



## Determinação da tenacidade à fratura em corte (G<sub>IIc</sub>) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF)

JOÃO CARLOS SILVA AZEVEDO

Outubro de 2014

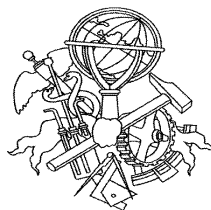
Determinação da tenacidade à fratura em corte ( $G_{IIc}$ ) de  
adesivos estruturais pelo ensaio *End-Notched Flexure*  
(ENF)

João Carlos Silva Azevedo

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

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



29 de outubro de 2014



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

Candidato: João Carlos Silva Azevedo, N°1111568, 1111568@isep.ipp.pt

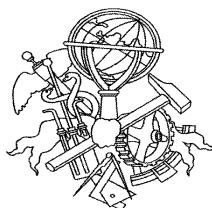
Orientação Científica: Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, rds@isep.ipp.pt

Co-orientação científica: Francisco José Gomes da Silva, fgs@isep.ipp.pt

Mestrado em Engenharia Mecânica

Departamento de Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto



29 de outubro de 2014



*Ao Hugo*



## *Agradecimentos*

Ao professor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, Orientador Científico da presente dissertação, pela sua dedicação, disponibilidade e incentivo que apresentou durante o tempo de realização deste trabalho. Sem a sua ajuda não seria possível a conclusão do mesmo.

Ao professor Francisco José Gomes da Silva, pelo apoio prestado no desenrolar da elaboração tese e revisão final da mesma.

Como a realização de uma dissertação não envolve apenas vertente científica, gostaria também de agradecer a todas as pessoas que de alguma forma me saudaram com a sua contribuição. Aos meus Pais e família, que me permitiram chegar aqui, porque sem eles eu nunca escreveria este texto. À minha namorada, companheira e amiga Andreia Lopes pelo apoio e paciência, mesmo nos momentos mais difíceis. Finalmente, aos meus Companheiros de Guerra (José Pires e Nuno Salgueiro), colegas e amigos, por todo o apoio que deram, espírito de entre ajuda que demonstraram e por todas aquelas palavras que tornaram os dias mais fáceis.

A todas estas pessoas um Grande Obrigado, pelo apoio e compreensão.





## Resumo

Os adesivos têm sido alvo de estudo ao longo dos últimos anos para ligação de componentes a nível industrial. Devido à crescente utilização das juntas adesivas, torna-se necessária a existência de modelos de previsão de resistência que sejam fiáveis e robustos. Neste âmbito, a determinação das propriedades dos adesivos é fundamental para o projeto de ligações coladas. Uma abordagem recente consiste no uso de modelos de dano coesivo (MDC), que permitem simular o comportamento à fratura das juntas de forma bastante fiável. Esta técnica requer a definição das leis coesivas em tração e corte. Estas leis coesivas dependem essencialmente de 2 parâmetros: a tensão limite e a tenacidade no modo de sollicitação respetivo. O ensaio *End-Notched Flexure* (ENF) é o mais utilizado para determinar a tenacidade em corte, porque é conhecido por ser o mais expedito e fiável para caracterizar este parâmetro. Neste ensaio, os provetes são sujeitos a flexão em 3 pontos, sendo apoiados nas extremidades e sollicitados no ponto médio para promover a flexão entre substratos, o que se reflete numa sollicitação de corte no adesivo. A partir deste ensaio, e após de definida a tenacidade em corte ( $G_{IIc}$ ), existem alguns métodos para estimativa da lei coesiva respetiva.

Nesta dissertação são definidas as leis coesivas em corte de três adesivos estruturais através do ensaio ENF e um método inverso de ajuste dos dados experimentais. Para o efeito, foram realizados ensaios experimentais considerado um adesivo frágil, o Araldite® AV138, um adesivo moderadamente dúctil, o Araldite® 2015 e outro dúctil, o SikaForce® 7752. O trabalho experimental consistiu na realização dos ensaios ENF e respetivo tratamento dos dados para obtenção das curvas de resistência (curvas- $R$ ) através dos seguintes métodos: *Compliance Calibration Method* (CCM), *Direct Beam Theory* (DBT), *Corrected Beam Theory* (CBT) e *Compliance-Based Beam Method* (CBBM). Os ensaios foram simulados numericamente pelo código comercial ABAQUS®, recorrendo ao Métodos de Elementos Finitos (MEF) e um MDC triangular, com o intuito de estimar a lei coesiva de cada um dos adesivos em sollicitação de corte. Após este estudo, foi feita uma análise de sensibilidade ao valor de  $G_{IIc}$  e resistência coesiva ao corte ( $t_s^0$ ), para uma melhor compreensão do efeito destes parâmetros na curva  $P$ - $\delta$  do ensaio ENF. Com o objetivo de testar a adequação dos 4 métodos de obtenção de  $G_{IIc}$  usados neste trabalho, estes foram aplicados a curvas  $P$ - $\delta$  numéricas de cada um dos 3 adesivos, e os valores de  $G_{IIc}$  previstos por estes métodos comparados com os respetivos valores introduzidos nos modelos numéricos.

Como resultado do trabalho realizado, conseguiu-se obter uma lei coesiva única em corte para cada um dos 3 adesivos testados, que é capaz de reproduzir com precisão os resultados experimentais.

***Palavras-Chave***

Adesivo estrutural, tenacidade, *End-Notched Flexure* (ENF), Método de Elementos Finitos

## *Abstract*

Adhesives have been studied over the past years for component joining in the industry. Due to the increasing use of adhesive joints, the existence of reliable and robust strength prediction models is required. In this context, the determination of the adhesive properties is fundamental for the design of bonded joints. A recent approach consists in the use of cohesive zone models (CZM), which accurately simulate the fracture behavior of bonded joints. This technique requires the definition of the cohesive laws in tension and shear. These cohesive laws depend essentially on two parameters: the cohesive traction and toughness in the respective mode of loading. The End-Notched Flexure (ENF) test is the most widely used to determine the toughness in shear ( $G_{IIc}$ ), because it is known as the most reliable and easy method to characterize this parameter. In this test, the specimens are subjected to 3-point bending, with support at the specimen ends and loading at the middle, to promote flexure between the adherends, which reflects on a shear loading to the adhesive layer. From this test, and after the estimation of  $G_{IIc}$ , there are some methods to estimate the respective cohesive law.

In this thesis, the shear cohesive laws of three structural adhesives are defined by the ENF test, together with the cohesive laws by an inverse fitting method of the experimental data. With this purpose, experimental tests were performed considering a brittle adhesive, the Araldite<sup>®</sup> AV138, a moderately ductile adhesive, the Araldite<sup>®</sup> 2015, and a ductile adhesive, the SikaForce<sup>®</sup> 7752. The experimental work consisted of performing the ENF tests and obtaining the resistance curves ( $R$ -curves) by the following methods: Compliance Calibration Method (CCM), Direct Beam Theory (DBT), Corrected Beam Theory (CBT) and Compliance-Based Beam method (CBBM). The tests were numerically simulated by the commercial code ABAQUS<sup>®</sup>, using Finite Element Methods (FEM) and a triangular CZM, in order to estimate the cohesive law of each adhesive in shear. After this study, a sensitivity analysis to the values of  $G_{IIc}$  and cohesive strength in shear ( $t_s^0$ ) was carried out, for a better understanding of the effect of these parameters on the  $P$ - $\delta$  curves of the ENF test. In order to test the suitability of the four methods of obtaining  $G_{IIc}$  used in this work, these methods were applied to numerical  $P$ - $\delta$  curves of each of three adhesives, and the values of  $G_{IIc}$  provided by these methods were compared with the respective values entered in the numerical models.

As a result of this work, it was possible to obtain a unique cohesive law in shear for each of three adhesives tested, which is able to accurately reproduce the experimental results.

***Keywords***

Structural adhesive, Fracture toughness, End-Notched Flexure (ENF), Finite Element Method

# Índice

<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>VII</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>IX</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>XI</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>XVII</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS.....</b>	<b>XXI</b>
<b>NOMENCLATURA.....</b>	<b>XXIII</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO.....	2
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>5</b>
2.1 LIGAÇÕES ADESIVAS.....	5
2.1.1 <i>Esforços e tipos de rotura em juntas adesivas</i> .....	6
2.1.1.1 Esforços de tração.....	6
2.1.1.2 Esforços de compressão.....	6
2.1.1.3 Esforços de corte.....	7
2.1.1.4 Esforços de clivagem ( <i>cleavage</i> ).....	8
2.1.1.5 Esforços de arrancamento ( <i>peel</i> ).....	8
2.1.2 <i>Tipos de rotura em juntas adesivas</i> .....	9
2.1.3 <i>Tipos de ligações adesivas</i> .....	10
2.2 ADESIVOS ESTRUTURAIS.....	16
2.2.1 <i>Caraterização dos adesivos estruturais</i> .....	17
2.2.2 <i>Tipos de adesivos estruturais</i> .....	18
2.2.2.1 Adesivos Epóxicos.....	19
2.2.2.2 Adesivos Fenólicos.....	21
2.2.2.3 Adesivos Acrílicos.....	22
2.2.2.4 Adesivos à base de resorcinol-formol.....	22
2.2.2.5 Adesivos de poliimida e adesivos de bismaleimida.....	23
2.2.2.6 Adesivos de poliuretano.....	23
2.3 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE ADESIVOS.....	23
2.3.1 <i>Ensaio de adesivo em bruto</i> .....	24
2.3.1.1 Ensaio de tração de provetes maciços.....	25

2.3.1.2	Ensaio de compressão de provetes maciços .....	27
2.3.2	<i>Ensaio de adesivo em junta adesiva</i> .....	30
2.3.2.1	Ensaio à tração em juntas topo a topo .....	30
2.3.2.2	Ensaio ao corte .....	32
2.3.2.3	Ensaio de arrancamento .....	34
2.3.2.4	Ensaio de impacto .....	36
2.3.2.5	Ensaio de fadiga .....	37
2.3.2.6	Ensaio de fluência .....	38
2.3.2.7	Ensaio de durabilidade .....	39
2.4	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO À FRATURA .....	41
2.4.1	<i>Modo I</i> .....	44
2.4.2	<i>Modo II</i> .....	45
2.4.3	<i>Modo misto I + II</i> .....	47
2.5	MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DO $G_{IIC}$ PELO ENSAIO ENF .....	49
2.5.1	<i>Métodos que requerem a medição do comprimento de fenda</i> .....	49
2.5.2	<i>Métodos baseados no comprimento de fenda equivalente</i> .....	51
2.5.3	<i>Métodos baseados no Integral-J</i> .....	53
<b>3</b>	<b>TRABALHO EXPERIMENTAL</b> .....	<b>55</b>
3.1	GEOMETRIA DOS PROVETES ENF .....	55
3.2	SUBSTRATOS PARA OS PROVETES ENF .....	56
3.3	ADESIVOS .....	58
3.3.1	<i>Araldite® AV138</i> .....	58
3.3.2	<i>Araldite® 2015</i> .....	60
3.3.3	<i>SikaForce® 7752 L60</i> .....	62
3.4	FABRICO DOS PROVETES .....	63
3.5	CONDIÇÕES DE ENSAIO .....	69
3.6	RESULTADOS .....	71
3.6.1	<i>Curvas P-<math>\delta</math></i> .....	71
3.6.2	<i>Determinação do <math>G_{IIC}</math></i> .....	76
3.6.2.1	Adesivo Araldite® AV138 .....	76
3.6.2.2	Adesivo Araldite® 2015 .....	79
3.6.2.3	Adesivo SikaForce® 7752 L60 .....	82
3.6.3	<i>Análise e comparação dos resultados</i> .....	83
<b>4</b>	<b>ANÁLISE NUMÉRICA</b> .....	<b>89</b>
4.1	CONDIÇÕES DA ANÁLISE NUMÉRICA .....	89
4.2	MODELO DE DANO COESIVO .....	92
4.2.1	<i>Modelo de dano triangular</i> .....	94
4.2.2	<i>Estimativa da lei coesiva em modo II</i> .....	95
4.2.2.1	Adesivo Araldite® AV138 .....	96

## ÍNDICE

---

4.2.2.2	Adesivo Araldite® 2015.....	98
4.2.2.3	Adesivo SikaForce® 7752 L60 .....	100
4.3	PREVISÃO DO COMPORTAMENTO DAS JUNTAS .....	102
4.3.1	<i>Adesivo Araldite® AV138</i> .....	103
4.3.2	<i>Adesivo Araldite® 2015</i> .....	106
4.3.3	<i>Adesivo SikaForce® 7752 L60</i> .....	108
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>113</b>
	<b>REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS.....</b>	<b>117</b>





## *Índice de Figuras*

Figura 1 - Esforço de tração (a) e compressão (b) e correspondente distribuição da tensão.....	7
Figura 2 - Esforço de corte e distribuição da tensão de corte.....	7
Figura 3 - Efeito do comprimento e da largura de sobreposição na resistência ao corte.....	8
Figura 4 - Esforços de clivagem (a) e de arrancamento (b): distribuição das tensões de clivagem e de arrancamento. ....	8
Figura 5 - Modos de rotura típicos de uma junta adesiva.....	9
Figura 6 - Tipos de juntas adesivas. ....	11
Figura 7 - Diferentes configurações de juntas topo a topo (Petrie, 2000).....	12
Figura 8 - Diferentes configurações de juntas de sobreposição (Petrie 2000). ....	13
Figura 9 - Diferentes técnicas para diminuir as forças de arrancamento em juntas adesivas (Kohen 1954). 14	14
Figura 10 - Soluções para diminuir a clivagem de juntas reforçadas (Kohen 1954).....	14
Figura 11 - Diferentes configurações de juntas para varões (a) e tubos (b) (Petrie 2000). ....	15
Figura 12 - Diferentes configurações de juntas em T (Adams et al. 1997).....	15
Figura 13 - Diferentes configurações de juntas de canto (Adams et al. 1997).....	16
Figura 14 - Provetes de tração de acordo com a EN ISO 527-2 a) provete longo, b) provete reduzido (dimensões em mm). ....	25
Figura 15 - Medição da deformação com base num sistema de registo fotográfico (da Silva et al. 2006). 26	26
Figura 16 - Provette Arcan (dimensões em mm).....	26
Figura 17 - Provette e respetivas fixações para o ensaio Arcan. ....	27
Figura 18 - Encurvadura no ensaio de compressão (Hosford 2005). ....	27
Figura 19 - Tipos de rotura possíveis na compressão de provetes cilíndricos (Unicamp 2010). ....	28
Figura 20 - Rotura de materiais sob compressão a) material dúctil e B) material frágil (Costa 2004).28	28
Figura 21 - Variação das deformações com o atrito e com o rácio L/D (Melo 2010).....	29
Figura 22 - Modos de deformação dos provetes submetidos a ensaio de compressão (Melo 2010).29	29
Figura 23 - Ensaio de tração de juntas topo-a-topo segundo a norma ASTM D897-01: a) sistema de acoplagem ou amarração b) provete de ensaio (Petrie 1999).....	30
Figura 24 - Ensaio de tração de juntas topo-a-topo segundo a norma ISO 11003-2:2001: a) provete de ensaio; provete de ensaio com aplicação de extensómetros (Öchsner e Gegner 2004).....	31

Figura 25 - Esquema típico das configurações de juntas de sobreposição mais comuns: a) sobreposição simples, com extensómetros abrangendo a linha de adesão, b) sobreposição dupla, c) sobreposição com tira simples, d) sobreposição com tira dupla. ....	32
Figura 26 - Geometria e carregamento do provete para o ensaio Iosipescu (dimensões em mm). ..	33
Figura 27 - Provete TAST, segundo ISO 11003-2.2: a) dimensões em mm; b) aplicação de um extensómetro. ....	34
Figura 28 - Provete para ensaio de arrancamento em junta T (dimensões em mm).....	35
Figura 29 - Geometria de ensaio de arrancamento a 180° (dimensões em mm). ....	35
Figura 30 - Ensaio de rolete flutuante, ASTM D 3167. ....	36
Figura 31 - Ensaio <i>Climbing Drum</i> num provete retirado de uma estrutura <i>sandwich</i> , ASTM 1781 (Broughton e Gower 2001).....	36
Figura 32 - Sistema de fixação para ensaios de impacto em juntas adesivas (Bezemer et al. 1988).37	
Figura 33 - Curva S-N representativa de ensaio à fadiga. ....	38
Figura 34 - Dispositivos para ensaios de fluência de acordo com as normas ASTM; a) mola carregada em tração (ASTM D 2294-96); b) mola carregada em compressão (ASTM D2293-96). ....	38
Figura 35 - Ensaio de Boeing <i>wedge test</i> , ASTM D3762. ....	40
Figura 36 - Dispositivo para ensaio de durabilidade em junta de sobreposição simples, ASTM D2919. ....	40
Figura 37 - Dispositivo de ensaio a utilizar em juntas T sujeitas a arrancamento, quando se pretende medir a durabilidade em condições de imersão ou de controlo da humidade relativa. ....	41
Figura 38 - Modos fundamentais de solitação de carga ou carregamento para a fratura; a) Modo I: tração ( <i>opening</i> ); b) Modo II corte ( <i>sliding</i> ); c) Modo III: rasgamento ( <i>tearing</i> ). ....	42
Figura 39 - Representação esquemática do provete DCB. ....	45
Figura 40 - Representação esquemática dos ensaios ENF, ELS e 4ENF. ....	46
Figura 41 - Geometria do provete ENF (Chai 1988).....	47
Figura 42 - Representação esquemática do ensaio MMF.....	47
Figura 43 - Representação esquemática do ensaio ADCB. ....	48
Figura 44 - Representação esquemática do ensaio MMB. ....	49
Figura 45 - Curva- <i>R</i> experimental obtida pelo CCM, CBT e CBBM (Campilho et al. 2009c). ....	51
Figura 46 - Representação esquemática da ZPF e do conceito de fenda equivalente (de Moura et al. 2008a).....	52
Figura 47 - Representação esquemática da obtenção do fator de correção do comprimento de fenda inicial. ....	52
Figura 48 - Geometria de um provete ENF. ....	55
Figura 49 - Curvas $\sigma$ - $\epsilon$ da liga de alumínio AW 6082-T651 (Campilho et al. 2011).....	57
Figura 50 - Adesivo epóxico Araldite® AV138/HV998. ....	58

Figura 51 - Curvas $\sigma$ - $\epsilon$ de provetes maciços do adesivo Araldite <sup>®</sup> AV138 (Campilho et al. 2013).	59
Figura 52 - Adesivo epóxico Araldite <sup>®</sup> 2015 (50 ml).	60
Figura 53 - Curvas $\sigma$ - $\epsilon$ de provetes maciços do adesivo Araldite <sup>®</sup> 2015 (Campilho et al. 2013).	60
Figura 54 - Adesivo SikaForce <sup>®</sup> 7752 L60.	62
Figura 55 - Granalhadora CIDBLAST, modelo RT6S.	64
Figura 56 - Granalhagem mecânica dos substratos a seco.	64
Figura 57 - Limpeza dos substratos.	65
Figura 58 - Representação esquemática da localização dos calços calibrados.	65
Figura 59 - Calço frontal na posição da pré-fenda.	66
Figura 60 - Fabrico do calço frontal (lâmina).	66
Figura 61 - Aplicação de adesivo, método "zigue-zague".	67
Figura 62 - Processo de posicionamento durante a cura.	67
Figura 63 - Limpeza dos bordos dos provetes.	68
Figura 64 - Máquina de ensaios SHIMADZU AG-X 100.	69
Figura 65 - Disposição do provete de ensaio ENF na máquina de ensaios.	70
Figura 66 - Camara de alta resolução usada na captura de imagens.	70
Figura 67 - Imagem obtida no início de um ensaio, com exemplificação da região de medição abrangida pela mesma.	71
Figura 68 - Curvas $P$ - $\delta$ para o Adesivo Araldite <sup>®</sup> AV138.	73
Figura 69 - Curvas $P$ - $\delta$ para o Adesivo Araldite <sup>®</sup> 2015.	74
Figura 70 - Curvas $P$ - $\delta$ para o Adesivo SikaForce <sup>®</sup> 7752 L60.	75
Figura 71 - Curva- $R$ das juntas coladas com o adesivo Araldite <sup>®</sup> AV138.	77
Figura 72 - Tendência de $G_{IIC}$ do adesivo Araldite <sup>®</sup> AV138 pelos vários métodos.	78
Figura 73 - Média do valor de $G_{IIC}$ para o adesivo Araldite <sup>®</sup> AV138 pelos vários métodos.	79
Figura 74 - Curva- $R$ das juntas coladas com o adesivo Araldite <sup>®</sup> 2015.	79
Figura 75 - Tendência de $G_{IIC}$ do adesivo Araldite <sup>®</sup> 2015 pelos vários métodos.	80
Figura 76 - Média do valor de $G_{IIC}$ para o do adesivo Araldite <sup>®</sup> 2015 pelos vários métodos.	81
Figura 77 - Curva- $R$ das juntas com adesivo SikaForce <sup>®</sup> 7752.	82
Figura 78 - Tendência de $G_{IIC}$ do adesivo SikaForce <sup>®</sup> 7752 pelo método CBBM.	83
Figura 79 - Comparação dos valores de $G_{IIC}$ dos adesivos ensaiados segundo os métodos utilizados.	85
Figura 80 - Distribuição da tensão de corte em adesivos frágeis e dúcteis (Troughton 2008).	86
Figura 81 - Refinamento geral de malha do modelo utilizado nos provetes ENF.	89
Figura 82 - Detalhe do refinamento de malha de elementos finitos na proximidade da extremidade da fenda.	90
Figura 83 - Detalhe do refinamento de malha de elementos finitos na zona de contato entre o provete e um dos cilindros de suporte.	90

Figura 84 - Detalhe do refinamento de malha de elementos finitos na zona de contato entre o provete e o cilindro de sollicitação.....	91
Figura 85 - Condições fronteira e de carregamento impostas nos modelos numéricos.....	91
Figura 86 - Faces selecionadas para as condições de contato impostas nos modelos numéricos.....	92
Figura 87 - Lei triangular do modelo de dano coesivo.....	93
Figura 88 - Comparativo das curvas $P-\delta$ experimental e numérica após o procedimento de ajuste de um provete ENF colado com o adesivo Araldite <sup>®</sup> AV138.....	97
Figura 89 - Leis coesivas obtidas por ajuste numérico para os provetes ENF colados com o adesivo Araldite <sup>®</sup> AV 138, e respetiva lei coesiva média. ....	97
Figura 90 - Comparativo das curvas $P-\delta$ experimental e numérica após o procedimento de ajuste de um provete ENF colado com o adesivo Araldite <sup>®</sup> 2015.....	99
Figura 91 - Leis coesivas obtidas por ajuste numérico para os provetes ENF colados com o adesivo Araldite <sup>®</sup> 2015, e respetiva lei coesiva média. ....	99
Figura 92 - Comparativo das curvas $P-\delta$ experimental e numérica após o procedimento de ajuste de um provete ENF colado com o adesivo SikaForce <sup>®</sup> 7752.....	101
Figura 93 - Leis coesivas obtidas por ajuste numérico para os provetes ENF colados com o adesivo SikaForce <sup>®</sup> 7752, e respetiva lei coesiva média.....	101
Figura 94 - Curvas $P-\delta$ para variação de $G_{IIc}$ , para o Araldite <sup>®</sup> AV138.....	103
Figura 95 - Curvas $P-\delta$ para variação de $ts_0$ , para o Araldite <sup>®</sup> AV138.....	104
Figura 96 - Comparação dos valores de $G_{IIc}$ obtidos pelos vários métodos, adesivo Araldite <sup>®</sup> AV138. 105	
Figura 97 - Curvas $P-\delta$ para variação de $G_{IIc}$ para o Araldite <sup>®</sup> 2015.....	106
Figura 98 - Curvas $P-\delta$ para variação de $ts_0$ , para o Araldite <sup>®</sup> 2015.....	107
Figura 99 - Comparação dos valores de $G_{IIc}$ obtidos pelos vários métodos, adesivo Araldite <sup>®</sup> 2015.	108
Figura 100 - Curvas $P-\delta$ para variação de $G_{IIc}$ , para o SikaForce <sup>®</sup> 7752.....	109
Figura 101 - Curvas $P-\delta$ para variação de $ts_0$ , para o SikaForce <sup>®</sup> 7752.....	110
Figura 102 - Comparação dos valores de $G_{IIc}$ obtidos pelos vários métodos, adesivo SikaForce <sup>®</sup> 7752. 110	

## *Índice de Tabelas*

Tabela 1 - Adesivos estruturais e suas formas físicas no estado não curado (da Silva et al. 2007). 17	17
Tabela 2 - Classificação dos adesivos segundo o desempenho (da Silva et al. 2007)..... 18	18
Tabela 3 - Propriedades típicas dos diversos tipos de adesivos estruturais (Esteves 1990). ..... 19	19
Tabela 4 - Identificação dos provetes de ensaio e respetivas dimensões (mm)..... 56	56
Tabela 5 - Composição química da liga de alumínio AW 6082-T651..... 57	57
Tabela 6 - Propriedades mecânicas da liga de alumínio AW 6082-T651. .... 57	57
Tabela 7 - Propriedades elásticas e plásticas do adesivo Araldite® AV138 (Neto et al. 2012; Campilho et al.2013)..... 59	59
Tabela 8 - Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® 2015 (Campilho et al. 2013). .... 61	61
Tabela 9 - Propriedades mecânicas do adesivo SikaForce® 7752 L60 (VP)..... 62	62
Tabela 10 - Controlo dimensional dos substratos de alumínio (mm)..... 63	63
Tabela 11 - Velocidade de solitação, valores de carga máxima e respetivo deslocamento das curvas $P$ - $\delta$ do adesivo Araldite® AV138. .... 72	72
Tabela 12 - Velocidade de solitação, valores de carga máxima e respetivo deslocamento das curvas $P$ - $\delta$ do adesivo Araldite® 2015..... 73	73
Tabela 13 - Velocidade de solitação, valores de carga máxima e respetivo deslocamento das curvas $P$ - $\delta$ do adesivo SikaForce® 7752 L60. .... 75	75
Tabela 14 - Valores de $G_{IIc}$ do Araldite® AV138 pelos vários métodos..... 77	77
Tabela 15 - Valores de $G_{IIc}$ do Araldite® 2015 pelos vários métodos. .... 80	80
Tabela 16 - Valores de $G_{IIc}$ do SikaForce®7752 pelo método CBBM. .... 82	82
Tabela 17 - Desvios em percentagem [%] dos vários métodos na medição de $G_{IIc}$ , dos provetes de adesivo Araldite® AV138..... 84	84
Tabela 18 - Desvios em percentagem [%] dos vários métodos na medição de $G_{IIc}$ , dos provetes de adesivo Araldite® 2015..... 84	84
Tabela 19 - Desvios em percentagem [%] do método CBBM na medição de $G_{IIc}$ , dos provetes de adesivo SikaForce®7752..... 84	84
Tabela 20 - Média e desvio padrão do valor de $G_{IIc}$ , para os vários métodos e adesivos [N/mm]... 85	85
Tabela 21 - Valores de entrada dos modelos numéricos das juntas ENF coladas com adesivo Araldite® AV138. .... 96	96
Tabela 22 - Valores obtidos pela lei coesiva triangular, adesivo Araldite® AV138..... 98	98
Tabela 23 - Valores de entrada dos modelos numéricos das juntas ENF coladas com adesivo Araldite® 2015. 98	98

Tabela 24 - Valores obtidos pela lei coesiva triangular, adesivo Araldite® 2015. ....	100
Tabela 25 - Valores de entrada dos modelos numéricos das juntas ENF coladas com adesivo SikaForce® 7752. ....	100
Tabela 26 - Valores obtidos pela lei coesiva triangular, adesivo SikaForce® 7752. ....	102
Tabela 27 - Parâmetros numéricos de entrada, variando o $G_{IIC}$ do adesivo Araldite® AV138. ....	103
Tabela 28 - Parâmetros numéricos de entrada, variando o $ts_0$ do adesivo Araldite® AV138. ....	104
Tabela 29 - Parâmetros numéricos de entrada, variando o $G_{IIC}$ do adesivo Araldite® 2015. ....	106
Tabela 30 - Parâmetros numéricos de entrada, variando o $ts_0$ do adesivo Araldite® 2015. ....	107
Tabela 31 - Parâmetros numéricos de entrada, variando o $G_{IIC}$ do adesivo SikaForce® 7752. ....	108
Tabela 32 - Parâmetros numéricos de entrada, variando o $ts_0$ do adesivo SikaForce® 7752. ....	109

## *Nomenclatura*

### **Carateres Romanos**

$2h$  - Altura do provete

$2L$  - Distância entre apoios

$2L_1$  - Comprimento do provete

$A$  - Área da fenda propagada

$a$  - Comprimento da fenda

$a_0$  - Comprimento de fenda inicial

$a_{eq}$  - Comprimento de fenda equivalente

$b$  - Largura da junta

$B$  - Largura do provete

$b$  – Semi-comprimento de fenda

$B$  - Largura do substrato

$C$  - Caminho em sentido anti-horário em torno da ponta da fenda

$C$  - Flexibilidade do provete

$c$  - Metade da espessura do substrato ( $c = h/2$ )

$c$  - Comprimento

$C=\delta/P$  - Flexibilidade

$C_0$  - Flexibilidade inicial



$C_0, C_1, C_2, C_3$  - Constantes do polinómio cúbico para determinação da flexibilidade

$C_{0corr}$  - Flexibilidade inicial corrigida

$C_{corr}$  - Flexibilidade corrigida

$D$  - Diâmetro do provete

$E$  - Módulo de elasticidade longitudinal

$E_1$  - Módulo de elasticidade longitudinal

$E_3$  - Módulo de elasticidade longitudinal segundo a direção 3

$E_a$  - Modulo de elasticidade real

$E_f$  - Modulo de elasticidade efetivo

$G$  - Energia de fratura

$G$  - Taxa de libertação de energia de deformação

$G_{13}$  - Módulo de corte transversal

$G_a$  - Módulo de corte do adesivo

$G_c$  - Taxa crítica de libertação de energia de deformação

$G_I$  - Energia de fratura em modo I

$G_{Ic}$  - Energia crítica de fratura em modo I

$G_{II}$  - Energia de fratura em modo II

$G_{IIc}$  - Energia crítica de fratura em modo II

$h$  - Espessura de substrato; espessura do provete normal ao plano de colagem; espessura dos aderentes

$I$  - Momento estático de 2ª ordem da seção reta de cada substrato

$J_c$  - Energia de fratura

$K$  - Tenacidade à fratura

$k=G_a/t$  - Rigidez elástica inicial da camada

$\mathbf{K}_{\text{COH}}$  - Matriz que relaciona as tensões e deformações em tração em corte nos elementos coesivos

$K_I$  - Fator de concentração de tensões em modo I

$K_{Ic}$  - Fator de concentração de tensões crítico em modo I

$l$  - Comprimento de sobreposição

$L$  - Comprimento do provete; comprimento de metade da amostra; distância entre punção de carga e rolete de apoio

$M_f$  - Momento fletor

$N$  - Carga aplicada

$P$  - Carga aplicada, carregamento, força

$P_{\text{máx}}$  - Carga máxima aplicada

$P_u$  - carga por unidade de largura

$t$  - Espessura do adesivo

$t_n$  - tensão normal

$t_n^0$  - carga máxima em tração

$t_s$  - tensão de corte

$t_s^0$  - carga máxima em corte

$U$  - densidade de energia de deformação do material

$U$  - Energia de deformação do provete, devido aos efeitos de flexão e de corte; energia interna de deformação

$V$  - Esforço transversal em cada substrato

$W$  - Densidade de energia de deformação; trabalho das forças exteriores

$W_f$  - Energia de fratura

$Y$  - Fator adimensional que depende da geometria e distribuição de carga

## Carateres Gregos

$\gamma_f$  - Deformação de rotura ao corte

$\delta$  - Deslocamento dos pontos de aplicação da carga

$A$  - Fator de correção para a rotação e deslocamento do aderente junto à frente de fenda

$A_{aZPF}$  – Fator de correção do comprimento de fenda afeta à Zona de Processo de Fratura

$A_I$  - Correção de comprimento da fenda para solicitação de tração

$A_{II}$  - Correção de comprimento da fenda para solicitação de corte

$\delta_{m\acute{a}x}$  - Deslocamento máximo dos pontos de aplicação da fenda

$\delta_n$  - Deslocamento em tração

$\delta_s$  - Deslocamento em corte

$\delta_s^0$  - Deslocamento de carga máxima ao corte

$\delta_s^f$  - Deslocamento máximo ao corte

$\varepsilon_f$  - Deformação de rotura à tração

$\varepsilon_n$  - Deformação em tração

$\varepsilon_s$  - Deformação em corte

$\nu$  - Coeficiente de Poisson

$\sigma$  - Tensão de tração

$\sigma_f$  - Tensão de rotura

$\sigma_R$  - Tensão remota aplicada na direção perpendicular à direção da fenda

$\sigma_y$  - Tensão de cedência

$\tau$  - Tensão de corte ao longo da espessura de substrato; tensão média de corte

$\tau_f$  - Tensão de rotura ao corte

$\tau_y$  - Tensão de cedência ao corte

$\delta$  - Deslocamento atual em corte na ponta da fenda

$\delta_c$  - Deslocamento de rotura ao corte na ponta da fenda

## **Abreviaturas**

2D - Duas dimensões

3D - Três dimensões

4ENF - *Four-Point End Notched Flexure*

ADCB - *Asymmetric Double Cantilever Beam*

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

BS - *British Standards*

CBBM - *Compliance-Based Beam Method*

CBT - *Corrected Beam Theory*

CCM - *Compliance Calibration Method*

CMM - *Compact Mixed-Mode*

DBT - *Direct Beam Theory*

DCB - *Double Cantilever Beam*

ELS - *End Loaded Split*

EN - Norma Europeia

ENF - *End Notched Flexure*

ISEP - Instituto Superior de Engenharia do Porto

ISO - *International Organization for Standardization*

JSS - Junta de Sobreposição Simples

MDC - Modelos de Dano Coesivo

MEF - Métodos dos Elementos Finitos

MMB - *Mixed-Mode Bending*

MMF - *Mixed-Mode Flexure*

TAST - *Thick Adherend Shear*

ZPF - Zona de Processo de Fratura

# 1 Introdução

## 1.1 Contextualização

As juntas adesivas apresentam várias vantagens em relação aos métodos de união tradicionais, como menores concentrações de tensões, boa resistência à fadiga e possibilidade de união de diferentes materiais. No entanto, o seu uso em aplicações estruturais ainda é limitado devido a fatores como a falta de conhecimento do seu comportamento a longa duração. Para o aumento da sua utilização é fundamental a existência de ferramentas de previsão fiáveis. Uma das possibilidades para previsão da resistência é a utilização dos conceitos da Resistência dos Materiais, que são claramente inadequados na presença de singularidades de tensões, tal como usualmente ocorre nas juntas adesivas. A Mecânica da Fratura surge então como alternativa. Neste âmbito, as abordagens são normalmente baseadas em conceitos energéticos de taxa de libertação de energia, que adquirem especial relevância em relação às abordagens com base em fatores de intensidade de tensão.

No entanto, em muitas aplicações estruturais a região de iniciação de dano não é óbvia. Por outro lado, os métodos baseados em tensões limites comportam-se bem na previsão de iniciação de dano, enquanto a Mecânica da Fratura se comporta bem na modelação da propagação do dano. A fim de superar as desvantagens de cada método e explorar a utilidade das vantagens descritas, podem ser usados Modelos de Dano Coesivo (MDC). Esta técnica combina aspetos de análise de tensões para modelar a iniciação de dano e conceitos da Mecânica da Fratura para lidar com a propagação de dano. Assim, não é necessária a existência de um defeito inicial, ao mesmo tempo que se evita os problemas de dependência da malha característicos dos métodos baseados em tensões. No entanto, os modelos coesivos dependem da medição precisa das energias críticas de fratura para aplicação em critérios energéticos escolhidos.

A caracterização da fratura de juntas coladas sob modo puro I tem sido amplamente estudada por diversos autores. No entanto, o modo II ainda não está bem abordado devido a alguns aspetos específicos inerentes aos testes mais usuais: *End Notched Flexure* (ENF), o *End Loaded Split* (ELS) e o *Four-Point*

*End Notched Flexure* (4ENF). O teste ELS envolve um grampo que constitui uma fonte de variabilidade e aumenta a complexidade do tratamento de dados. Por outro lado, o teste 4ENF requer uma configuração de teste complexa e apresenta alguns problemas relacionados com o atrito. Como consequência, o ENF parece ser o mais adequado para a caracterização de adesivos em modo II.

## 1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é a determinação da taxa crítica de libertação de energia de deformação ao corte ( $G_{IIc}$ ) de três adesivos estruturais em junta adesiva através do ensaio ENF com substratos de alumínio, bem como a respetiva lei coesiva ao corte. Assim sendo, foram realizados ensaios ENF considerando um adesivo frágil, o Araldite® AV138, um adesivo moderadamente dúctil, o Araldite® 2015 e outro dúctil, o SikaForce® 7752, para a identificação das curvas força vs. deslocamento (curvas  $P-\delta$ ). Com esta informação e a medição do comprimento de fenda durante o ensaio, é possível a obtenção das curvas de resistência (curvas- $R$ ), através de vários métodos de redução: *Compliance Calibration Method* (CCM), *Direct Beam Theory* (DBT), *Corrected Beam Theory* (CBT) e *Compliance Based Beam Method* (CBBM). Após esta fase, são também comparados os referidos métodos em termos de precisão dos resultados obtidos. Para a obtenção da lei coesiva em corte relativa a cada adesivo, os ensaios realizados experimentalmente foram simulados numericamente recorrendo ao *software* de código comercial ABAQUS®, por Métodos de Elementos Finitos (MEF) e um MDC triangular. Após este estudo, foi feita uma análise de sensibilidade ao valor de  $G_{IIc}$  e  $t_s^0$ , para uma melhor compreensão do efeito destes parâmetros na curva  $P-\delta$  do ensaio ENF. Com o objetivo de testar a adequação dos 4 métodos de obtenção de  $G_{IIc}$  usados neste trabalho, estes foram aplicados a curvas  $P-\delta$  numéricas de cada um dos 3 adesivos, e os valores de  $G_{IIc}$  previstos por estes métodos comparados com os respetivos valores introduzidos nos modelos numéricos.

## 1.3 Organização do relatório

A presente dissertação encontra-se estruturada da seguinte forma:

Capítulo 1 - é feita a contextualização do trabalho realizado, descritos os objetivos do trabalho e apresentada a organização do relatório.

Capítulo 2 - é feita uma revisão bibliográfica sobre o tema em questão, onde se pretende abordar as ligações adesivas e dar a conhecer os adesivos estruturais, tal como caracterizar as propriedades dos adesivos, os ensaios que caracterizam a fratura e os métodos para determinação do  $G_{IIC}$  pelo ensaio ENF.

Capítulo 3 - é apresentado todo o procedimento experimental que envolve a caracterização da geometria dos ensaios ENF, dos materiais utilizados e do fabrico dos provetes. São descritos os ensaios realizados, determinado o valor de  $G_{IIC}$  para cada um dos adesivos testados pelos métodos de redução anteriormente descritos e feita a análise e comparação dos resultados obtidos.

Capítulo 4 - é apresentada a modelação dos ensaios no *software* ABAQUS® obedecendo às condições da análise numérica, com o objetivo de determinação da lei coesiva associada a cada ensaio realizado. É efetuada uma análise de sensibilidade aos parâmetros constituintes da lei coesiva e é também testada numericamente a capacidade dos 4 métodos de redução usados em prever o valor de  $G_{IIC}$ .

Capítulo 5 - são apresentadas as conclusões deste trabalho e as perspetivas de trabalhos futuros.





# 2 Revisão Bibliográfica

## 2.1 Ligações adesivas

Uma união elaborada através do uso de um adesivo é denominada por junta adesiva, junta colada ou ligação adesiva. Os elementos estruturais da junta, que são ligados entre si pelo adesivo, são designados por substratos ou aderentes. O termo substrato é geralmente utilizado para designar os componentes da junta antes da ligação adesiva. Após a colagem, estes passam a designar-se aderentes. A utilização de juntas adesivas na indústria tem tido um crescimento exponencial nos últimos anos. A facilidade da sua conceção, as maiores cadências produtivas, menores custos, facilidade de utilização na união de materiais diferentes, melhor resistência à fadiga e elevada capacidade de amortecimento de vibrações, são muitas das vantagens das ligações adesivas, quando comparadas com os métodos tradicionais de ligação tais como soldadura, brasagem, aparafusagem, rebitagem e outras ligações mecânicas (da Silva et al. 2011). As ligações adesivas permitem também reduzir o número de componentes (pinos, parafusos, rebites, grampos, etc.).

Os adesivos podem ser compreendidos como uma substância com propriedades capazes de fomentar a adesão entre substratos de um mesmo material ou materiais diferentes, por meio de uma ligação superficial (ação de forças intermoleculares). Esta propriedade, não intrínseca da substância, desenvolve-se somente dentro de algumas condições, enquanto interage com a superfície do aderente. A ligação adesiva deve promover a ligação eficiente e a transmissão de carga entre componentes, mantendo a sua integridade sob as condições a que está sujeita durante o seu tempo de vida (da Silva et al. 2011). As ligações adesivas estão condicionadas por diversas variáveis como a preparação das superfícies, ou condições ambientais de temperatura e humidade relativa. Outros fatores deverão igualmente ser avaliados, tais como, o adesivo deve ser adequado aos substratos a unir, ser compatível com os processos de fabrico, transmitir os esforços de trabalho previstos e suportar as condições ambientais operacionais. Também é necessário considerar os métodos de aplicação, os sistemas de cura, o tempo de aplicação e os custos destes inúmeros aspetos no processo de ligação.

O projeto de uma ligação é considerado um dos parâmetros fundamentais para que o adesivo escolhido seja utilizado da forma mais eficiente possível. O projeto tem de ser ajustado aos limites do adesivo (cura por todo o volume, preenchimento da folga, etc.) e ser otimizado para evitar os tipos de cargas mais severos, ou seja, esforços de arrancamento e clivagem. O projeto de ligações adesivas deve ter em atenção a geometria e suas configurações, de forma a evitar as tensões localizadas. As ligações não são instantâneas, necessitando por vezes de sistemas de posicionamento e a necessidade de recorrer a temperaturas elevadas para se desencadear o processo de cura.

### **2.1.1 Esforços e tipos de rotura em juntas adesivas**

Os principais esforços presentes em juntas adesivas são (da Silva et al. 2011):

- a) Tração;
- b) Compressão;
- c) Corte;
- d) Clivagem (*cleavage*);
- e) Arrancamento (*peel*).

#### **2.1.1.1 Esforços de tração**

As tensões de tração surgem quando as forças se propagam no plano perpendicular ao plano de colagem (Figura 1). Neste caso, a distribuição das tensões normais através do comprimento da colagem é uniforme. Na realidade, os adesivos em juntas coladas não estão sujeitos a tensão uniforme, devido ao surgir de picos de tensões de clivagem ou de arrancamento nas extremidades da zona de sobreposição. As juntas que funcionem em regime de tração devem encontrar-se perfeitamente alinhadas, para garantir um carregamento axial uniforme.

#### **2.1.1.2 Esforços de compressão**

As forças presentes tentam comprimir os aderentes um de encontro ao outro (Figura 1), esmagando a película de adesivo. A distribuição da tensão pelo adesivo é constante, tal como se observa para um carregamento de tração, e as forças de compressão devem manter-se alinhadas para que o adesivo permaneça em compressão pura.

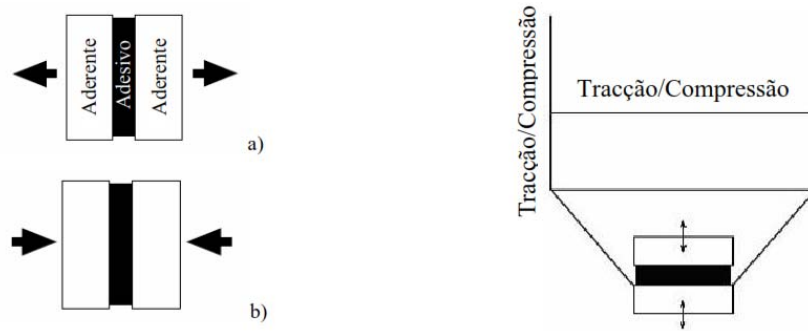


Figura 1 - Esforço de tração (a) e compressão (b) e correspondente distribuição da tensão.

### 2.1.1.3 Esforços de corte

As forças de corte dispõem-se de forma a provocar o escorregamento entre os dois aderentes no plano do adesivo (Figura 2). As juntas são de um modo geral mais resistentes quando sofrem solicitações ao corte, pois toda a área colada contribui para a resistência da junta. A distribuição de tensões de corte no caso de uma junta de sobreposição simples (JSS) (Figura 2), manifesta um maior nível de tensões nas extremidades do que na parte central da ligação. A justificação deste comportamento deve-se ao efeito de deformação diferencial de cada um dos aderentes ao longo do comprimento de sobreposição, já que os aderentes se deformam longitudinalmente a uma taxa crescente, desde uma extremidade até à extremidade oposta da sobreposição (Pinto et al. 2009).

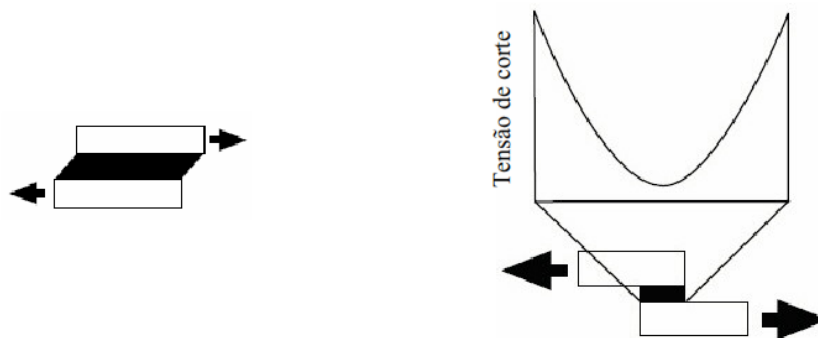


Figura 2 - Esforço de corte e distribuição da tensão de corte.

Este efeito acentua-se com o aumento do comprimento de sobreposição. Por tal motivo, a largura da sobreposição é mais relevante que o comprimento (Figura 3), uma vez que o aumento da largura da ligação torna a junta mais resistente, devido ao aumento da área em cada extremidade da sobreposição, que corresponde aos locais de maior incidência das tensões. Porém, um aumento de comprimento de sobreposição provoca um aumento da resistência da junta, mas a uma taxa decrescente, devido ao efeito acentuado de deformação diferencial dos aderentes.

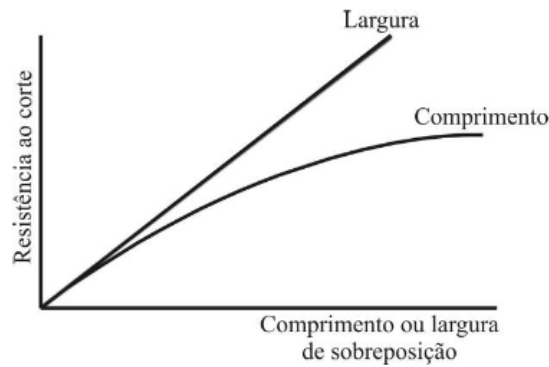


Figura 3 - Efeito do comprimento e da largura de sobreposição na resistência ao corte.

#### 2.1.1.4 Esforços de clivagem (*cleavage*)

Os esforços de abertura numa das extremidades da ligação entre aderentes rígidos fazem com que os esforços normais se distribuam por um comprimento significativo (Figura 4a), atuando de modo a separar os aderentes. Neste caso, existe uma forte concentração de tensões na extremidade da junta que está sob forças de clivagem (Figura 4a).

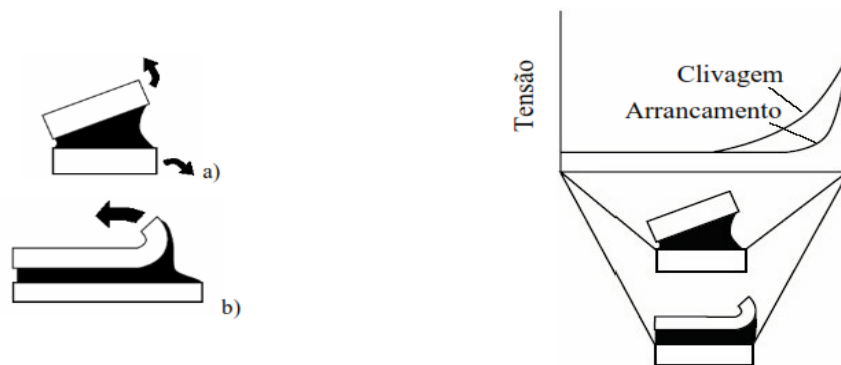


Figura 4 - Esforços de clivagem (a) e de arrancamento (b): distribuição das tensões de clivagem e de arrancamento.

#### 2.1.1.5 Esforços de arrancamento (*peel*)

Caso semelhante ao anterior, diferenciando-se pelo simples facto de o substrato ou substratos serem finos e flexíveis, podendo deformar-se plasticamente por ação das forças aplicadas (Figura 4b). Assim, toda a tensão fica concentrada numa área muito pequena, na proximidade da solitação (Figura 4).

### 2.1.2 Tipos de rotura em juntas adesivas

O objetivo de uma ligação adesiva é a transmissão de esforços entre os dois componentes ligados, mantendo-se a sua integridade estrutural sob solicitações estáticas e/ou dinâmicas, em condições ambientais adversas de temperatura e humidade. Torna-se indispensável uma correta avaliação das distribuições de tensões e, conseqüentemente, dos modos de rotura induzidos nas juntas coladas. A rotura de uma junta adesiva pode dar-se segundo três modos (Figura 5):

- Rotura coesiva no interior do adesivo;
- Rotura adesiva na interface entre o substrato e o adesivo;
- Rotura de um dos substratos;
- Rotura mista.

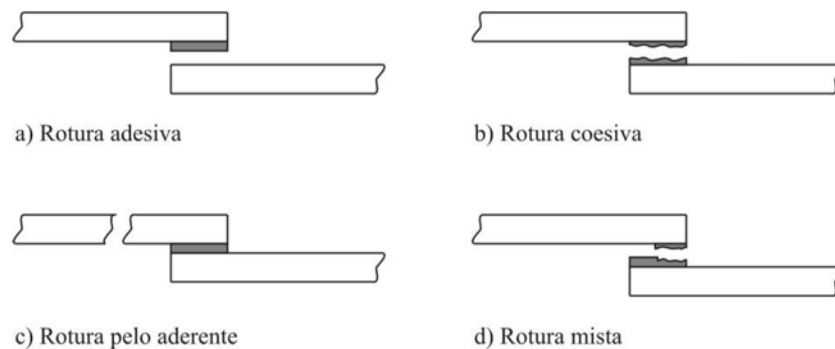


Figura 5 - Modos de rotura típicos de uma junta adesiva.

A rotura da junta, ao dar-se por uma combinação de diferentes modos, designa-se por rotura mista. Assume-se que no projeto de juntas, a conceção será ideal quando a rotura se verifique num dos substratos, ou pelo menos rotura coesiva, indicativa de preparação correta das superfícies. As principais causas das roturas adesivas devem-se à desajustada preparação de superfícies a colar. A ação específica da preparação consiste normalmente no aumento da rugosidade das superfícies, de modo a promover o contato mecânico com o adesivo e/ou provocar alterações químicas que favoreçam a atração electrostática ao nível atómico, através das forças de Van der Waals (Pinto 2007). Os procedimentos dependem dos substratos a ligar e são objeto de normalização.

A rotura coesiva ocorre quando a ligação entre o adesivo e o substrato é mais forte do que a resistência interna do próprio adesivo. Neste caso, as superfícies de rotura estão ambas com uma película de adesivo. Também pode ocorrer rotura coesiva do aderente, sinónimo de uma maior resistência interna do adesivo em relação ao substrato.

A rotura adesiva ocorre na interface entre o adesivo e um dos aderentes. Após a rotura, verifica-se que a superfície de um dos aderentes não apresenta resíduos de adesivo. A superfície de rotura do outro aderente apresenta-se coberta de adesivo. Neste caso, ocorre falha na adesão entre o adesivo e a superfície do aderente (da Silva et al. 2007). A rotura adesiva só ocorre se houver má preparação das superfícies. Todavia, trabalhos recentes mostraram que, em juntas coladas de sobreposição simples, existe variação de tensões de arrancamento e corte ao longo da espessura do adesivo, e que os valores máximos destas tensões ocorrem junto da interface. Isto pode explicar o aparecimento de uma rotura adesiva (Campilho et al. 2005).

O modo de rotura preferencial é a rotura coesiva no adesivo ou no aderente (Figura 5), uma vez que se está a utilizar a totalidade da resistência dos materiais constituintes da junta. A rotura de um dos aderentes é demonstrativa de uma junta bem concebida, nomeadamente se a carga de rotura corresponder, ou pelo menos se aproximar, da resistência nominal do substrato.

### **2.1.3 Tipos de ligações adesivas**

Os tipos mais comuns de juntas adesivas estão apresentados na Figura 6 abaixo representada, dos quais passamos a citar os seguintes:

- Sobreposição simples;
- Sobreposição dupla;
- Chanfro exterior;
- Chanfro interior;
- Degrau;
- Cobre-junta;
- Cobre-junta dupla;
- Topo a topo;
- Tubular;
- Arrancamento (*peel*).

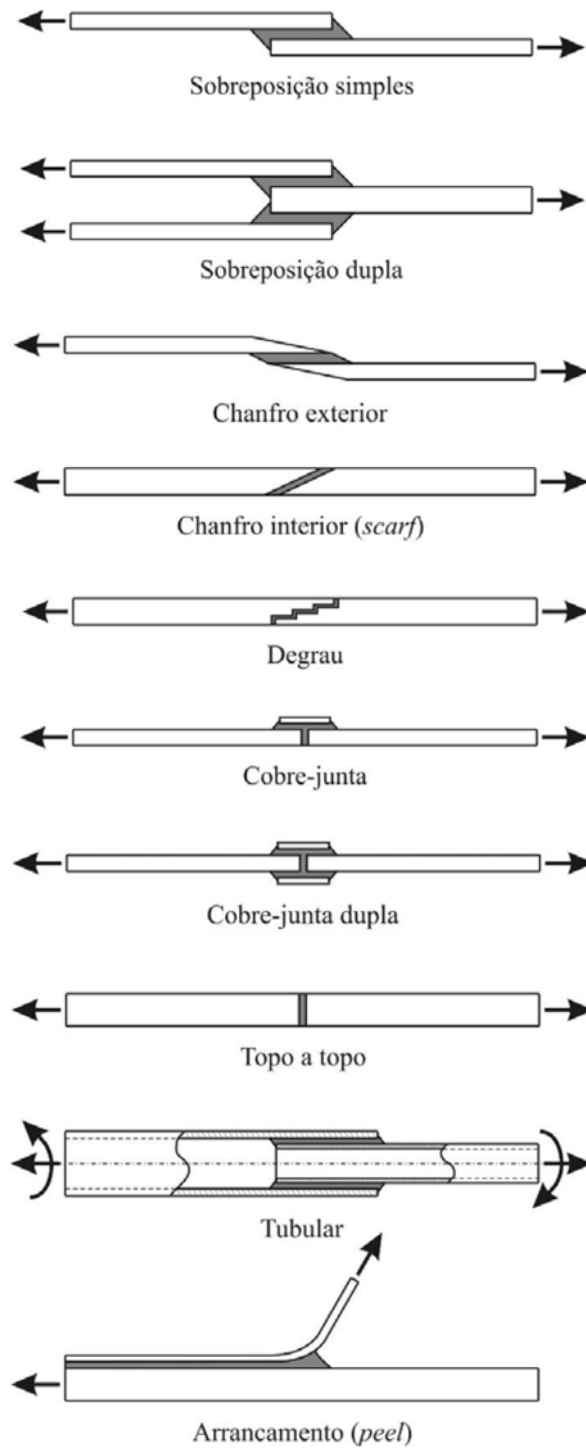


Figura 6 - Tipos de juntas adesivas.

As juntas adesivas podem ter diversas configurações. A JSS é a mais frequentemente usada em aplicações industriais porque é simples de fabricar. Todavia, a aplicação descentrada da carga provoca efeitos de flexão que originam o aparecimento de tensões normais na direção da espessura do adesivo



(arrancamento), reduzindo a resistência da junta (Campilho et al. 2005). Para minimizar este problema, pode recorrer-se a juntas de sobreposição dupla, em que os efeitos da flexão são consideravelmente inferiores. No entanto, a fabricação é mais morosa. As juntas topo a topo (*butt joints*) planas são as mais simples de fabricar. No entanto, não apresentam uma eficácia elevada, devido à reduzida área de colagem e tipo de sollicitação. Além disso, este tipo de juntas não suporta esforços de flexão porque o adesivo, neste caso, estaria sujeito a clivagem. A utilização de juntas em rampa ou em chanfro interior (*scarf*) ou ainda em degraus permite a diminuição dos gradientes de tensões ao longo do adesivo, o que leva à elevada resistência destas juntas (Campilho et al. 2009a). A significativa diminuição da excentricidade dos esforços também contribui para este facto. Na prática, porém, a dificuldade de maquinar os degraus ou rampas esbatem as referidas vantagens e encarecem o processo de fabrico. No caso das juntas em degrau, com substratos em compósito, é comum e mais económico executar os degraus durante o empilhamento, antes da cura. Este procedimento elimina as operações de maquinagem, evitando assim a danificação das fibras. As juntas com chanfro e as juntas em degrau também foram desenvolvidas para reduzir as tensões de arrancamento. As juntas realizadas com cobre-junta e cobre-junta dupla também apresentam resistência superior às juntas de sobreposição simples. A de reforço simples é também sujeita a esforços de arrancamento, enquanto a de reforço duplo reduz o momento-fletor, sendo por isso preferível (Petrie 2000).

No caso de substratos espessos, a junta pode ser melhorada como indicado na Figura 7 (Petrie 2000). Todas estas modificações reduzem a clivagem. As juntas macho-fêmea (*tongue-and-groove*) são particularmente eficientes porque são auto alinhantes e a zona maquinada controla a espessura e depósito do adesivo na ligação.

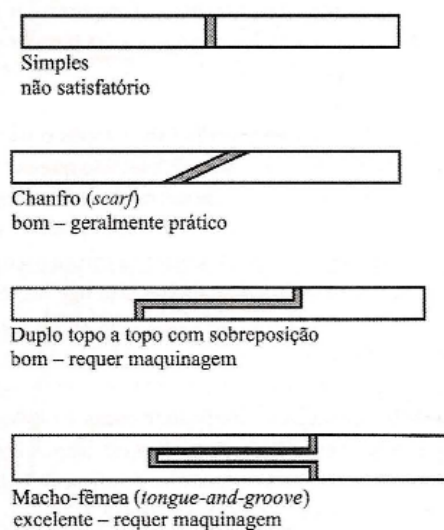


Figura 7 - Diferentes configurações de juntas topo a topo (Petrie, 2000).

As juntas de sobreposição são as mais simples, devido à facilidade de fabricação e devido ao facto do adesivo ser solicitado maioritariamente ao corte. No entanto, as forças não são colineares e isso introduz tensões de arrancamento nas extremidades da sobreposição. Existem várias formas de diminuir esse efeito, como mostrado na Figura 8 (Pires et al. 2003; Campilho et al. 2009b). A junta de ressalto (*joggle*) é a solução mais simples para obter o alinhamento das forças, sendo o substrato facilmente dobrado. A junta de sobreposição dupla tem uma construção mais balanceada, que diminui drasticamente o momento-fletor, mas é de fabricação mais difícil. As juntas com chanfro permitem diminuir as concentrações de tensões.

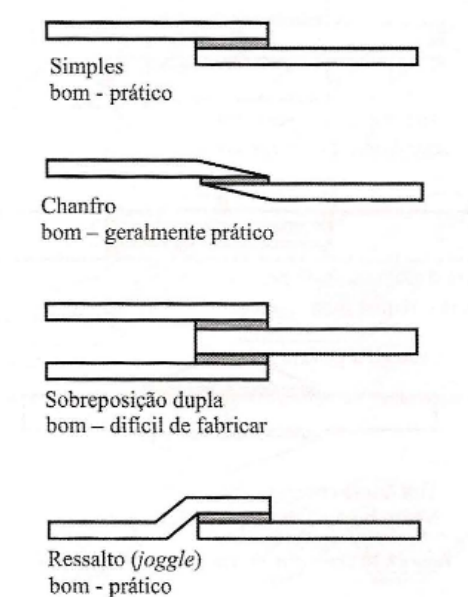


Figura 8 - Diferentes configurações de juntas de sobreposição (Petrie 2000).

A Figura 9 apresenta soluções alternativas que permitem a diminuição das forças de arrancamento. É também uma prática comum a colagem de reforços sobre substratos finos, com o objetivo de aumentar a sua rigidez. Todavia, nestes casos, as solicitações de flexão podem eventualmente induzir clivagem no adesivo. Na Figura 10 apresentam-se algumas soluções para diminuir a clivagem de juntas reforçadas (Kohen 1954). Consegue-se melhorar a resistência às forças de flexão aumentando a área colada, a flexibilidade do rebordo e a rigidez da base.

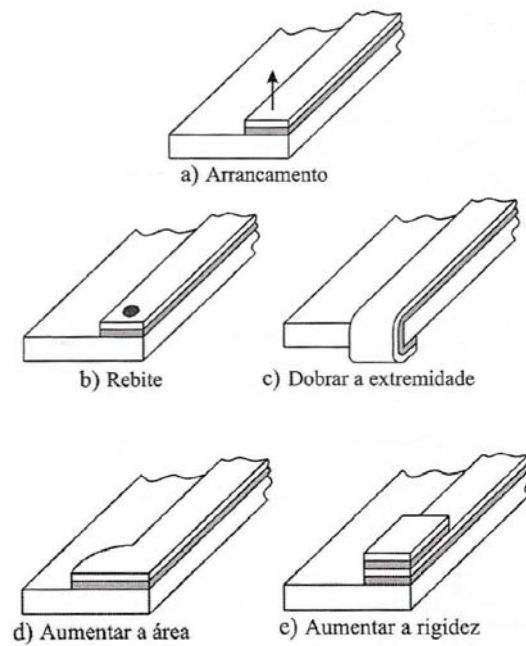


Figura 9 - Diferentes técnicas para diminuir as forças de arrancamento em juntas adesivas (Kohen 1954).

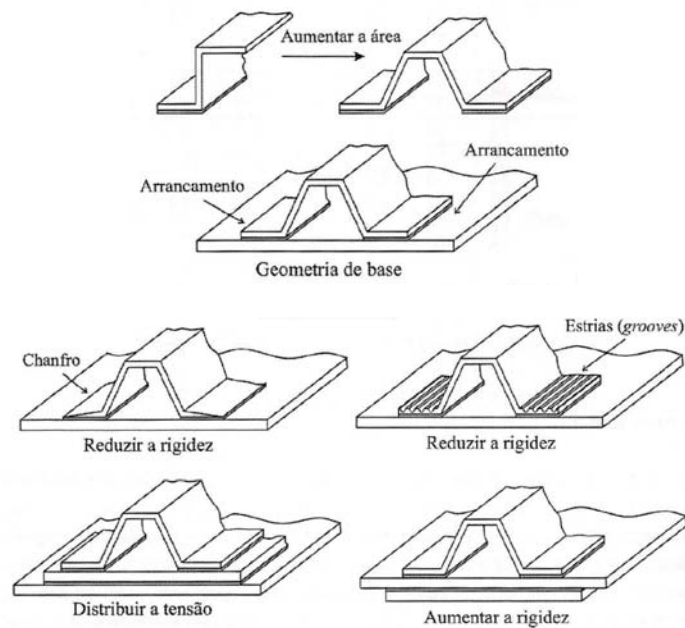


Figura 10 - Soluções para diminuir a clivagem de juntas reforçadas (Kohen 1954).

As juntas cilíndricas que apresentamos na Figura 11 representam algumas juntas cilíndricas habitualmente utilizadas na colagem de varões e tubos, conseguindo-se uma maior área resistente e uma diminuição do efeito de arrancamento, apesar de requererem maquinagem.

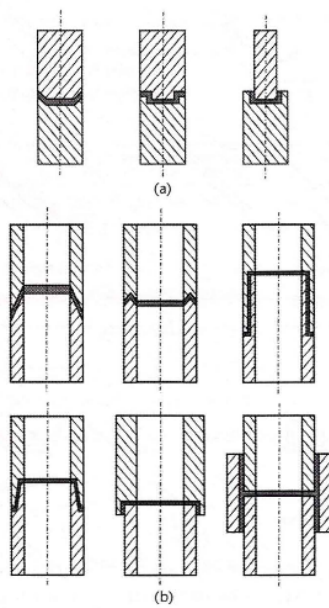


Figura 11 - Diferentes configurações de juntas para varões (a) e tubos (b) (Petrie 2000).

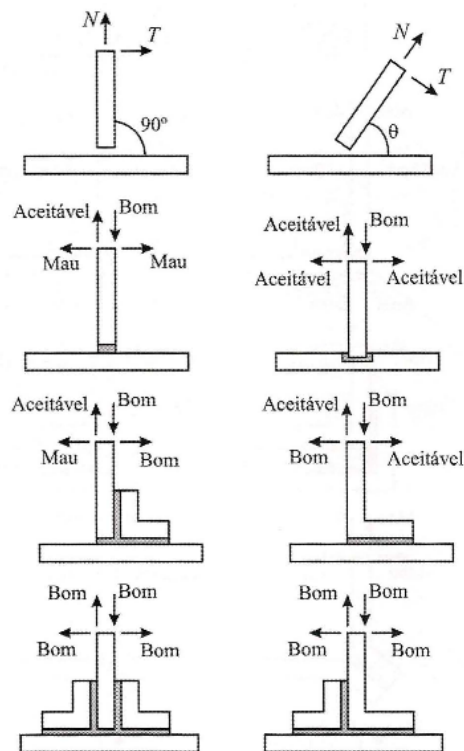


Figura 12 - Diferentes configurações de juntas em T (Adams et al. 1997).

As juntas em T (Figura 12) são caracterizadas pela orientação perpendicular dos dois componentes ( $\theta = 90^\circ$ ). Todavia, também se inclui nesta designação juntas cujos componentes a colar apresentem uma orientação diferente de  $90^\circ$ . O carregamento pode ser efetuado no plano da chapa ( $N$ ) ou transversal ( $T$ ). A análise deste tipo de juntas é mais complexa, quando comparado com as juntas de

sobreposição. Na Figura 12 apresentam-se algumas juntas deste tipo (Adams et al. 1997). O objetivo fundamental das soluções propostas é a minimização das forças de arrancamento e a maximização das solicitações de corte no adesivo.

As juntas de canto são semelhantes às juntas em T. Na Figura 13 apresentam-se as soluções habitualmente utilizadas para diminuir o efeito de arrancamento no adesivo (Keimel 1966). Como se constata, estas soluções são semelhantes às preconizadas para as juntas em T.

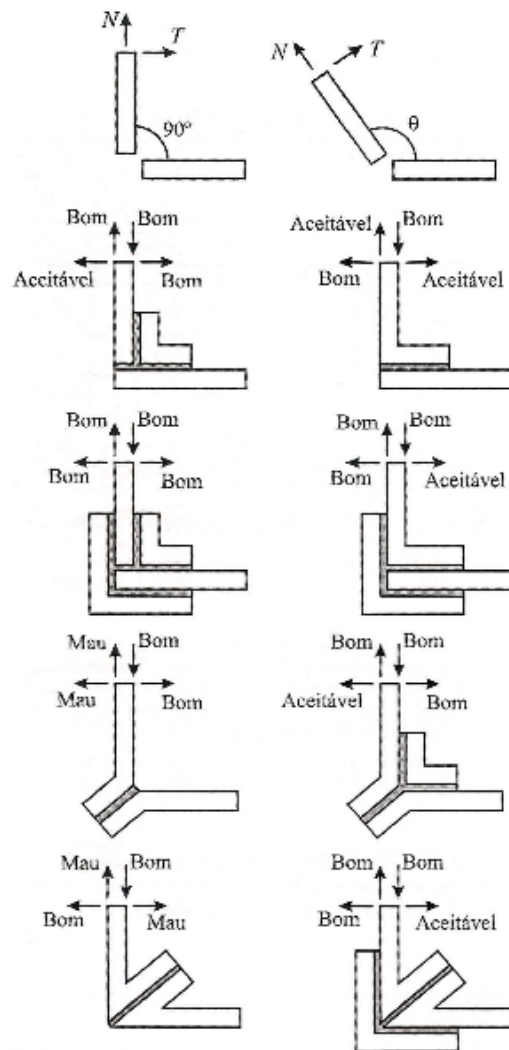


Figura 13 - Diferentes configurações de juntas de canto (Adams et al. 1997).

## 2.2 Adesivos estruturais

Teoricamente, um adesivo deve distribuir as cargas e tensões sobre a área total da união, ao contrário de concentrá-las apenas em alguns pontos, originando uma distribuição mais uniforme das

cargas estáticas e dinâmicas. Desta forma, a montagem com adesivos é mais resistente à flexão e vibração do que, por exemplo, a montagem com rebites.

Adesivo é um material capaz de unir dois corpos através de forças de adesão e coesão interna. A força de adesão depende da afinidade entre o adesivo e os substratos, estando baseada nas forças de atração entre moléculas de adesivo e as superfícies dos materiais a ligar. A coesão é a própria resistência interna do adesivo, quando sujeito a esforços. Quanto mais fortes forem as forças intermoleculares do adesivo, maior será a coesão e, conseqüentemente, a resistência do adesivo. O adesivo, além de promover a ligação dos substratos, pode, funcionar como vedante, eliminando a corrosão que possa surgir numa montagem mecânica.

### 2.2.1 Caracterização dos adesivos estruturais

Uma das muitas formas de divisão dos adesivos estruturais é a sua apresentação no estado não curado e temperatura de cura. Na Tabela 1 é apresentada a forma e temperatura de cura aproximada de alguns tipos de adesivos.

Tabela 1 - Adesivos estruturais e suas formas físicas no estado não curado (da Silva et al. 2007).

<b>Tipo</b>	<b>Forma</b>	<b>Temperatura de cura aproximada [°C]</b>
Fenólico	Filmes e pastas de cura a quente	171
Epóxido	Filmes e pastas de cura a quente	82, 121, 171
Epóxido	Um componente activado por luz	25
Epóxido	Pastas de dois componentes	25
Acrílico	Líquido de um componente	25
Acrílico	Um componente activado por luz	25
Acrílico	Activado por um primário	25
Acrílico	Pastas de dois componentes	25
Uretano	Pastas de dois componentes	25
Poliimida	Filmes de cura a quente	220
Cianato de éster	Filmes e pastas de cura a quente	171
Bismaleimida	Filmes e pastas de cura a quente	200

Para se obter uma ligação aceitável entre o adesivo e a superfície do substrato, é necessário que o adesivo se espalhe facilmente sobre toda a superfície, ou seja, é necessário que a superfície possua uma boa molhagem. Define-se molhagem como sendo a capacidade de um líquido se espalhar numa superfície sólida. A molhagem está intrinsecamente relacionada com a energia livre de superfície e a

tensão de superfície. A energia livre de superfície, ou simplesmente energia de superfície, pode ser vista como a força de atração de uma superfície (da Silva et al. 2007).

## 2.2.2 Tipos de adesivos estruturais

Os adesivos estruturais abrangem materiais com elevada resistência coesiva, usados para unir aderentes que também apresentam uma significativa resistência coesiva. Um adesivo estrutural pode ser convenientemente definido como sendo um material usado para unir outros materiais de elevada resistência, tais como madeira, compósitos, ou metal, permitindo que a resistência da ligação adesiva ao corte exceda os 6,9 MPa à temperatura ambiente (Pocius 2002). A Tabela 2 classifica os tipos principais de adesivos segundo o desempenho.

Tabela 2 - Classificação dos adesivos segundo o desempenho (da Silva et al. 2007).

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

Outra definição é a que considera o adesivo estrutural como um material que não sofre fluência sob ação de cargas significativas (Pocius 2002). Em certas aplicações, os adesivos estruturais são necessários para garantir uma boa ligação adesiva em ambientes adversos durante anos ou mesmo décadas. Segundo Gauthier (1990), um adesivo estrutural é definido como um material capaz de transferir as forças aplicadas à junta em condições de serviço ou, alternativamente, como um material de comprovada fiabilidade em aplicações nas quais a ligação deve ser mantida, sem ocorrências de rotura, mesmo quando sujeita a solicitações significativas por um longo período de tempo. Admitindo o adesivo como parte integrante da estrutura, este deve apresentar uma resistência equivalente aos materiais constituintes da estrutura a ser colada. Nesta perspectiva, a designação de adesivo estrutural é atribuída aos adesivos capazes de suportarem a transmissão de esforços de grandeza considerável.

Os vários tipos de adesivos podem encontrar-se nas mais diversas formulações e classificados segundo diferentes classes. A Tabela 3 apresenta diversos tipos de adesivos estruturais e suas propriedades.

Tabela 3 - Propriedades típicas dos diversos tipos de adesivos estruturais (Esteves 1990).

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

### 2.2.2.1 Adesivos Epóxidos

Os adesivos epóxidos são dos adesivos mais frequentemente utilizados e que se encontram no mercado há vários anos, têm boa resistência química e mecânica, não produzem substâncias voláteis durante a cura, têm baixa contração e, em juntas convenientemente projetadas, formam ligações



extremamente fortes e duráveis com a maioria dos materiais (Pinto 2007). Estes adesivos permitem grande mutabilidade na sua formulação, uma vez que existem diversas resinas e diferentes endurecedores, disponíveis numa grande variedade de formas que vão desde adesivos líquidos de baixa viscosidade até pastas sólidas ou filmes. São comercializados sob a forma de um só componente ou de vários componentes (normalmente dois). O desenvolvimento deste tipo de adesivos ao longo do tempo, apresentando elevada rigidez, potenciou o seu uso em muitos tipos de indústria. Estes adesivos apresentam uma enorme diversidade de aplicações, podendo ser empregues na ligação de quase todos os materiais utilizados na construção mecânica.

Nos adesivos de dois componentes, a cura pode ser processada a partir dos 5°C. O processo de cura pode ser acelerado por ação da temperatura. Geralmente, um aumento de temperatura provoca um aumento na velocidade de reação, ou seja, se um adesivo epóxico a 20°C demora 1 hora para curar, então, para uma temperatura de 40°C curará em 15 minutos. O tempo necessário para terminar o processo de cura à temperatura ambiente pode variar de alguns minutos a vários dias. No caso dos sistemas de dois componentes é importante assegurar as quantidades exatas de resina e endurecedor, sendo necessário cuidado na relação entre a resina e o endurecedor indicada pelo fabricante, sendo também necessário garantir uma adequada mistura entre os componentes, pois, de outra forma, não se dará a reação corretamente, dando origem a propriedades inferiores ao esperado. O processo de cura destes adesivos não necessita da aplicação 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, polisulfido, fenólicos, vinílico, etc.) ou por um elastómero (poliuretano ou nitrilo).

**Epóxico de poliamida.** A resina de poliamida tem o papel de endurecedor e de agente flexibilizante. O adesivo será tanto mais flexível quanto maior for a razão entre a quantidade de resina poliamida e resina de epóxico. Estes adesivos possuem uma cura lenta à temperatura ambiente (12 a 16 horas) e apresentam maior flexibilidade e uma resistência ao arrancamento significativamente maior relativamente a adesivos epóxicos não modificados.

**Epóxico polisulfido.** Oferecem boa resistência química, bom comportamento na exposição a intempéries e boa resistência ao impacto, sendo direcionados para aplicações sujeitas a choques e vibrações. São recomendados para ligar materiais com coeficientes de dilatação térmica diferentes.

**Epóxico fenólico.** A resina fenólica melhora a resistência a altas temperaturas, mantendo boa estabilidade e resistência ao corte para temperaturas da ordem dos 200°C. Estes adesivos são apresentados comercialmente na forma de filmes ou líquidos que são curados sob pressão a temperaturas

da ordem dos 170°C. A baixa resistência ao arrancamento e ao impacto e o custo relativamente elevado são as grandes limitações destes adesivos.

**Epóxico vinilo.** A parte das resinas vinílicas melhora a resistência ao impacto e ao arrancamento. Contudo, prejudica a resistência a altas temperaturas.

**Epóxico poliuretano.** Foram desenvolvidos com o objetivo de se obter um adesivo com uma boa resistência ao arrancamento, idêntica à dos adesivos epóxico poliamida, e uma favorável resistência a choques e vibrações. Apresentam também boa resistência à fadiga.

**Epóxico nitrilo.** São adesivos com boa resistência ao arrancamento que permitem temperaturas de utilização entre -55°C e 120°C. São comercializados sob a forma de filmes, tendo grande aplicação na construção e manutenção de aviões comerciais a jato.

#### 2.2.2.2 Adesivos Fenólicos

Foram os primeiros adesivos estruturais disponibilizados para metais e têm uma longa história na ligação de metais e madeira, são quimicamente idênticos aos adesivos de resorcinol e o mecanismo de cura é o mesmo. Durante o processo de cura, que deve realizar-se a altas temperaturas, ocorre libertação de água. Por tal motivo, os substratos devem ser porosos ou deve-se aplicar uma elevada pressão para evitar o aparecimento de vazios na zona de colagem. Os adesivos fenólicos apresentam em geral um baixo custo e possuem boa resistência mecânica e boa resistência a temperaturas elevadas e aos agentes ambientais. Como restrições, aponta-se a baixa resistência à corrosão por solventes, baixa resistência ao impacto e grande fragilidade. Para a resolução destes problemas têm sido desenvolvidos adesivos que combinam a resina fenólica com uma resina vinílica ou um elastómero (nitrilo ou policloropreno).

**Fenólicos vinílicos.** Possuem uma temperatura máxima de utilização de 130°C e apresentam elevada resistência ao corte e ao arrancamento, sendo a sua resistência à fadiga boa devido às propriedades plastificantes da fase vinílica. Geralmente são apresentados sob a forma de emulsões e filmes, ou sob a forma de dois componentes (líquido + pó).

**Fenólicos nitrilo.** São adesivos com características mecânicas ligeiramente inferiores aos adesivos fenólicos vinílicos, mas apresentando uma melhor estabilidade térmica (sendo utilizados em contínuo até temperaturas de 160°C). São comercializados sob a forma de filmes ou líquido monocomponente.

**Fenólicos cloropreno.** Elaborados de forma idêntica à dos adesivos com nitrilo, podendo ser utilizados numa gama de baixas temperaturas (até aos -50°C). No entanto, são mais sensíveis aos agentes químicos que os dois adesivos anteriores.

### 2.2.2.3 Adesivos Acrílicos

Nos adesivos acrílicos incluem-se os adesivos anaeróbicos, os cianoacrilatos e os acrílicos modificados. A principal vantagem dos adesivos acrílicos é que estes não carecem de uma preparação de superfície exigente. Na realização da colagem, a resina é aplicada numa superfície e o agente endurecedor noutra.

**Anaeróbicos.** Muito aplicados na indústria mecânica de fixação (peças estriadas, roscadas e rolamentos, etc.). São geralmente líquidos monocomponentes, que podem ser curados à temperatura ambiente, apresentando-se sob a forma de pastas ou líquidos tixotrópicos. O processo de endurecimento dá-se por reação de polimerização do tipo radical livre, uma vez eliminado o oxigénio. Apresentam resistência idêntica à dos epóxidos, uma boa resistência a solventes, e temperatura máxima de utilização situada nos 150°C. Aplicam-se na colagem de diversos materiais como o acetal, as poliolefinas, o nylon e o policloreto de vinilo (PVC).

**Cianoacrilatos.** Adesivo instantâneo, possibilitando colagens muito rápidas. Apresenta-se sob a forma de líquido monocomponente ou versão tixotrópica sem solventes. Estes adesivos são conhecidos como colas instantâneas, supercolas ou ainda por cola-tudo. O processo de cura destes adesivos é influenciado pela humidade. Apresentam excelente resistência à tração, mas baixa resistência ao arrancamento, fragilidade e custo elevados.

**Acrílicos modificados e metacrilatos.** Adesivos cuja modificação se promove com a introdução de polimetilmetacrilatos e uma borracha de nitrilo. Apresentam elevada resistência à humidade, boa resistência ao arrancamento e ao impacto. Possuem baixa contração, podendo ser utilizados para unir uma grande variedade de materiais (especialmente os plásticos e metais). Apresentam baixa resistência mecânica a altas temperaturas e elevada flamabilidade.

### 2.2.2.4 Adesivos à base de resorcinol-formol

Adesivo que é um produto de propriedade única no mercado, pois é totalmente à prova de água, e resistente a diversos solventes orgânicos e fungos. Recomendado para colagens de materiais em trabalhos navais, aeronáuticos, hidráulicos e outros que poderão ser expostos à ação da água e intempéries (temperatura, chuva, vento, humidade, etc.). Na indústria das madeiras também é comum o

uso de adesivos à base de ureia-formol, adesivos de contato, adesivos à base de cianoacrilato e adesivos vinílicos ou, como mais conhecidos, cola branca.

#### **2.2.2.5 Adesivos de poliimida e adesivos de bismaleimida**

Adesivos para altas temperaturas, são os mais estáveis a altas temperaturas (superiores a 200°C). Estão disponíveis sob a forma de líquidos e filmes, mas são relativamente caros e difíceis de manusear. Requerem longos tempos de cura com ciclos de pressão e temperatura elevadas, pelo que a sua aplicação é complexa. São os que apresentam maior retenção de resistência a longo prazo com temperaturas elevadas. Os adesivos de bismaleimida têm um processo de cura mais simples.

#### **2.2.2.6 Adesivos de poliuretano**

Os adesivos de poliuretano curam por reação química com a humidade. As principais vantagens são a excelente tenacidade, que faz com que a junta possa acomodar deformações elevadas, assim como um custo moderado. Resultam da reação do polioliol (ou poliéter-polioliol) com um isocianato, apresentando-se geralmente sob a forma de dois componentes (Banea et al. 2014). A cura processa-se lentamente à temperatura ambiente, mas podem ser elaborados de forma a abranger uma gama alargada de tempos de cura. A distância entre as superfícies a colar pode ir até aos 25 mm. Apresentam boa flexibilidade, bom comportamento a baixas temperaturas, boa resistência ao arrancamento, à abrasão, a choques e vibrações, boa tenacidade e bom comportamento quando sujeitos a intempéries. Estes adesivos podem apresentar uma resistência de rotura ao corte da ordem dos 20 MPa, possibilitando a utilização em aplicações estruturais.

### **2.3 Determinação das propriedades de adesivos**

O conhecimento das propriedades mecânicas e de fratura do adesivo é fundamental para a determinação das tensões na junta e para a previsão da sua resistência e tempo de vida útil. No caso da resistência estática, para além da necessidade da informação do módulo de elasticidade longitudinal e do coeficiente de Poisson, são necessárias as curvas de tensão-deformação em tração e corte, face ao comportamento acentuadamente não-linear dos adesivos. A resistência à fratura também é revelante para a determinação da resistência das juntas.

Existe uma grande variedade de ensaios para caracterizar os adesivos e que são objeto de normas: *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, *British Standards (BS)*, *International*

*Organization for Standardization* (ISO), e Norma Europeia (EN), que definem os procedimentos de ensaio, técnicas de preparação de amostras, tratamento das superfícies, ciclos de cura, etc. De realçar que, face às dificuldades em medir certas propriedades do adesivo a partir dos ensaios de juntas, recorre-se também a provetes maciços e aos ensaios normalizados para materiais poliméricos. A caracterização dos adesivos a partir do ensaio de juntas apresenta várias dificuldades, resultantes da pequena espessura da camada adesiva e de componentes de tensão indesejadas, como por exemplo tensões de arrancamento em juntas de sobreposição simples.

### **2.3.1 Ensaios de adesivo em bruto**

Um dos principais problemas na preparação de provetes maciços de adesivo é a dificuldade em eliminar bolhas de ar. Em princípio, elas podem ser eliminadas recorrendo a pressão hidrostática suficientemente elevada para comprimir o ar aprisionado em volumes insignificantes, forçando-o a dissolver-se no adesivo. Em alternativa, a eliminação de bolhas pode ser conseguida através de vácuo, aplicado durante um tempo suficiente e com o adesivo a uma temperatura que o torne suficientemente fluído. O vácuo deve ser aplicado à temperatura a que a viscosidade do adesivo está num valor mínimo (Kinloch 1987).

A norma ISO 15166-1:1998 descreve um método de preparação de provetes maciços para adesivos bi-componente com recurso a vácuo. A mistura dos componentes deve, se possível, ser efetuada em câmara de vácuo, ou então ser sujeita a vácuo antes do vazamento em molde. Isto tem por objetivo evitar o aprisionamento de bolhas de ar no interior do adesivo e entre o adesivo e a superfície do molde, principalmente junto às arestas. O molde pode conferir a forma final do provete a ensaiar ou a forma de placa a partir da qual são maquinados posteriormente os provetes. Todavia, a maquinagem pode induzir um estado de tensão inicial com efeitos indesejados (San Róman 2005). da Silva et al. (2004) obtiveram placas de adesivos para altas temperaturas, aplicando vácuo para remover bolhas de ar. Os referidos autores concluíram que as temperaturas e os tempos de aplicação de vácuo necessários para remover as bolhas conduziam a superfícies irregulares dos provetes. Recorreram por isso à técnica definida na norma francesa NF T 76-142, que se revelou bastante mais simples e eficaz. A primeira etapa desta técnica consiste em depositar adesivo sobre uma placa molde numa região delimitada por uma barreira metálica. Esta é removida imediatamente antes do fecho do molde, que provoca fluxo de adesivo até uma barreira circundante flexível de silicone que, por sua vez, está rodeada por barras metálicas mais finas que determinam a espessura final da placa.

### 2.3.1.1 Ensaios de tração de provetes maciços

A determinação das propriedades à tração de um adesivo pode ser executada através do ensaio de um provete em adesivo maciço, de acordo com o previsto na norma EN ISO 527-2. O maior problema consiste em obter provetes isentos de defeitos e porosidades. As propriedades dos adesivos são sensíveis ao modo como se apresentam na forma maciça ou em filme. Em provetes maciços espessos a probabilidade de ocorrência de defeitos é maior, o que tende a resultar em propriedades mecânicas inferiores. A sua forma tradicional é a de 'osso de cão', com as dimensões indicadas na Figura 14.

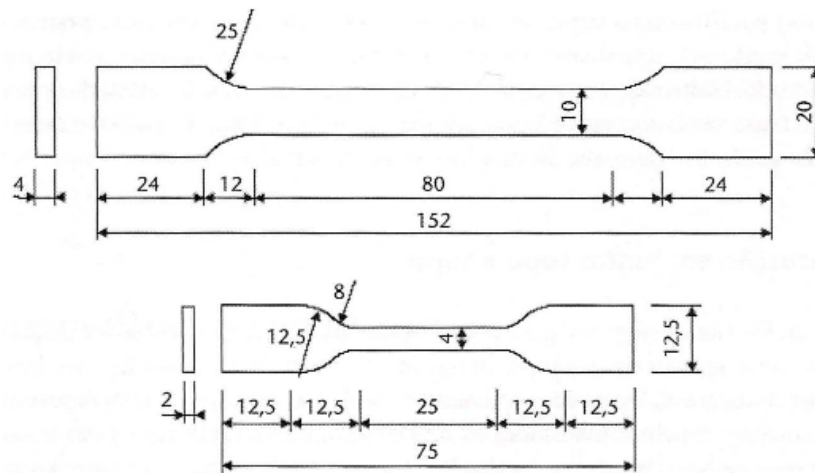


Figura 14 - Provetes de tração de acordo com a EN ISO 527-2 a) provete longo, b) provete reduzido (dimensões em mm).

A opção pelo provete longo a) ou pelo provete reduzido b) é determinada pela rigidez do adesivo. Nos adesivos mais rígidos, as deformações são menores, pelo que o provete de maiores dimensões se adapta melhor. A realização do ensaio consiste em solicitar segundo a direção longitudinal do provete até à ocorrência da rotura, sendo possível o registo de uma curva de *tensão vs. deformação*. A tensão correspondente à transição elasto-plástica será obtida considerando a força correspondente a essa transição e a tensão máxima corresponderá ao ponto em que a força aplicada atinge o valor máximo. A transição elasto-plástica nem sempre é perfeitamente perceptível. Nestes casos poderá haver a necessidade de considerar tensões convencionais obtidas para uma deformação residual permanente (por exemplo 0,2%). Para a medição das deformações são utilizados transdutores diretamente aplicados sobre o provete ou utilizada uma técnica de medição sem contato, como ilustrado na Figura 15.



Figura 15 - Medição da deformação com base num sistema de registo fotográfico (da Silva et al. 2006).

Estas técnicas são preferíveis uma vez que, não interferindo com o adesivo, não podem condicionar de nenhum modo as propriedades a obter. O problema maior é quando as deformações são de baixa amplitude. Neste caso, a resolução pode ser baixa e conduzir a resultados pouco fiáveis (da Silva et al. 2006). Da curva tensão vs. deformação pode-se recolher ainda o módulo de elasticidade longitudinal,  $E$ . Este valor corresponde ao declive da curva no domínio linear-elástico.

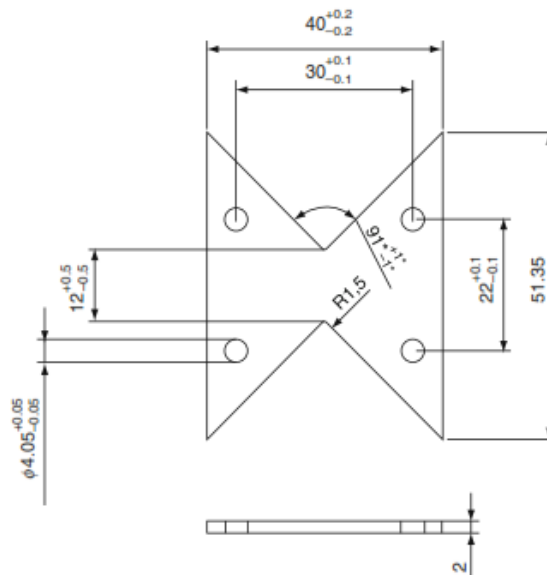


Figura 16 - Provete Arcan (dimensões em mm).

O ensaio *Notched plate shear method* (ou Arcan) é usado para obtenção de propriedades de corte, utilizando para o efeito provetes com uma configuração semelhante a uma borboleta (Figura 16). O ensaio apresenta bom desempenho em todos os tipos de adesivo, incluindo os mais dúcteis, e pode

ser utilizado com espessuras menores, o que aproxima a caracterização do comportamento mecânico às condições mais empregues em juntas em que o adesivo apresenta uma espessura muito fina. O provete Arcan possui dois entalhes simétricos a  $90^\circ$ , um raio de concordância de 1,5 mm para minimizar a concentração de tensões, e dois furos em cada metade do provete que permitem a sua fixação num dispositivo semelhante ao representado na Figura 17.



Figura 17 - Provete e respetivas fixações para o ensaio Arcan.

### 2.3.1.2 Ensaios de compressão de provetes maciços

É sabido que os polímeros possuem melhor resistência à compressão do que à tração, o que torna necessário realizar ensaios de compressão (Kinloch 1987; Adams et al. 1997; Hosford 2005). Como se compreende facilmente, os ensaios de compressão de provetes maciços são claramente preferíveis aos ensaios de juntas topo-a-topo para caracterizar o comportamento de adesivos (San Róman 2005). As normas seguidas no ensaio de adesivos são as dos materiais poliméricos, como a ISO 604:2003 ou a ASTM D695-96. Na realidade, os ensaios de compressão apresentam dois inconvenientes importantes: o atrito nos topos e a tendência para a encurvadura (Figura 18), que limita o comprimento dos provetes (Hosford 2005).



Figura 18 - Encurvadura no ensaio de compressão (Hosford 2005).



O atrito entre os blocos de carregamento e os topos do provete contraria localmente o seu alargamento natural, provocando embarrilamento seguido de fissuras longitudinais, ou a rotura ao corte ao longo de superfícies cónicas (devido às tensões secundárias de tração), consoante se trate de polímeros dúcteis ou frágeis, respetivamente (Figura 19 e Figura 20) (Costa 2004; Hosford 2005; Ferneda et al. 2006).

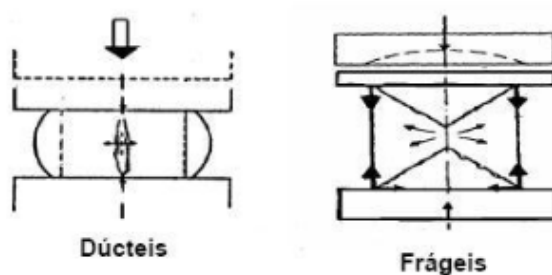


Figura 19 - Tipos de rotura possíveis na compressão de provetes cilíndricos (Unicamp 2010).

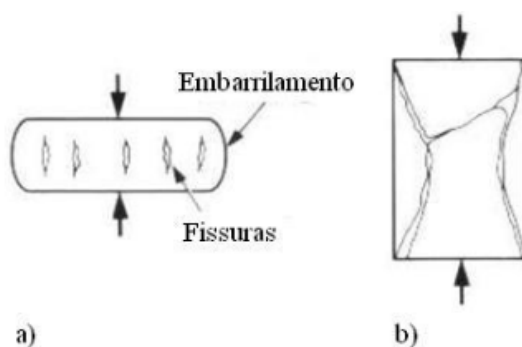


Figura 20 - Rotura de materiais sob compressão a) material dúctil e B) material frágil (Costa 2004).

O efeito do atrito na curva tensão-deformação pode ser significativo em provetes curtos (Melo 2010) (Figura 21). É possível diminuí-lo mediante a aplicação de lubrificantes, tais como filmes de PTFE (películas em Teflon<sup>®</sup>), grafite ou silicone, ou ainda através da inclusão de papel abrasivo entre os blocos de carregamento e os provetes (Ferneda et al. 2006; Melo 2010). Todavia, pode ocorrer escorregamento do provete. Em alternativa ou complemento, pode-se aumentar a razão comprimento ( $L$ )/diâmetro ( $D$ ) do provete, mas isso aumenta a probabilidade de encurvadura (Figura 21) (Hosford 2005; Melo 2010).

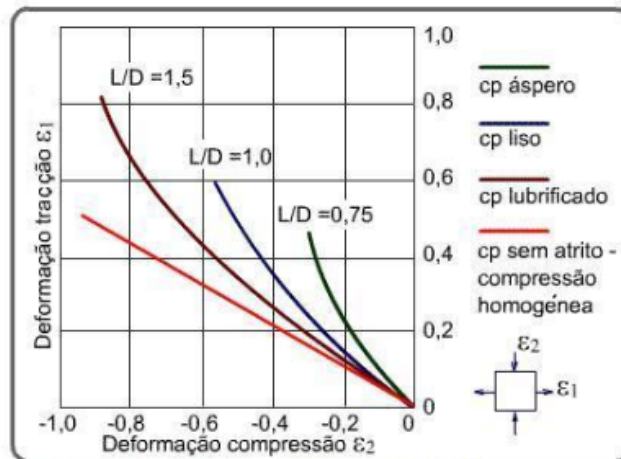


Figura 21 - Variação das deformações com o atrito e com o rácio  $L/D$  (Melo 2010).

Melo (2010) estudou os modos de deformação e rotura de provetes cilíndricos à compressão em função da relação  $L/D$ , tendo constatado a ocorrência de (Figura 22):

1. Encurvadura quando  $L/D > 5$ ;
2. Corte se  $L/D > 2,5$ ;
3. Barril duplo quando  $L/D > 2,0$ ;
4. Barril simples quando  $L/D > 2,0$  e existe atrito apreciável entre o provete e os blocos de carregamento;
5. Compressão homogênea se  $L/D < 2,0$  e não existe atrito significativo;
6. Instabilidade compressiva para materiais bastante flexíveis.

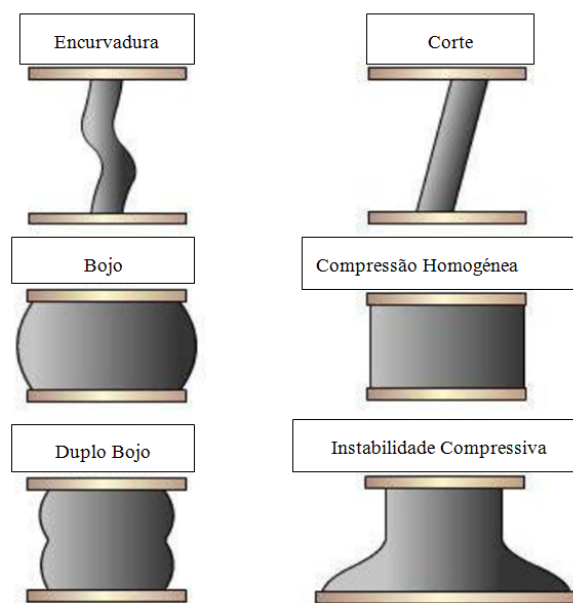


Figura 22 - Modos de deformação dos provetes submetidos a ensaio de compressão (Melo 2010).

A tensão de ruptura é, portanto, condicionada pela geometria do provete e pelas condições de lubrificação nos topos do mesmo. Como tal, a resistência à compressão medida pode não ser uma verdadeira propriedade do material (Melo 2010).

### 2.3.2 Ensaios de adesivo em junta adesiva

Os testes em junta adesiva são fundamentais para garantir a longevidade de qualquer sistema ligado ou componente. Os testes são realizados para as mais diversas finalidades, incluindo a seleção de materiais, aquisição de dados para o projeto, validação, avaliação da durabilidade ambiental e controlo de qualidade. Muitos métodos diferentes de teste estão disponíveis e é importante que o método utilizado seja o mais conveniente para a obtenção das propriedades que se pretendem analisar e que este possa ser aplicado de uma forma reproduzível. Há uma extensa gama de métodos de teste disponíveis como padrões nacionais e internacionais. Estes são geralmente métodos com longas histórias de aplicação e são largamente usados e aceites em diferentes indústrias. As principais normas publicadas pela ISO e ASTM Internacional sugerem os meios e métodos a utilizar aquando da realização dos ensaios seleccionados. No entanto, também há muitas normas específicas elaboradas pelas próprias indústrias, com o objetivo de garantir propriedades específicas e em conformidade com o produto fabricado. Os testes normalizados poderão não reproduzir necessariamente os valores mais precisos e não ser os testes mais adequados para muitas finalidades.

#### 2.3.2.1 Ensaios à tração em juntas topo a topo

O comportamento à tração dos adesivos pode ser determinado através de ensaios de juntas topo-a-topo (Figura 23 e Figura 24) [ISO 6922:1987; ISO 11003-2:2001; ASTM D897-01; ASTM D2094-00e1; ASTM D2095-96:2002].

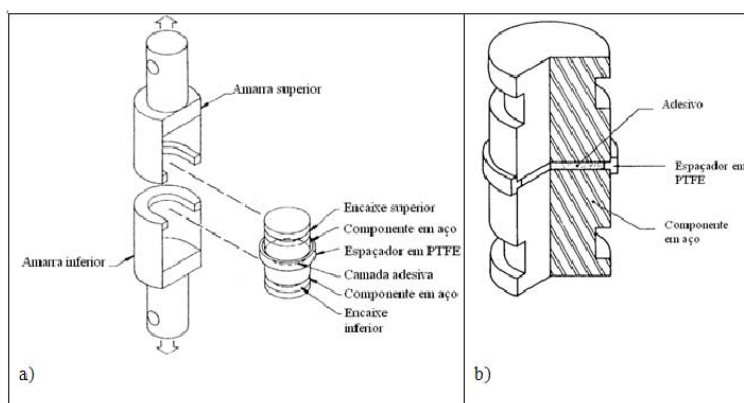


Figura 23 - Ensaio de tração de juntas topo-a-topo segundo a norma ASTM D897-01: a) sistema de acoplamento ou amarração b) provete de ensaio (Petrie 1999).

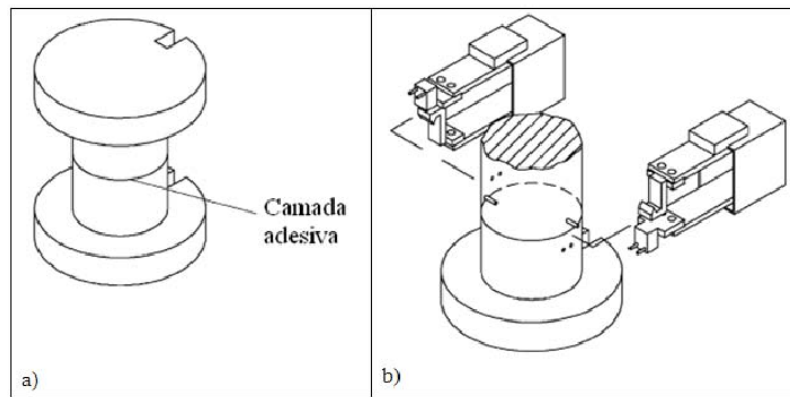


Figura 24 - Ensaio de tração de juntas topo-a-topo segundo a norma ISO 11003-2:2001: a) provete de ensaio; provete de ensaio com aplicação de extensómetros (Öchsner e Gegner 2004).

O ensaio é realizado com dois aderentes circulares em aço e ligados entre si pelo adesivo, conforme ilustra a Figura 24. Permite obter informação respeitante ao módulo de elasticidade longitudinal e coeficiente de Poisson. As tensões são calculadas dividindo a força aplicada pela área colada. Aparentemente, a junta de topo carregada axialmente introduz um estado uniaxial de tensão uniforme. Contudo, alguns autores como Adams e Coppendale (1978) demonstraram que a distribuição de tensões, de facto, não é uniforme. Tal resulta do efeito de Poisson, da constrição provocada na camada de adesivo pelos substratos quando existe uma diferença sensível de rigidez entre eles, ou ainda por desalinhamento. Sem o constrangimento lateral, a deformação radial no adesivo é maior do que a verificada no substrato, isto porque as diferenças de módulo de elasticidade podem ser apreciáveis. Contudo, segundo Adams e Coppendale (1978) é possível obter uma relação entre um módulo de elasticidade que designaram por módulo aparente,  $E_a$  e o módulo real  $E$ . Se o adesivo for completamente constrangido pelo substrato e a contração do substrato for nula (o substrato é completamente rígido), a razão entre  $E_a$  e  $E$  é dada por:

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

sendo  $\nu$  o coeficiente de Poisson medido no adesivo. As dificuldades inerentes à obtenção de propriedades mecânicas em tração por este processo estendem-se à precisão do fabrico dos provetes e ao correto alinhamento destes durante a solitação. Pequenos desalinhamentos introduzem esforços espúrios de flexão que reduzem fortemente as propriedades de resistência.

### 2.3.2.2 Ensaios ao corte

As estruturas coladas são geralmente projetadas para que o adesivo seja essencialmente sujeito a esforços de corte, porque para este tipo de solicitação o adesivo apresenta melhores características mecânicas. Por este motivo, é muito importante o estudo do comportamento dos adesivos ao corte. Ensaios ao corte em juntas de sobreposição simples são comumente usados em testes de adesivos. A tensão de corte média na camada adesiva é dada pela carga aplicada, dividida pela área de sobreposição ligada. Algumas juntas de ensaio típicas estão ilustradas na Figura 25.

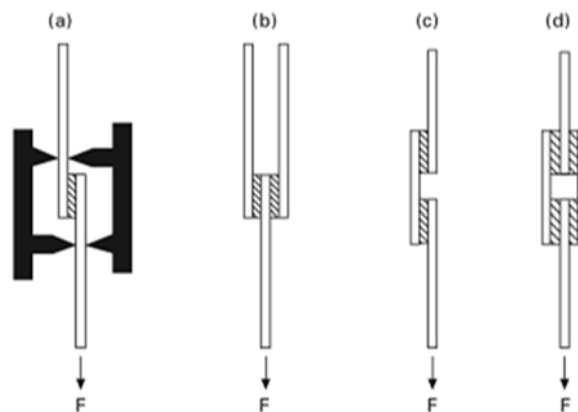


Figura 25 - Esquema típico das configurações de juntas de sobreposição mais comuns: a) sobreposição simples, com extensômetros abrangendo a linha de adesão, b) sobreposição dupla, c) sobreposição com tira simples, d) sobreposição com tira dupla.

A avaliação do comportamento ao corte pode ser realizada com o adesivo no estado maciço ou como camada fina em juntas adesivas. Existem diversos tipos de ensaios de ligações adesivas que colocam o adesivo solicitado ao corte.

O ensaio de tração numa junta de sobreposição simples é um dos métodos mais comuns para caracterizar uma junta adesiva. Muitas das aplicações de adesivos em juntas utilizam condições de sobreposição dos substratos. É um método simples, económico e pode ser realizado em máquinas universais convencionais (da Silva et al. 2011). Este ensaio é regulamentado pelas normas ASTM D1002, ISO 4587 ou outras similares. Como facilmente se percebe pela geometria do provete, existe um desalinhamento das forças de tração, mesmo quando são colocados reguladores de espessura nos locais de amarração. O ensaio em junta de sobreposição simples pode, contudo, ser usado como método comparativo para estudo de adesivos, desde que se garantam a uniformização dos restantes parâmetros que podem afetar o resultado dos ensaios. O resultado é expresso pela tensão média de corte quando ocorre a rotura. Sendo  $P$  a carga aplicada [N],  $b$  a largura [mm] da junta e  $l$  o comprimento de sobreposição [mm], a tensão média de corte,  $\tau$  [N/mm<sup>2</sup>], é dada por:

$$\tau = \frac{P}{lb}. \quad (2)$$

Neste ensaio, regulamentado pela norma ASTM D1002 ou outras similares, os aderentes estão sujeitos a uma solicitação de tração, enquanto a camada de adesivo está sujeita a esforços de corte, embora combinados com esforços de arrancamento. Os esforços de arrancamento resultam da própria geometria da junta, na qual existe um desalinhamento das forças de tração, mesmo quando são colocados calços (reguladores de espessura) nos locais de amarração (da Silva et al. 2011). Estes esforços de arrancamento são ainda mais evidentes em juntas com aderentes de baixa resistência mecânica e baixo módulo de Young (como, por exemplo, aderentes poliméricos), devido à maior flexão transversal da junta. Nestes casos, é preferível utilizar o ensaio *Block Shear*, regulamentado pela norma ASTM D4501. Com este método, os aderentes não são sujeitos a esforços de tração, diminuindo a probabilidade da rotura ocorrer pelo substrato e, para além disso, os esforços de arrancamento no adesivo são minimizados. Contudo, para a realização de ensaios segundo este método, é necessária uma ferramenta adequada para uma correta solicitação da junta. Existem vários métodos que permitem avaliar o comportamento ao corte, quer para provetes de adesivo maciço, quer para juntas: ensaio de borboleta ou Arcan e o ensaio *Thick Adherend Shear Test (TAST)*. No primeiro método, é ensaiado o adesivo maciço, enquanto no segundo método, o adesivo é testado como camada fina a ligar dois provetes espessos de aço.

O ensaio Iosipescu pode ser realizado em provetes maciços de adesivo ou em junta. Originalmente, o ensaio foi proposto para caracterizar o comportamento ao corte de metais. No seguimento de trabalhos desenvolvidos por Adams e Walrath (1987), o ensaio Iosipescu foi adotado pela norma ASTM D3379 para laminados de materiais compósitos. O ensaio é realizado num provete retangular com dois entalhes simétricos no centro do provete, conforme se ilustra na Figura 26. Este provete, que pode ser considerado uma viga, é solicitado em 4 pontos.

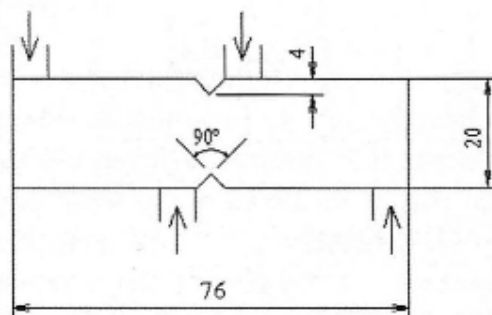


Figura 26 - Geometria e carregamento do provete para o ensaio Iosipescu (dimensões em mm).

Das metodologias de ensaio para obtenção de propriedades de corte, o ensaio TAST é dos mais populares, uma vez que tanto os dispositivos de ensaio como a realização dos provetes é relativamente fácil. Este ensaio é exclusivamente realizado em junta, sendo as dimensões indicadas na Figura 27. Os substratos devem ser metálicos e espessos para que apresentem elevada rigidez. A ideia de que a impossibilidade de flexão dos substratos conduz a um esforço de corte uniforme na junta não corresponde integralmente à realidade, porque existem basicamente duas fontes potenciais de erro, como referem Adams et al. (1997): distribuição não uniforme de tensões no adesivo e deformação dos substratos que não é normalmente contabilizada. O ensaio TAST é uma metodologia normalizada pela ISO 11003-2.2 e pela ASTM D3983. Nos Estados Unidos o ensaio é conduzido de acordo com a norma ASTM, utilizando um provete sugerido por Krieger (1988), e aplica-se à medição do módulo de corte em adesivos pouco rígidos e em que se verifique que a relação entre o módulo de elasticidade longitudinal do substrato,  $E$ , e o módulo de corte do adesivo,  $G$ , cumpram uma relação de 300:1, no mínimo. Na Europa utiliza-se um provete baseado em trabalhos conduzidos por Althof (1982), cujas dimensões são metade das propostas por Krieger (1988).

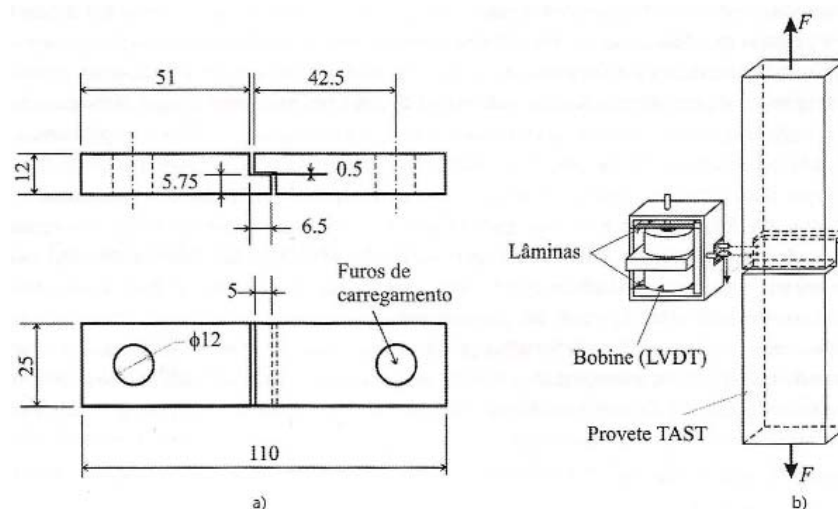


Figura 27 - Provette TAST, segundo ISO 11003-2.2: a) dimensões em mm; b) aplicação de um extensômetro.

### 2.3.2.3 Ensaios de arrancamento

Os ensaios de arrancamento são particularmente úteis para diferenciar os adesivos frágeis dos adesivos dúcteis. Para ensaiar os adesivos a este tipo particular de esforço, existem diversos métodos de ensaio. Verifica-se que a maior parte deles são utilizados para a caracterização de adesivos dúcteis, surgindo a resistência ao arrancamento como uma propriedade fornecida pelos fabricantes de adesivos. Nestes ensaios, uma parte significativa da energia é dissipada nos substratos. Os testes de arrancamento requerem, pelo menos, um aderente flexível. O termo "flexível" refere-se à capacidade do aderente dobrar  $90^\circ$ , sem quebrar ou rachar.

### 2.3.2.3.1 Ensaios de arrancamento em junta tipo T

O ensaio de arrancamento em junta tipo T é um método de ensaio bastante divulgado e que se encontra normalizado pela ASTM D1876 (Figura 28). É aplicável à caracterização da resistência ao arrancamento de ligações adesivas em substratos flexíveis.

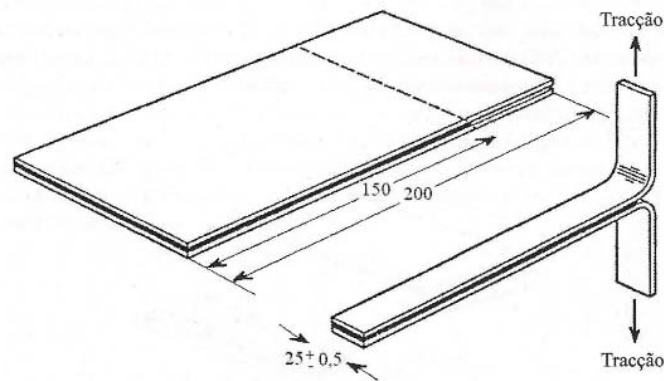


Figura 28 - Provete para ensaio de arrancamento em junta T (dimensões em mm).

### 2.3.2.3.2 Ensaios entre um substrato rígido e um substrato flexível

Existem várias metodologias disponíveis para a avaliação da resistência ao arrancamento de uma ligação adesiva, em que um dos substratos é rígido e outro é flexível. A principal diferença entre elas está no ângulo de arrancamento que se considera. O ensaio de arrancamento a 180° está representado esquematicamente na Figura 29.

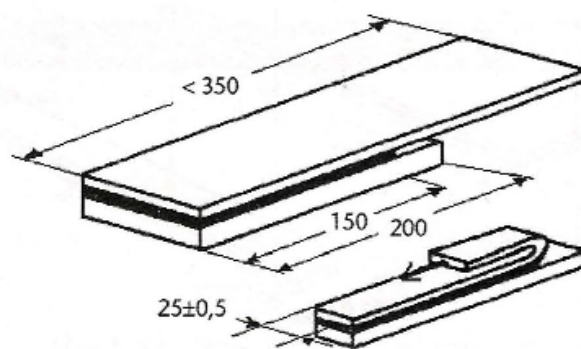


Figura 29 - Geometria de ensaio de arrancamento a 180° (dimensões em mm).

O ensaio de rolete flutuante está ilustrado na Figura 30. O mecanismo de rolete utilizado no dispositivo de carregamento permite um ângulo constante de arrancamento, que se mantém durante o ensaio.



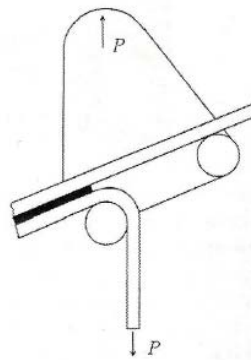


Figura 30 - Ensaio de rolete flutuante, ASTM D 3167.

O ensaio de *Climbing Drum* é normalizado pela ASTM D1781 e muito utilizado para estruturas *sandwich* em que se pretende conhecer a resistência de separação entre a pele e o núcleo. A Figura 31 ilustra a forma como este ensaio se processa sobre um provete tipo *sandwich*.

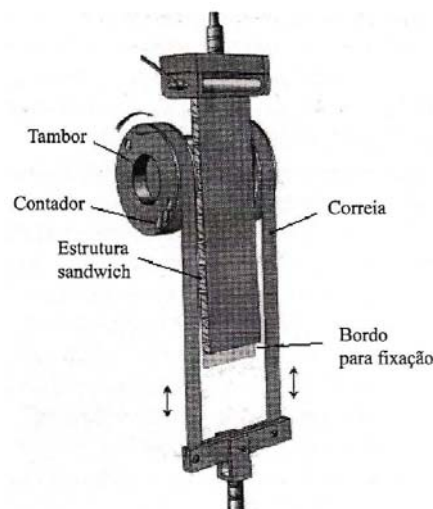


Figura 31 - Ensaio *Climbing Drum* num provete retirado de uma estrutura *sandwich*, ASTM 1781 (Broughton e Gower 2001).

#### 2.3.2.4 Ensaios de impacto

O comportamento perante solicitações de impacto é um tema particularmente importante porque os adesivos, como os polímeros em geral, são bastante sensíveis à velocidade de deformação. A resistência que um adesivo oferece nestas condições pode ser determinada com base em ensaios de impacto, semelhantes aos que estão disponíveis para materiais metálicos, Figura 32.

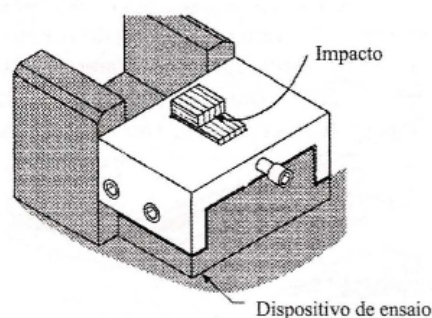


Figura 32 - Sistema de fixação para ensaios de impacto em juntas adesivas (Bezemer et al. 1988).

O resultado do ensaio é apresentado como a energia absorvida para produzir a rotura do provete, dividida pela área colada, e expresso em  $J/m^2$ . Por vezes os resultados não são muito reprodutíveis e, por isso, o ensaio não é amplamente utilizado em situações práticas. Uma razão é o facto de se verificar que a energia absorvida aumenta com a espessura do adesivo, o que significa que parte da energia medida não está relacionada exclusivamente com o tipo de junta, mas sim apenas com a camada de adesivo. Os resultados não permitem obter propriedades intrínsecas da junta, mas têm um carácter qualitativo que pode ser útil como método de comparação quando se utilizam condições de ensaio idênticas.

### 2.3.2.5 Ensaios de fadiga

O comportamento sob condições cíclicas é uma função do tipo de adesivo e, fundamentalmente, da geometria da junta. Os ensaios que são realizados têm normalmente como objetivo permitir representar num diagrama de *tensão máxima vs. número de ciclos para a rotura*, (Figura 33), o comportamento de uma determinada ligação adesiva. Este diagrama é designado por curva S-N ou curva de Wöhler, em homenagem ao engenheiro Alemão que se dedicou ao estudo do fenómeno da fadiga em materiais metálicos. A norma ASTM D3166-99 refere o procedimento que deve ser considerado para avaliação do comportamento à fadiga em juntas de sobreposição simples, aplicável a substratos metálicos e matriz polimérica. São considerados cinco ou mais níveis de tensão selecionados criteriosamente, de modo a que a rotura ocorra de forma regular num mínimo de 2000 ciclos e um máximo de, pelo menos, 10 milhões de ciclos. A cada um dos níveis de tensão são ensaiados, no mínimo, cinco provetes. Como referência inicial, pode ser tomada a tensão correspondente a 50% da resistência ao corte da junta quando solicitada em condições estáticas.

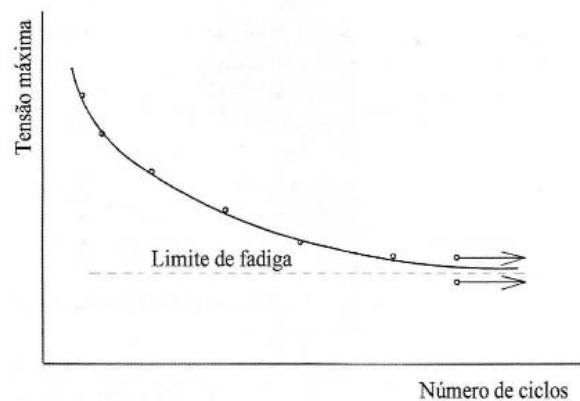


Figura 33 - Curva S-N representativa de ensaio à fadiga.

### 2.3.2.6 Ensaios de fluência

Quando uma junta adesiva se mantém sob carga durante um período de tempo suficientemente longo, sofre uma variação dimensional resultante do efeito de fluência no adesivo. Para conhecer o comportamento mecânico nestas condições utilizam-se procedimentos normalizados, vulgarmente designados por ensaios de fluência. Estes ensaios são realizados carregando provetes, normalmente juntas de sobreposição simples, segundo as dimensões previstas pela ASTM D1002, com níveis de tensão conhecidos e medindo a deformação total em função do tempo para a rotura completa da junta. Dependendo das características do adesivo, do nível de carregamento aplicado e das condições de ensaio, o tempo necessário para se verificarem deformações mensuráveis pode ser bastante longo.

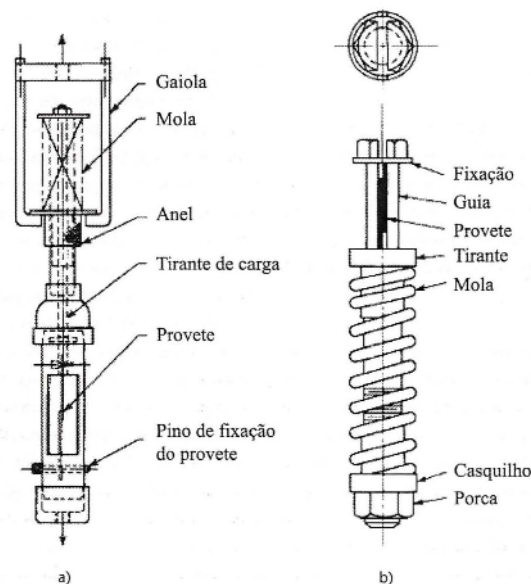


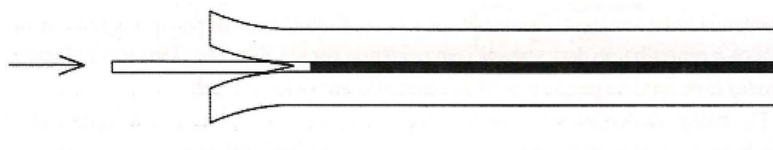
Figura 34 - Dispositivos para ensaios de fluência de acordo com as normas ASTM; a) mola carregada em tração (ASTM D 2294-96); b) mola carregada em compressão (ASTM D2293-96).

Os dispositivos de ensaio recorrem a sistemas que incorporam molas para produzirem uma tensão constante na junta. A norma ASTM D1002 refere alguns destes dispositivos, Figura 34 a) e b), aplicáveis a juntas entre substratos metálicos, ver, por exemplo, ASTM D2294-96 e ASTM D2293-96. No primeiro caso, a solicitação aplicada na junta resulta de uma ação de tração sobre a mola, enquanto no segundo caso é exercida compressão. Em qualquer dos casos, o registo durante o ensaio é o alongamento verificado entre traços que foram previamente marcados na zona de sobreposição. A espessura do filme de adesivo influencia a deformação total registada. A deformação aumenta com a espessura do adesivo. Nesta perspetiva, torna-se recomendável estabelecer a variação da deformação de fluência por unidade de espessura.

### **2.3.2.7 Ensaios de durabilidade**

A exposição às condições ambientais diminui a capacidade de resistência das juntas adesivas. O efeito da temperatura, da humidade relativa, de soluções aquosas, ultravioletas ou o contacto com outro tipo de condições agressivas reduz a durabilidade, ou seja, a capacidade de manutenção em serviço em condições normais, por um período de tempo compatível com o previsto no projeto. Os ensaios de durabilidade permitem avaliar este desempenho da junta e o efeito de várias preparações de superfície ou influência dos substratos. Idealmente, o conhecimento da durabilidade de uma junta deveria ser obtida através do ensaio em condições ambientais e de carregamento semelhantes às de serviço, por um período igual ao previsto em projeto. Contudo, em laboratório é impensável realizar ensaios com essa duração. Normalmente, os procedimentos normalizados existentes baseiam-se na utilização de ensaios de menor duração, realizados em condições ambientais que se julgam adequadas para descrever as condições de serviço. Por vezes são utilizadas metodologias de ensaio que visam acelerar determinado efeito, conjugando-as com critérios de extrapolação, como por exemplo as que se baseiam nas equações de Williams et al. (1955), tentando assim extrapolar consequências a longo prazo.

Dos ensaios de durabilidade, podemos distinguir aqueles em que o objetivo é a avaliação das condições ambientais isoladamente e os que permitem avaliar o efeito combinado das condições de carregamento e das condições ambientais. Os primeiros baseiam-se, geralmente, em ensaios de curta duração, enquanto os outros podem ser ensaios de longa duração. Os ensaios para caracterização do efeito isolado das condições ambientais têm por princípio sujeitar, durante algum tempo, as juntas adesivas a condições ambientais pré-definidas, geralmente normalizadas, e, em seguida, submetê-las a ensaios. Desta forma, é possível estabelecer uma comparação entre o que é a resistência da junta sem qualquer exposição ambiental e a resistência da junta após envelhecimento. Referiremos, pela sua maior utilização, os ensaios realizados em junta de topo e o ensaio de cunha (Figura 35), designado por *wedge test*.

Figura 35 - Ensaio de Boeing *wedge test*, ASTM D3762.

Os ensaios para caracterização do efeito combinado das condições ambientais e das condições de carregamento são os mais comuns. O procedimento está descrito na norma ASTM D2919. O dispositivo utilizado pode ser semelhante ao da Figura 36, ou então o previsto na norma D2294. Os dispositivos introduzem um esforço de tração através de uma mola (ou um par de molas), devendo a força aplicada ter a precisão de  $\pm 1\%$ . Os dispositivos são colocados nas condições ambientais desejadas e realizadas observações periódicas dos provetes. Como registo, é considerado o tempo total para a rotura.

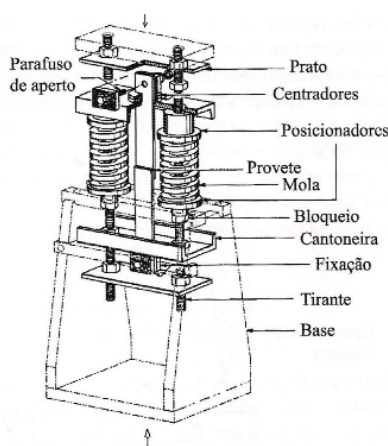


Figura 36 - Dispositivo para ensaio de durabilidade em junta de sobreposição simples, ASTM D2919.

Quando os substratos são flexíveis, é frequente utilizarem-se ensaios de arrancamento. O ensaio realizado em juntas com a forma de T é o mais habitual, pela sua simplicidade. A norma ASTM D2918 refere um método para medir a durabilidade de juntas adesivas nestas condições de solitação. O dispositivo de ensaio pode ser preparado para exposição ambiental exterior (ASTM D1828), exposição em câmara com atmosfera controlada ou imersão do provete em banhos com temperatura controlada. A Figura 37 ilustra o dispositivo sugerido para ensaios com imersão em água destilada, desionizada ou qualquer outra exposição em que a humidade relativa deva permanecer constante.

O registo pode ser feito por hora, dia ou semana, dependendo da taxa de arrancamento verificada. Para cada par de *tensão vs. condição ambiental* devem ser ensaiados três provetes. Os níveis de carregamento podem ser de 25, 50 ou 75% da resistência da junta em T, medida através do procedimento normalizado previsto pela norma ASTM D1876.

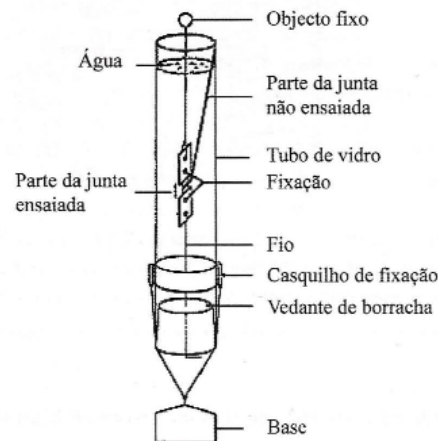


Figura 37 - Dispositivo de ensaio a utilizar em juntas T sujeitas a arrancamento, quando se pretende medir a durabilidade em condições de imersão ou de controlo da humidade relativa.

Este tipo de ensaio pode ter uma função comparativa e ser utilizado para determinar o efeito da preparação da superfície ou do substrato na durabilidade. A avaliação do efeito ambiental no comportamento das juntas adesivas em condições de carregamento cíclico é realizada por comparação entre a resistência à fadiga de juntas envelhecidas e a resistência à fadiga de juntas não envelhecidas. Os provetes, normalmente juntas de sobreposição simples, são sujeitos a um período de acondicionamento mínimo em condições ambientais específicas e, posteriormente, ensaiados de acordo com a metodologia descrita pela norma ASTM D3166-99. Deste modo, é estabelecida a comparação entre as diferentes curvas de *tensão máxima vs. número de ciclos para a rotura* encontradas.

## 2.4 Ensaios de caracterização à fratura

O conhecimento das propriedades do adesivo é indispensável para determinação das tensões na junta e para a previsão da sua resistência e tempo de vida útil. A Mecânica da Fratura sugere um tratamento diferenciado do ponto de vista do projeto para prevenção da rotura: ao invés de se focalizar na prevenção da nucleação de defeitos, admite que haverá sempre defeitos no material de um componente. A Mecânica da Fratura tem por objetivo caracterizar o comportamento dos materiais à fratura (o estudo da propagação de uma fenda). Inicialmente, a sua utilização só era usada em ligas metálicas de alto rendimento, na indústria aeroespacial, donde surgiu a Mecânica da Fratura Linear Elástica. Posteriormente, foi aplicada em construções soldadas, dando origem à Mecânica da Fratura Elasto-Plástica. Ultimamente, com o aumento do uso dos materiais compósitos, tem surgido o interesse da aplicabilidade da Mecânica da Fratura nestes materiais.

No caso da Mecânica da Fratura Linear Elástica, a tenacidade à fratura é dada pelo fator de intensidade de tensão,  $K$ , ou pela taxa de libertação de energia da deformação,  $G$ . Estes conceitos só são válidos para um grupo de materiais onde a propagação da fenda se encontra na região plástica, podendo ser usados para caracterizar a fratura frágil. Contudo, a grande maioria dos materiais encontra-se no grupo da Mecânica da Fratura Elasto-Plástica, os quais apresentam uma alta ductilidade. Nestas circunstâncias, pode ser utilizado o integral- $J$  para caracterizar a tenacidade à fratura (Yong et al. 2009). Irwin e Kies (1954) e Westergaard (1939) definiram o princípio de três modos fundamentais de solitação de carga ou de carregamento, baseado nos três eixos principais do espaço tridimensional de tensão, conforme mostra a Figura 38.

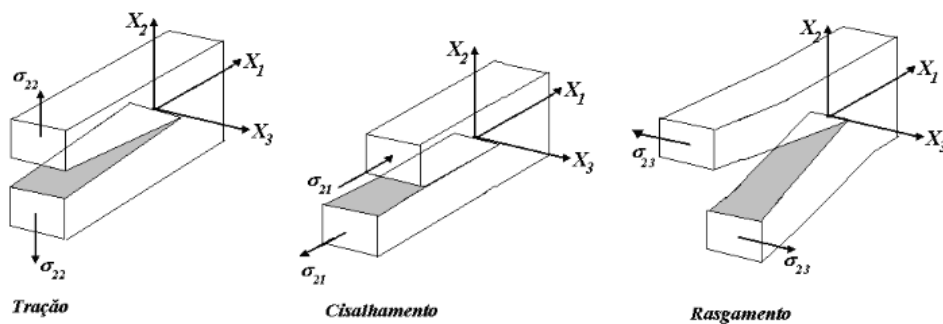


Figura 38 - Modos fundamentais de solitação de carga ou carregamento para a fratura; a) Modo I: tração (*opening*); b) Modo II: corte (*sliding*); c) Modo III: rasgamento (*tearing*).

A Mecânica da Fratura tem em conta os defeitos presentes no material, defeitos esses que podem existir devido a um mau processo de fabrico ou ocorrer durante o funcionamento da estrutura. A Mecânica da Fratura permite assim criar programas de Engenharia capazes de definir o nível de aceitação de determinados defeitos de um material, podendo pequenos defeitos em determinadas geometrias ser mais prejudiciais do que em outras. Existem dois tipos de critérios da Mecânica da Fratura convencional. O critério que se baseia no conceito do fator de concentração de tensões ( $K_I$ ) e que é definido em modo I como:

$$K_I = Y\sigma_R\sqrt{\pi a} \quad (3)$$

em que  $Y$  é um fator adimensional que depende da geometria e da distribuição de carga,  $\sigma_R$  a tensão remota aplicada na direção perpendicular à direção da fenda [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ] e  $a$  o comprimento da fenda [mm]. A propagação da fenda ocorre quando  $K_I$  atinge o seu valor crítico, ou seja:

$$K_I = K_{Ic} \quad (4)$$

Ao contrário do parâmetro  $K_I$ , que depende da geometria da peça e da fenda,  $K_{Ic}$  é uma propriedade mecânica e intrínseca do material. O critério energético baseia-se nos conceitos de taxa de

libertação de energia de deformação (no domínio elástico), assumindo que a propagação do dano ocorre quando a taxa de libertação de energia de deformação na extremidade do defeito ( $G$ ) iguala a taxa crítica de libertação de energia de deformação ( $G_c$ ), que é uma propriedade intrínseca do material. A taxa de libertação de energia  $G$  é obtida através da expressão:

$$G = \frac{dW}{dA} - \frac{dU}{dA} \quad (5)$$

onde  $W$  representa o trabalho das forças exteriores [W],  $U$  a energia interna de deformação [J] e  $A$  a área da fenda propagada [mm<sup>2</sup>].

Autores como Kinloch (1987) mostram que, para a previsão da resistência das juntas, o conceito da taxa de libertação de energia possui vantagens em relação ao critério que se baseia no conceito do fator de concentração de tensões. De facto, a taxa de libertação de energia tem um significado físico importante, enquanto a determinação de  $K_I$  nem sempre é fácil, nomeadamente no caso da propagação da fenda se dar junto a uma interface. Embora a utilização do conceito da taxa de libertação de energia possa parecer sempre vantajosa, tem também os seus problemas, nomeadamente no que toca ao modo em que uma junta é solicitada, pois se em materiais isotrópicos as fendas tendem a propagar-se em modo I, em materiais ortotrópicos e em juntas coladas, a propagação ocorre muitas vezes em modo misto (I + II). A Mecânica da Fratura possui também algumas desvantagens na previsão da resistência de juntas adesivas, devido à necessidade de definição prévia de uma pré-fenda, que por vezes não existe numa estrutura real.

A Mecânica da Fratura e os MDC têm sido objeto da atenção de vários investigadores pelas potencialidades demonstradas na avaliação da resistência mecânica de juntas coladas (da Silva e Campilho 2011). A taxa crítica de libertação de energia  $G$  é o parâmetro mais utilizado, e as situações de carregamento mais estudadas são as de modo I e modo II. Todavia, as juntas coladas representam uma aplicação típica de modo misto I e II, devido à presença simultânea de tensões normais e de corte.

Os MDC combinam elementos das metodologias da resistência dos materiais e da Mecânica da Fratura para prever o comportamento das estruturas (Kafkalidis e Thouless 2002). Uma das vantagens principais destes modelos está relacionada com a sua capacidade para simular a iniciação e o crescimento não-auto-semelhante do dano. Não é necessária a existência de uma fenda inicial, e a propagação do dano ocorre sem a intervenção do utilizador. Estes modelos não dependem de uma fenda inicial pré-definida, ao contrário das abordagens convencionais pela Mecânica de Fratura. Normalmente, usam-se critérios baseados em tensões e na mecânica da fratura para simular o início e crescimento do dano, respetivamente. Normalmente, os modelos de dano coesivos são baseados em elementos de mola (Cui e Wisnom 1993) ou elementos finitos de interface (Petrossian e Wisnom 1998),



ligando elementos sólidos bidimensionais ou tridimensionais. Estes elementos são colocados nos planos mais propícios à iniciação e propagação do dano que, em muitas estruturas, podem ser difíceis de identificar. No entanto, uma característica importante das ligações adesivas é que a propagação do dano é restrita a planos bem definidos, correspondentes a regiões perto ou nas interfaces entre o adesivo e os aderentes, ou mesmo no interior do adesivo, minorando assim esta limitação dos MDC. Estes modelos baseiam-se, geralmente, numa relação de amaciamento entre as tensões e os deslocamentos relativos entre as faces da fenda, simulando-se assim uma degradação gradual das propriedades materiais. A forma destas leis de amaciamento também pode ser adaptada ao comportamento do material ou interface que estão a simular. Este princípio também pode ser aplicado à plasticidade da camada de adesivo, que pode ser simulada com leis trapezoidais (Campilho et al. 2008). As áreas debaixo de cada lei coesiva, em cada modo, são igualadas à taxa crítica de libertação de energia de deformação do adesivo ou interface no respetivo modo (I ou II). Em modo puro, a propagação de dano num determinado ponto de integração ocorre quando as tensões forem libertadas na respetiva lei de tração-separação. Em modo misto, os critérios energéticos são muitas vezes usados para combinar os modos puros I e II (análises bidimensionais) ou I, II e III (análises tridimensionais), simulando assim o comportamento típico de modo misto inerente a estas juntas. Com esta metodologia, é possível obter a curva  $P-\delta$  até à rotura e o modo de rotura respetivo.

#### **2.4.1 Modo I**

No modo puro I (tração), o teste *Double-Cantilever Beam* (DCB) é o mais comumente utilizado, devido à sua simplicidade. Este ensaio está atualmente normalizado para a medição de  $G_{Ic}$  em juntas coladas (ASTM D3433-99). É considerada uma região inicial, de comprimento  $a_0$ , isenta de adesivo (pré-fenda). Deve-se providenciar um sistema de fixação à máquina auto alinhante, de modo a garantir o correto alinhamento da solitação. A norma preconiza ainda que a velocidade de solitação deve ser fixada de modo a induzir o início da propagação da pré-fenda, um minuto após o começo do ensaio (de Moura et al. 2008a). A velocidade de solitação está, em geral, compreendida entre 0,5 e 3 mm/min, dependendo da geometria e das características dos materiais do provete considerado. Durante o ensaio, regista-se a carga  $P$  e o deslocamento  $\delta$  para os correspondentes valores de comprimento de fenda  $a$ .

Os provetes DCB são constituídos por dois braços de igual comprimento ( $L$ ), espessura ( $h$ ) e largura ( $B$ ). No caso de juntas coladas, o adesivo encontra-se entre os substratos e possui uma espessura ( $t$ ), sendo considerado um comprimento de fenda inicial ( $a_0$ ) desde a zona onde é aplicada a solicitação até à extremidade da pré-fenda presente no adesivo, a qual se propaga sob ação das forças  $P$ , como se pode constatar na Figura 39.

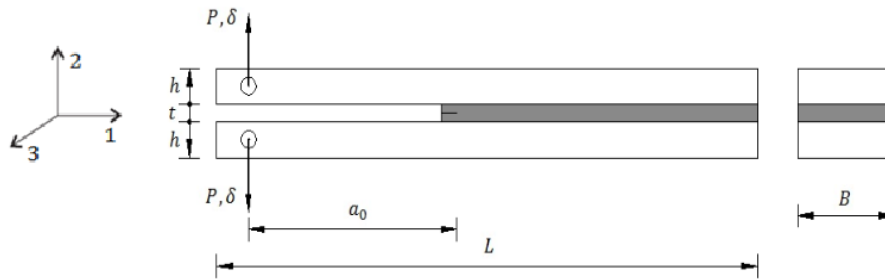


Figura 39 - Representação esquemática do provete DCB.

À medida que o provete é solicitado em abertura (modo I), são registados os valores da força ( $P$ ), do deslocamento ( $\delta$ ) e do comprimento de fenda ( $a$ ) de modo a calcular o valor da energia crítica de fratura ( $G_{Ic}$ ). A uma dada altura, a força  $P$  provoca a variação do comprimento da fenda. Existem vários métodos de obtenção de  $G_{Ic}$ , nomeadamente métodos baseados na teoria das vigas (corrigida ou não), métodos baseados no comprimento equivalente ou o integral- $J$ .

#### 2.4.2 Modo II

Não existe até ao momento qualquer norma para a caracterização à fratura em modo II de juntas coladas. A maior parte dos artigos publicados sobre o tema baseia-se em ensaios geralmente utilizados para a caracterização da fratura interlaminar de modo II em materiais compósitos. Neste contexto, destacam-se os ensaios ENF, ELS e 4ENF (Figura 40). O ensaio ELS apresenta algumas dificuldades na correta obtenção de  $G_{IIc}$  relacionadas com a existência de grandes deslocamentos e alguma sensibilidade às condições de aperto (de Moura et al. 2008b). O ensaio 4ENF requer um dispositivo de ensaio mais sofisticado e apresenta alguns problemas relacionados com a influência do atrito na região da pré-fenda (Schuecker e Davidson 2000). O ensaio ENF é o mais utilizado para a caracterização de materiais à fratura em modo II, sobretudo devido à sua simplicidade.

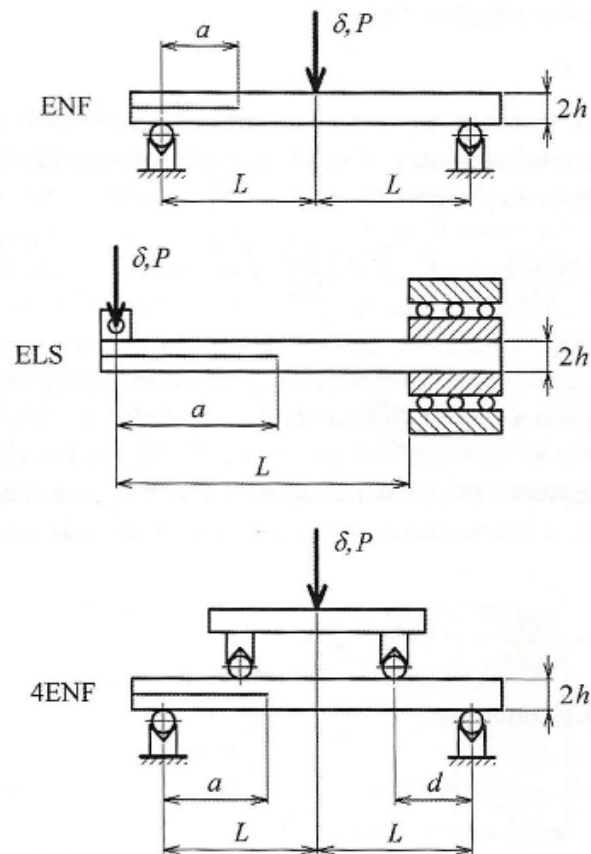


Figura 40 - Representação esquemática dos ensaios ENF, ELS e 4ENF.

O ensaio ENF pode ser descrito como uma viga simplesmente apoiada, solicitada a meio vão por uma carga de intensidade variável, e velocidade de sollicitação constante. A representação esquemática de um provete ENF é apresentada na Figura 41, onde  $a$  é o comprimento de fenda inicial [mm],  $2L$  é a distância entre apoios [mm],  $2L_1$  é o comprimento do provete [mm],  $2h$  é a altura do provete [mm],  $B$  a largura do provete [mm],  $P$  é a carga aplicada [N] e  $\delta$  o deslocamento [mm]. São conhecidas algumas dificuldades durante a obtenção de  $G_{IIc}$  para juntas coladas pelo método ENF. Devido ao tipo de sollicitação aplicada, a fenda propaga-se sem separação dos aderentes, o que dificulta a correta medição de  $a$ . Uma vez que a fenda cresce sem abertura, não dá uma clara visualização da ponta da mesma (Blackman et al. 2006). Isto é particularmente significativo, já que as técnicas de redução de dados clássicas geralmente necessitam da medição de  $a$  durante a propagação.

Nos ensaios ENF são empregues provetes com a forma representada na Figura 41, dotados de uma fenda inicial com comprimento  $a_0$ . A meio do vão do provete é aplicada uma força  $P$ , que provoca a variação do comprimento da fenda. As grandezas medidas durante o ensaio são  $P$  e  $a$ , além do deslocamento  $\delta$  do ponto de aplicação da força  $P$ . Para que a propagação da fenda seja estável, é

necessário que o comprimento de fenda inicial seja pelo menos igual a 70% de metade do vão (Yoshihara 2004).

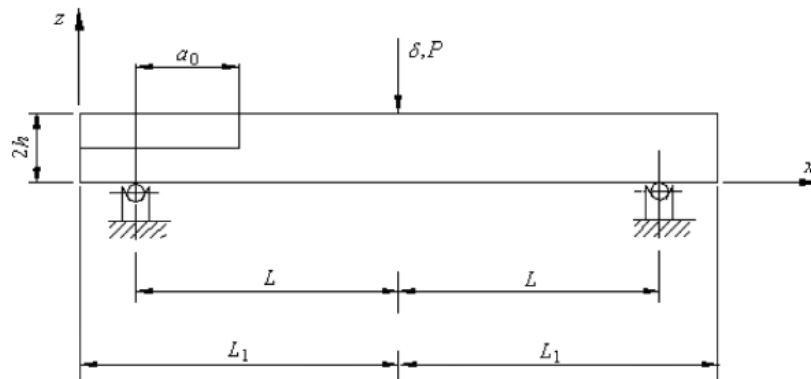


Figura 41 - Geometria do provete ENF (Chai 1988)

É importante referir que a fenda está localizada no eixo neutro do provete (meio da espessura), pelo que a sua propagação é controlada pelas tensões de corte, traduzindo assim um efeito de modo II puro.

### 2.4.3 Modo misto I + II

Como já foi referido, as juntas coladas estão geralmente submetidas ao efeito combinado de tensões normais e de corte. Existem diversos ensaios para a caracterização do comportamento de juntas coladas em modo misto, embora nenhum deles esteja normalizado. Alguns autores (Russel e Street 1985; Xu et al. 1995; Parvatareddy e Dillard 1999) usaram o ensaio *Mixed-Mode Flexure* (MMF) que é similar ao ensaio ENF. No ensaio MMF, uma das extremidades do provete está apenas apoiada no braço superior (Figura 42), o que origina um modo de abertura (modo I) e também um modo de corte (modo II).

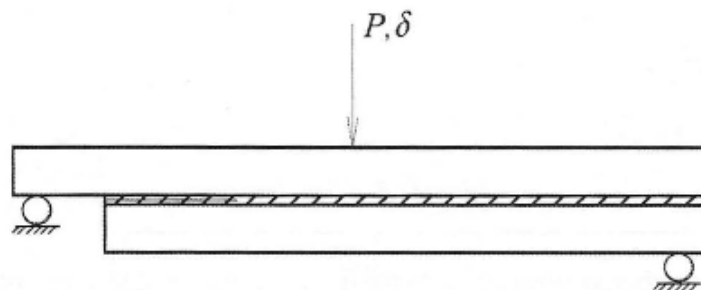


Figura 42 - Representação esquemática do ensaio MMF.

Uma alternativa é o ensaio DCB assimétrico (*Asymmetric Double Cantilever Beam (ADCB)*), em que a diferença de espessuras dos braços do provete origina a combinação de solicitações (Figura 43).

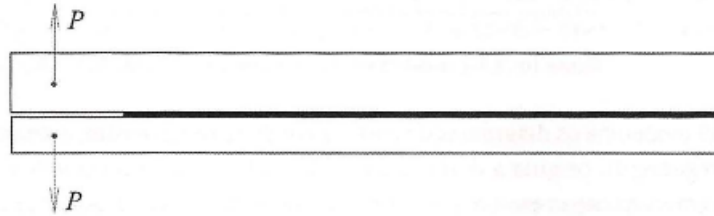


Figura 43 - Representação esquemática do ensaio ADCB.

Convém referir que, nestes ensaios, a variação da relação entre modos requer alterações geométricas aos provetes. Para obviar a esta dificuldade, Pang (1995) propôs o ensaio *Compact Mixed-Mode (CMM)* que, dependendo da orientação da solicitação relativamente ao provete, permite a obtenção de diferentes combinações de solicitações. Um ensaio que já se encontra normalizado (ASTM D 6671), no caso da caracterização à fratura interlaminar de compósitos em modo misto, é o ensaio *Mixed-Mode Bending (MMB)*. Este ensaio, inicialmente desenvolvido por Reeder e Crews (1990; 1991), tem vindo a sofrer aperfeiçoamentos e já alguns autores o utilizaram no contexto de juntas coladas (Liu et al. 2000; Dillard et al. 2009). O ensaio MMB baseia-se na combinação do ensaio DCB para modo I puro com o ensaio ENF para modo II puro (Figura 44). Basicamente, trata-se de um ensaio ENF ao qual é adicionada uma solicitação em modo de abertura da fenda. O valor relativo das duas solicitações aplicadas ao provete determina o rácio de modo misto na extremidade da fenda. As duas solicitações podem ser aplicadas através de um braço submetido a uma única força  $P$ . A distância  $c$  define o valor relativo das duas solicitações no provete e determina o rácio de modo misto existente num dado ensaio. Uma das vantagens deste tipo de ensaio está relacionada com a possibilidade de se poder testar diferentes rácios de modo misto sem ser necessário alterar a geometria dos provetes, bastando para tal variar o comprimento  $c$  (Reeder e Crews 1990). Verifica-se também que, para a maioria das configurações de modo misto, a propagação é estável, embora a iniciação seja instável. Finalmente, refira-se também que a relação de modo misto se mantém praticamente constante durante a propagação da fenda.

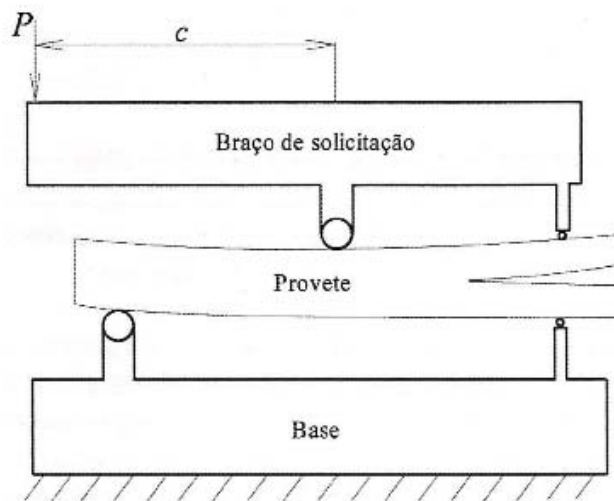


Figura 44 - Representação esquemática do ensaio MMB.

Chaves (2013) desenvolveu um dispositivo de teste à fratura de juntas adesivas para modo I, modo II e modo misto I+II que permite obter o envelope de fratura completo sem necessidade de medição do comprimento de fenda.

## 2.5 Métodos para determinação do $G_{IIc}$ pelo ensaio ENF

A determinação do  $G_{IIc}$  pelo ensaio ENF pode-se dividir em três tipos de métodos:

- Os que necessitam da medição do comprimento de fenda;
- Os que se baseiam no comprimento de fenda equivalente;
- O método do integral- $J$ .

### 2.5.1 Métodos que requerem a medição do comprimento de fenda

Existem diversos 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 propagação. Enquanto os métodos CCM e CBT provaram ser bastante precisos, DBT geralmente subestima  $G_{IIc}$  por causa da ausência de correções para levar em conta as deformações de corte. Nos adesivos dúcteis, devido à existência de uma Zona de Processo de Fratura (ZPF) desenvolvida na frente da extremidade da fenda, ocorrem fenômenos como plasticidade e iniciação de micro fendas. Estes fenômenos dificultam a localização da extremidade da fenda durante o ensaio, o que pode levar a erros significativos na caracterização à fratura.

Estes métodos dependem da medição do comprimento de fenda ( $a$ ) durante a realização do ensaio, o que nem sempre é uma tarefa fácil sem o auxílio de equipamento de visualização. As características do adesivo influenciam grandemente a visualização do deslocamento da extremidade da fenda, pois o ensaio ENF dá-se sem separação dos aderentes. Todas estas ocorrências levam a que nem sempre se obtenha a precisão necessária na monitorização do comprimento de fenda durante o ensaio.

A energia de fratura é medida classicamente usando o método CCM ou por meio da CBT. No que diz respeito ao CCM, a taxa de libertação de energia é avaliada através da equação de Irwin-Kies:

$$G_{II} = \frac{P^2}{2B} \times \frac{dC}{da}, \quad (6)$$

sendo a flexibilidade dada pela relação  $C = \delta/P$  durante a propagação da fenda, ou seja,  $C = f(a)$ . Normalmente, são utilizados polinómios cúbicos ( $C = C_3 a^3 + C_2 a^2 + C_1 a + C_0$ ) para ajustar as curvas  $C = f(a)$ , apesar do método por vezes apresentar problemas de calibração do polinómio para efetuar a derivada  $dC/da$ . Também podem ser utilizadas teorias das vigas para obtenção dos valores  $G_{IIc}$ .

O método DBT, com base na teoria das vigas direta, usa a seguinte expressão para o cálculo de  $G_{IIc}$ :

$$G_{IIc} = \frac{9P\delta a^2}{2B(2L^3 + 3a^3)} \quad (7)$$

em que  $L$  é o comprimento de metade da amostra [mm]. Alternativamente, pode ser usado o CBT, através da expressão seguinte:

$$G_{II} = \frac{9P^2 \left( a + |\Delta_{II}|^2 \right)}{4B^2 h^3 E_1} \quad (8)$$

$E_1$  representa o módulo de elasticidade longitudinal e  $\Delta_{II}$  a correção do comprimento da fenda responsável por efeitos de rotação e corte ( $\Delta_{II} = 0.49\Delta_I$ ), onde:

$$\Delta_I = h \sqrt{\frac{E_1}{11G_{13}} \left[ 3 - 2 \left( \frac{\Gamma}{1+\Gamma} \right)^2 \right]} \quad (9)$$

com

$$\Gamma = 1,18 \frac{\sqrt{E_1 E_3}}{G_{13}} \quad (10)$$

O parâmetro  $E_3$  representa o módulo de elasticidade longitudinal na direção local 3 e  $G_{13}$  o módulo de corte transversal. Ambos os métodos CCM e CBT exigem um acompanhamento do comprimento da fenda, o que não é fácil de realizar com a precisão necessária, uma vez que a fenda se propaga sem abertura, tornando difícil a identificação da sua ponta.

Os métodos propostos permitem determinar a "curva-R", que relaciona o  $G_{II}$  com  $a$ , e cujo patamar dá o valor crítico de  $G_{II}$ , ou seja, o  $G_{IIc}$  (Figura 45).

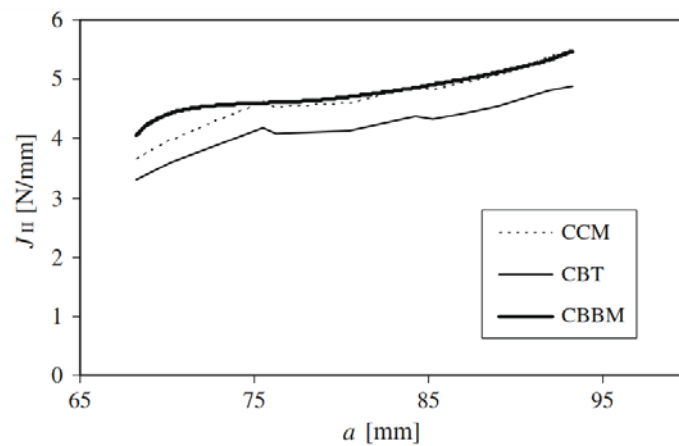


Figura 45 - Curva-R experimental obtida pelo CCM, CBT e CBBM (Campilho et al. 2009c).

### 2.5.2 Métodos baseados no comprimento de fenda equivalente

Conforme referido anteriormente, a medição do valor de  $a$  durante o ensaio ENF acarreta algumas dificuldades. Para adesivos com alguma ductilidade, a energia dissipada na ZPF durante a propagação da fenda também deve ser considerada. Para superar estas dificuldades, utiliza-se o CBBM proposto por de Moura et al. (2008), método este dependente do valor da flexibilidade  $C = P/\delta$  durante o ensaio e baseado no conceito de fenda equivalente  $a_{eq}$  e na Teoria de Vigas de Timoshenko.

O comprimento de fenda equivalente pode ser calculado, considerando  $a_{eq}$  em vez de  $a$ , como função do valor da flexibilidade total do provete, registada durante o ensaio (Figura 46), sendo  $a_{eq} = a + |\Delta| + \Delta_{aZPF}$ . O parâmetro  $\Delta$  é um fator de correção do comprimento de fenda inicial  $a_0$ , obtido através da regressão linear do valor da flexibilidade  $C^{1/3}=f(a_0)$ . Este parâmetro pode ser determinado numericamente, utilizando os diferentes comprimentos de fenda iniciais (Figura 47).



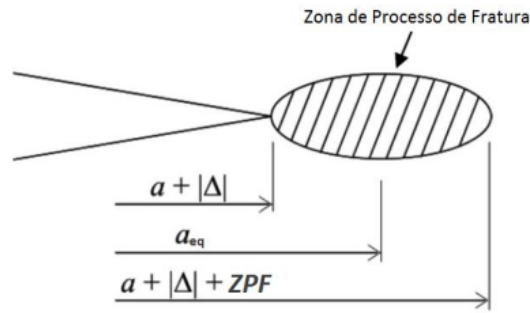


Figura 46 - Representação esquemática da ZPF e do conceito de fenda equivalente (de Moura et al. 2008a).

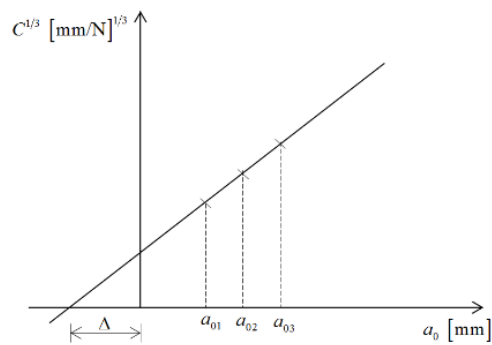


Figura 47 - Representação esquemática da obtenção do fator de correção do comprimento de fenda inicial.

Durante a propagação, a flexibilidade experimental incorpora não só o comprimento de fenda real ( $a$ ), como também o efeito da ZPF. A partir do Teorema de Castigliano pode-se escrever:

$$C = \frac{3a^3 + 2L^3}{8E_1 Bh^3} + \frac{3L}{10G_{13} Bh} \quad (11)$$

Como o módulo de flexão desempenha um papel fundamental da curva  $P-\delta$ , este pode ser calculado pela expressão anterior a partir da flexibilidade inicial  $C_0$  e o comprimento de fenda inicial  $a_0$

$$E_f = \frac{3a_0^3 + 2L^3}{8Bh^3 C_{0\text{corr}}} \quad (12)$$

onde  $C_{0\text{corr}}$  é dado por

$$C_{0\text{corr}} = C_0 - \frac{3L}{10G_{13} Bh} \quad (13)$$

Como tal, durante a propagação da fenda, é considerada uma correção ao comprimento de fenda real na expressão (11) para ter em conta com a ZPF. Substituindo  $E_f$  (expressão (12)) e  $a_{\text{eq}}$  no lugar de  $E_1$  e  $a$ , respetivamente, na expressão (11) pode-se escrever

$$a_{\text{eq}} = a + \Delta a_{\text{ZPF}} = \left[ \frac{C_{\text{corr}}}{C_{0\text{corr}}} a_0^3 + \frac{2}{3} \left( \frac{C_{\text{corr}}}{C_{0\text{corr}}} - 1 \right) L^3 \right]^{1/3}, \quad (14)$$

onde  $C_{\text{corr}}$  é dado pela expressão (13) considerando  $C$  em vez de  $C_0$ . A taxa crítica de liberação de energia de deformação em modo II ( $G_{\text{IIc}}$ ) pode ser obtida a partir da expressão de Irwin-Kies, resultando em

$$G_{\text{IIc}} = \frac{9P^2 a_{\text{eq}}^2}{16B^2 h^3 E_f}. \quad (15)$$

Seguindo esta metodologia, a curva- $R$  em modo II é obtida em função de  $a_{\text{eq}}$  e a energia de fratura crítica  $G_{\text{IIc}}$  é obtida a partir do seu patamar. O método depende apenas dos dados de deslocamento de carga obtidos durante o ensaio experimental. Assim, é superado o problema associado com a monitorização do comprimento de fenda, 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, uma vez que a sua presença afeta o comportamento de fratura.

O método proposto evita assim a medição do comprimento de fenda. A partir dos dados de força e deslocamento adquiridos no ensaio experimental, pode-se traçar diretamente a curva- $R$ , em função da fenda equivalente. A parte ascendente inicial da curva- $R$  corresponde ao desenvolvimento da ZPF à frente da ponta da pré-fenda. Quando a ZPF está completamente desenvolvida, a fenda começa a propagar, a fim de definir um patamar evidente na curva- $R$ . Este patamar define a energia de fratura em modo II de carregamento.

### 2.5.3 Métodos baseados no Integral- $J$

O conceito de Integral- $J$ , proposto inicialmente por Rice (1968), tem um tratamento essencialmente mecânico, apoiado numa forte base matemática, desconsiderando aspetos micro estruturais da fratura. Andersson e Stigh (2004) obtiveram as relações tração-deformação que são determinadas por deformação de casca pura. A taxa de liberação de energia e a energia de fratura estão intimamente relacionadas com a lei constitutiva. Isto é mostrado pelo uso da expressão geral do integral- $J$  (Rice 1968),

$$J = \int_c \left( U dy - T \times \frac{\partial u}{\partial x} dc \right), \quad (16)$$

onde  $C$  define o caminho em sentido anti-horário em torno da ponta da fenda,  $U$  é a densidade de energia de deformação do material [J],  $T$  é o vetor de tração, e  $u$  é o campo de deformação.

Stigh et al. (2010), em trabalho realizado baseado no pressuposto da existência de uma lei coesiva, concluíram que, para as camadas do adesivo, a lei coesiva é independente das partes ligadas, refletindo as propriedades do adesivo, podendo o integral- $J$  ser calculado ao longo de um caminho arbitrário que contorna a fenda. Para a fratura em modo II pelo ensaio ENF, está disponível uma formulação de cálculo de  $G_{IIc}$  pelo método do integral- $J$  (Zhu et al. 2009). O valor do integral- $J$  é dado por:

$$G_{II} = \frac{9}{16} \frac{(P_u a)^2}{E h^3} + \frac{3}{8} \frac{P_u \delta_t}{h}, \quad (17)$$

onde  $P_u$  representa a carga por unidade de largura [MPa],  $a$  o comprimento de fenda [mm],  $h$  a espessura dos aderentes [mm],  $E$  o módulo de Young dos aderentes [GPa] e  $\delta_t$  o deslocamento entre os aderentes superior e inferior na extremidade da fenda [mm]. Pela avaliação do integral- $J$  ao longo de um caminho exterior à zona de processo de fratura, pode-se escrever:

$$G_{II} = \int_0^{\delta_t} \tau(\delta_t) d\delta_t, \quad (18)$$

onde  $\delta_t$  e  $\delta_c$  são, respetivamente o deslocamento atual em corte na ponta da fenda e o deslocamento de rotura ao corte na ponta da fenda. Pela diferenciação da expressão anterior obtém-se:

$$\tau(\delta_t) = \frac{\partial G_{II}}{\partial \delta_t}. \quad (19)$$

A expressão obtida indica que é possível obter a relação entre  $\tau$  e  $\delta_t$ , ou seja, a lei coesiva em corte do adesivo, por diferenciação da curva de  $G_{II}$  em função do valor medido durante o ensaio de  $\delta_t$ . O comportamento observado em ensaio consiste numa curva crescente de  $G_{II}=f(\delta_t)$  até um patamar, que ocorre aquando do início da propagação da fenda e corresponde a  $G_{II}=G_{IIc}$ , e cuja diferenciação resulta diretamente na lei coesiva experimental para a camada de adesivo. Assim, o procedimento do ensaio consiste em medir a relação de  $P$ ,  $a$  e  $\delta_t$ .

# 3 Trabalho experimental

## 3.1 Geometria dos provetes ENF

Os provetes para os ensaios ENF foram produzidos seguindo a geometria indicada na Figura 48. Foram fabricadas 3 séries de 8 provetes, variando o tipo de adesivo utilizado (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752).

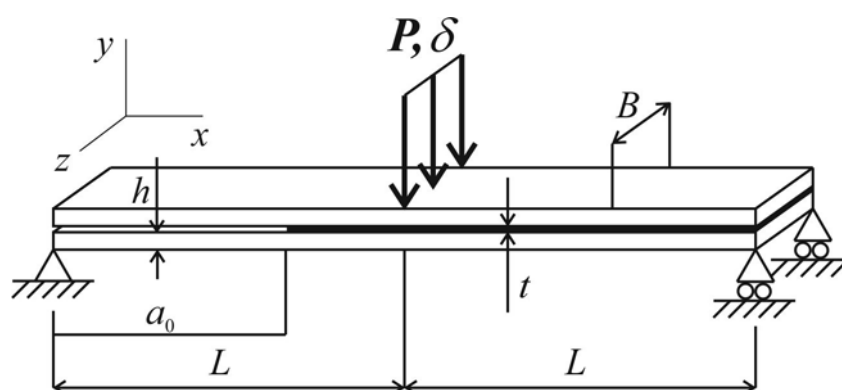


Figura 48 - Geometria de um provete ENF.

A Figura 48 mostra as dimensões características do provete para ensaio ENF, que são definidas como se segue:

$a_0$  - Comprimento de pré-fenda inicial (mm);

$L$  - Distância entre punção de carga e rolete de apoio (mm);

$h$  - Espessura de substrato (mm);

$t$  - Espessura de adesivo (mm);

$P$  - Carregamento (N);

$\delta$  - Deslocamento (mm);

$B$  - Largura do substrato (mm).

Foram consideradas as seguintes dimensões:  $L=100$  mm,  $B=25$  mm e  $h=3$  mm. A Tabela 4 apresenta a identificação dos provetes e os valores individuais de pré-fenda.

Tabela 4 - Identificação dos provetes de ensaio e respectivas dimensões (mm).

Adesivo	Provete	Pré-fenda $a_0$ (mm)
Araldite® AV138	AV138_1	65,90
	AV138_2	51,65
	AV138_3	50,60
	AV138_4	84,80
	AV138_5	66,10
	AV138_6	64,15
	AV138_7	67,80
	AV138_8	66,15
Araldite® 2015	A2015_1	48,84
	A2015_2	53,87
	A2015_3	51,60
	A2015_4	48,76
	A2015_5	49,67
	A2015_6	48,93
	A2015_7	52,19
	A2015_8	51,22
SikaForce® 7752 L60	S7752_1	49,92
	S7752_2	60,13
	S7752_3	58,02
	S7752_4	58,84
	S7752_5	53,31
	S7752_6	51,49
	S7752_7	54,53
	S7752_8	55,97

### 3.2 Substratos para os provetes ENF

Os substratos utilizados na realização dos provetes ENF consistem na liga de alumínio 6082 T651, que é uma liga da série 6000, com 82% de alumínio; e magnésio e silício como principais elementos de liga. Esta liga apresenta excelente resistência à corrosão e boa soldabilidade. A liga 6082

é conhecida como uma liga estrutural, que sofreu tratamento térmico, solubilizada e envelhecida artificialmente. A Tabela 5 apresenta a composição química da liga AW 6082-T651.

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

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

Na Tabela 6 apresentam-se as propriedades mecânicas da liga de alumínio, conforme especificado na ficha técnica do fabricante.

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

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

Em forma de placa, a liga de alumínio 6082 é a liga mais amplamente utilizada para maquinagem, tendo as mais diversas aplicações estruturais. A liga 6082 apresenta alta resistência, podendo ser comercializada sob a forma de barras, tubos e perfis. Em termos de aplicações em estruturas coladas, devido à sua boa relação resistência/peso, a liga 6082 tem ampla aplicação nas indústrias aeronáuticas e automóvel.

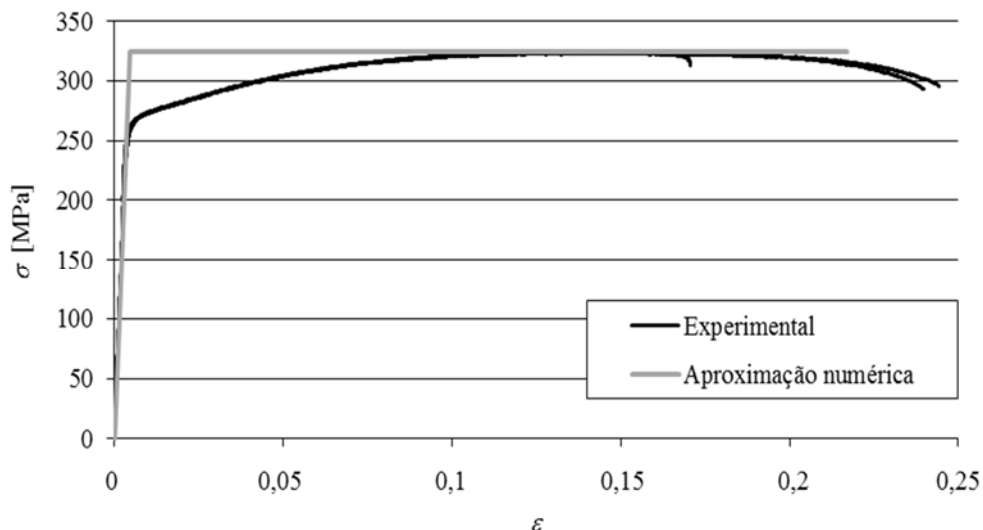


Figura 49 - Curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  da liga de alumínio AW 6082-T651 (Campilho et al. 2011).

A Figura 49 representa as curvas tensão-deformação ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) desta liga de alumínio à tração, obtidas no trabalho de Campilho et al. (2011), de acordo com a norma ASTM-E8M-04. Dos ensaios

realizados registaram-se as seguintes propriedades: Módulo de Young ( $E$ ) de  $70,07 \pm 0,83$  GPa, tensão de cedência ( $\sigma_y$ ) de  $261,67 \pm 7,65$  MPa, tensão de rotura ( $\sigma_f$ ) de  $324 \pm 0,16$  MPa e deformação de rotura à tração ( $\epsilon_f$ ) de  $21,70 \pm 4,24\%$ . Na figura 56 apresenta-se também uma possível aproximação numérica do comportamento desta liga para introdução em modelos de Elementos Finitos, e que foi utilizada neste trabalho para a modelação dos ensaios ENF.

### 3.3 Adesivos

Dos adesivos selecionados, todos eles são bi-componente (resina e endurecedor), dois deles epóxicos (Araldite® AV138 e 2015) e um poliuretano (SikaForce® 7752). Todos estes adesivos são caracterizados pela fácil aplicação devido à viscosidade relativamente baixa. A forma bi-componente é vantajosa em relação à de filme, na medida em que permite flexibilidade na escolha da espessura da camada adesiva, incluindo a possibilidade de compensar alguma falta de planeza dos aderentes. Estes adesivos apresentam uma ductilidade crescente pela ordem apresentada, desde a consideração de um adesivo frágil até um adesivo bastante dúctil, o que vai permitir a caracterização e modelação dos ensaios em condições diferentes, e uma validação do método numérico para uma gama alargada de comportamentos do adesivo.

#### 3.3.1 Araldite® AV138

O Araldite® AV138 (Figura 50) com o endurecedor HV998 é um adesivo do fabricante Huntsman Advanced Materials considerado estrutural de base epóxida, termoendurecível de dois componentes, apresentando-se na forma de pasta tixotrópica de cura à temperatura ambiente, com baixa emissão de gases e perdas voláteis, excelente resistência química e resistente a temperaturas até aos 120 °C.



Figura 50 - Adesivo epóxico Araldite® AV138/HV998.

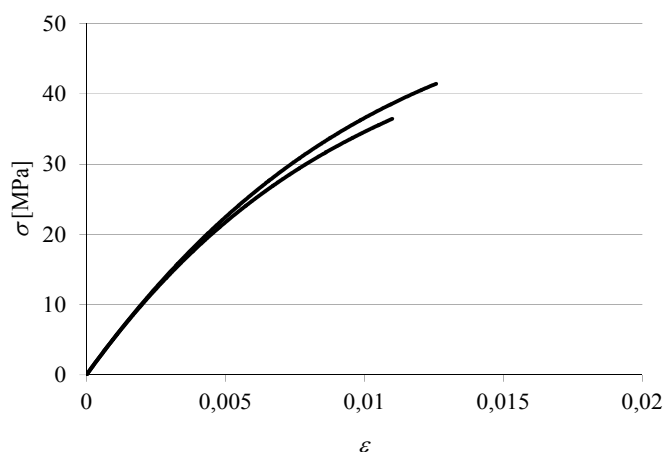


Figura 51 - Curvas  $\sigma$ - $\varepsilon$  de provetes maciços do adesivo Araldite® AV138 (Campilho et al. 2013).

Tabela 7 - Propriedades elásticas e plásticas do adesivo Araldite® AV138 (Neto et al. 2012; Campilho et al.2013).

Propriedades	Araldite® AV138
Módulo de <i>Young</i> , $E$ [GPa]	4,89±0,81
Coefficiente de <i>Poisson</i> , $\nu^b$	0,35
Tensão de cedência à tração, $\sigma_y$ [MPa]	36,49±2,47
Tensão de rotura à tração, $\sigma_f$ [MPa]	39,45±3,18
Deformação de rotura à tração, $\varepsilon_f$ [%]	1,21±0,10
Módulo de elasticidade transversal, $G$ [GPa]	1,56±0,01
Tensão de cedência ao corte, $\tau_y$ [MPa]	25,1±0,33
Tensão de rotura ao corte, $\tau_f$ [MPa]	30,2±0,40
Deformação de rotura ao corte, $\gamma_f$ [%]	7,8±0,7
Tenacidade à tração, $G_{Ic}$ [N/mm]	0,20 <sup>a</sup>
Tenacidade ao corte, $G_{IIc}$ [N/mm]	0,38 <sup>a</sup>
<sup>a</sup> valores estimados na referência (Neto 2011)	
<sup>b</sup> valor do fabricante	

O Araldite® AV138 com o endurecedor HV998, quando combinado nas proporções corretas, descreve-se como um adesivo epóxico frágil mas de elevada resistência, adequado para ligar materiais de famílias diferentes tais como metais, compósitos e polímeros (Campilho et al. 2013). A Figura 51



apresenta curvas típicas  $\sigma$ - $\varepsilon$  de provetes maciços ensaiados à tração, obtidas experimentalmente no trabalho Campilho et al. (2013).

A Tabela 7 indica as propriedades mecânicas elásticas e plásticas mais relevantes do adesivo, obtidas em trabalhos realizados anteriormente (Neto et al. 2012; Campilho et al. 2013).

### 3.3.2 Araldite® 2015

O Araldite® 2015 (Figura 52) é um adesivo do fabricante Huntsman Advanced Materials considerado estrutural, de base epóxida, termoendurecível de dois componentes, apresentando-se na forma de pasta tixotrópica de cura à temperatura ambiente, com baixa contração e uma alta resistência ao corte e clivagem, apresentando uma ductilidade moderada.



Figura 52 - Adesivo epóxido Araldite® 2015 (50 ml).

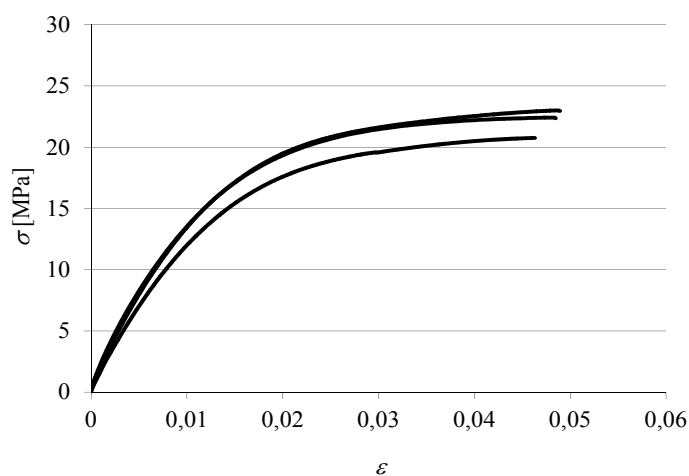


Figura 53 - Curvas  $\sigma$ - $\varepsilon$  de provetes maciços do adesivo Araldite® 2015 (Campilho et al. 2013).

A resistência e durabilidade das ligações efetuadas por este adesivo são dependentes de um tratamento adequado das superfícies a ligar. No mínimo, as superfícies a ligar devem ser limpas com um bom agente desengordurante tal como acetona, isopropanol (para plásticos) ou outros agentes desengordurantes, a fim de remover todos os vestígios de contaminações e sujidade. As curvas  $\sigma$ - $\varepsilon$  dos provetes maciços ensaiados à tração são dadas na Figura 53 (Campilho et al. 2013).

O adesivo Araldite® 2015, quando comparado com o adesivo Araldite® AV138, oferece uma resistência à tração e corte inferiores. No entanto, o facto de ser um adesivo dúctil possibilita a redistribuição de tensões nas regiões de concentração, tipicamente nas extremidades da zona de ligação, devido à existência de assimetria da junta e do efeito de deformação diferencial dos aderentes (Campilho et al. 2013). A Tabela 8 indica as propriedades mecânicas mais relevantes do adesivo, obtidas em trabalhos realizados anteriormente (Campilho et al. 2013).

Tabela 8 - Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® 2015 (Campilho et al. 2013).

Propriedades	Araldite® 2015
Módulo de <i>Young</i> , $E$ [GPa]	1,85±0,21
Coefficiente de <i>Poisson</i> , $\nu^a$	0,33
Tensão de cedência à tração, $\sigma_y$ [MPa]	12,63±0,61
Tensão de rotura à tração, $\sigma_f$ [MPa]	21,63±1,61
Deformação de rotura à tração, $\varepsilon_f$ [%]	4,77±0,15
Módulo de elasticidade transversal, $G$ [GPa]	0,56±0,21
Tensão de cedência ao corte, $\tau_y$ [MPa]	14,6±1,3
Tensão de rotura ao corte, $\tau_f$ [MPa]	17,9±1,8
Deformação de rotura ao corte, $\gamma_f$ [%]	43,9±3,4
Tenacidade à tração, $G_{Ic}$ [N/mm]	0,43±0,02
Tenacidade ao corte, $G_{IIc}$ [N/mm]	4,70±0,34
<sup>a</sup> valor do fabricante	

Comparando os valores deste adesivo com o Araldite® AV138, verifica-se que a deformação de rotura ao corte é quase seis vezes superior. Por outro lado, as tensões de rotura à tração e ao corte do Araldite® AV138 são praticamente o dobro das do Araldite® 2015.

### 3.3.3 SikaForce® 7752 L60

O SikaForce® 7752 L60 (VP) (Figura 54) é um adesivo poliuretano estrutural tixotrópico de 2 componentes, formado por uma resina polioliol com cargas e endurecedor de base isocianato, com baixa emissão de gases e perdas voláteis e com boa resistência a altas temperaturas.



Figura 54 - Adesivo SikaForce® 7752 L60.

Tabela 9 - Propriedades mecânicas do adesivo SikaForce® 7752 L60 (VP).

Propriedades	SikaForce® 7752
Módulo de <i>Young</i> , $E$ [GPa]	0,49±0,09
Coefficiente de <i>Poisson</i> , $\nu^a$	0,30
Tensão de cedência à tração, $\sigma_y$ [MPa]	3,24±0,48
Tensão de ruptura à tração, $\sigma_f$ [MPa]	11,48±0,25
Deformação de ruptura à tração, $\epsilon_f$ [%]	19,18±1,40
Módulo de elasticidade transversal, $G$ [GPa]	0,19±0,01
Tensão de cedência ao corte, $\tau_y$ [MPa]	5,16±1,14
Tensão de ruptura ao corte, $\tau_f$ [MPa]	10,17±0,64
Deformação de ruptura ao corte, $\gamma_f$ [%]	54,82±6,38
Tenacidade à tração, $G_{Ic}$ [N/mm]	2,36±0,17
Tenacidade ao corte, $G_{IIc}$ [N/mm]	5,41±0,47
<sup>a</sup> valor do fabricante	

O SikaForce® 7752 L60 (VP) é um adesivo que cura à temperatura ambiente, com boa resistência ao envelhecimento e à exposição química, com grande resistência ao impacto e bastante flexível a baixas temperaturas. Encontra aplicação na ligação de metais, cerâmicos, madeira e seus derivados. O SikaForce® 7752 L60 é um adesivo bastante dúctil, o que pode ser comprovado nos valores de tenacidade obtidos num trabalho anterior (Faneco 2014). A Tabela 9 indica os valores mais relevantes das propriedades mecânicas do adesivo, obtidas num trabalho realizado anteriormente (Faneco 2014).

### 3.4 Fabrico dos provetes

O trabalho experimental começou pelo fabrico de 24 provetes com a geometria ENF, 8 com cada adesivo. Os substratos de alumínio 6082 T651 utilizados nos 24 provetes de ensaio foram obtidos de chapa de 3 mm de espessura, adquiridos em tiras de  $25 \pm 1$  mm de largura. A partir destas, foram cortados 48 substratos com um comprimento de  $230 \pm 0,5$  mm. Foi utilizando um corte limpo (isento de fluídos de corte/refrigeração) em guilhotina existente nas Oficinas Mecânicas do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP). A largura dos substratos foi cuidadosamente controlada e registada em vários pontos dos provetes através de paquímetro, pois a largura é um parâmetro de entrada nas expressões de  $G_{IIc}$  elevado ao quadrado, ao contrário de outros parâmetros geométricos como o  $L$ . Foram obtidos substratos com diferenças máximas de corte de 0,5 mm no comprimento, devido à existência de um plano paralelo na mesa de corte da guilhotina. Na Tabela 10 estão representadas as principais medidas dos substratos.

Tabela 10 - Controlo dimensional dos substratos de alumínio (mm).

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

Após a obtenção de todos os substratos com as dimensões controladas, iniciou-se a preparação das superfícies através de uma decapagem mecânica por projeção de partículas utilizando uma granalhadora, com granalha de alumina (Figura 55), tendo em atenção o facto de os substratos serem finos.



Figura 55 - Granalhadora CIDBLAST, modelo RT6S.

De facto, a decapagem mecânica foi efetuada a seco em ambas as faces, com o objetivo de contrariar as tensões induzidas nos substratos pelo impacto das partículas abrasivas de grande dureza (Figura 56).

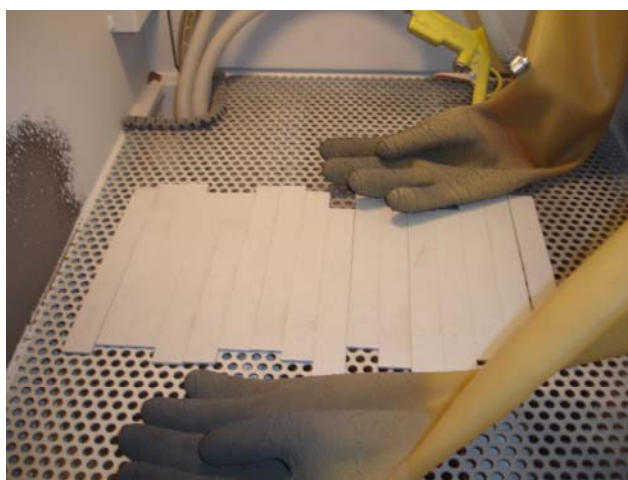


Figura 56 - Granalhagem mecânica dos substratos a seco.

A preparação da superfície é um passo crítico na união adesiva. Uma preparação da superfície de granalhagem correta é essencial para obter uma superfície limpa e molhável, e garantir uma manutenção da integridade a longo prazo das juntas coladas (da Silva et al. 2007). Concluída a decapagem mecânica, inicia-se a limpeza de todas as superfícies recorrendo a folhas de papel embebidas em acetona, até garantir a remoção total de partículas soltas deixadas pela decapagem mecânica (Figura 57).

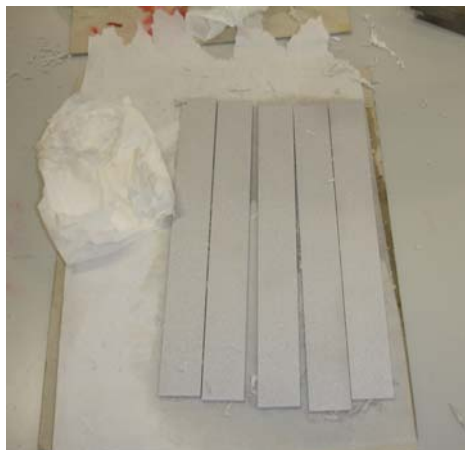


Figura 57 - Limpeza dos substratos.

Por inspeção visual averigua-se a eficácia da limpeza pela presença de brancura no papel utilizado, o que implica uma limpeza bem conseguida. Deve-se ter especial atenção para que não haja contato entre as mãos e as superfícies limpas, após terminada esta etapa. De seguida, inicia-se a identificação dos corpos de prova, distribuindo-os por séries de provetes. A forma escolhida para garantir uma espessura de adesivo constante e a obtenção da pré-fenda inicial consistiu na utilização de fitas de aço calibrado para a produção dos calços (Figura 58).

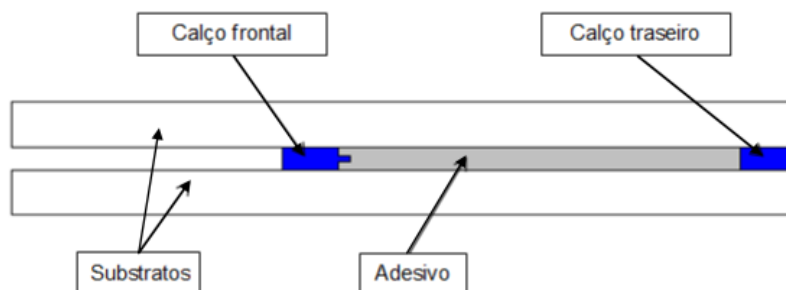


Figura 58 - Representação esquemática da localização dos calços calibrados.

Na produção dos calços traseiros foi utilizada uma fita de aço calibrado de 0,2 mm de espessura. Na produção do calço frontal foi utilizado o método proposto por Lee et al. (2004), que consiste em fabricar um calço composto por uma lâmina de 0,1 mm de espessura intercalada por duas fitas de aço calibrado de 0,05 mm de espessura, com a lâmina ligeiramente adiantada com o objetivo de criar uma pré-fenda no adesivo (Figura 59).



Figura 59 - Calço frontal na posição da pré-fenda.

Para o fabrico do calço frontal, é efetuado o corte de duas fitas de aço calibrado, desengordurando-as com acetona antes da colagem, aplicando o cianoacrilato numa face da fita, colocando-se a lâmina sobre a fita, aplicando novamente cianoacrilato na face lâmina e colocando-se a fita superior. Deve ser deixada uma extremidade da lâmina de fora, de maneira a garantir a pré-fenda inicial. Garante-se deste modo um calço com espessura controlada de 0,2 mm. Após concluída esta tarefa, inicia-se a aplicação de desmoldante no conjunto dos calços realizados, bem como nos calços traseiros, para facilitar a sua remoção após cura do adesivo (Figura 60).



Figura 60 - Fabrico do calço frontal (lâmina).

Seguidamente efetua-se a aplicação do adesivo sobre o substrato utilizando uma pistola manual de mistura, no caso do adesivo Araldite® 2015, cujo cartucho bi-componente é introduzido numa pistola própria que pressiona a resina e o endurecedor de modo a que estes sejam expelidos por um bico de mistura, permitindo assim regular a deposição do adesivo no provete. A deposição do adesivo foi efetuada sob a forma de linhas ao longo do comprimento do provete, utilizando um processo em "zigue-zague" (Figura 61).

No caso dos adesivos Araldite® AV138 e SikaForce® 7752, a deposição foi efetuada manualmente com auxílio de espátula, após mistura dos dois componentes, cuja dosagem relativa foi obtida por pesagem em balança digital. A deposição foi efetuada em várias passagens para evitar a

existência de porosidades antes do fecho dos provetes. A aplicação de adesivo junto ao calço traseiro foi bastante cuidadosa, tentando evitar que este não se movesse e que o adesivo não se espalhasse sobre o mesmo, pois este calço garante a espessura da camada de adesivo. Deve-se ter o mesmo cuidado junto do calço frontal, sendo que neste caso é necessário garantir adesivo por cima e por baixo da extremidade livre da lâmina. Em seguida coloca-se o substrato superior, estabelecendo-se o contacto por basculamento de maneira a evitar a formação de porosidades e vazios na camada de adesivo, mantendo uma ligeira pressão de posicionamento sobre o substrato superior para que os excessos de adesivo sejam expelidos pelos bordos dos substratos.

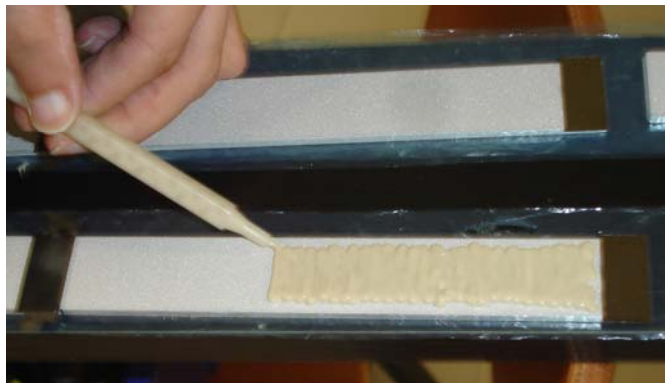


Figura 61 - Aplicação de adesivo, método "zigue-zague".

O processo de cura decorreu à temperatura ambiente, ou seja, cerca de 20° C, e com os substratos pressionados por aplicação de grampos para garantir a espessura desejada do adesivo (Figura 62).



Figura 62 - Processo de posicionamento durante a cura.

Apesar de o método apresentado ser um método bastante utilizado na introdução de pré-fendas em juntas coladas, este possui uma desvantagem que se prende com o facto de a lâmina possuir um raio de curvatura na sua ponta que não pode ser considerado desprezável, algo que teoricamente uma fenda não possui. Para ultrapassar esta limitação, a fenda vai ser ligeiramente propagada de forma manual



antes do início do ensaio, seguindo-se a medição do valor de pré-fenda para aplicação dos métodos de obtenção de  $G_{IIc}$ . Após cura e com o auxílio de um alicate, foram removidos os calços dos provetes. Esta tarefa não foi de fácil execução devido às dimensões diminutas dos calços calibrados. Em seguida, foi necessário remover o excesso de adesivo dos bordos dos provetes, tendo sido utilizado um engenho de furar e uma mó em pedra (Figura 63).



Figura 63 - Limpeza dos bordos dos provetes.

Após concluída a tarefa de limpeza dos excessos de adesivo, e com o objetivo de se melhorar a visualização da propagação da fenda no desenrolar do ensaio, procedeu-se à pintura com tinta de corretor de uma das faces laterais do provete, incidindo sobre a linha de adesivo. Seguidamente, provoca-se a iniciação da propagação da fenda de forma manual, forçando a separação dos substratos de forma cuidada, intercalando entre substratos uma ferramenta pontiaguda e sem causar dano na junta, ao mesmo tempo que se monitoriza a extremidade da fenda por intermédio de um microscópio ótico, até que seja perceptível a propagação da fenda. A propagação do início de fenda tem como objetivo evitar o aumento artificial do valor medido de  $G_{IIc}$  no início da propagação da fenda, induzido pelo raio da lâmina, e identificação da extremidade de fenda para aplicação de escalas. A propagação manual da fenda não deve exceder 3 a 4 mm.

Após este passo, são preparadas escalas para avaliação quantitativa da propagação da fenda, que são coladas em ambos os substratos de um dos lados do provete, para posicionamento na máquina de ensaios. A escala colada no substrato superior deve ficar rigorosamente alinhada pela escala do substrato inferior e ambas afastadas minimamente da linha do adesivo, para que estas não obstruam a visualização da progressão da fenda durante a realização do ensaio. Para posicionamento da escala, considerou-se que o valor 0 coincide com a posição da ponta da fenda. Para obtenção do comprimento de fenda durante o ensaio, considera-se que este é igual a  $a_0$ , somado do valor medido pela escala. Concluída esta etapa,

efetuou-se a marcação do centro do provete e distância entre apoios para posicionamento na máquina de ensaios.

### 3.5 Condições de ensaio

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos do ISEP. Todos os provetes foram sujeitos a carregamento contínuo numa máquina de ensaios SHIMADZU AG-X 100 (Figura 64), conectada a um computador externo para aquisição de dados de força e deslocamento. A máquina está configurada de forma a realizar ensaios de flexão a 3 pontos e equipada com uma célula de carga de 100 kN, usando velocidade de solitação variável, conforme citado posteriormente. De cada ensaio obteve-se um registo da variação da carga em função do deslocamento do punção de solitação. Os ensaios decorreram com condições ambientes de temperatura e humidade.



Figura 64 - Máquina de ensaios SHIMADZU AG-X 100.

Na Figura 65 pode-se visualizar a disposição dos provetes ENF durante os ensaios em modo II. O ensaio ENF caracteriza-se pelo facto do provete estar disposto numa posição de viga simplesmente apoiada nos seus extremos, sendo aplicada uma carga a meio vão.

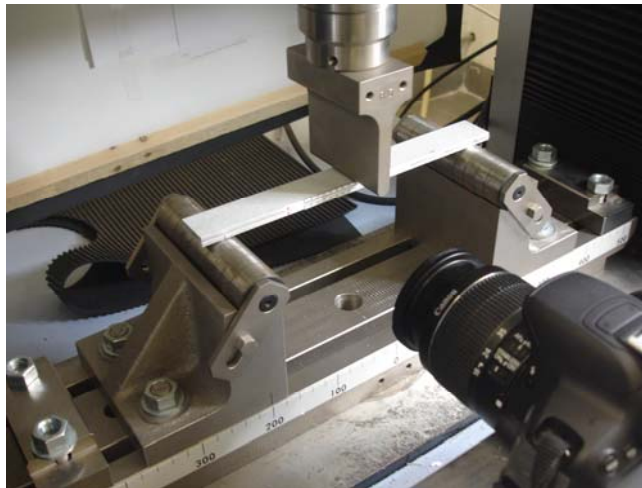


Figura 65 - Disposição do provete de ensaio ENF na máquina de ensaios.

Os rolos de suporte são de facto rolamentos que rodam sem atrito em torno de um veio fixo, para que o provete possa deformar livremente durante a aplicação da carga. Os rolos de suporte são distanciados de  $2L$  com auxílio de uma escala existente no seu suporte. O provete é colocado sobre os dois rolos exteriores, tendo em atenção o seu alinhamento e disposição centrada pelo cilindro de solicitação. Para auxílio nesta tarefa foi efetuada uma marcação na face lateral dos provetes, identificando a localização dos pontos de apoio e carga.

A velocidade de teste, escolhida em função da taxa de deformação desejada para os ensaios, deve ser suficientemente pequena para permitir a monitorização da fenda durante os testes. Uma vez que a propagação de fenda ocorre a um valor constante de  $G_{IIc}$ , são sugeridas, pelo menos, 20-30 medições para construir a curva- $R$  (Campilho et al. 2014). A monitorização da propagação da fenda foi efetuada com o auxílio de uma câmara de alta resolução apoiada numa base sólida para gravação de imagens, numa cadência de intervalos de tempo especificados em 5 s (Figura 66).



Figura 66 - Camara de alta resolução usada na captura de imagens.

A câmara de alta resolução foi posicionada de forma a capturar a face lateral do provete, com um afastamento aproximado de 120 mm, garantindo que a câmara se encontrava paralela à linha do adesivo, permitindo a visualização da escala desde o início da zona de medição até à posição do cilindro de carga, para assegurar a captação de imagens da propagação de fenda na região de medição de  $G_{IIc}$  (Figura 67).



Figura 67 - Imagem obtida no início de um ensaio, com exemplificação da região de medição abrangida pela mesma.

Antes do início do ensaio é capturada a imagem "0". Iniciado o ensaio, as fotos são tiradas com um intervalos de 5 s até que a fenda atinja o ponto de carregamento, onde a fenda deixa de sofrer corte puro e passa a ocorrer a ação combinada do corte com compressão da fenda, devido ao cilindro de carregamento que tende a esmagar a película de adesivo.

### 3.6 Resultados

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios ENF, nomeadamente as curvas  $P-\delta$ , o tratamento de dados conducente à obtenção dos valores de  $G_{IIc}$  para os 3 adesivos, e é também feita uma análise crítica dos resultados obtidos.

#### 3.6.1 Curvas $P-\delta$

O registo dos valores de carga ( $P$ ) e deslocamento ( $\delta$ ) durante os ensaios ENF foi realizado com uma taxa de aquisição de 5 Hz para as três séries de juntas adesivas de 8 provetes, obtendo-se as curvas  $P-\delta$  para todos os testes considerados válidos. Através deste procedimento de ensaios, foi possível correlacionar os dados obtidos de  $P$  e  $\delta$  com o  $a$  durante os ensaios, o que é necessário para a obtenção de  $G_{IIc}$  pelos vários métodos que necessitam da medição de  $a$ . A correlação é efetuada pelo conhecimento do instante de tempo correspondente a cada imagem e a velocidade de ensaio dos provetes.

Apenas um ensaio em cada série de juntas adesivas não foi considerado válido: AV138\_4, A2015\_2 e S7752\_8, devido a uma disparidade de resultados assinalável relativamente aos restantes provetes da respetiva série. Observou-se que, devido à flexibilidade da máquina de ensaios, o comportamento das curvas  $P-\delta$  apresentou uma rigidez crescente na região inicial dos ensaios. Este

aspecto foi corrigido nas curvas que se apresentam, considerando a rigidez dos provetes na zona intermédia da região elástica antes do início da propagação da fenda. A Tabela 11 apresenta os valores de carga máxima e deslocamento no ponto de carga máxima para o adesivo Araldite® AV138.

Tabela 11 - Velocidade de solitação, valores de carga máxima e respetivo deslocamento das curvas  $P-\delta$  do adesivo Araldite® AV138.

Proвете	Velocidade (mm/min)	Carga Máxima (N)	Deslocamento (mm)
AV138_1	0,75	458,956	4,30000
AV138_2	0,75	681,575	4,97148
AV138_3	0,75	671,005	4,54958
AV138_4 <sup>a)</sup>	0,75	451,040	8,98829
AV138_5	0,75	471,290	4,07458
AV138_6	0,75	464,535	4,07773
AV138_7	0,75	439,533	4,05583
AV138_8	0,75	431,887	4,03708
<sup>a)</sup> Ensaio não validado			

A Figura 68 mostra as curvas  $P-\delta$  obtidas para os sete provetes considerados válidos das juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138. As curvas obtidas demonstram tratar-se de um adesivo com um comportamento de rotura frágil, onde se verifica uma rotura abrupta após ser atingida a carga máxima. Nesta altura, o valor de  $P$  cai abruptamente, dando origem a uma propagação rápida da fenda, o que se traduziu numa maior dificuldade em monitorizar o crescimento de  $a$  e, conseqüentemente, de obter um número significativo de imagens para o tratamento de dados subsequente. Observa-se uma diferença notória entre os provetes AV138\_2 e AV138\_3 e os restantes, o que está relacionado com a existência de um valor de  $a_0$  inferior aos restantes, por questões relacionadas com o fabrico dos provetes. No entanto, este efeito foi contabilizado no tratamento subsequente dos dados pelos vários métodos, pelo que não terá influência na medição de  $G_{IIc}$ . Independentemente deste facto, a repetibilidade das curvas é bastante boa em termos de rigidez dos provetes até à iniciação da fenda. O comportamento durante a propagação foi algo instável, o que se atribui à elevada rigidez e baixa ductilidade do adesivo, que tipicamente conduzem a este comportamento.

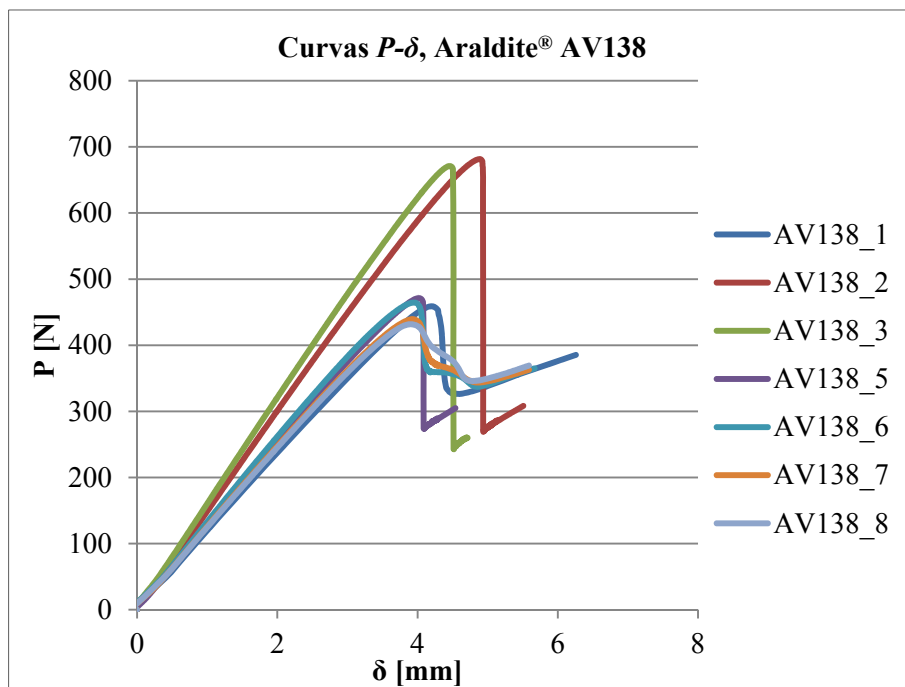


Figura 68 - Curvas  $P$ - $\delta$  para o Adesivo Araldite® AV138.

Para o conjunto de dados apresentados, os valores máximos de  $P_{\text{máx}}$  e respectivo deslocamento foram os seguintes:  $P_{\text{máx}} = 516,969 \pm 109,741$  N e  $\delta = 4,29518 \pm 0,35166$  mm. A Tabela 12 apresenta os valores de  $P_{\text{máx}}$  e deslocamento no ponto de carga máxima para o adesivo Araldite® 2015.

Tabela 12 - Velocidade de solitação, valores de carga máxima e respectivo deslocamento das curvas  $P$ - $\delta$  do adesivo Araldite® 2015.

Provete	Velocidade (mm/min)	Carga Máxima (N)	Deslocamento (mm)
A2015_1	2,00	1193,22	8,49056
A2015_2 <sup>a)</sup>	2,00	1162,62	9,30723
A2015_3	2,00	1097,85	7,94058
A2015_4	2,00	1192,65	8,52392
A2015_5	2,00	1170,06	8,27390
A2015_6	2,00	1272,76	8,89056
A2015_7	2,00	1082,77	7,82390
A2015_8	2,00	1076,84	7,96556
<sup>a)</sup> Ensaio não validado			

A Figura 69 mostra as curvas  $P$ - $\delta$  obtidas para os sete provetes considerados válidos das juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015. Neste caso, constata-se uma grande repetibilidade dos ensaios realizados ao nível dos aspetos mais relevantes, nomeadamente rigidez elástica e comportamento durante a propagação da fenda, o que antevê a obtenção de resultados de  $G_{IIc}$  coerentes entre os vários provetes.

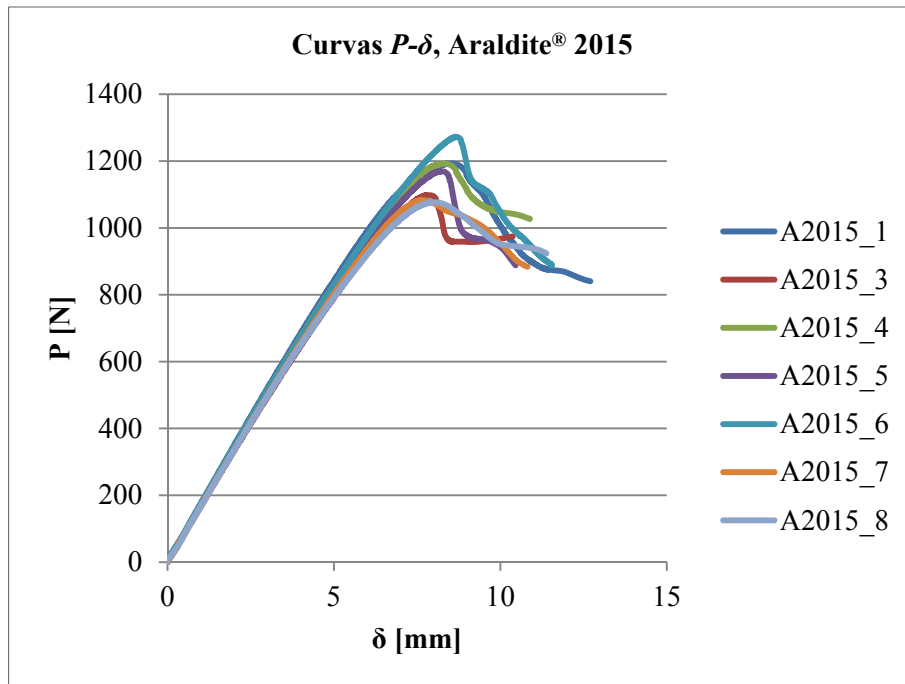


Figura 69 - Curvas  $P$ - $\delta$  para o Adesivo Araldite® 2015.

Analisando os dados apresentados, os valores máximos de  $P_{\text{máx}}$  e respetivo deslocamento registaram os seguintes valores:  $P_{\text{máx}} = 1155,16 \pm 72,53$  N e  $\delta = 8,27271 \pm 0,38695$  mm. As curvas  $P$ - $\delta$  apresentadas pelo adesivo Araldite® 2015 demonstram que se trata de um adesivo com um comportamento com alguma ductilidade, uma vez que se verifica uma rotura mais suavizada com valores de deslocamento por volta de 8,3 mm, verificando-se aproximadamente o dobro do deslocamento de rotura comparativamente ao Araldite® AV138. O valor da carga máxima é ligeiramente superior ao dobro do apresentado pelo Araldite® AV138.

É notória a presença de três fases nas curvas  $P$ - $\delta$  do adesivo Araldite® 2015. Na primeira fase, a evolução da carga/deslocamento é linear, com um comportamento elástico reversível. Na segunda fase, um pouco antes do ponto de carga máxima, verifica-se uma perda da linearidade, correspondente à ocorrência de um processo irreversível do adesivo (formação da ZPF). Na vizinhança de  $P_{\text{máx}}$ , a energia armazenada no provete atinge o seu valor crítico,  $G_{\text{IIC}}$ , correspondente ao início da propagação da fenda. Após ser atingida  $P_{\text{máx}}$ , ocorre a terceira fase, em que a carga aplicada diminui progressivamente, o que corresponde a uma propagação estável da fenda. A Tabela 13 apresenta os valores de  $P_{\text{máx}}$  e deslocamento no ponto de carga máxima para o adesivo SikaForce® 7752 L60.

Tabela 13 - Velocidade de solitação, valores de carga máxima e respetivo deslocamento das curvas  $P-\delta$  do adesivo SikaForce® 7752 L60.

Provete	Velocidade (mm/min)	Carga Máxima (N)	Deslocamento (mm)
S7752_1	2,00	1191,70	15,1578
S7752_2	2,00	1106,93	13,0322
S7752_3	2,00	1103,61	14,8656
S7752_4	2,00	1079,21	13,7156
S7752_5	2,00	1127,82	14,7822
S7752_6	2,00	1187,12	15,6656
S7752_7	2,00	1181,81	13,6739
S7752_8 <sup>a)</sup>	2,00	1062,62	13,6489
<sup>a)</sup> Ensaio não validado			

A Figura 70 mostra as curvas  $P-\delta$  obtidas para os sete provetes considerados válidos das juntas coladas com o adesivo SikaForce® 7752 L60. Para esta série de ensaios, tal como observado no caso anterior, registou-se uma boa concordância entre as curvas  $P-\delta$  dos vários provetes a nível de rigidez no domínio elástico, carga máxima e respetivo deslocamento. As curvas  $P-\delta$  apresentadas pelo adesivo SikaForce® 7752 demonstram que se trata de um adesivo com um comportamento dúctil, para o qual se verifica uma rotura muito suavizada com valores de deslocamento aplicado de cerca de 14,4 mm, correspondente à carga máxima, verificando-se um valor 3,4 vezes superior ao adesivo Araldite® AV138 e cerca de 1,6 vezes superior ao adesivo Araldite® 2015. O valor de carga registado é ligeiramente superior ao dobro do apresentado pelo adesivo Araldite® AV138, mas muito semelhante ao do adesivo Araldite® 2015.

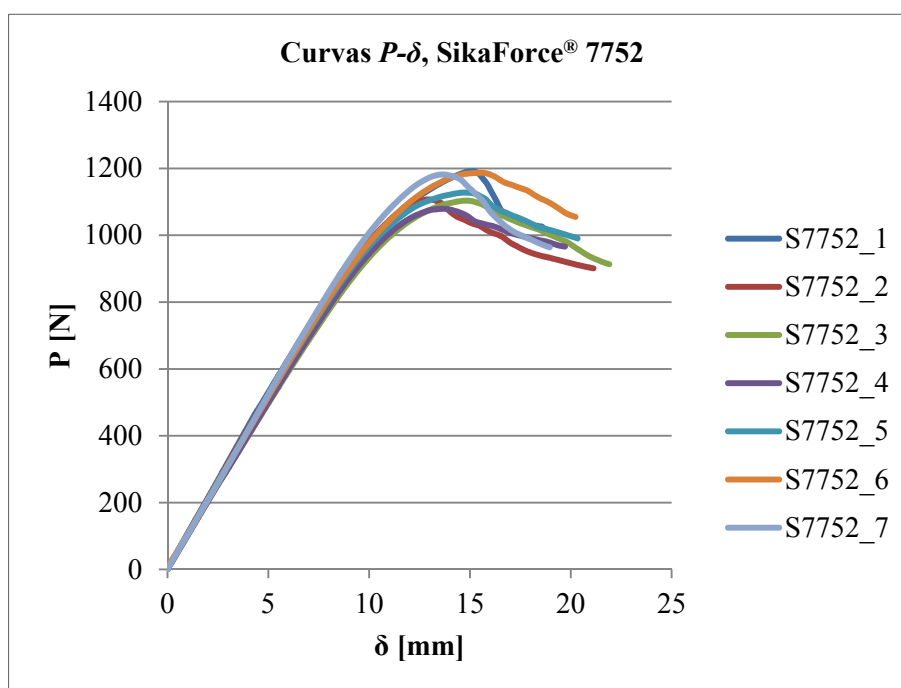


Figura 70 - Curvas  $P-\delta$  para o Adesivo SikaForce® 7752 L60.



Para os ensaios com o adesivo SikaForce® 7752 verificou-se que, durante o ensaio, a aparente propagação da fenda medida pela rotura da camada de tinta branca não correspondia à realidade. Isto deveu-se à grande ductilidade do adesivo, o que fez com que a camada de tinta rompesse muito antes da propagação real da fenda. Como tal, para este adesivo, apenas se efetuou a estimativa de  $G_{IIc}$  pelo método CBBM. O adesivo SikaForce® 7752 apresenta as três fases da curva  $P-\delta$  ainda bem mais definidas do que o adesivo Araldite® 2015. Na primeira fase, a evolução da carga/deslocamento é linear, com um comportamento reversível e elástico. Na segunda fase, está bem mais definida do que no adesivo Araldite® 2015 e a surgir bem antes do ponto de carga máxima, verificando-se a perda da linearidade, correspondente à ocorrência de um processo irreversível de plastificação do adesivo. Após a  $P_{m\acute{a}x}$  ocorre a terceira fase, em que a carga aplicada diminui progressivamente de uma forma muito suave, o que corresponde a uma propagação estável da fenda. Observando os dados apresentados, o valor médio de  $P_{m\acute{a}x}$  e respetivo deslocamento foram de:  $P_{m\acute{a}x} = 1139,74 \pm 46,37$  N e  $\delta = 14,4133 \pm 0,9490$  mm.

### 3.6.2 Determinação do $G_{IIc}$

A determinação do  $G_{IIc}$  é baseada nas denominadas curvas de resistência, ou curvas- $R$ , que representam a evolução da taxa de libertação de energia de deformação ao corte em função do comprimento de fenda durante o ensaio. No caso do ensaio ENF, entre o início da fenda e a posição correspondente ao ponto em que a propagação da fenda começa a ser afetada pelo cilindro de carregamento (que induz efeitos de compressão que dificultam a propagação da fenda), é expectável que este parâmetro seja contante. Este valor de patamar corresponde ao valor de  $G_{IIc}$  do respetivo adesivo. São apresentadas curvas de provetes representativos (uma curva para cada adesivo) referentes aos três métodos utilizados, o CCM e CBT, que requerem a medição do comprimento de fenda, e o CBBM, baseado no comprimento de fenda equivalente. Os resultados apresentados são considerados como representativos dos resultados globais para os ensaios realizados de cada série de adesivos.

#### 3.6.2.1 Adesivo Araldite® AV138

A Figura 71 diz respeito às curvas- $R$  representativas do provete escolhido para representação da série de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138, pelos métodos referenciados anteriormente, com e sem medição do comprimento de fenda.

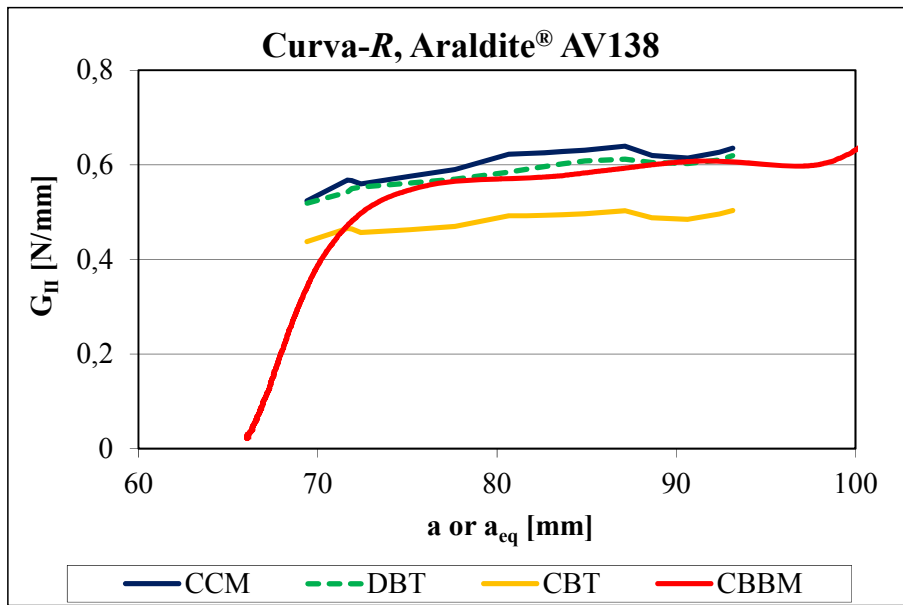


Figura 71 - Curva-R das juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138.

Nas curvas-R representativas do adesivo Araldite® AV138 observou-se o crescimento de fenda a  $G_{II}$  aproximadamente constante para todos os métodos. Observou-se uma boa repetibilidade no valor de patamar, exceto para o CBT, que subestima o valor de  $G_{IIc}$ . De notar que a curva-R do CBBM está deslocada para a direita porque o comprimento de fenda utilizado na representação da curva-R é  $a_{eq}$  em vez de  $a$ , sendo  $a_{eq} = a + |\Delta| + \Delta_{aZPF}$  ( $\Delta_{aZPF}$  corresponde à contribuição da ZPF para  $a_{eq}$ ). A Tabela 14 resume os valores de  $G_{IIc}$  (N/mm) dos sete ensaios válidos por todos os métodos, bem como a média e desvio padrão associada a cada método.

Tabela 14 - Valores de  $G_{IIc}$  do Araldite® AV138 pelos vários métodos.

Adesivo	Araldite® AV138			
	CCM	DBT	CBT	CBBM
AV138_1	0,469	0,566	0,440	0,572
AV138_2	*	0,709	0,566	0,712
AV138_3	*	0,650	0,608	0,724
AV138_4	-	-	-	-
AV138_5	*	0,578	0,519	0,594
AV138_6	0,568	0,579	0,487	0,562
AV138_7	0,605	0,581	0,478	0,576
AV138_8	0,603	0,583	0,481	0,585
<b>Média</b>	0,561	0,606	0,511	0,618
<b>Desvio Padrão</b>	0,064	0,053	0,058	0,069
* provete que não foi possível obter o ajuste do polinómio $C = f(a)$				

A partir da informação da Tabela 14 para o adesivo AV138, apresenta-se o gráfico seguinte, que representa a tendência de valores de  $G_{IIc}$  obtida pelos vários métodos.

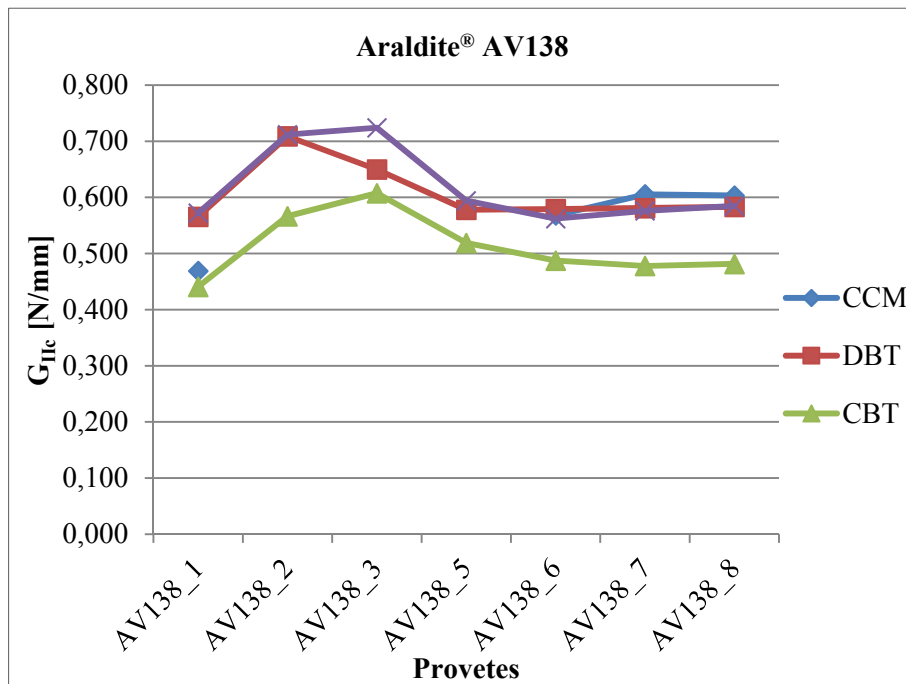


Figura 72 - Tendência de  $G_{IIc}$  do adesivo Araldite® AV138 pelos vários métodos.

Analisando o gráfico anterior, constata-se que existe uma boa repetibilidade entre os valores obtidos para os vários provetes, o que comprova a realização de provetes com condições idênticas e ajuda à veracidade dos resultados obtidos. As curvas seguem a mesma tendência, com acordo bastante bom entre os métodos CCM, DBT e CBBM, enquanto o CBT subestima  $G_{IIc}$  comparativamente aos outros métodos (Campilho et al. 2009c). A Figura 73 representa a média dos valores de  $G_{IIc}$  e os respetivos desvios segundo os vários métodos utilizados na obtenção do  $G_{IIc}$ .

O gráfico representa com mais pormenor a comparação entre os vários métodos. Considera-se o CBBM como valor de referência, devido ao facto de ser um método robusto e que traduz com precisão o valor de  $G_{IIc}$  (Campilho et al. 2009c). Em comparação com este, o CCM apresenta um valor inferior em 9,22%, o DBT em 1,94% e o CBT em 17,31%. Confirma-se que o CBT apresenta resultados substancialmente inferiores aos restantes.

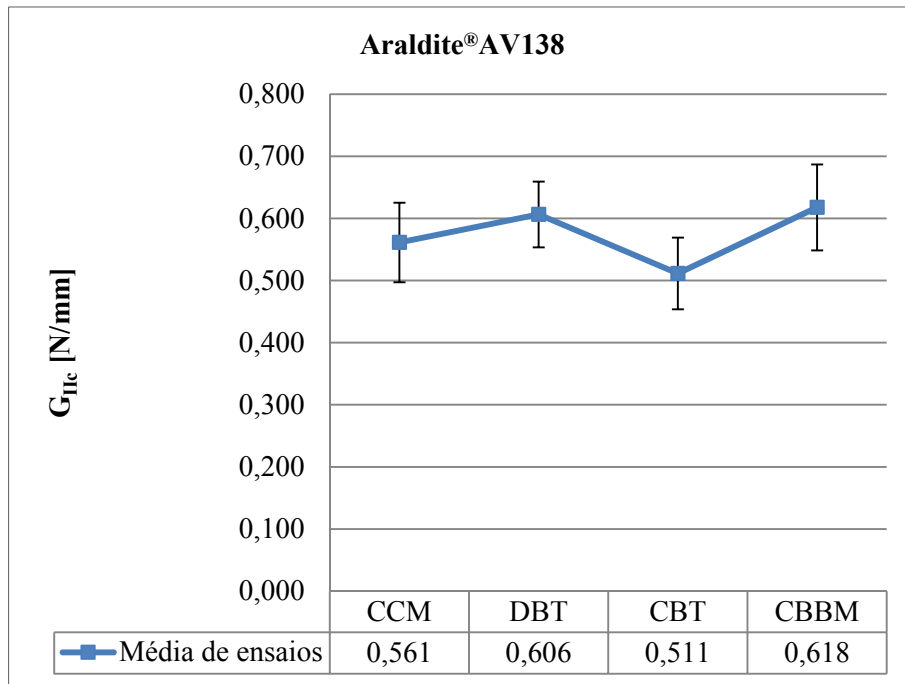


Figura 73 - Média do valor de  $G_{IIIc}$  para o adesivo Araldite® AV138 pelos vários métodos.

### 3.6.2.2 Adesivo Araldite® 2015

A Figura 74 apresenta as curvas- $R$  do ensaio escolhido para representação da série de juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015, pelos 4 métodos em consideração.

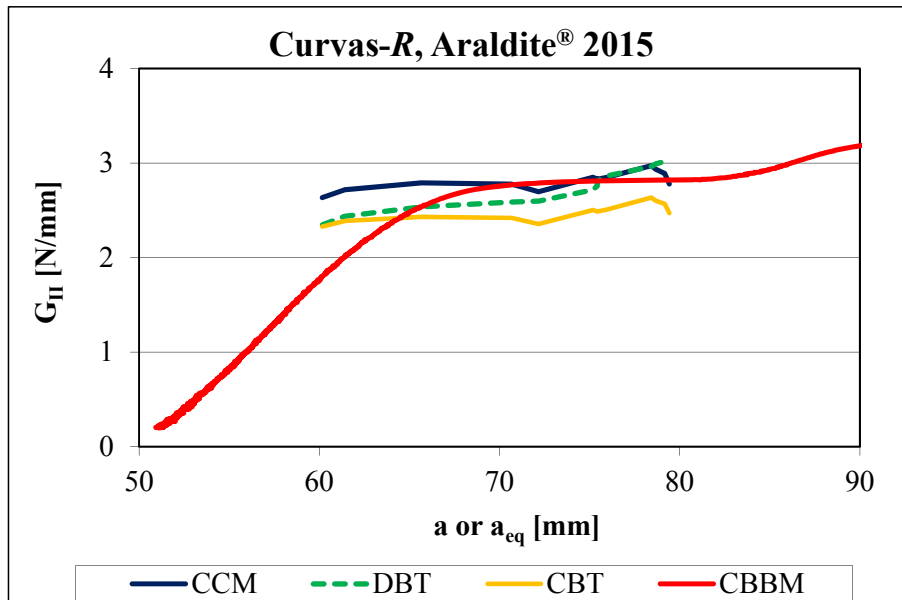


Figura 74 - Curva- $R$  das juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015.

Tal como tinha ocorrido com o adesivo Araldite® AV138, observou-se um patamar de evolução de  $G_{II}$  com  $a$  ou  $a_{eq}$  praticamente constante. No entanto, a extensão do patamar de medição de  $G_{IIc}$  é substancialmente inferior ao obtido para o Araldite® AV138, o que se deve à maior ductilidade do adesivo. Esta diferença faz com que a ZPF se estenda a um comprimento maior à frente da fenda, o que faz com que os efeitos compressivos do punção de carregamento se façam sentir antes do observado para o adesivo anterior. Nas curvas- $R$  apresentadas constata-se o crescimento de fenda a  $G_{II}$  aproximadamente constante para todos os métodos. Observou-se uma boa repetibilidade no valor de patamar, exceto para o CBT. A Tabela 15 resume os valores de  $G_{IIc}$  (N/mm) dos sete ensaios válidos por todos os métodos, observando-se uma concordância entre as amostras razoavelmente boa.

Tabela 15 - Valores de  $G_{IIc}$  do Araldite® 2015 pelos vários métodos.

Adesivo	Araldite® 2015			
	CCM	DBT	CBT	CBBM
Provete				
A2015_1	3,029	3,083	2,644	3,420
A2015_2	-	-	-	-
A2015_3	3,675	2,401	2,177	2,545
A2015_4	3,214	2,916	2,544	2,943
A2015_5	2,812	2,741	2,476	2,801
A2015_6	3,357	3,088	2,644	3,136
A2015_7	2,696	2,831	2,624	2,901
A2015_8	3,008	2,952	2,512	3,025
<b>Média</b>	3,113	2,859	2,517	2,967
<b>Desvio Padrão</b>	0,334	0,238	0,164	0,273

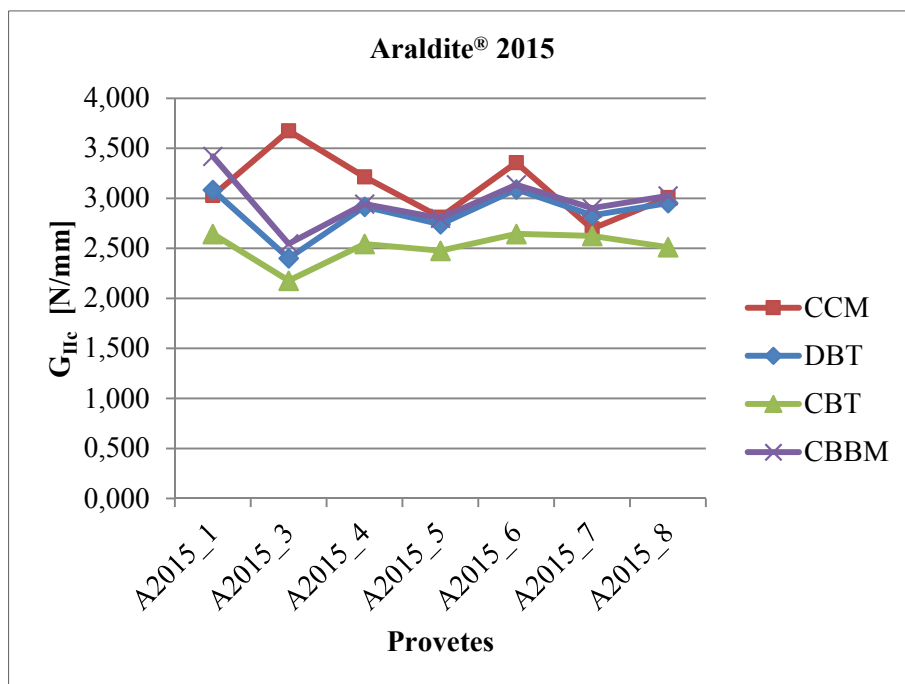


Figura 75 - Tendência de  $G_{IIc}$  do adesivo Araldite® 2015 pelos vários métodos.

Tendo como base os valores de  $G_{IIC}$  apresentados na Tabela 15, respeitantes ao adesivo Araldite® 2015, construiu-se o gráfico da Figura 75, que representa a tendência de valores de  $G_{IIC}$  pelos vários métodos.

Analisando o gráfico representativo da comparação dos valores de  $G_{IIC}$  obtido pelos vários métodos, verifica-se a existência de uma boa repetibilidade entre os valores obtidos para os vários provetes, o que comprova a realização de provetes com condições idênticas e ajuda à autenticidade dos resultados obtidos. As curvas respeitantes aos vários métodos seguem a mesma tendência, com acordo bastante bom entre o DBT e o CBBM, enquanto o CBT subestima  $G_{IIC}$  comparativamente aos outros métodos. O CCM apresenta algumas oscilações, o que está relacionado com o ajuste do polinómio de  $C = f(a)$  (Campilho et al. 2009c). A Figura 76 representa a média dos valores de  $G_{IIC}$  e os respetivos desvios para o adesivo segundo os diferentes métodos de obtenção de  $G_{IIC}$ .

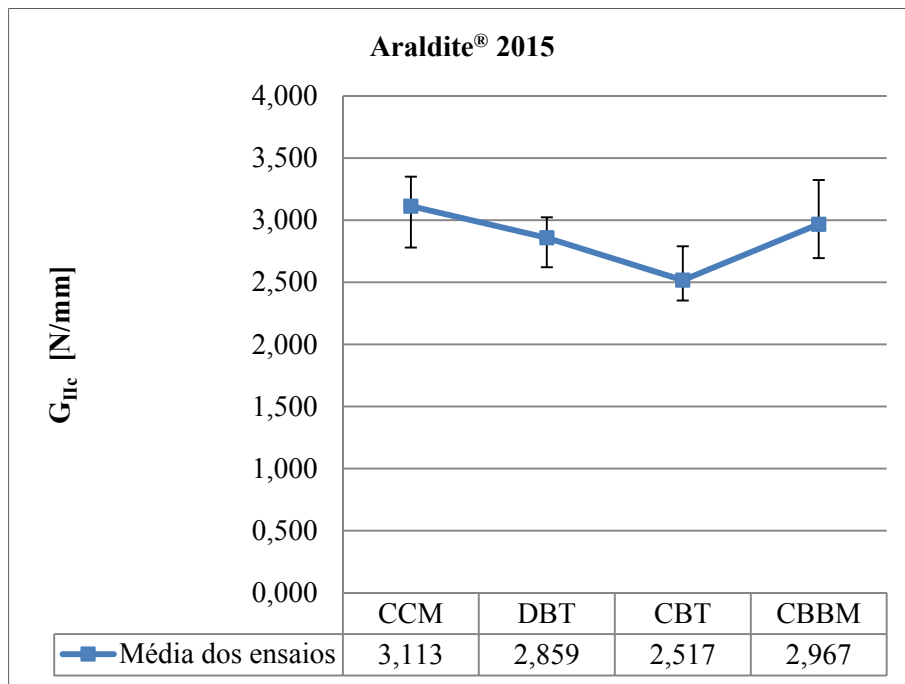


Figura 76 - Média do valor de  $G_{IIC}$  para o do adesivo Araldite® 2015 pelos vários métodos.

Apresenta-se assim com mais pormenor a comparação de valores médios de  $G_{IIC}$  entre os vários métodos. Utilizando o método CBBM como referência, verifica-se que o CCM apresenta um valor superior em 4,92%, o DBT um valor inferior em 3,64% e o CBT um valor também inferior em 15,17%. De notar que o CBT apresenta resultados substancialmente inferior aos restantes (Campilho et al. 2009c).

**3.6.2.3 Adesivo SikaForce® 7752 L60**

A Figura 77 apresenta uma curva-*R* obtida pelo método CBBM para representação da série de juntas coladas com o adesivo SikaForce® 7752 L60, sendo este o único método que não requer medição de comprimento de fenda. Apenas se apresenta esta curva pois o adesivo apresenta um comportamento extremamente dúctil e, como tal, a visualização da propagação da fenda não foi perceptível, acabando por estar primeiramente a tinta corretora de auxílio da visualização, sem que a fenda propagasse.

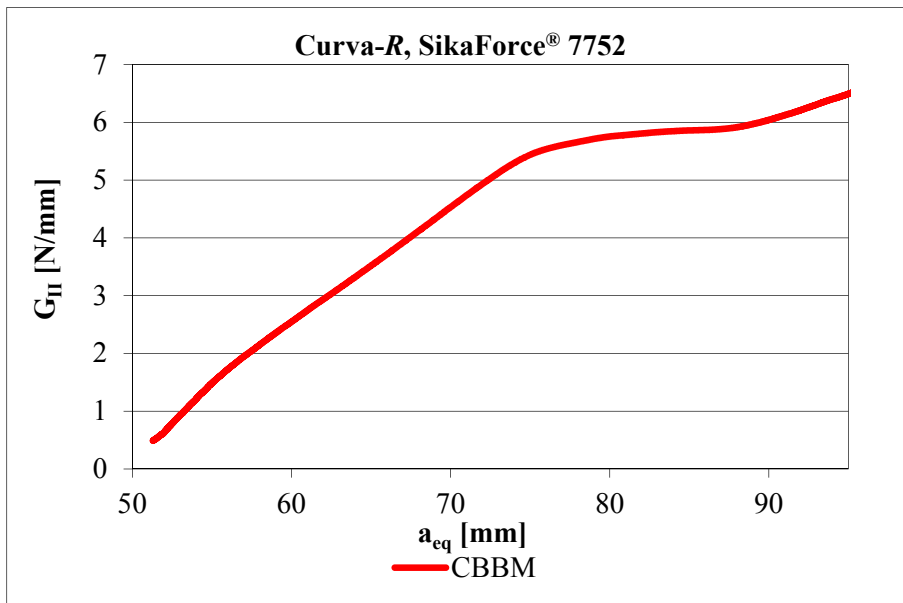


Figura 77 - Curva-*R* das juntas com adesivo SikaForce® 7752.

Tabela 16 - Valores de  $G_{IIc}$  do SikaForce®7752 pelo método CBBM.

<b>Adesivo</b>	<b>SikaForce® 7752</b>
<b>Provede</b>	<b>CBBM</b>
S7752_1	5,825
S7752_2	5,877
S7752_3	5,474
S7752_4	4,813
S7752_5	5,676
S7752_6	5,648
S7752_7	5,619
S7752_8	-
<b>Média</b>	<b>5,562</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,356</b>

É possível observar que a curva-*R* apresenta um patamar de crescimento de fenda a  $G_{II}$  constante. No entanto, este patamar tem extensão substancialmente inferior ao observado para os dois

adesivos já referidos, devido à maior ductilidade do adesivo SikaForce® 7752. Ainda assim, é claramente perceptível a existência de uma zona na qual é possível efetuar a medição de  $G_{IIC}$ .

A Tabela 16 resume os valores de  $G_{IIC}$  (N/mm) dos sete ensaios válidos pelo método CBBM, onde se observa que a concordância entre as amostras é razoável, o que fica patente pelo reduzido valor de desvio padrão dos ensaios. Os valores de  $G_{IIC}$  são representados graficamente na Figura 78 para uma melhor perceção da tendência de  $G_{IIC}$  entre provetes pelo método CBBM.

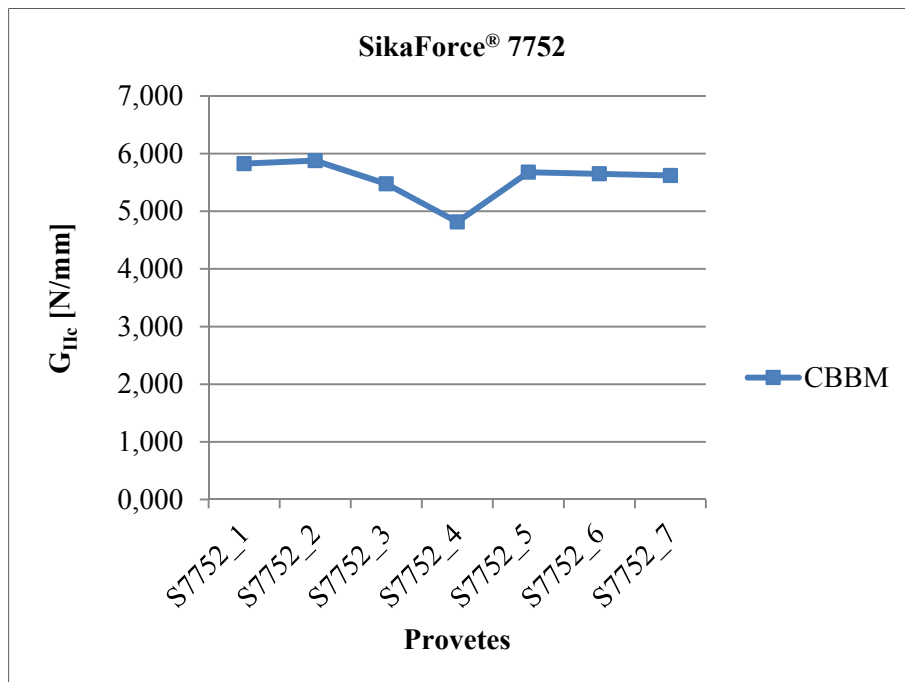


Figura 78 - Tendência de  $G_{IIC}$  do adesivo SikaForce® 7752 pelo método CBBM.

Analisando o gráfico representativo dos valores de  $G_{IIC}$  obtido pelos vários ensaios verifica-se a existência de repetibilidade entre os valores obtidos para os vários provetes, excetuando o provete S7752\_4 que apresenta um valor ligeiramente inferior, o que valida a realização de provetes com condições idênticas e é indicativo da coerência dos resultados obtidos.

### 3.6.3 Análise e comparação dos resultados

Efetuada uma comparação mais detalhada dos valores obtidos pelos diferentes métodos, apresenta-se na Tabela 17 os valores do desvio, em percentagem e em valor absoluto, de cada provete do adesivo Araldite® AV138 em relação à média. Observa-se que, pelo método CCM, o desvio médio em valor absoluto cifra-se em 11,40%, enquanto para o método DBT este é igual a 8,73%, para o CBT apresenta um valor de 11,28% e para o CBBM regista 11,20%. Constata-se assim uma dispersão aceitável relativamente ao que se tem observado em estudos do género (Campilho et al. 2009c).



Tabela 17 - Desvios em percentagem [%] dos vários métodos na medição de  $G_{IIC}$ , dos provetes de adesivo Araldite® AV138.

Provete	CCM	DBT	CBT	CBBM
AV138_1	16,47	6,74	13,87	7,73
AV138_2		16,89	10,76	15,21
AV138_3		7,14	18,79	17,20
AV138_4				
AV138_5		4,70	1,44	3,84
AV138_6	1,17	4,51	4,69	9,03
AV138_7	7,83	4,22	6,57	6,77
AV138_8	7,47	3,86	5,86	5,34

A Tabela 18 apresenta os valores absolutos do desvio, em percentagem, entre o valor de  $G_{IIC}$  de cada ensaio e o respetivo valor médio do adesivo Araldite® 2015. Estes apresentam uma concordância entre ensaios razoavelmente boa, sendo que pelo método CCM o desvio médio cifra-se em 10,72%, para o DBT este é igual a 8,32%, o CBT apresenta 6,52% e o CBBM regista 9,20%.

Tabela 18 - Desvios em percentagem [%] dos vários métodos na medição de  $G_{IIC}$ , dos provetes de adesivo Araldite® 2015.

Provete	CCM	DBT	CBT	CBBM
A2015_1	2,71	7,84	5,04	15,25
A2015_2				
A2015_3	18,05	16,02	13,51	14,22
A2015_4	3,26	1,99	1,05	0,81
A2015_5	9,68	4,14	1,64	5,61
A2015_6	7,83	8,03	5,03	5,67
A2015_7	13,38	0,98	4,25	2,23
A2015_8	3,37	3,26	0,22	1,94

A Tabela 19 apresenta os valores de desvio absoluto relativamente ao  $G_{IIC}$  médio, em percentagem, para cada provete do adesivo SikaForce® 7752. De salientar a concordância entre ensaios razoavelmente boa, com um desvio máximo de 13,46%.

Tabela 19 - Desvios em percentagem [%] do método CBBM na medição de  $G_{IIC}$ , dos provetes de adesivo SikaForce®7752.

Provete	CBBM
S7752_1	4,73
S7752_2	5,67
S7752_3	1,58
S7752_4	13,46
S7752_5	2,06
S7752_6	1,55
S7752_7	1,04
S7752_8	

A Tabela 20 representa a média do  $G_{IIc}$  pelos vários métodos utilizados, para os adesivos ensaiados.

Tabela 20 - Média e desvio padrão do valor de  $G_{IIc}$ , para os vários métodos e adesivos [N/mm].

	<b>Araldite® AV138</b>	<b>Araldite® 2015</b>	<b>SikaForce® 7752</b>
<b>CCM</b>	0,561±0,064	3,113±0,334	
<b>DBT</b>	0,606±0,053	2,859±0,238	
<b>CBT</b>	0,511±0,058	2,517±0,164	
<b>CBBM</b>	0,618±0,069	2,967±0,273	5,562±0,356

Analisando os valores obtidos, o adesivo SikaForce® 7752 é aquele que necessita de mais energia de deformação para ocorrer a propagação do dano. De facto, o valor de  $G_{IIc}$  é cerca de 9 vezes superior relativamente ao adesivo Araldite® AV138 e 1,9 vezes superior comparativamente ao adesivo Araldite® 2015. O Araldite® 2015 tem um valor de  $G_{IIc}$  superior em aproximadamente 4,8 vezes relativamente ao observado para o adesivo Araldite® AV138.

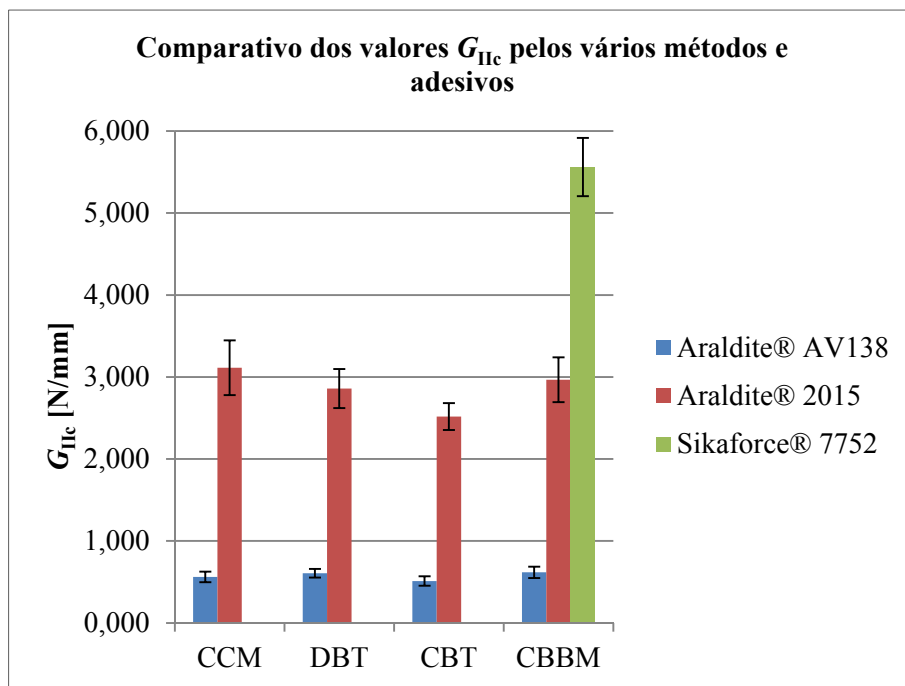


Figura 79 - Comparação dos valores de  $G_{IIc}$  dos adesivos ensaiados segundo os métodos utilizados.

Na Figura 79 pode-se observar os valores médios e desvio padrão encontrados de  $G_{IIc}$ , pelos quatro métodos e para os três adesivos estudados. Dos resultados obtidos observa-se que o SikaForce® 7752 é sem dúvida o mais dúctil, sendo o Araldite® AV138 o mais frágil. Como é sabido, as propriedades dos adesivos influenciam de forma significativa a resistência da junta. No entanto, um adesivo mais forte não significa necessariamente uma resistência superior em junta adesiva. Na verdade, um adesivo resistente mas frágil atinge localmente nos bordos da junta adesiva uma tensão elevada, mas não permite

a redistribuição do esforço para o interior desta. Como resultado, a tensão de corte média de rotura é muito baixa. Este é o comportamento expectável do Araldite® AV138. Por outro lado, os adesivos com elevada ductilidade e de baixo módulo têm geralmente uma resistência baixa. No entanto, estes são capazes de distribuir as tensões de forma mais uniforme ao longo da junta por deformação plástica (devido à baixa rigidez), o que torna as juntas mais resistentes do que com os adesivos mais resistentes e frágeis (Troughton 2008). Enquadra-se nesta categoria o Araldite® 2015, que apresenta uma ductilidade moderada para adesivos estruturais e uma resistência à tração e corte inferiores ao Araldite® AV138.

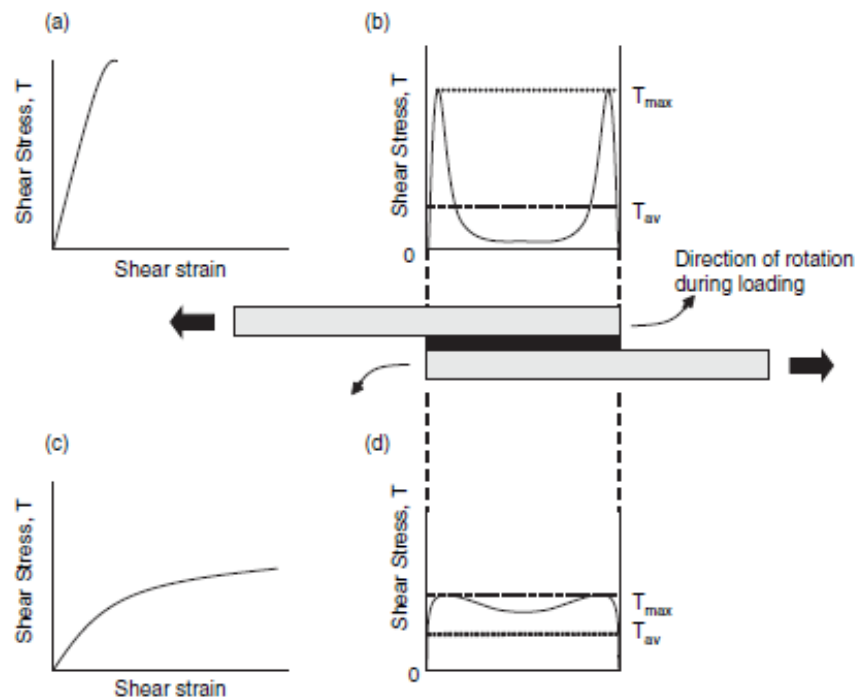


Figura 80 - Distribuição da tensão de corte em adesivos frágeis e dúcteis (Troughton 2008).

Pela Figura 80 pode-se verificar que, para adesivos frágeis, com uma curva típica tensão vs. deformação como indicado em (a), a rotura dá-se quando as tensões máximas nas extremidades da sobreposição atingem os valores limite do adesivo (b). Em adesivos dúcteis, com uma curva típica de tensão vs. deformação como mostrado em (c), a rotura tem lugar após plastificação do adesivo nas extremidades da sobreposição e aumento das tensões de corte na região intermédia (d), o que permite uma tensão de corte média e uma resistência global da junta superiores.

A flexibilidade do adesivo mais dúctil permite à junta acomodar mais facilmente o movimento dos aderentes durante o carregamento; a tensão é então distribuída ao longo de uma área maior. Ora, adesivos frágeis são mais sensíveis à propagação da fenda enquanto os dúcteis resistem mais à sua propagação, o que se reflete numa maior resistência (Henkel 2011). O SikaForce® 7752 tem uma

resistência inferior aos restantes dois adesivos, mas apresenta uma grande ductilidade. Desta forma, é um adesivo que permite uma maior redistribuição de tensões na camada de adesivo após o seu limite elástico ser atingido. Para comprimentos de sobreposição reduzidos antevê-se uma resistência de junta inferior aos restantes dois adesivos, mas um comportamento mais favorável para comprimentos de sobreposição mais elevados, para os quais a tenacidade tem um papel preponderante na resistência. Por outro lado, a resistência à fadiga de juntas coladas é tipicamente menor para adesivos frágeis. Esta diferença é justificada pela distribuição de tensões no adesivo mais uniformes e maior energia de amortecimento das juntas coladas com adesivos dúcteis (Petrie 2000). Os adesivos frágeis são muito sensíveis a defeitos, tais como espaços vazios e microfissuras (da Silva et al. 2006). Os adesivos dúcteis têm uma maior capacidade para suportar esforços de clivagem e de arrancamento, daí a preferência do seu uso para unir chapas finas (ECSS 2011).



# 4 Análise numérica

A parte numérica deste trabalho tem como objetivo principal a reprodução dos resultados experimentais através da utilização de leis de dano coesivo que sejam representativas do comportamento dos adesivos utilizados e que, como tal, possam ser aplicadas posteriormente para efeitos de previsão da resistência de juntas adesivas com estes adesivos. As simulações foram feitas recorrendo ao MEF, incluindo o MDC formulado seguidamente.

## 4.1 Condições da análise numérica

A simulação foi feita recorrendo ao *software* ABAQUS® versão 6.13. Este *software* baseia-se no MEF e a sua escolha recai pela possibilidade de utilização do módulo integrado de MDC para prever o comportamento das juntas em ensaios ENF. A modelação das juntas foi feita em duas dimensões, com elementos sólidos de estado plano de deformação para a modelação dos aderentes (CPE4 do ABAQUS®). Para simular a junta colada foi usado um elemento coesivo de quatro nós (COH2D4 do ABAQUS®), já utilizado em estudos anteriores (Campilho et al. 2011) e que utilizou o modelo de dano coesivo com lei triangular de amaciamento. Para os elementos MDC na camada do adesivo, apenas foi considerado um elemento na direção da espessura do adesivo.

Para a análise de rotura por MDC foram consideradas não linearidades geométricas. As malhas utilizadas nos modelos são bastante refinadas, com elementos na camada adesiva de dimensões 0,2 mm × 0,2 mm. Na Figura 81 apresenta-se uma visão geral do refinamento de malha utilizado nos modelos dos provetes ENF.



Figura 81 - Refinamento geral de malha do modelo utilizado nos provetes ENF.

Na Figura 82 mostra-se um detalhe da malha na proximidade da extremidade da fenda, onde se pode observar os elementos coesivos representativos do adesivo com dimensões de  $0,2 \times 0,2$  mm. Na zona correspondente à pré-fenda, a malha não é tão refinada no sentido do comprimento dos provetes, uma vez que esta zona não estará sujeita a grandes gradientes de tensões. Na direção da espessura, foi utilizada uma gradação do tamanho dos elementos (efeito *bias*), no sentido do maior refinamento na proximidade do adesivo, devido à necessidade de modelação do adesivo com precisão, e também nas faces horizontais exteriores dos aderentes, para maior precisão das condições de contato com os cilindros de suporte e carregamento.

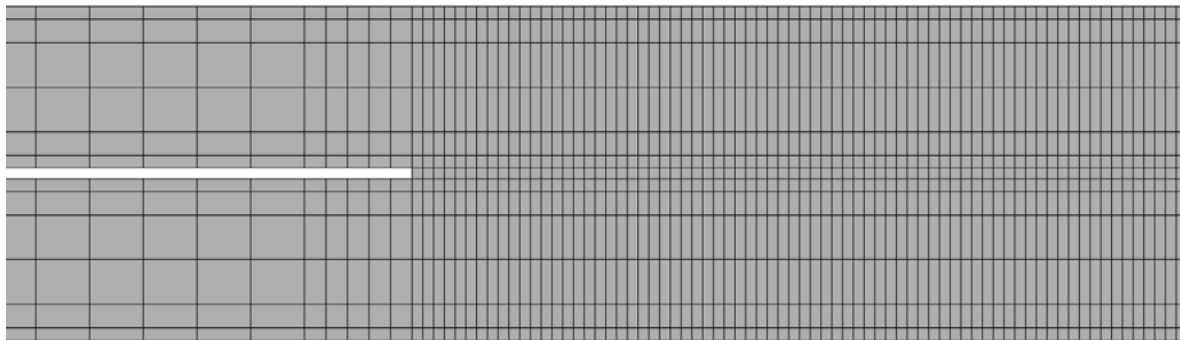


Figura 82 - Detalhe do refinamento de malha de elementos finitos na proximidade da extremidade da fenda.

Na Figura 83 exemplifica-se o refinamento da malha na zona de contato entre o provete e um dos cilindros de suporte, na qual se utilizaram elementos com 0,05 mm de lado na zona que durante a análise estará em contato com o respetivo cilindro.

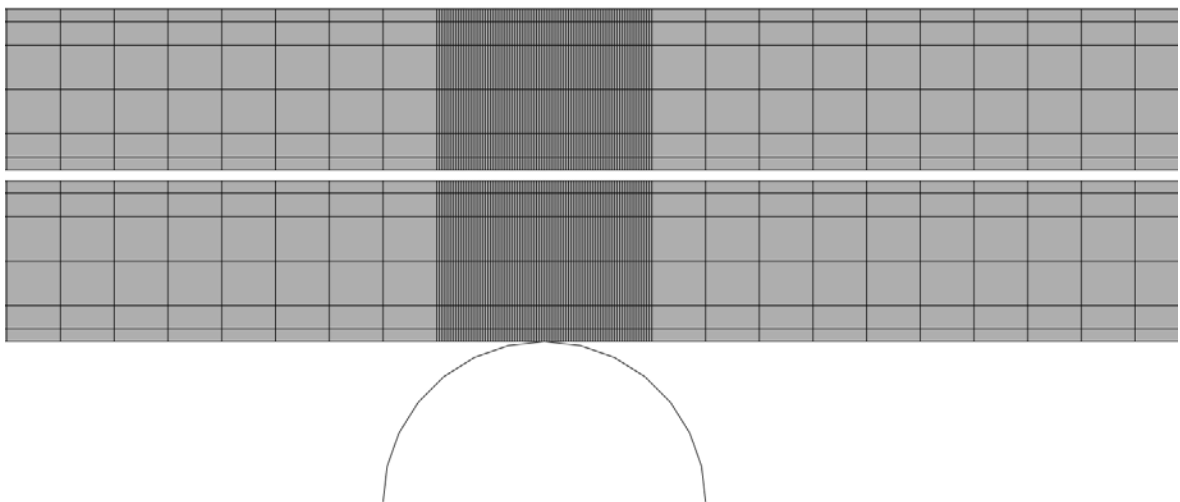


Figura 83 - Detalhe do refinamento de malha de elementos finitos na zona de contato entre o provete e um dos cilindros de suporte.

A Figura 84 representa um detalhe da malha na zona de contato entre o provete e o cilindro de solicitação, onde se pode observar um refinamento de malha idêntico ao descrito anteriormente, e também uma malha mais grosseira na zona de propagação de dano à direita do cilindro de solicitação, uma vez que esta região já excede os limites de análise do ensaio ENF.

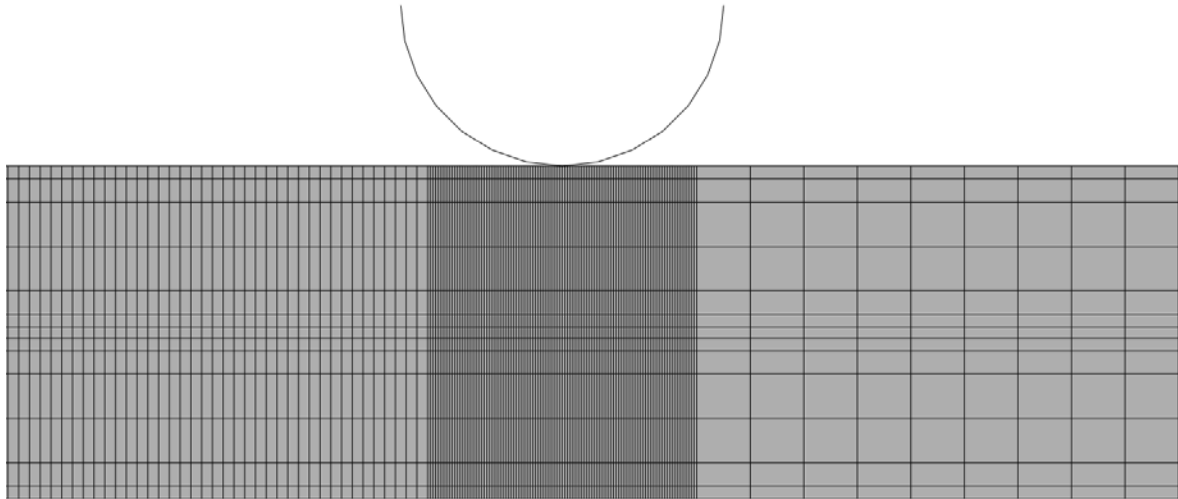


Figura 84 - Detalhe do refinamento de malha de elementos finitos na zona de contato entre o provete e o cilindro de solicitação.

As variações do número de elementos e do efeito *bias* na malha têm como intuito diminuir o esforço computacional, permitindo uma redução do tempo na obtenção dos resultados, sem comprometer a precisão dos resultados nas zonas com grandes variações de tensões. No que diz respeito às condições fronteira (Figura 85), de forma a modelar as condições reais dos ensaios experimentais, restringiram-se os cilindros de suporte nas duas direções e rotação no plano, restringiu-se o cilindro de carregamento na direção horizontal e aplicou-se um deslocamento vertical com sentido descendente e, finalmente, restringiu-se um nó a meio do comprimento do provete na direção horizontal para evitar o deslocamento horizontal do mesmo.

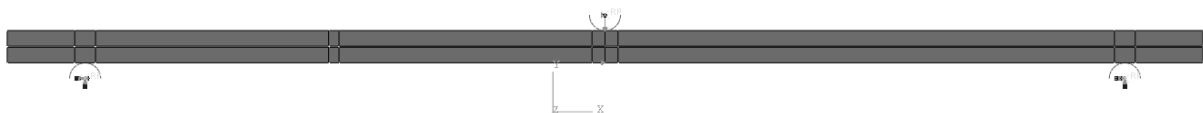


Figura 85 - Condições fronteira e de carregamento impostas nos modelos numéricos.

Foi necessário introduzir condições de contato entre cada um dos três cilindros e o provete, e também entre os dois substratos na zona da pré-fenda, para garantir o deslizamento sem atrito e para evitar a interpenetração entre eles. Foi utilizada uma formulação com pequeno deslizamento do tipo



*surface to surface*. Foi utilizado um comportamento tangencial sem fricção e um comportamento normal do tipo *hard contact*.

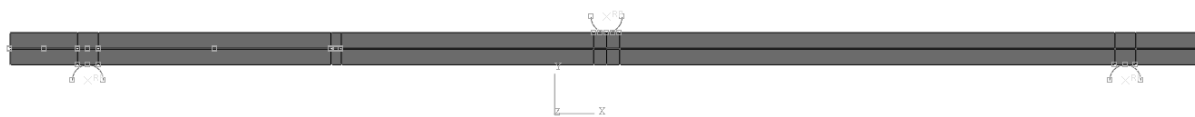


Figura 86 - Faces selecionadas para as condições de contato impostas nos modelos numéricos.

## 4.2 Modelo de dano coesivo

A aplicação de Modelos Coesivos tem sido frequente nos últimos anos, nomeadamente no que toca ao estudo da resistência de juntas adesivas (Kafkalidis e Thouless 2002; Campilho et al. 2008). Estes modelos têm a grande vantagem de combinar metodologias da Resistência dos Materiais e da Mecânica da Fratura na previsão do comportamento dos materiais e, mais objetivamente, das juntas adesivas.

Os modelos MDC tiveram início com os trabalhos de Barenblatt (1959; 1962) e Dugdale (1960). Nestes trabalhos foi proposto o conceito de zona coesiva para descrever o dano, sob cargas estáticas, da zona de processo coesiva à frente da ponta de fenda. A partir desse momento, os MDC começaram a ser testados como forma de simular o início de dano e respetiva propagação na zona coesiva e interfacial entre materiais, ou até mesmo para casos de delaminação de compósitos. Uma característica destes modelos é que podem facilmente ser incorporados em programas que têm como base o MEF e desta forma avaliar o comportamento de vários materiais sob fratura. Os MDC são baseados no pressuposto de que uma ou mais regiões ou interfaces de fratura podem ser introduzidas artificialmente nas estruturas, nas quais o crescimento do dano é permitido através da introdução de uma descontinuidade no campo de deslocamentos. A técnica consiste no estabelecimento de leis de tração-separação (também denominadas de leis coesivas) para modelar interfaces ou regiões finitas. Os MDC proporcionam uma propagação macroscópica dos danos existentes ao longo de um dado percurso, desvalorizando os fenómenos microscópicos presentes no início da fenda, através da implementação das leis de tração-deslocamento relativo ( $t-\delta$ ) (Zhao 2011). Para além disso, estes modelos são usados para simular a evolução linear dos esforços transmitidos durante o regime elástico dos materiais, seguida do amaciamento correspondente à degradação até à quebra da ligação, permitindo desta forma simular a deterioração das propriedades dos materiais até à rotura. As leis referidas de tração-separação são frequentemente representadas por relações lineares em cada uma das etapas de carregamento (elasticidade, plasticidade e degradação), apesar de qualquer uma destas etapas poder ser definida de

uma forma distinta, de maneira a possibilitar uma representação mais fiável do comportamento dos materiais (Yang 2001). Este modelo foi implementado em *software*, como é o caso do ABAQUS®, em duas (2D) e três dimensões (3D). O modelo triangular 2D foi implementado para análise com cargas estáticas, enquanto o modelo 3D, embora seja muito similar a este, inclui uma componente adicional de corte (Campilho et al. 2012).

O uso de MDC em conjunto com o MEF consiste no método mais usado para prever a modelação do dano estático ou de fadiga (Campilho et al. 2005). Podem ser usadas as técnicas de aproximação local ou contínua, uma vez que os MDC podem ser considerados para modelar uma fratura interfacial de camadas em compósitos ou a interface entre o adesivo e o aderente para simular roturas adesivas (aproximação local) ou, por outro lado, para simular uma pequena camada de adesivo de espessura constante (aproximação contínua). A modelação de juntas adesivas pela aproximação contínua tem um grande campo de aplicação (Campilho et al. 2008), mas a consideração de uma camada única de elementos coesivos usada para modelar a camada adesiva torna impossível a diferenciação dos efeitos ao longo da espessura ou de concentrações de tensões na direção da interface, permitindo apenas obter um comportamento equivalente da camada adesiva (Magalhães et al. 2005).

O modelo triangular 2D está representado na Figura 87, onde a lei de maiores dimensões representa as leis em modo puro (tração e corte), e a lei de menores dimensões representa a lei em modo misto. Neste trabalho, a forma da lei de separação de tração foi definida como um modelo bilinear (Figura 87). Os índices n e s referem-se as tensões pura normal e de corte, respetivamente,  $t_n$  e  $t_s$  são as tensões correspondentes atuais, e  $\delta_n$  e  $\delta_s$  os valores atuais de  $\delta$ .

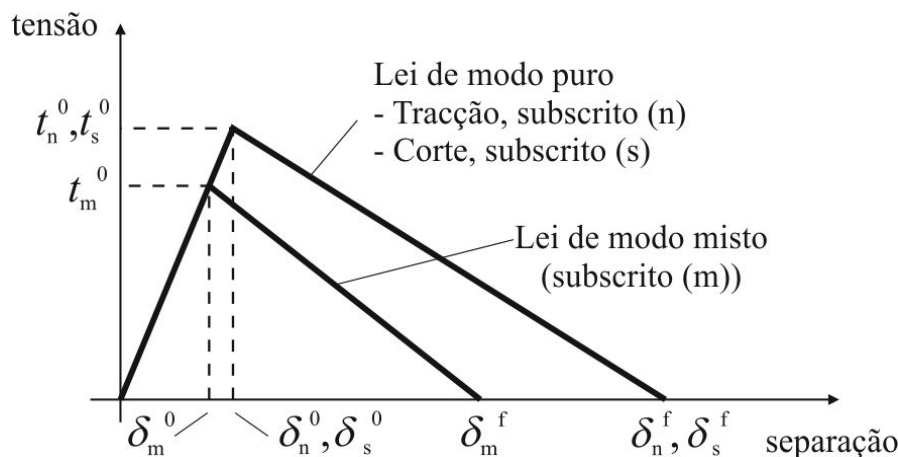


Figura 87 - Lei triangular do modelo de dano coesivo.

O grande benefício de usar os MDC é a possibilidade de simular o comportamento de estruturas até à rotura e possibilitar incluir nos modelos numéricos múltiplas possibilidades de rotura, dentro de diferentes regiões ou nas interfaces entre materiais. Por outro lado, a limitação principal destes modelos

está na obrigatoriedade de introdução, nos modelos numéricos, dos elementos coesivos nas regiões onde se considera provável que o dano ocorra (Campilho et al. 2008).

#### 4.2.1 Modelo de dano triangular

Em função do comportamento do material ou da interface em simulação, podem ser consideradas diferentes formas de leis coesivas de forma a obter resultados mais precisos (Pinto et al. 2009). Ao longo dos anos foram desenvolvidos diversos modelos, dos quais se destacam o triangular (Alfano e Crisfield 2001), linear parabólico (Allix e Corigliano 1996), exponencial (Chandra et al. 2002), polinomial (Chen 2002) e trapezoidal (Kafkalidis e Thouless 2002). Pela sua simplicidade, pelo reduzido número de parâmetros a serem determinados e ainda pelos resultados precisos para a maioria das condições reais, a lei triangular é a mais usada (Liljedahl et al. 2006). Nesta lei, distinguem-se dois modos. O modo puro caracteriza-se pela propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respetivo são anulados na lei coesiva correspondente. Em modo misto, são utilizados critérios de tensões e energéticos para combinar os modos puros de tração e corte (Campilho et al. 2008). Os elementos coesivos estão sujeitos a uma componente de deformação normal e outra de corte que são determinadas recorrendo à cinemática do elemento. Em camadas finas entre aderentes rígidos, como se consideram ser as camadas de adesivo, as tensões de membrana são desprezadas. Antes da ocorrência do dano, a relação entre tensões e deformações é definida pela matriz  $\mathbf{K}_{\text{COH}}$ , que relaciona as tensões e deformações em tração e corte nos elementos coesivos. Esta matriz é definida da seguinte forma:

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{nn} & k_{ns} \\ k_{ns} & k_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = \mathbf{K}_{\text{COH}} \boldsymbol{\varepsilon}. \quad (20)$$

Esta matriz contém os parâmetros de rigidez da ligação adesiva, cuja definição depende da formulação utilizada. Caso se esteja a considerar uma formulação local, esta é usada para simular fraturas de espessura nula, em que os parâmetros da matriz possuem valores extremamente elevados, com a finalidade de não haver deformações na estrutura induzidas pela presença dos elementos coesivos (Campilho et al. 2008). Para uma formulação contínua de camadas finas, mais especificamente para ligações adesivas, adquire-se uma boa aproximação aos parâmetros de rigidez admitindo que:

$$K_{nn} = E, K_{ss} = G, K_{ns} = 0 \quad (21)$$

onde  $E$  corresponde ao módulo de elasticidade longitudinal e  $G$  ao módulo de elasticidade transversal. Considerando esses parâmetros, o modelo reproduz de forma fiel a deformação da camada de adesivo

(Campilho et al. 2008). Em modo misto, a iniciação do dano pode ser definida por diferentes critérios, como o critério quadrático de tensões, expresso pela seguinte expressão:

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 = 1 \quad (22)$$

onde  $\langle \rangle$  são os parêntesis de Macaulay, que indicam que uma tensão de compressão não induz dano. Este critério distingue-se pela sua precisão, já testada em trabalhos anteriores (Campilho et al. 2009d). Quando  $t_m^0$  é atingido (Figura 87) pela igualdade da equação 0.29, a rigidez do material começa a sofrer um processo de amaciamento. A separação completa de um par de nós homólogos ( $\delta_m^f$  na Figura 87) é prevista por um critério linear energético, em função dos valores de  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$

$$\frac{G_I}{G_{Ic}} + \frac{G_{II}}{G_{IIc}} = 1. \quad (23)$$

#### 4.2.2 Estimativa da lei coesiva em modo II

As simulações numéricas foram realizadas com as condições apresentadas anteriormente com o objetivo de estabelecer, para cada adesivo testado, uma lei coesiva representativa do comportamento do mesmo ao corte, de tal forma que esta possa ser posteriormente aplicada para a previsão da resistência de juntas adesivas.

O método utilizado, considerado como um método inverso de ajuste de parâmetros, consistiu na introdução, no modelo numérico correspondente, do valor de  $G_{IIc}$  obtido experimentalmente pelo CBBM. O valor de  $G$  foi obtido experimentalmente a partir de  $E$  e  $\nu$ , considerando a relação da lei de Hooke para materiais isotrópicos. Inicialmente é usado um valor típico de  $t_s^0$ , cujo valor representativo do provete em causa é estimado por ajuste das curvas  $P$ - $\delta$  experimentais e numéricas de cada amostra. Após a consideração deste procedimento individualmente para cada provete dos 3 adesivos estudados, apresentam-se de seguida os valores médios de  $G_{IIc}$ ,  $t_s^0$ , e  $\delta_s^0$  e as respetivas leis coesivas triangulares.

Observou-se pelo procedimento de ajuste realizado que os valores de  $G_{IIc}$  e  $t_s^0$  influenciam bastante o perfil das curvas numéricas  $P$ - $\delta$ . O valor de  $G_{IIc}$ , que é inserido nas simulações numéricas, influencia principalmente o valor da carga de pico. A consideração de maiores valores de  $t_s^0$  aumenta a carga de pico e a rigidez da amostra até o pico de carga, levando a uma redução mais abrupta da carga pós-pico.

Nos resultados apresentados seguidamente apresenta-se também o valor de deslocamento relativo máximo em corte,  $\delta_s^f$ , para que ocorra uma rotura completa. Este valor é obtido a partir de  $G_{IIC}$  e  $t_s^0$ , igualando a área abaixo da lei coesiva (Figura 87) à respetiva energia de fratura crítica:

$$G_{IIC} = \frac{1}{2} t_s^0 \delta_s^f. \quad (24)$$

#### 4.2.2.1 Adesivo Araldite® AV138

A Tabela 21 apresenta os valores de entrada utilizados em cada um dos modelos numéricos das juntas ENF coladas com o adesivo Araldite® AV138, e cujo procedimento de ajuste permitiu a estimativa de  $t_s^0$  do adesivo.

Tabela 21 - Valores de entrada dos modelos numéricos das juntas ENF coladas com adesivo Araldite® AV138.

Provetes	$G_{IIC}$ [N/mm]	$E$ [MPa]	$G$ [MPa]
AV138_1	0,635	4890	1560
AV138_2	0,870	4890	1560
AV138_3	0,757	4890	1560
AV138_5	0,615	4890	1560
AV138_6	0,598	4890	1560
AV138_7	0,590	4890	1560
AV138_8	0,580	4890	1560

A Figura 88 mostra as curvas  $P$ - $\delta$  numérica e experimental de um provete ENF colado com o adesivo Araldite® AV138, após o procedimento iterativo de ajuste, e cuja concordância final é representativa do conjunto das simulações realizadas para todos os provetes. De facto, globalmente verificou-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais, nomeadamente no comportamento pós-pico, que corresponde à propagação da fenda e, como tal, representa a zona de maior importância no processo de ajuste. Constata-se que, de um modo geral, as curvas  $P$ - $\delta$  obtidas numericamente reproduzem bastante bem as curvas experimentais de todos os provetes.

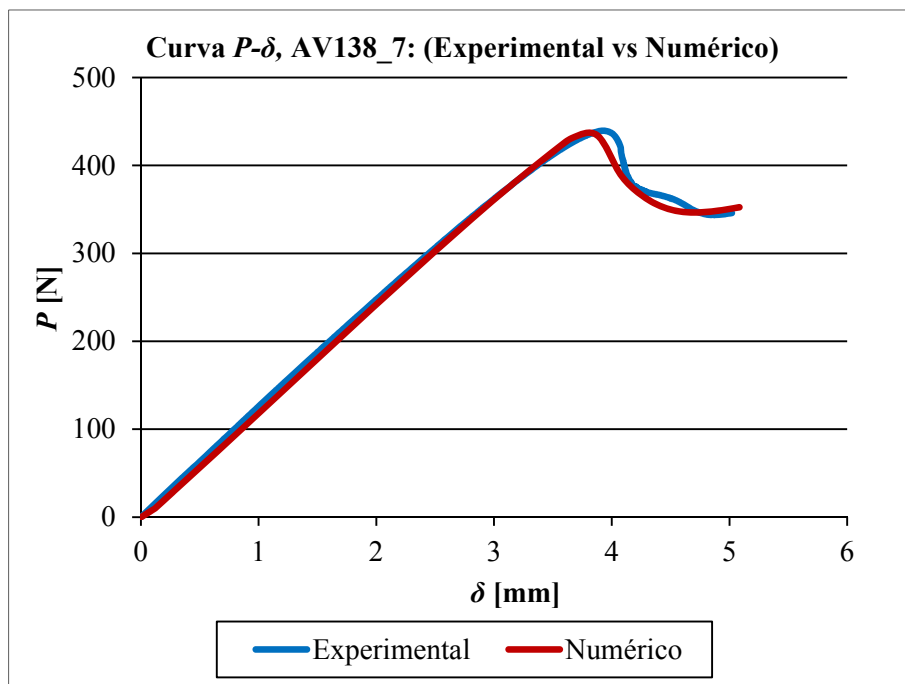


Figura 88 - Comparativo das curvas  $P$ - $\delta$  experimental e numérica após o procedimento de ajuste de um provete ENF colado com o adesivo Araldite® AV138.

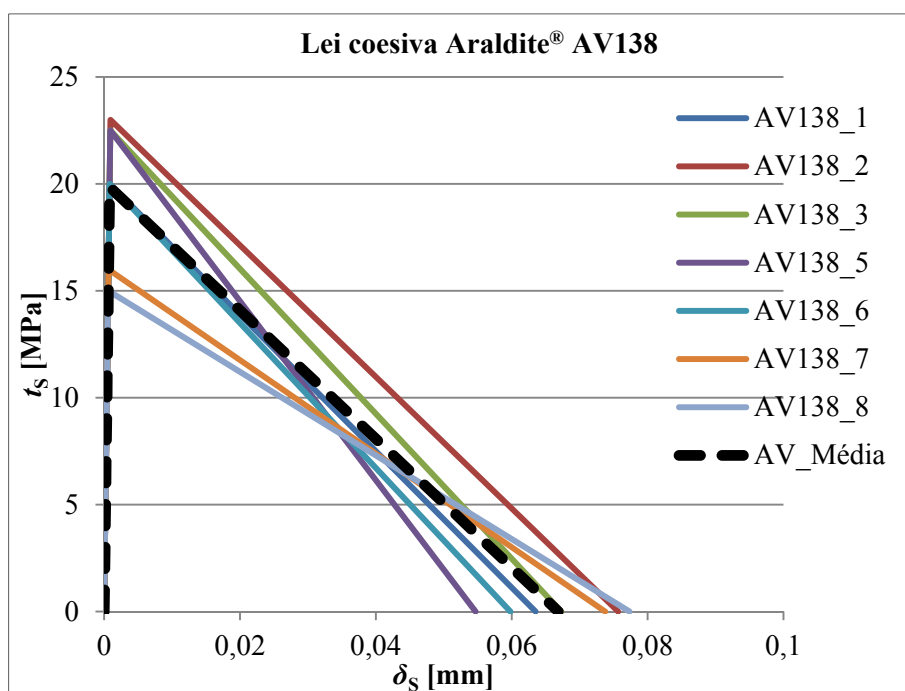


Figura 89 - Leis coesivas obtidas por ajuste numérico para os provetes ENF colados com o adesivo Araldite® AV 138, e respetiva lei coesiva média.

A Figura 89 mostra as leis coesivas triangulares obtidas para cada um dos provetes, auferidas através do ajuste das sete curvas  $P$ - $\delta$  experimentais do adesivo Araldite® AV138. É também apresentada

uma lei coesiva média, construída a partir das médias de  $t_s^0$  e  $G_{IIC}$  para os 7 provetes testados. É possível observar que as leis apresentam um bom grau de concordância entre elas, o que é indicativo da robustez dos resultados experimentais obtidos e processo iterativo de ajuste.

Na Tabela 22 estão apresentados os valores individuais de  $G_{IIC}$  e  $t_s^0$ , bem como  $\delta_s^0$  (deslocamento de carga máxima) e  $\delta_s^f$  (deslocamento de rotura).

Tabela 22 - Valores obtidos pela lei coesiva triangular, adesivo Araldite® AV138.

Provetes	$t_s^0$ [MPa]	$\delta_s^0$ [mm]	$\delta_s^f$ [mm]	$G_{IIC}$ [N/mm]
AV138_1	20,000	0,000818	0,063500	0,635
AV138_2	23,000	0,000941	0,075652	0,870
AV138_3	22,500	0,000920	0,067289	0,757
AV138_5	22,500	0,000920	0,054667	0,615
AV138_6	20,000	0,000818	0,059800	0,598
AV138_7	16,000	0,000654	0,073750	0,590
AV138_8	15,000	0,000613	0,077333	0,580
<b>AV Média</b>	19,857	0,000812	0,066835	0,664
<b>Desvio Padrão</b>	3,224	0,000132	0,008585	0,109

#### 4.2.2.2 Adesivo Araldite® 2015

A Tabela 23 apresenta os valores de entrada introduzidos em cada um dos modelos numéricos das juntas ENF coladas com o adesivo Araldite® 2015 para realização do procedimento de ajuste que permitiu a estimativa de  $t_s^0$  do adesivo.

Tabela 23 - Valores de entrada dos modelos numéricos das juntas ENF coladas com adesivo Araldite® 2015.

Provetes	$G_{IIC}$ [N/mm]	$E$ [MPa]	$G$ [MPa]
A2015_1	3,420	1850	560
A2015_3	2,580	1850	560
A2015_4	3,100	1850	560
A2015_5	2,840	1850	560
A2015_6	3,430	1850	560
A2015_7	2,850	1850	560
A2015_8	2,850	1850	560

A Figura 90 mostra o resultado final do ajuste entre as curvas  $P$ - $\delta$  numérica e experimental de um provete ENF colado com o adesivo Araldite® 2015, representativo da generalidade dos ensaios realizados no que concerne à reprodutibilidade conseguida dos resultados experimentais. Na generalidade dos ensaios, verificou-se uma concordância razoável entre os resultados numéricos e experimentais, mesmo no comportamento pós-pico, que corresponde à propagação da fenda, e no qual

se obteve especial cuidado para ajuste, pois é a zona que corresponde à propagação da fenda durante o ensaio. Verifica-se, de um modo geral, que as curvas  $P$ - $\delta$  obtidas numericamente reproduzem bastante bem as curvas experimentais de todos os provetes.

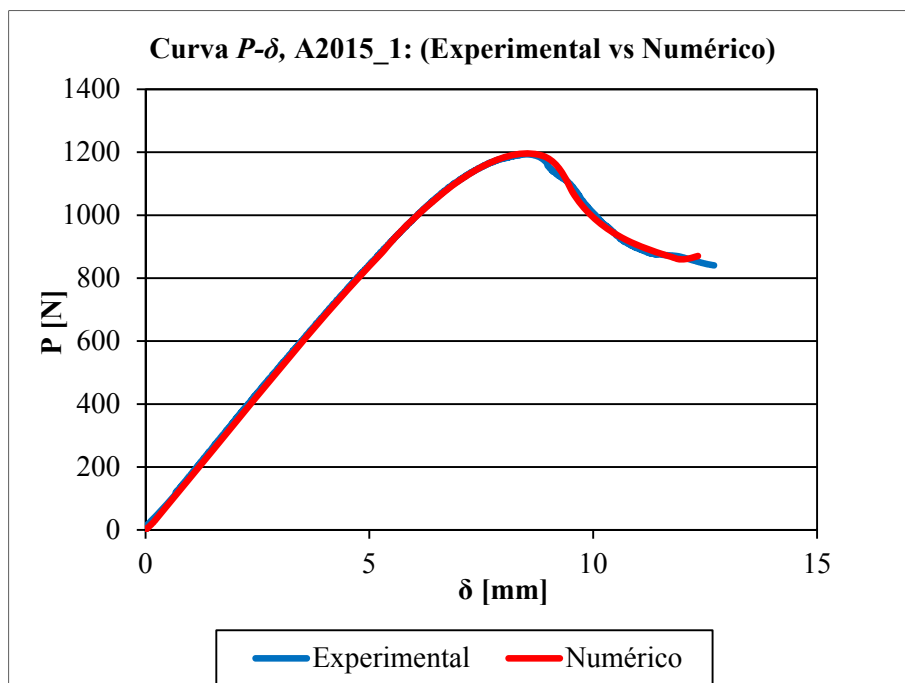


Figura 90 - Comparativo das curvas  $P$ - $\delta$  experimental e numérica após o procedimento de ajuste de um provete ENF colado com o adesivo Araldite® 2015.

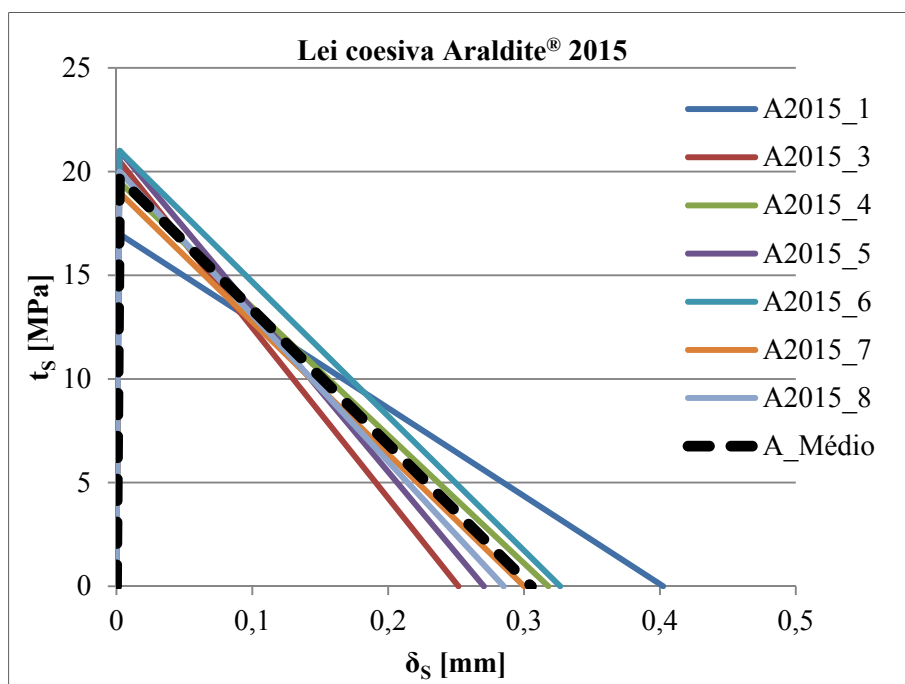


Figura 91 - Leis coesivas obtidas por ajuste numérico para os provetes ENF colados com o adesivo Araldite® 2015, e respetiva lei coesiva média.



A Figura 91 exibe as leis coesivas triangulares para cada um dos provetes obtidas através do ajuste das sete curvas  $P-\delta$  experimentais do adesivo Araldite® 2015. É igualmente apresentada uma lei coesiva média, traçada a partir das médias de  $t_s^0$  e  $G_{IIc}$  para os 7 provetes testados. É possível observar que as leis apresentam um grau de concordância razoável entre elas, o que é indicativo do rigor dos resultados experimentais obtidos e processo iterativo de ajuste. Na Tabela 24 estão discriminados os valores obtidos para cada lei coesiva triangular, e também os respectivos valores de  $\delta_s^0$  e  $\delta_s^f$ .

Tabela 24 - Valores obtidos pela lei coesiva triangular, adesivo Araldite® 2015.

Provetes	$t_s^0$ [MPa]	$\delta_s^0$ [mm]	$\delta_s^f$ [mm]	$G_{IIc}$ [N/mm]
A2015_1	17,000	0,001838	0,402353	3,420
A2015_3	20,500	0,002216	0,251707	2,580
A2015_4	19,500	0,002108	0,317949	3,100
A2015_5	21,000	0,002270	0,270476	2,840
A2015_6	21,000	0,002270	0,326667	3,430
A2015_7	19,000	0,002054	0,300000	2,850
A2015_8	20,000	0,002162	0,285000	2,850
<b>A_Médio</b>	19,714	0,002131	0,305362	3,010
<b>Desvio Padrão</b>	1,410	0,000152	0,049192	0,321

#### 4.2.2.3 Adesivo SikaForce® 7752 L60

A Tabela 25 apresenta os valores característicos de entrada estabelecidos para cada um dos modelos numéricos das juntas ENF coladas com o adesivo SikaForce® 7752, que serviram de base ao processo iterativo de ajuste que possibilitou a estimativa de  $t_s^0$  do adesivo.

Tabela 25 - Valores de entrada dos modelos numéricos das juntas ENF coladas com adesivo SikaForce® 7752.

Provetes	$G_{IIc}$ [N/mm]	$E$ [MPa]	$G$ [MPa]
S7752_1	5,950	490	190
S7752_2	5,465	490	190
S7752_3	5,949	490	190
S7752_4	4,813	490	190
S7752_5	5,676	490	190
S7752_6	6,300	490	190
S7752_7	5,619	490	190

A Figura 92 mostra um exemplo de curva  $P-\delta$  numérica e experimental do adesivo SikaForce® 7752, representativo da globalidade dos ensaios realizados, para um ensaio válido e após o procedimento iterativo de ajuste da curva numérica. De uma maneira geral, verificou-se uma concordância satisfatória entre os resultados numéricos e experimentais, mesmo no comportamento do pós-pico, que corresponde

à região de propagação da fenda e na qual se obteve especial cuidado para ajuste. Verifica-se, de um modo geral, que as curvas  $P - \delta$  obtidas numericamente reproduzem de forma bastante satisfatória as curvas experimentais de todos os provetes.

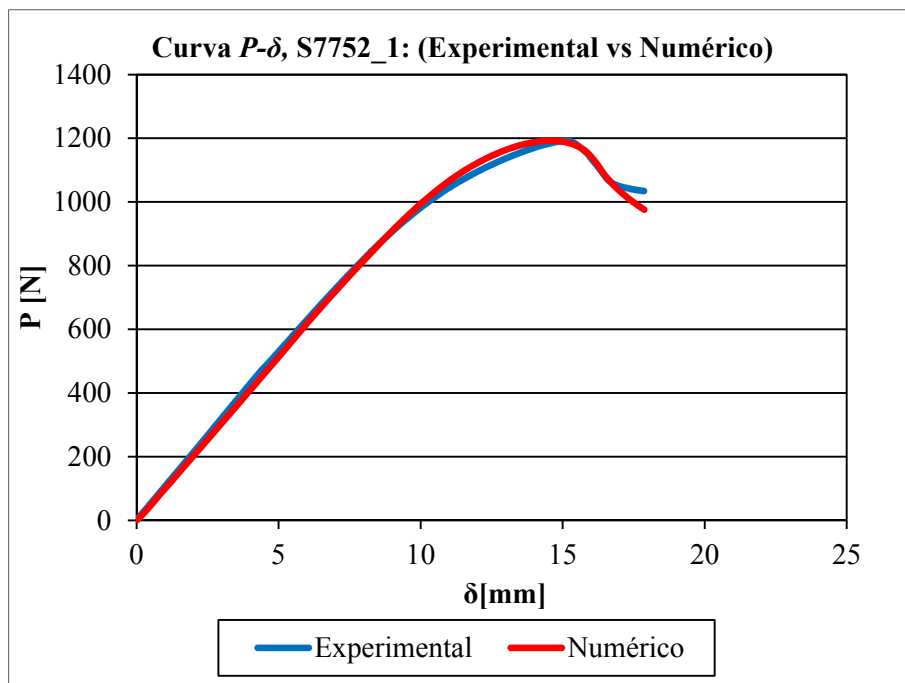


Figura 92 - Comparativo das curvas  $P-\delta$  experimental e numérica após o procedimento de ajuste de um provete ENF colado com o adesivo SikaForce® 7752.

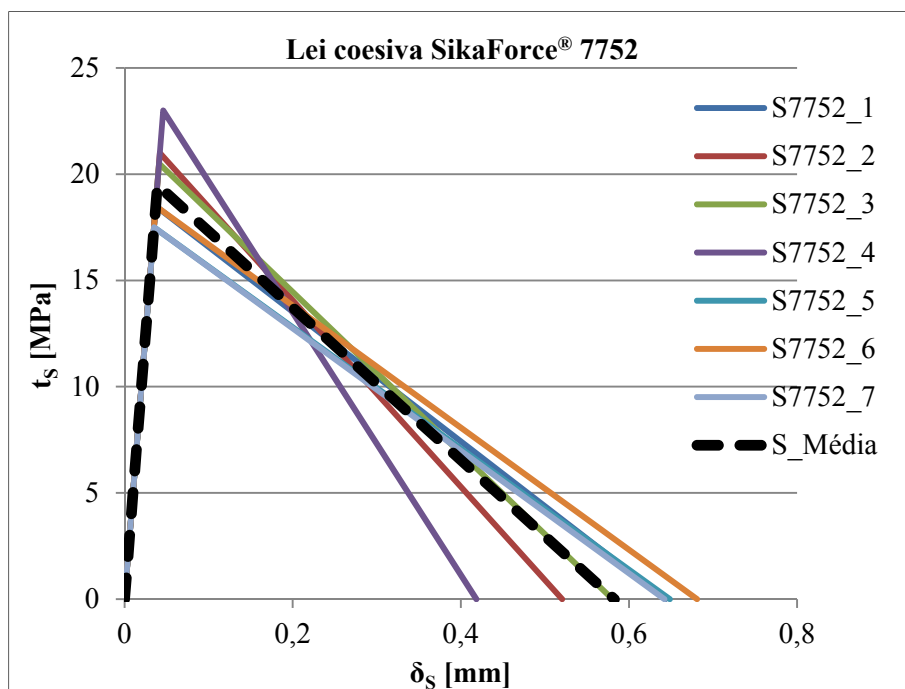


Figura 93 - Leis coesivas obtidas por ajuste numérico para os provetes ENF colados com o adesivo SikaForce® 7752, e respetiva lei coesiva média

A Figura 93 ilustra as leis coesivas triangulares obtidas individualmente para cada um dos provetes, adquiridas através do ajuste das sete curvas  $P - \delta$  experimentais do adesivo SikaForce® 7752. É apresentada uma lei coesiva média, traçada a partir das médias de  $t_s^0$  e  $G_{IIc}$  para os 7 provetes testados, cujos valores individuais foram obtidos por ajuste das sete curvas  $P-\delta$  experimentais do adesivo SikaForce® 7752.

Na Tabela 26 estão expostos os valores obtidos das leis coesivas para cada provete.

Tabela 26 - Valores obtidos pela lei coesiva triangular, adesivo SikaForce® 7752.

Provetes	$t_s^0$ [MPa]	$\delta_s^0$ [mm]	$\delta_s^f$ [mm]	$G_{IIc}$ [N/mm]
S7752_1	18,500	0,037000	0,643243	5,950
S7752_2	21,000	0,042000	0,520476	5,465
S7752_3	20,500	0,041000	0,580390	5,949
S7752_4	23,000	0,046000	0,418522	4,813
S7752_5	17,500	0,035000	0,648686	5,676
S7752_6	18,500	0,037000	0,681081	6,300
S7752_7	17,500	0,035000	0,642171	5,619
<b>S_Média</b>	19,500	0,039000	0,582740	5,682
<b>Desvio Padrão</b>	2,062	0,004123	0,092758	0,471

### 4.3 Previsão do comportamento das juntas

Neste trabalho, o valor de  $G_{IIc}$  para os diversos provetes de cada adesivo testado foi obtido experimentalmente a partir de ensaios ENF. Posteriormente, o valor de  $t_s^0$  foi obtido por um método iterativo de ajuste. É assim necessário compreender com mais detalhe a influência da variação de  $G_{IIc}$  e  $t_s^0$  na curva  $P-\delta$  do ensaio ENF obtida numericamente.

Neste âmbito, foi realizado um estudo de sensibilidade destes dois parâmetros no resultado da curva  $P-\delta$  numérica. Foram utilizados diferentes valores de tenacidade (variação de  $\pm 10\%$  e  $\pm 25\%$  do valor médio experimental de cada adesivo) e tensão máxima ao corte (na gama de  $\pm 10\%$  e  $\pm 50\%$  do valor médio experimental) para a lei de tração separação bilinear mostrada na Figura 87. Paralelamente a esta análise, foi realizado um estudo numérico para avaliar a adequação dos quatro métodos de redução utilizados para medir  $G_{IIc}$ . O objetivo é verificar como os métodos utilizados reproduzem o  $G_{IIc}$  introduzido nos modelos numéricos, aplicando-os às respetivas curvas  $P-\delta$  numéricas. Para realizar este estudo, os parâmetros numéricos  $P-\delta-a$  foram obtidos dos modelos numéricos e usados para obter  $G_{IIc}$  pelos métodos CCM, DBT, CBT e CBBM.

### 4.3.1 Adesivo Araldite® AV138

A Tabela 27 apresenta os valores de entrada para a análise de sensibilidade da curva  $P-\delta$  do adesivo Araldite® AV138, considerando a variação de  $G_{IIc}$ . A variação de valores cifra-se em -25%, -10%, +10% e +25% do valor experimental médio de  $G_{IIc}$  obtido a partir dos vários ensaios ENF realizados.

Tabela 27 - Parâmetros numéricos de entrada, variando o  $G_{IIc}$  do adesivo Araldite® AV138.

Provete AV138	$t_s^0$ [MPa]	$G_{IIc}$ [N/mm]	$E$ [MPa]	$G$ [MPa]
GIIc_M+T_M	19,857	0,664	4890	1560
GIIc_M(-10%)+T_M	19,857	0,598	4890	1560
GIIc_M(-25%)+T_M	19,857	0,498	4890	1560
GIIc_M(+10%)+T_M	19,857	0,730	4890	1560
GIIc_M(+25%)+T_M	19,857	0,830	4890	1560

Como se pode observar na Figura 94, a variação de  $G_{IIc}$  afeta bastante a curva  $P-\delta$  do ensaio, nomeadamente a carga de pico. A rigidez mantém-se inalterada até a carga máxima do ensaio ser atingida. Desta forma, o aumento de  $G_{IIc}$  traduz-se também num aumento do deslocamento de carga máxima.

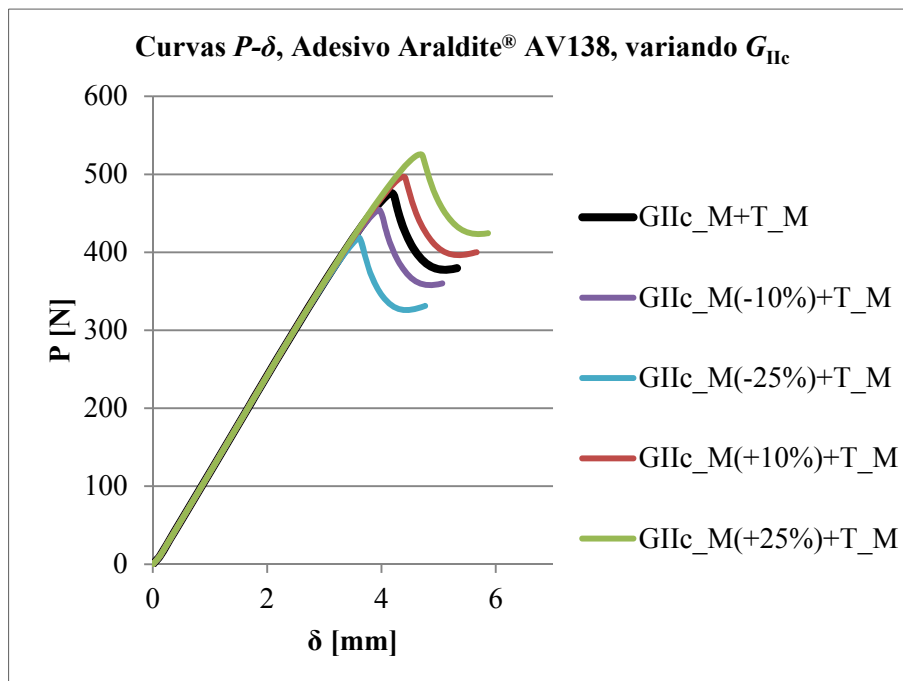


Figura 94 - Curvas  $P-\delta$  para variação de  $G_{IIc}$ , para o Araldite® AV138.

A Tabela 28 apresenta os valores dos parâmetros de entrada para a análise de sensibilidade da curva  $P-\delta$  do adesivo Araldite® AV138, agora considerando a variação de  $t_s^0$ . A variação de valores cifra-se em -50%, -10%, +10% e +50% do valor médio de  $t_s^0$  obtido pelo procedimento de ajuste.

Tabela 28 - Parâmetros numéricos de entrada, variando o  $t_s^0$  do adesivo Araldite® AV138.

Provete AV138	$t_s^0$ [MPa]	$G_{IIc}$ [N/mm]	$E$ [MPa]	$G$ [MPa]
GIIc_M+T_M	19,857	0,664	4890	1560
GIIc_M+T_M(-10%)	17,871	0,664	4890	1560
GIIc_M+T_M(-50%)	9,929	0,664	4890	1560
GIIc_M+T_M(+10%)	21,843	0,664	4890	1560
GIIc_M+T_M(+50%)	29,786	0,664	4890	1560

Na Figura 95 compara-se as curvas  $P-\delta$  numéricas para as condições mencionadas. Observou-se a variação de tensão de pico, registrando-se um ligeiro aumento na carga necessária para se iniciar a propagação da fenda com o aumento de  $t_s^0$ . No entanto, a diferença mais significativa diz respeito à variação da rigidez dos modelos. Como era de esperar, para valores mais reduzidos de  $t_s^0$  surge um amaciamento significativo da curva  $P-\delta$  antes da carga máxima, nomeadamente para uma variação de  $t_s^0$  de 50%.

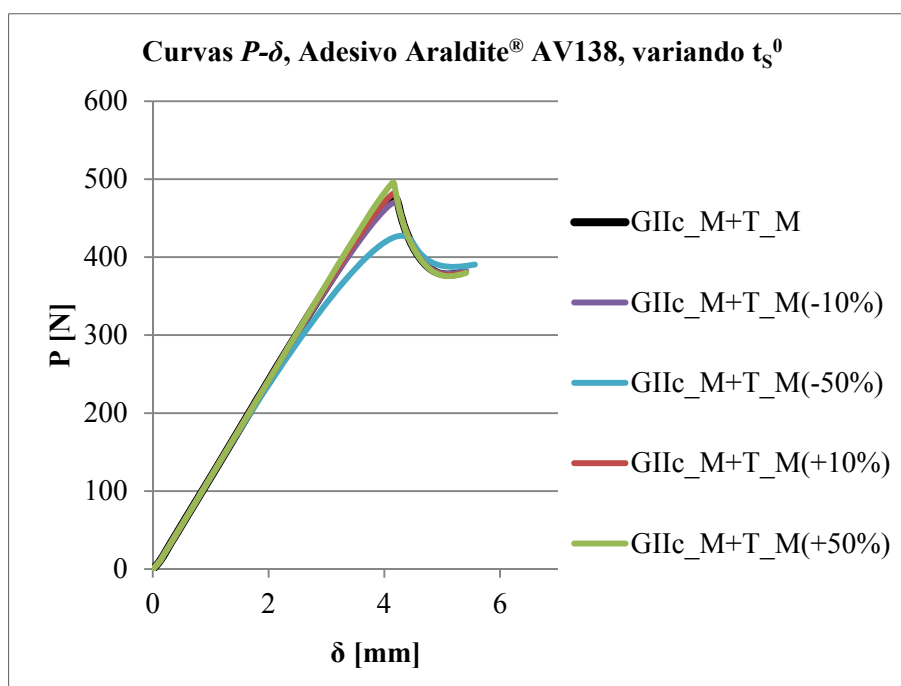


Figura 95 - Curvas  $P-\delta$  para variação de  $t_s^0$ , para o Araldite® AV138.

Conclui-se assim que o valor de  $G_{IIc}$  influencia principalmente o valor da carga de pico, mantendo a rigidez, enquanto o aumento  $t_s^0$  origina a necessidade de cargas maiores para iniciar a propagação da fenda com elevada rigidez até ao pico da carga. No entanto observa-se uma redução da

carga no pós-pico mais abrupta e sem aumento da deformação com a redução de  $t_s^0$ . Em função das diferentes variações obtidas, é possível dizer que é possível obter uma lei coesiva única correspondente a cada ensaio. Tal facto também se vai verificar para os restantes adesivos.

Paralelamente ao estudo de sensibilidade, foi também realizada uma análise de adequação de cada um dos 4 métodos de extração de  $G_{IIc}$ . A Figura 96 mostra os resultados obtidos para um modelo numérico no qual foi utilizado o valor médio de  $G_{IIc}$  para o adesivo Araldite® AV138. Observa-se, para os quatro esquemas de redução de dados, uma região com patamar bem definido, correspondente à propagação da fenda com  $G_{IIc}$  constante. De registar um comportamento crescente de  $G_{II} = f(a)$  quando a fenda se aproxima do cilindro de carga. Este efeito é explicado pela presença do ZPF, que induz compressão na camada de adesivo. O DBT e o CBBM apresentam um patamar similar, enquanto o CBT subestima o valor de  $G_{IIc}$  (Campilho et al. 2009c). As curvas- $R$  obtidas pelos métodos CCM, DBT e CBBM apresentam uma boa previsão do valor introduzido nos modelos, ao contrário do CBT, que subestimou o valor introduzido de  $G_{IIc}$  por defeito. Além disso, deve-se ressaltar que os métodos CCM, DBT e CBT também exigem a medição do comprimento da fenda durante a fase de propagação, o que foi efetuado de forma manual e, como tal, é propenso a introduzir erros adicionais. Por outro lado, usando o CBBM, é obtida curva- $R$  completa apenas a partir dos dados da curva  $P-\delta$ .

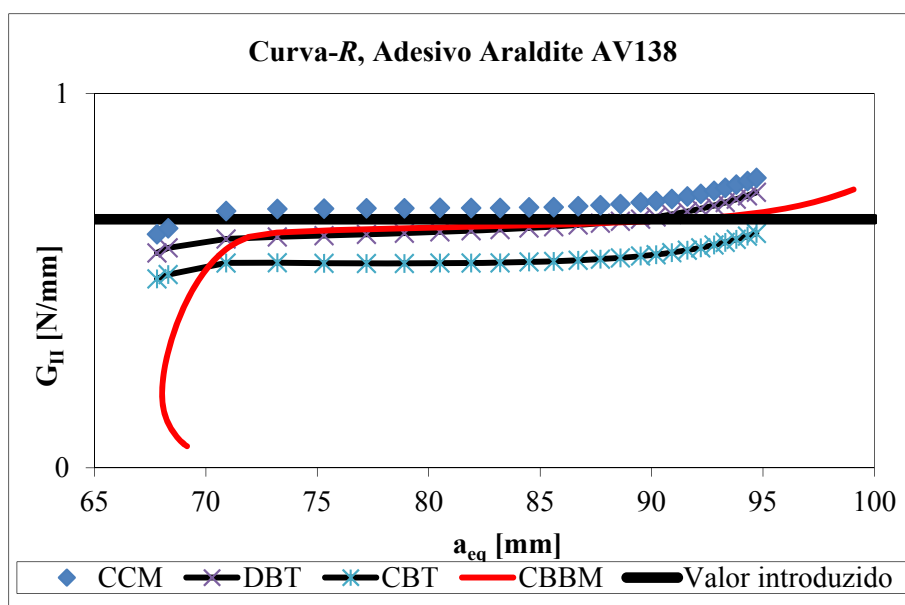


Figura 96 - Comparação dos valores de  $G_{IIc}$  obtidos pelos vários métodos, adesivo Araldite® AV138.

### 4.3.2 Adesivo Araldite® 2015

A Tabela 29 apresenta os valores de entrada para a análise de sensibilidade da curva  $P$ - $\delta$  do adesivo Araldite® 2015, começando pela variação de  $G_{IIc}$  com valores de -25%, -10%, +10% e +25% do valor médio de  $G_{IIc}$  obtido experimentalmente pelos vários ensaios ENF realizados.

Tabela 29 - Parâmetros numéricos de entrada, variando o  $G_{IIc}$  do adesivo Araldite® 2015.

Provete A2015	$t_s^0$ [MPa]	$G_{IIc}$ [N/mm]	$E$ [MPa]	$G$ [MPa]
GIIc_M+T_M	19,714	3,010	1850	560
GIIc_M(-10%)+T_M	19,714	2,710	1850	560
GIIc_M(-25%)+T_M	19,714	2,260	1850	560
GIIc_M(+10%)+T_M	19,714	3,310	1850	560
GIIc_M(+25%)+T_M	19,714	3,760	1850	560

Observando a Figura 97 confirma-se que a variação de  $G_{IIc}$  nas curvas  $P$ - $\delta$  denota que as curvas  $P$ - $\delta$  são bastante sensíveis a  $G_{IIc}$ , tal como aconteceu para o adesivo Araldite® AV138. O valor de pico de carga acompanha a subida e a descida do valor de  $G_{IIc}$ , embora sem alterar de forma perceptível a rigidez da curva  $P$ - $\delta$  até ao início do dano. Isto não é surpreendente, uma vez que  $G_{IIc}$  deverá ser proporcional a  $P^2$ , conforme se encontra patente nas expressões de cálculo de  $G_{IIc}$  anteriormente apresentadas. O aumento do valor de  $G_{IIc}$  é acompanhado de um aumento do deslocamento aplicado correspondente à carga de pico.

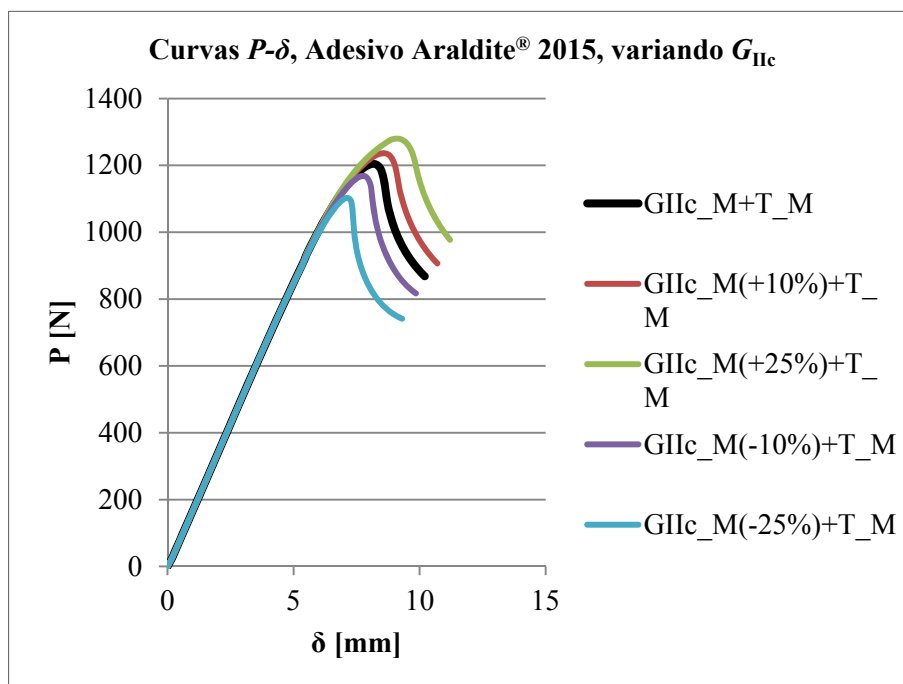


Figura 97 - Curvas  $P$ - $\delta$  para variação de  $G_{IIc}$  para o Araldite® 2015.

A Tabela 30 apresenta os valores de entrada para a análise de sensibilidade da curva  $P-\delta$  do adesivo Araldite® 2015, relativa ao valor de  $t_s^0$ . A variação utilizada foi de -50%, -10%, +10% e +50% do valor médio de  $t_s^0$ .

Tabela 30 - Parâmetros numéricos de entrada, variando o  $t_s^0$  do adesivo Araldite® 2015.

Provete A2015	$t_s^0$ [MPa]	$G_{IIc}$ [N/mm]	$E$ [MPa]	$G$ [MPa]
GIIC_M+T_M	19,714	3,010	1850	560
GIIC_M+T_M(-10%)	17,743	3,010	1850	560
GIIC_M+T_M(-50%)	9,857	3,010	1850	560
GIIC_M+T_M(+10%)	21,685	3,010	1850	560
GIIC_M+T_M(+50%)	29,571	3,010	1850	560

Na Figura 98 são comparados os resultados obtidos pelas curvas  $P-\delta$  dos vários ensaios, com variação de tensão de pico, registrando-se um aumento pouco significativo na carga necessária para se iniciar a propagação da fenda com o aumento de  $t_s^0$ . No entanto, a redução de  $t_s^0$  abaixo de um dado valor provoca uma grande diminuição de rigidez antes da propagação da fenda e também da carga de pico.

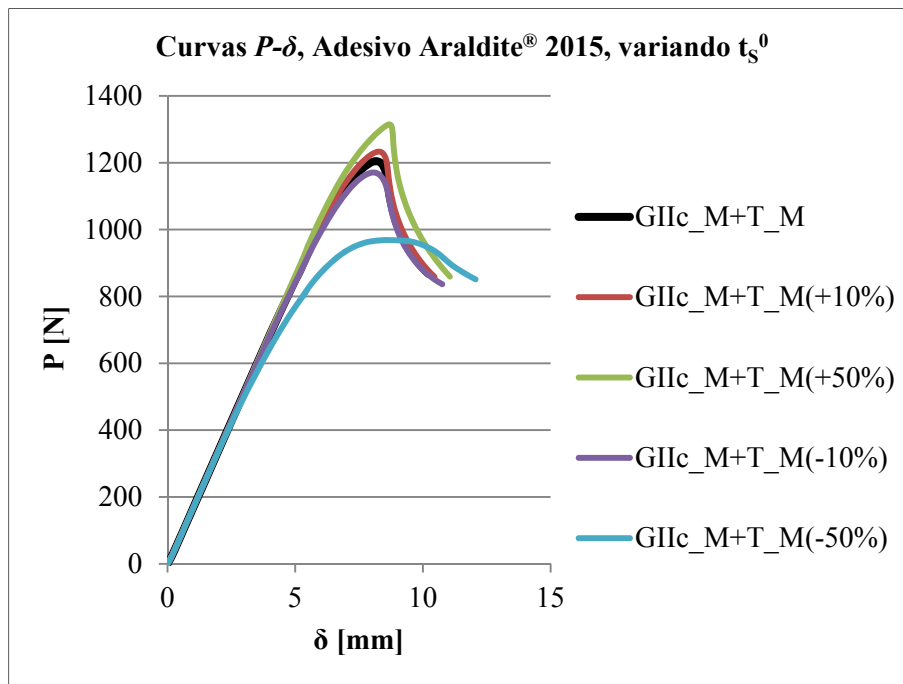


Figura 98 - Curvas  $P-\delta$  para variação de  $t_s^0$ , para o Araldite® 2015.

O valor de  $G_{IIc}$  é o que influencia de forma mais significativa o valor da carga de pico, mantendo a rigidez inicial, enquanto que incrementos no valor de  $t_s^0$  têm uma maior influência na rigidez antes da carga de pico ser atingida, mas apenas para reduções significativas de  $t_s^0$ .



A Figura 99 apresenta os resultados do estudo de previsão de  $G_{IIc}$  pelos quatro métodos para as juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015. A Figura 99 mostra, para os quatro esquemas de redução de dados aplicados à curva  $P$ - $\delta$  numérica, uma região com patamar mais bem definido e similar para os métodos CCM e CBBM, enquanto os métodos DCT e CBT preveem o valor introduzido de  $G_{IIc}$  por defeito e não têm patamar bem definido, devido à tendência crescente de  $G_{II}$  com o comprimento de fenda. Considera-se que esta discrepância relativamente ao observado para os resultados do adesivo Araldite® AV138 se deve à maior plasticidade do adesivo. O aumento de  $G_{II}$  a partir de um dado valor de comprimento de fenda é explicado pela presença da ZPF, que é mais extensa relativamente ao adesivo anteriormente estudado devido à ductilidade deste adesivo.

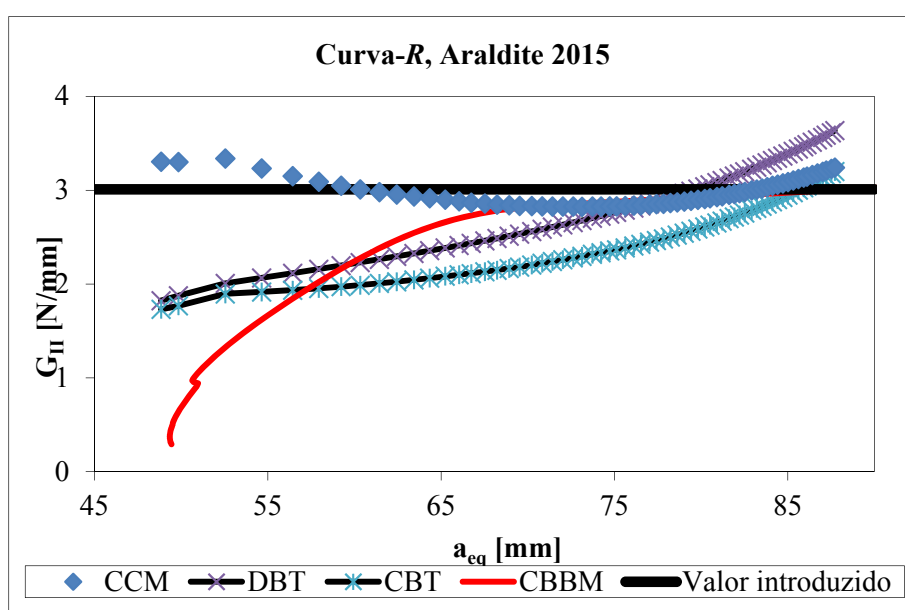


Figura 99 - Comparação dos valores de  $G_{IIc}$  obtidos pelos vários métodos, adesivo Araldite® 2015.

### 4.3.3 Adesivo SikaForce® 7752 L60

A Tabela 31 apresenta os valores de entrada para o estudo de sensibilidade da curva  $P$ - $\delta$  do adesivo SikaForce® 7752, começando o estudo pelo valor de  $G_{IIc}$ . A variação é de -25%, -10%, +10% e +25% do valor médio de  $G_{IIc}$  obtido experimentalmente pelos vários ensaios ENF realizados.

Tabela 31 - Parâmetros numéricos de entrada, variando o  $G_{IIc}$  do adesivo SikaForce® 7752.

Provete S7752	$t_s^0$ [MPa]	$G_{IIc}$ [N/mm]	$E$ [MPa]	$G$ [MPa]
GIIC_M+T_M	19,500	5,682	490	190
GIIC_M(-10%)+T_M	19,500	5,114	490	190
GIIC_M(-25%)+T_M	19,500	4,262	490	190
GIIC_M(+10%)+T_M	19,500	6,250	490	190
GIIC_M(+25%)+T_M	19,500	7,025	490	190

Observando a Figura 100, confirma-se que a variação de  $G_{IIC}$  provoca um efeito idêntico ao observado para os adesivos anteriormente estudados, isto é, variação correspondente da carga de pico com manutenção da mesma rigidez.

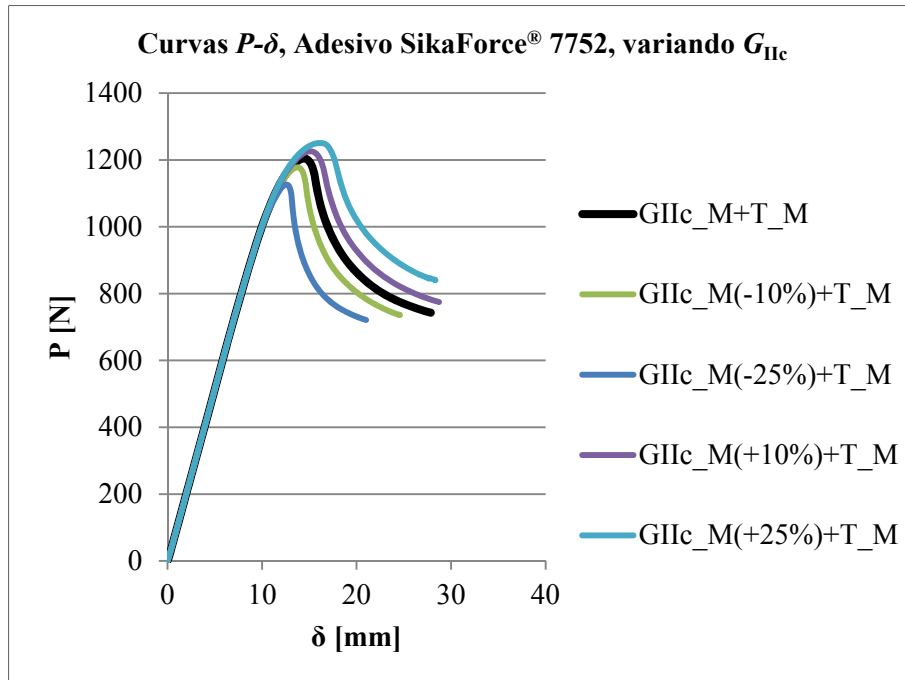


Figura 100 - Curvas  $P-\delta$  para variação de  $G_{IIC}$ , para o SikaForce® 7752.

A Tabela 32 apresenta os valores introduzidos nos modelos numéricos das curvas  $P-\delta$  do adesivo SikaForce® 7752, para o estudo do efeito de  $t_s^0$ . A variação considerada foi de -50%, -10%, +10% e +50% do valor médio de  $t_s^0$  ajustado nos ensaios numéricos dos vários provetes.

Tabela 32 - Parâmetros numéricos de entrada, variando o  $t_s^0$  do adesivo SikaForce® 7752.

Proвете S7752	$t_s^0$ [MPa]	$G_{IIC}$ [N/mm]	$E$ [MPa]	$G$ [MPa]
GIIc_M+T_M	19,500	5,682	490	190
GIIc_M+T_M(-10%)	17,550	5,682	490	190
GIIc_M+T_M(-50%)	9,750	5,682	490	190
GIIc_M+T_M(+10%)	21,450	5,682	490	190
GIIc_M+T_M(+50%)	29,250	5,682	490	190

A Figura 101 permite observar o comportamento registado ao aplicar as propriedades da Tabela 32, e que se traduziu numa variação algo idêntica à observada para os 2 adesivos anteriormente estudados. Assim, o valor de  $t_s^0$  afeta principalmente a rigidez antes da obtenção da carga de pico e o valor de carga de pico para quedas acentuadas do mesmo.

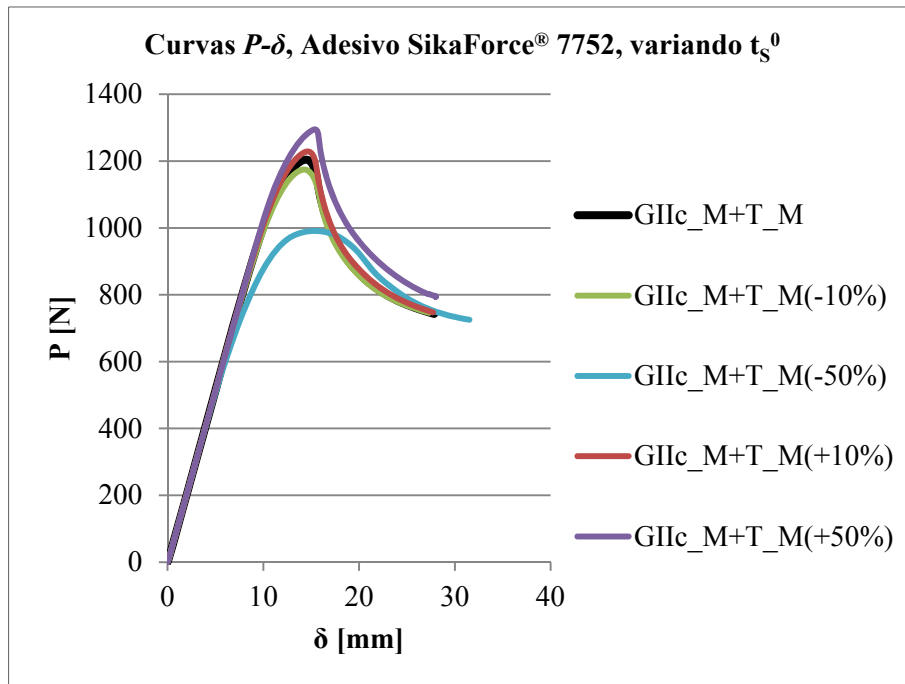


Figura 101 - Curvas  $P$ - $\delta$  para variação de  $t_s^0$ , para o SikaForce® 7752.

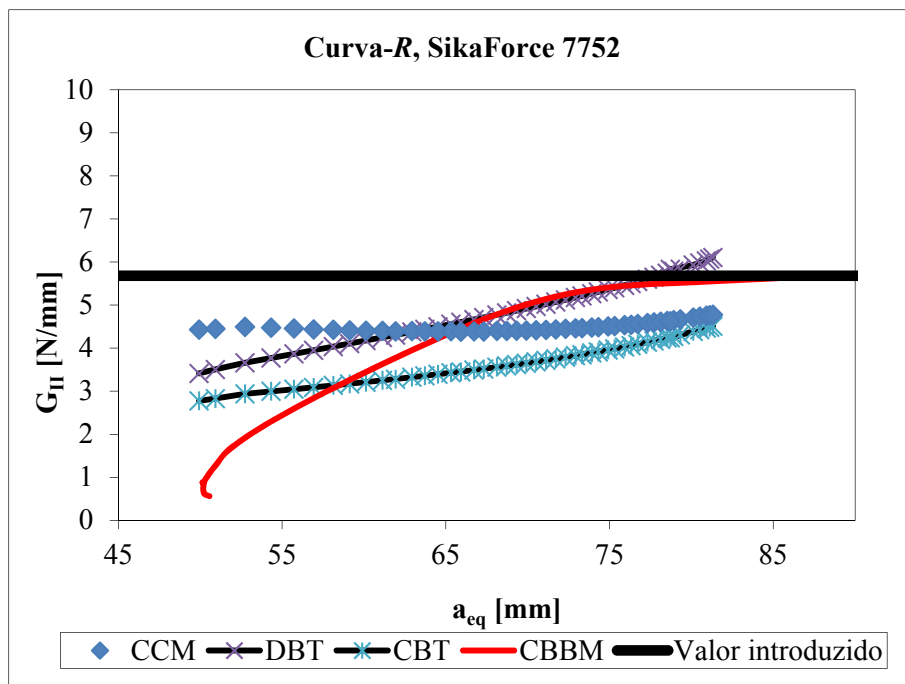


Figura 102 - Comparação dos valores de  $G_{IIc}$  obtidos pelos vários métodos, adesivo SikaForce® 7752.

A Figura 102 mostra a estimativa de curva- $R$  pelos 4 métodos de redução após introdução no modelo numérico do valor médio de  $G_{IIc}$  dos ensaios experimentais. O comportamento é semelhante ao observado para o adesivo Araldite® 2015, embora neste caso apenas o método CBBM apresente uma boa concordância com o valor de  $G_{IIc}$  introduzido no modelo numérico, tendo os restantes 3 métodos

previsto por defeito o valor introduzido de  $G_{IIC}$ . Considera-se que este comportamento, obtido em maior escala para o SikaForce<sup>®</sup> 7752 relativamente ao Araldite<sup>®</sup> 2015, se deve à plasticidade destes adesivos, uma vez que os métodos CCM, DBT e CBT não estão vocacionados para este tipo de adesivos por serem baseados na Mecânica da Fratura convencional.



# 5 Conclusões

A realização deste trabalho teve como objetivo caracterizar a tenacidade à fratura de três adesivos através da energia de fratura crítica em corte ( $G_{IIc}$ ) utilizando o ensaio ENF, bem como estimar a respetiva lei coesiva. A parte inicial do trabalho consistiu então na determinação experimental dos valores de  $G_{IIc}$  por 4 métodos de redução distintos. Os valores médios  $G_{IIc}$  obtidos pelos vários métodos para o adesivo Araldite® AV138 foram os seguintes:  $0,561 \pm 0,064$  N/mm (CCM),  $0,606 \pm 0,053$  N/mm (DBT),  $0,511 \pm 0,058$  N/mm (CBT) e  $0,618 \pm 0,069$  N/mm (CBBM). No caso do adesivo Araldite® 2015 os valores médios obtidos de  $G_{IIc}$  foram os seguintes:  $3,113 \pm 0,334$  N/mm (CBT),  $2,859 \pm 0,238$  N/mm (DBT),  $2,517 \pm 0,164$  N/mm (CBT) e  $2,967 \pm 0,273$  N/mm (CBBM). Para o adesivo SikaForce® 7752 apenas se utilizou o método CBBM, que resultou em  $G_{IIc} = 5,562 \pm 0,356$  N/mm.

Após a realização dos ensaios, observou-se que as curvas  $P-\delta$ , assim como as curvas- $R$  obtidas experimentalmente, apresentaram boa reprodutibilidade, o que mostra a robustez dos resultados obtidos. Para cada um dos 3 adesivos testados, observou-se uma boa coerência de valores entre os diversos ensaios para cada adesivo, e também entre métodos de redução para um dado adesivo. O método CBT foi sempre o mais conservativo registando valores por defeito em relação aos outros métodos utilizados. Para o adesivo Araldite® AV138, a diferença percentual máxima de um ensaio para a média dos ensaios de cada adesivo foi de 11,40% para o CCM, de 8,73% para o DBT, de 11,28% para o CBT e de 11,20% para o CBBM. No caso do adesivo Araldite® 2015, esta mesma diferença foi a seguinte: 10,72% para o CCM, 8,32%, para o DBT, 6,52% para o CBT e 9,20% para o CBBM. O adesivo SikaForce® 7752 registou um desvio máximo em valor absoluto para o método CBBM de 13,46%.

Após a realização dos ensaios experimentais verificou-se assim que o adesivo mais frágil era o Araldite® AV138, seguido pelo Araldite® 2015 e finalmente o Sikaforce® 7752, o que se revelou estar de acordo com o comportamento observado na literatura para estes adesivos. Devido a esta diferença de ductilidade registou-se uma grande variação da extensão do patamar das curvas- $R$ . Assim sendo, observou-se uma redução deste patamar desde o adesivo mais frágil para o mais dúctil devido à ZPF que apresenta uma dimensão crescente com o aumento da ductilidade do adesivo. Como tal, com o

aumento da ductilidade, a ZPF chega mais rapidamente à região central do carregamento do provete, o que inviabiliza a medição de  $G_{IIc}$  por adicionar compressão ao estado de tensão que idealmente deve ser de corte puro.

Comparando os vários métodos de redução, observa-se que o CBBM é o mais robusto e fiável, já que evita a medição do comprimento da fenda, eliminando assim esta fonte de erro na medição de  $G_{IIc}$ . Para além deste facto, contabiliza de forma rigorosa a plasticidade na medição de  $G_{IIc}$ . Os restantes 3 métodos necessitam da medição do comprimento de fenda, o que pode conduzir a erros significativos, especialmente se houver uma discrepância entre a rotura do adesivo e da tinta corretora usada para melhorar a visualização da fenda. O CCM acresce a esta fonte de erro dificuldades no ajuste do polinómio usado para reproduzir  $C=f(a)$ , necessário para o cálculo de  $dC/da$ .

A análise numérica permitiu encontrar o valor de  $t_s^0$  para cada ensaio realizado pelo método inverso, que consiste no ajuste das curvas  $P-\delta$  numéricas às experimentais. Com este parâmetro e  $G_{IIc}$ , torna-se possível definir a lei coesiva para cada ensaio, representativa do adesivo em causa. Observou-se que, pelo ajuste de  $t_s^0$ , é possível obter uma aproximação bastante precisa das curvas  $P-\delta$  experimentais para os três adesivos testados. No caso do adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138 os valores médios e respetivos desvios foram os seguintes:  $t_s^0=19,857\pm 3,224$  MPa,  $\delta_s^0=0,000812\pm 0,000132$  mm,  $\delta_s^f=0,066835\pm 0,008585$  mm e  $G_{IIc}=0,664\pm 0,109$  N/mm. Para o adesivo Araldite<sup>®</sup> 2015 os valores foram:  $t_s^0=19,714\pm 1,410$  MPa,  $\delta_s^0=0,0021131\pm 0,000152$  mm,  $\delta_s^f=0,305362\pm 0,049192$  mm e  $G_{IIc}=3,010\pm 0,321$  N/mm. Para o adesivo SikaForce<sup>®</sup> 7752 obteve-se os seguintes valores:  $t_s^0=19,500\pm 2,062$  MPa,  $\delta_s^0=0,039000\pm 0,004123$  mm,  $\delta_s^f=0,582740\pm 0,092758$  mm e  $G_{IIc}=5,682\pm 0,471$  N/mm.

Foi realizado um estudo de sensibilidade, no sentido de averiguar a influência de  $G_{IIc}$  e  $t_s^0$  nas curvas  $P-\delta$  dos ensaios ENF. Este estudo permitiu concluir que o  $G_{IIc}$  é o parâmetro que mais influencia a curva  $P-\delta$  em termos da carga de pico, mantendo a rigidez inicial, enquanto o valor de  $t_s^0$  apresenta maior influência na rigidez antes da carga de pico ser atingida. Em função deste comportamento, concluiu-se que, com o método inverso de ajuste, é possível chegar a uma lei coesiva única em corte para um determinado ensaio. Foi igualmente realizado um estudo numérico para avaliar a adequação dos quatro métodos de redução utilizados para medir  $G_{IIc}$ , pela reprodução do valor de  $G_{IIc}$  inserido nos modelos numéricos, e aplicando os métodos de redução aos resultados numéricos. Observou-se que para o adesivo frágil a correspondência é excelente, enquanto o aumento da ductilidade do adesivo provoca desfasamentos crescentes para os resultados do CCM, DBT e CBT, devido à não contabilização de forma satisfatória da ductilidade dos adesivos por parte destes métodos.

Com o trabalho realizado, concluiu-se que os MDC são um método adequado e fiável para a previsão do comportamento das juntas. São também disponibilizadas leis coesivas em corte de camada fina de adesivo dos adesivos estudados, que podem ser posteriormente usadas para previsão de resistência de juntas adesivas, se combinadas com as correspondentes leis coesivas em tração e respetivos critérios de iniciação e propagação de dano em modo misto.

Como sugestões de trabalhos futuros, apresentam-se as seguintes:

- Comparação do ensaio ENF com os ensaios 4ENF e ELS para averiguação da capacidade de obtenção da lei coesiva em corte dos adesivos;
- Utilização do método do integral- $J$  para obtenção do valor de  $G_{IIc}$ , devido ao facto de este método ser mais adequado para contabilização da plasticidade dos materiais;
- Utilização do método do integral- $J$  para obtenção da lei coesiva ao corte pelo método direto, e averiguação da correspondência de resultados.





## *Referências Documentais*

(Adams e Coppendale 1977) Adams RD, Coppendale JJ, Peppiat NA. Failure analysis of aluminium-aluminium bonded joints. In Adhesion (Allen KW ed), Applied Science Publishers, London, 1977.

(Adams e Walrath 1987) Adams DF, Walrath DE. Current status of the Iosipescu shear test method. *Journal of Composite Materials* 1987;21:494-507.

(Adams et al. 1997) Adams RD, Comyn J, Wake WC. *Structural Adhesive Joints in Engineering*, Second Edition. Chapman & Hall, London, 1997.

(Alfano e Crisfield 2001) Alfano G, Crisfield MA. Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues. *International Journal of Numerical Methods in Engineering* 2001;50:1701-1736.

(Allix e Corigliano 1996) Allix O e Corigliano A. Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens. *International Journal of Fracture* 1996;77:111-140.

(Althof 1974) Althof WG. Verfahren zur ermittlung von schubspannungs-gleitungs-diagrammen von konstruktionsklebstoffen. *Materialpruf* 1974;16:387-404.

(Andersson e Stigh 2004) Andersson T, Stigh U. The stress-elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces. *International Journal of Solids and Structures* 2004;41:413-434.

(ASTM-E8M-04) Standard test methods for tension testing of metallic materials. 2004.

(Banea et al. 2014) Banea MD, da Silva LFM, Carbas RJC, Campilho RDSG. Mechanical and thermal characterization of a structural polyurethane adhesive modified with thermally expandable particles. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 2014;54:191-199.

(Barenblatt 1959) Barenblatt GI. The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypothesis. Axially symmetric cracks. *Applied Mathematics and Mechanics* 1959;23:622-636.

(Barenblatt 1962) Barenblatt GI. The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture. *Advances in Applied Mechanics* 1962;7:55-129.

- (Bezemer et al. 1988) Bezemer AA, Guyt CB, Vlot A. New impact specimen for adhesives: optimization of high-speed-loaded adhesive joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 1988;18:255-260.
- (Blackman et al. 2006) Blackman BRK, Brunner AJ, Williams JG. Mode II fracture testing of composites: a new look at an old problem. *Engineering Fracture Mechanics* 2006;73:2443-2455.
- (Broughton e Gower 2001) Broughton B, Gower M. Preparation and testing of adhesive joints. National Physical laboratory, UK, 2001.
- (Campilho et al. 2005) Campilho RDSG, de Moura MFSF, Domingues JJMS. Modelling single and double-lap repairs on composite materials. *Composites Science and Technology* 2005;65:1948-1958.
- (Campilho et al. 2008) Campilho RDSG, de Moura MFSF, Domingues JJMS. Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs. *International Journal of Solids and Structures* 2008;45:1497-1512.
- (Campilho et al. 2009a) Campilho RDSG, de Moura MFSF, Pinto AMG, Morais JIL, Domingues JJMS. Modelling the tensile fracture behaviour of CFRP scarf repairs. *Composites Part B: Engineering* 2009;40:149-157.
- (Campilho et al. 2009b) Campilho RDSG, de Moura MFSF, Domingues JJMS. Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 2009;29:195-205.
- (Campilho et al. 2009c) Campilho RDSG, de Moura MFSF, Gonçalves JPM. Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints. *International of Solids and Structures* 2009;46:1589-1595.
- (Campilho et al. 2009d) Campilho RDSG, de Moura MFSF, Domingues JJMS. Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 2009;29:195-205.
- (Campilho et al. 2011) Campilho RDSG, Banea MD, Pinto AMG, da Silva LFM, de Jesus AMP. Strength prediction of single-and double-lap joints by standard and extended finite element modelling. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 2011;31:363-372.
- (Campilho et al. 2012) Campilho RDSG, Pinto AMG, Banea MD, da Silva LFM. Optimization study of hybrid spot welded-bonded single-lap joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 2012;37:86-95.

- (Campilho et al. 2013) Campilho RDSG, Banea MD, Neto JABP, da Silva LFM. Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 2013;88:513-533.
- (Campilho et al. 2014) Campilho RDSG, Moura DC, Banea MD, da Silva LFM. Adherend thickness effect on the tensile fracture toughness of a structural adhesive using an optical data acquisition method. *International Journal of Adhesion & Adhesives*. 2014;53:15-22.
- (Chai 1988) Chai H. Shear fracture. *International Journal of Fracture* 1988;37:137-159.
- (Chandra et al. 2002) Chandra N, Li H, Shet C, Ghonem H. Some issues in the application of cohesive zone models for metal-ceramic interfaces. *International Journal of Solids and Structures* 2002;39:2827-2855.
- (Charlene et al. 2006). Squires CH, Netting KH, Chambers AR. Understanding the factors affecting the compressive testing of unidirectional carbon fibre composites. *Composites Part B: Engineering*. 2007;38:481-487.
- (Chaves 2013) Chaves FJP. Fracture mechanics applied to the design of adhesively bonded joints. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
- (Chen 2002) Chen J. Predicting progressive delamination of stiffened fibre-composite panel and by decohesion models. *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 2002;15:429-441.
- (Costa 2004) Costa DL. Avaliação de ligações adesivas à base de resorcinol em madeiras de pinus. Encontro brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira, Curitiba, 2004:191.
- (Cui e Wisnom 1993) Cui W, Wisnom MR. A combined stress-based and fracture-mechanics based model for predicting delamination in composites. *Composites* 1993;24:467-474.
- (da Silva e Campilho 2011) da Silva LFM e Campilho RDSG. *Advances in Numerical Modelling of Adhesive Joints*. Springer: Heidelberg, Germany; 2011.
- (da Silva et al. 2004) da Silva LFM, Adams RD, Gibbs M. Manufacture of adhesive joints and bulk specimens with high-temperature adhesives. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 2004;24:69-83.
- (da Silva et al. 2006) da Silva LFM, Ramos JE, Figueiredo MV, Strohaecker. Influence of the adhesive, the adherend and the overlap on the single lap shear strength. *Journal of Adhesion and Interface* 2006;7:1-9.

(da Silva et al. 2007) da Silva LFM, de Magalhães AG, de Moura MFSF. Juntas Adesivas Estruturais, Publindústria, Edições Técnicas, Porto, 2007.

(da Silva et al. 2011) da Silva LFM, Öchsner A, Adams RD (eds). Handbook of Adhesion Technology, Springer, Verlag Berlin, Heidelberg, 2011.

(de Moura et al. 2008a) de Moura MFSF, Campilho RDSG, Gonçalves JPM. Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading. Composites Science and Technology 2008;68:2224-2230.

(de Moura et al. 2008b) de Moura MFSF, Gonçalves JPM, Chousal JAG, Campilho RDSG. Cohesive and Continuum Mixed-mode damage models applied to the simulation of the mechanical behavior of bonded joints", International Journal of Adhesion & Adhesives.2008;28:419-426.

(Dillard et al. 2009) Dillard DA, Singh HK. Observations of decreased fracture toughness for mixed mode fracture testing of adhesively bonded joints. Journal of Adhesion Science and Technology 2009;23:1515-1530.

(Dugdale 1960) Dugdale DS. Yielding of steel sheets containing slits. Journal of Mechanics and Physics of Solids 1960;8:100–104.

(ECSS 2011) Standardization, ECSS - European Cooperation For Space. Space engineering - Adhesive bonding handbook. Noordwijk, The Netherlands: ECSS Secretariat, ECSS-E-HB-32-21A, 2011.

(Esteves 1990) Esteves JLS. Estudo do comportamento de adesivos estruturais. FEUP: Porto. 1990:112.

(Faneco 2014) Faneco TMS. Caracterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica – Ramo de Materiais e Tecnologias de Fabrico. Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2014.

(Ferneda et al. 2006) Ferneda AB, Costa RR, Tita V, Proença SP, Carvalho J, Purquerio BM. Compression tests of castor oil biopolymer. Materials Research 2006;9:313-315.

(Gauthier 1990) Gauthier MM. Sorting out structural adhesives. Advanced Materials & Processes. ASM International July 1990:138.

(Henkel 2011) Henkel C. Design Guide for Bonding Plastics, Henkel Corporation, Engineering Adhesives, 2011.

(Hosford 2005) Hosford WF. Mechanical behavior of materials. Cambridge University Press, 2005.

(Irwin e Kies 1954) Irwin GR, Kies JA. Critical energy rate analysis of fracture strength. *Welding Journal (Research Supplement)* 1954;33:193-198.

(Kafkalidis e Thouless 2002) Kafkalidis MS, Thouless MD. The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints. *International Journal of Solids and Structures* 2002;39:4367-4383.

(Keimel 1966) Keimel FA. Strutural adhesives bonding In *Appl Polym Symp N° 3*, (Bodnar MJ ed.), Wiley, New York - 1966:p27.

(Kinloch 1987) Kinloch AJ. Adhesion and adhesives: science and technology. Chapman & Hall, London, 1987.

(Kohen 1954) Kohen GW. Design Manual on Adhesives, *Machine Design*, April, 1954.

(Krieger 1988) Krieger RB. Stress analyses concepts for adhesive bonding of aircraft primary structure. In: Johnson WS (ed) *Adhesive bonded joints; testing, analysis and design*. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1988:264-275.

(Lee et al. 2004) Lee DB, Ikeda T, Miyazaki N, Choi NS. Effect of bond thickness on the fracture toughness of adhesive joints. *Journal of Engineering Materials and Technology Transactions of the Asme* 2004;126:14-18.

(Liljedahl et al. 2006) Liljedahl CDM, Crocombe AD, Wahab MA, Ashcroft IA. Damage modelling of adhesively bonded joints. *International Journal of Fracture* 2006;141:147-161.

(Liu et al. 2000) Liu Z, Gibson RF, Newaz GM. Modification of the Composite Laminate Mixed Mode Bending Test for Fracture Testing of Adhesive Joints, Fifteenth Annual Conference of the American Society for Composites, 2000.

(Magalhães et al. 2005) Magalhães AG, de Moura MFSF, Gonçalves JPM. Evaluation of stress concentration effects in single-lap bonded joints of laminate composite materials. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 2005;25:313-319.

(Melo 2010) <URL:<http://meusite.uai.com.br/~sidcm/Discipl/Material/2-Compressao.pdf>>

(Neto 2011) Neto JABP. Estudo paramétrico de juntas Adesivas em Material Compósito. Tese Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2011.

- (Neto et al. 2012) Neto JABP, Campilho RDSG, da Silva LFM. Parametric study of adhesive joints with composites. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 2012;37:96-101.
- (Öchsner e Gegner 2004) Öchsner A, Gegner J. Critical analysis of the substrate deformation correction in the thick-adherend tensile-shear test. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 2004;24:37-41.
- (Pang 1995) Pang HLJ. Mixed mode fracture analysis and toughness of adhesive joints. *Engineering Frature Mechanics* 1995;51:575-583.
- (Parvatareddy e Dillard 1999) Parvatareddy H, Dillard D. Effect of mode-mixity on the fracture toughness of Ti-6Al-4V/FM-5 adhesive joints. Springer+Business Media. 1999.
- (Petrie 1999) Petrie EM. Handbook of adhesives and sealants, New York, McGraw-Hill, 1999.
- (Petrie 2000) Petrie, E.W. Handbook of adhesives and sealants 2nd ed. New York, McGraw-Hill, 2000.
- (Petrossian e Wisnom 1998) Petrossian Z, Wisnom MR. Prediction of delamination initiation and growth from discontinuous plies using interface elements. *Composites: Part A – Applied Science and Manufacturing* 1998;29:503-515.
- (Pinto 2007) Pinto AMG. Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos, Tese de doutoramento, Porto, 2007.
- (Pinto et al. 2009) Pinto AMG, Magalhães AG, Campilho RDSG, de Moura MFSF, Baptista APM. Single lap joints of similar and dissimilar adherends bonded with an acrylic adhesive. *The Journal of Adhesion* 2009;85:351-376.
- (Pires et al. 2003) Pires I, Quintino L, Durodola JF, Beevers A. Performance of bi-adhesive bonded aluminium lap joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 2003;23:215-223.
- (Pocius 2002) Pocius AV. Adhesion and Adhesives Technology, An Introduction, Hanser, 2002.
- (Reeder e Crews 1990) Reeder JR, Crews JH. Mixed mode bending method for delamination testing *AIAA Journal*, 1990;28:1270-1276.
- (Reeder e Crews 1991) Reeder JR e Crews JH. Nasa Technical Memorandum, NASA TM-102777, 1991.
- (Rice 1968) Rice JR. A Path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks. *Journal of Applied Mechanics* 1968;35:379-386.

(Russel e Street 1985) Russell, AJ, Street KN. Moisture and temperature effects on the mixed-mode delamination fracture of unidirectional graphite/epoxy. ASTM STP 1985;876:349-370.

(San Róman 2005) San Róman JC. Technical Report CCLab2000.1b/1- Experiments on Epoxy, Polyuretane and ADP Adhesives, March, 2005.

(Schuecker e Davidson 2000) Schuecker C, Davidson BD. Effect of friction on the perceived mode II delamination toughness from three and four point bend end notched flexure tests. ASTM STP 2000;1383:334-344.

(Stigh et al. 2010) Stigh U, Alfredsson KS, Anderson T, Biel A, Carlberger T, Salomonsson K Some aspects of cohesive models and modelling with special application to strength of adhesive layers. International Journal of Fracture 2010;165:149-162.

(Troughton 2008) Troughton MJ. Handbook of plastics joining: a practical guide - 2nd ed. United States of America : William Andrew Inc, 2008.

(Unicamp 2010) [http://www.gps.dema.fem.unicamp.br/images/stories/unicamp.fem.gps/graduacao/EM641\\_Ensaio\\_dos\\_Materiais/ensaio\\_de\\_compressao.pdf](http://www.gps.dema.fem.unicamp.br/images/stories/unicamp.fem.gps/graduacao/EM641_Ensaio_dos_Materiais/ensaio_de_compressao.pdf)>.

(Westergaard 1939) Westergaard HM. Bearing pressures and cracks. Journal of Applied Mechancics 1939;6:A49-A53.

(Williams et al. 1955) Williams ML, Landel RF, Ferry JD. Journal of the American Chemical Society 1955;77:3701-3707.

(Xu et al. 1995) Xu HHK, Wei L, Pature NP, Lawn BR, Yeckley RL. Effect of microstructural coarsening on Hertzian contact damage in silicon nitride. Journal of Materials Science 1995;30:869-878.

(Yang 2001) Yang QD, Thouless MD. Mixed-mode fracture analyses of plastically deforming adhesive joints. International Journal of Fracture 2001;110:175-187.

(Yong et al. 2009) Yong Zhu, Kenneth M. Liechti, K. Ravi-Chandar. Direct extraction of rate-dependent traction–separation laws for polyurea/steel interfaces. International Journal of Solids and Structures 2009;46:31-51.

(Yoshihara 2004) Yoshihara H. Mode II R-curve of wood measured by 4-ENF test. Engineering Fracture Mechanics 2004;71:2065-2077.



(Zhao 2011) Zhao X, Adams RD, da Silva LFM. Single lap joints with rounded adherend corners: experimental results and strength prediction. *Journal of Adhesion Science and Technology* 2011;25:837-856.

(Zhu et al. 2009) Zhu Y, Liechti KM, Ravi-Chandar K. Direct extraction of rate-dependent traction-separation laws for polyurea/steel interfaces. *International Journal of Solids and Structures* 2009;46:31-2011.