



Comparação dos métodos ENF e 4-ENF para determinação da tenacidade ao corte de juntas adesivas

BRUNO MIGUEL ALMEIDA DE OLIVEIRA

Fevereiro de 2016

Comparação dos métodos ENF e 4-ENF para
determinação da tenacidade ao corte de juntas
adesivas

Bruno Miguel Almeida de Oliveira

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

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



24 de fevereiro de 2016

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

Candidato: Bruno Miguel Almeida de Oliveira, 1121314@isep.ipp.pt

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

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

Mestrado em Engenharia Mecânica

Departamento de Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto



24 de fevereiro de 2016

Ao meu pai...

Agradecimentos

Agradeço ao Orientador Científico deste trabalho, Professor Doutor Raul Campilho, pela disponibilidade, apoio e amizade que demonstrou na orientação desta dissertação. A sua colaboração no desenvolvimento da parte experimental foi um fator motivacional para a conclusão da presente dissertação.

Quero ainda expressar o meu agradecimento ao Coorientador deste trabalho, Professor Doutor Francisco Silva, pelo seu apoio e indicações que permitiram obter este trabalho. Ao Eng.º Vítor Moreira pela ajuda preciosa nos trabalhos de maquinação.

Não poderia deixar de agradecer à minha família, colegas de trabalho e a todos os amigos que todos os dias contribuem para a minha realização como pessoa.

Dedico este trabalho ao meu pai agradecendo-lhe toda amizade, conselhos e sobretudo por tudo aquilo que fez por mim.

A todos os que contribuíram para este trabalho, o meu sincero obrigado.

Resumo

Ao longo destes últimos anos as ligações adesivas têm vindo a verificar um aumento progressivo em aplicações estruturais em detrimento das ligações mecânicas convencionais. Esta alteração de paradigma deve-se às vantagens que as juntas adesivas possuem relativamente aos outros métodos de ligação. A mecânica da fratura e os Modelos de Dano Coesivo (MDC) são critérios comuns para prever a resistência em juntas adesivas e usam como parâmetros fundamentais as taxas de libertação de energia. Pelo facto do ensaio *4-Point End Notched Flexure* (4-ENF), aplicado em juntas adesivas, ainda estar pouco estudado é de grande relevância um estudo acerca da sua viabilidade para a determinação da taxa crítica de libertação de energia de deformação ao corte (G_{IIc}).

Esta dissertação tem como objetivo principal efetuar uma comparação entre os métodos *End-Notched Flexure* (ENF) e 4-ENF na determinação de G_{IIc} em juntas adesivas. Para tal foram utilizados 3 adesivos: Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752. O trabalho experimental passou pela conceção e fabrico de uma ferramenta para realização do ensaio 4-ENF, seguindo-se o fabrico e a preparação dos provetes para os ensaios. Pelo facto do ensaio 4-ENF ainda se encontrar pouco divulgado em juntas adesivas, e não se encontrar normalizado, uma parte importante do trabalho passou pela pesquisa e análise em trabalhos de investigação e artigos científicos. A análise dos resultados foi realizada por comparação direta dos valores de G_{IIc} com os resultados obtidos no ensaio ENF, sendo realizada por série de adesivo, através da comparação das curvas $P-\delta$ e curvas- R .

Como resultado verificou-se que o ensaio 4-ENF em ligações adesivas não é o mais versátil para a determinação do valor de G_{IIc} , e que apenas um método de obtenção de G_{IIc} é viável. Este método é baseado na medição do comprimento de fenda (a). Ficou evidenciado que o ensaio ENF, devido a ser um ensaio normalizado, por apresentar um *setup* mais simples e por apresentar uma maior disponibilidade de métodos para a determinação do valor de G_{IIc} , é o mais recomendado. Conclui-se assim que o ensaio 4-ENF, embora sendo uma alternativa ao ensaio ENF, tem aplicação mais limitada.

Palavras-Chave

End-Notched Flexure (ENF), *Four-Point End-Notched Flexure* (4-ENF), ligações adesivas, adesivos estruturais.

Abstract

Over the last few years, adhesively-bonded joints have been increasingly used in structural applications instead of conventional mechanical joints. This paradigm change is due to advantages of the adhesively-bonded joints when compared with the other joining methods. Fracture mechanics and the Cohesive Zone Models (CZM) are the usual techniques to predict joints strength and they use the energy release rate as fundamental parameters. Since the 4-End Notched Flexure (4-ENF) test, applied to adhesively-bonded joints, is understudied, the studies about the viability of this method to estimate the critical shear strain energy release rate (G_{IIc}) have great relevance.

The main objective of this thesis is the comparison between the *End-Notched Flexure* (ENF) and 4-ENF test methods in the determination of G_{IIc} of adhesively-bonded joints. Three types of adhesives were used: Araldite[®] AV138, Araldite[®] 2015 and SikaForce[®] 7752. The experimental initiated by the design and manufacturing of the tool needed for 4-ENF test, followed by the manufacturing and preparation of the test coupons for testing. As the 4-ENF test is still not widespread for adhesively-bonded joints and it is not standardized, one significant part of this work involved the research and analysis of this topic in investigation works and scientific articles. The analysis of the results was conducted by direct comparison of the G_{IIc} values with the ENF results, by series of adhesives, through the comparison of P - δ curves and R -curves.

As result, it was verified that the 4-ENF test in adhesively-bonded joints is not the more suitable to estimate G_{IIc} , and that only one G_{IIc} method is viable. This method is based on the crack length measurement (a). It was evidenced that the ENF test, due to being a standardized test, to present a simpler setup and to have a higher availability of G_{IIc} estimation methods, is recommended. It is concluded that the 4-ENF test, while being an alternative to the ENF test, has limited application.

Keywords

End-Notched Flexure (ENF), *Four-Point End-Notched Flexure* (4-ENF), adhesively-bonded joints, structural adhesives.

Índice

AGRADECIMENTOS	VII
RESUMO	IX
ABSTRACT	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XVII
ÍNDICE DE TABELAS	XXIII
NOMENCLATURA	XXV
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 LIGAÇÕES ADESIVAS.....	6
2.1.1 <i>Caracterização das juntas adesivas</i>	6
2.1.2 <i>Esforços típicos em juntas adesivas</i>	9
2.1.2.1 Esforços de tração	9
2.1.2.2 Esforços de compressão	10
2.1.2.3 Esforços de corte	11
2.1.2.4 Esforços de Clivagem.....	12
2.1.2.5 Esforços de arrancamento	12
2.1.3 <i>Configurações possíveis de junta</i>	13
2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS ADESIVOS	19
2.2.1 <i>Caracterização dos adesivos estruturais</i>	20
2.2.2 <i>Tipos de adesivos estruturais</i>	20
2.2.2.1 Adesivos Fenólicos	21
2.2.2.2 Adesivos Acrílicos	21
2.2.2.3 Adesivos Poliuretanos	22
2.2.2.4 Adesivos Poliimidas e Bismaleimidas.....	23
2.2.2.5 Adesivos Epóxidos	23
2.3 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE ADESIVOS	25
2.3.1 <i>Ensaio de adesivo maciço</i>	25
2.3.1.1 Ensaio de tração em provetes maciços.....	27
2.3.1.2 Ensaio de compressão em provetes maciços.....	28
2.3.1.3 Ensaio Iosipescu ou <i>V-Notched beam shear method</i>	29
2.3.1.4 Ensaio de borboleta ou <i>Notched plate shear method (Arcan)</i>	30

2.3.2	<i>Ensaio de adesivos em junta</i>	31
2.3.2.1	Ensaio de tração em juntas topo a topo ou <i>butt-joints</i>	31
2.3.2.2	Ensaio de tração em juntas de sobreposição simples	32
2.3.2.3	Ensaio com junta topo a topo em torção ou <i>Napkin ring test</i>	33
2.3.2.4	Ensaio <i>Thick Adherent Shear Test (TAST)</i>	34
2.3.2.5	Ensaio de arrancamento	34
2.3.2.5.1	Ensaio de arrancamento em junta tipo T.....	35
2.3.2.5.2	Ensaio de arrancamento a 180°	35
2.3.2.5.3	Ensaio de rolete flutuante (<i>floating roller test</i>)	36
2.3.2.5.4	Ensaio de climbing ou climbing drum test.....	36
2.3.2.6	Ensaio de impacto.....	37
2.3.2.7	Ensaio de fadiga.....	38
2.3.2.8	Ensaio de fluência.....	38
2.3.2.9	Ensaio de durabilidade.....	39
2.3.2.9.1	Determinação da durabilidade em junta de sobreposição simples	40
2.3.2.9.2	Determinação da durabilidade através do ensaio de cunha ou wedge test	40
2.3.2.9.3	Determinação da durabilidade de juntas de sobreposição simples em tração	40
2.3.2.9.4	Determinação da durabilidade por ensaios de arrancamento (junta em T)	41
2.4	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO À FRATURA.....	42
2.4.1	<i>Modo I</i>	44
2.4.1.1	<i>Double-Cantilever Beam (DCB)</i>	45
2.4.1.2	<i>Tapered Double-Cantilever Beam (TDCB)</i>	46
2.4.1.3	<i>Compact Tension (CT)</i>	47
2.4.1.4	<i>Single-Edge Notched Bending (SENB)</i>	47
2.4.2	<i>Modo II</i>	48
2.4.2.1	<i>End-Notched Flexure (ENF)</i>	49
2.4.2.2	<i>Four-Point End-Notched Flexure (4-ENF)</i>	49
2.4.2.3	<i>End-Loaded Split (ELS)</i>	50
2.4.2.4	<i>Stabilized End-Notched Flexure (SENF)</i>	51
2.4.3	<i>Modo misto I + II</i>	51
2.4.3.1	<i>Asymmetric Double-Cantilever Beam (ADCB)</i>	51
2.4.3.2	<i>Asymmetric Tapered Double-Cantilever Beam (ATDCB)</i>	52
2.4.3.3	<i>Mixed-Mode Bending (MMB)</i>	52
2.4.3.4	<i>Mixed-Mode Flexure (MMF)</i>	53
2.5	MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DE G_{IIc}	53
2.5.1	<i>Ensaio End-Notched Flexure (ENF)</i>	54
2.5.1.1	Métodos analíticos baseados na medição de a	54
2.5.1.2	Métodos analíticos baseado em comprimento de fenda equivalente (a_{eq})	55
2.5.1.3	Método do integral- J	56
2.5.2	<i>Ensaio 4-Point End-Notched Flexure (4-ENF)</i>	57
2.5.2.1	Métodos baseados na medição de a	58
2.5.2.2	Métodos que não necessitam da medição de a	58
3	DESENVOLVIMENTO	61

3.1	SELEÇÃO DA GEOMETRIA E MATERIAL DOS ADERENTES DOS ENSAIOS 4-ENF	61
3.2	MATERIAIS	65
3.2.1	<i>Aderentes</i>	65
3.2.2	<i>Adesivos</i>	66
3.2.2.1	Adesivo Araldite® AV138.....	66
3.2.2.2	Adesivo Araldite® 2015	68
3.2.2.3	Adesivo SikaForce® 7752	69
3.3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	71
3.3.1	<i>Geometria das juntas</i>	71
3.3.2	<i>Processo de fabrico</i>	74
3.3.3	<i>Ferramenta para realização do ensaio 4-ENF</i>	85
3.3.4	<i>Ensaio das juntas</i>	86
3.4	RESULTADOS	89
3.4.1	<i>Ensaio End-Notched Flexure (ENF)</i>	89
3.4.1.1	Curvas $P-\delta$	89
3.4.1.1.1	Curvas $P-\delta$ com o Araldite® AV138.....	90
3.4.1.1.2	Curvas $P-\delta$ com o Araldite® 2015	91
3.4.1.1.3	Curvas $P-\delta$ com o SikaForce® 7752	92
3.4.1.2	Determinação de G_{IIC}	93
3.4.1.2.1	Juntas adesivas com o Araldite® AV138	93
3.4.1.2.2	Juntas adesivas com o Araldite® 2015	95
3.4.1.2.3	Juntas adesivas com o SikaForce® 7752.....	96
3.4.2	<i>Ensaio 4-Point End-Notched Flexure (4-ENF)</i>	97
3.4.2.1	Curvas $P-\delta$	97
3.4.2.1.1	Curvas $P-\delta$ com o Araldite® AV138.....	97
3.4.2.1.2	Curvas $P-\delta$ com o Araldite® 2015	98
3.4.2.1.3	Curvas $P-\delta$ com o SikaForce® 7752	99
3.4.2.2	Determinação de G_{IIC}	100
3.4.2.2.1	Juntas adesivas com o Araldite® AV138	101
3.4.2.2.2	Juntas adesivas com o Araldite® 2015	105
3.4.2.2.3	Juntas adesivas com o SikaForce® 7752.....	109
3.5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS	112
4	CONCLUSÕES	117
	REFERÊNCIAS	119

Índice de Figuras

Figura 1 – Diferença de comportamento de soluções rebitadas e ligações adesivas [1]	5
Figura 2 – Exemplo de uma junta de sobreposição simples (JSS) [5]	6
Figura 3 – Corpo do Mercedes CLS com indicação das ligações adesivas [4]	6
Figura 4 – Esquema representativo de um esforço de tração [7]	9
Figura 5 – Distribuição de tensões em esforços de tração [6]	10
Figura 6 – Esquema representativo de um esforço de compressão [7]	10
Figura 7 – Esquema representativo de um esforço de corte [7]	11
Figura 8 – Distribuição de tensões de corte numa JSS [7]	11
Figura 9 – Efeito da largura ou comprimento de sobreposição na resistência ao corte [7]	12
Figura 10 – Esquema representativo de um esforço de clivagem [7]	12
Figura 11 – Esquema representativo de um esforço de arrancamento [7]	13
Figura 12 – Distribuição de tensões normais numa junta de sobreposição quando submetida a esforços de tração ou arrancamento [7]	13
Figura 13 – Juntas topo a topo, com chanfro interior e degrau [7]	15
Figura 14 – Efeito da espessura do aderente na resistência de juntas adesivas de sobreposição [12]	15
Figura 15 – Tensões de arrancamento no adesivo numa JSD [1]	16
Figura 16 - Tipos de juntas de sobreposição [7]	16
Figura 17 – Tipos de junta com cobre-junta [7]	17
Figura 18 - Junta tubular [7]	17
Figura 19 – Tipos de juntas em T e seu comportamento perante solicitação [14]	18
Figura 20 – Tipos de juntas de canto e seu comportamento perante solicitação [14]	19
Figura 21 – Diferentes tipos de adesivos estruturais	20
Figura 22 – Produção de placa de adesivo por prensagem hidrostática [20] de acordo com a norma NF T 76-142 [21]	25
Figura 23 – Vista explodida do molde destinado à produção de placas de adesivo através de pressão hidrostática [20]	26
Figura 24 – Esquema de princípio da produção de provetes através de moldação rotacional [20] ..	26
Figura 25 – Vista explodida de um molde destinado à produção de provetes por injeção [20]	26
Figura 26 – Geometria e dimensões (mm) dos provetes de tração [1] de acordo com a norma EN ISO 527-2 [22]	27
Figura 27 – Medição da deformação sem contacto, registo fotográfico [1]	28

Figura 28 – Geometria e dimensões do provete maciço plano para espessura inferiores a 3,2 mm de acordo com a norma ASTM D695 [25]	28
Figura 29 – Geometria e dimensões (mm) de provete cúbico para ensaio de compressão segundo a norma NF T 51-10 [24].....	29
Figura 30- Geometria e dimensões (mm) de provete paralelepípedo para ensaio de compressão [1]segundo a norma ASTM D695 [25].....	29
Figura 31 – Geometria e dimensões (mm) do provete para o ensaio Iosipescu (adaptado de [26]).	29
Figura 32 – Esquema da amarra associada ao ensaio de Iosipescu [27]	30
Figura 33 – Dimensões (mm) do provete Arcan [1].....	30
Figura 34 – Acessório e respetivas fixações para o ensaio Arcan [20]	31
Figura 35 – Carga axial aplicada num provete cilíndrico com ligação <i>butt-joint</i> [17].....	32
Figura 36 – Geometria e dimensões (mm) de uma JSS [1] pela norma ASTM D1002 [28]	33
Figura 37 – Geometria e dimensões (mm) do provete <i>Napkin ring</i> [20]	33
Figura 38 – Geometria e dimensões (mm) do provete TAST [1] de acordo com a norma ISO 11003-2.2 [29].....	34
Figura 39 – Geometria e dimensões (mm) do provete para ensaio de arrancamento em junta T de acordo com norma ASTM D1876 [31] (adaptado de [1]).....	35
Figura 40 – Geometria e dimensões (mm) do provete para ensaio de arrancamento a 180° [1] de acordo com a norma ASTM D903-49 [32].....	35
Figura 41 – Ensaio de rolete flutuante de acordo com a norma ASTM D3167 [33] (adaptado de [1])	36
Figura 42 – Esquema de princípio de ensaio <i>climbing</i> de acordo com a norma ASTM D1781 [34]	36
Figura 43 – Geometria e dimensões (polegada) do provete com substratos metálicos de acordo com a norma ASTM D950 [35].....	37
Figura 44 – Exemplo de fixação para ensaios de impacto em juntas adesivas de acordo com a norma ASTM D950 [35].....	37
Figura 45 – Curva S-N ou de Wöhler [1].....	38
Figura 46 – Dispositivo mecânico para a realização do ensaio de fluência à tração [1] – ASTM D2294 [39]	39
Figura 47 – Dispositivo mecânico para a realização do ensaio de fluência à compressão [1] – ASTM D2293 [40].....	39
Figura 48 – Geometria e dimensões (cm) do ensaio de cunha ou <i>wedge test</i> [20] de acordo com a norma ASTM D3762 [42].....	40
Figura 49 – Dispositivo para a realização do ensaio de durabilidade [1] pela norma ATSM D2919 [41]	41

Figura 50 – Dispositivo de ensaio a utilizar em juntas em T sujeitas a arrancamento quando se pretende medir a durabilidade em condições de imersão [1]	42
Figura 51 – Modos puros de propagação de fendas [45]	43
Figura 52 – Geometria e dimensões (mm) do provete DCB [1] pela norma ASTM D3433 [47] ...	45
Figura 53 – Representação esquemática do ensaio DCB [1]	45
Figura 54 – Provete típico para ensaio TDCB [20] segundo a norma ASTM D3433 [47].....	46
Figura 55 - Provete típico para ensaio TDCB [20] segundo a norma ISO 25217 [48].....	46
Figura 56 – Representação esquemática do ensaio CT [20].....	47
Figura 57 – Representação esquemática do ensaio SENB [20]	48
Figura 58 – Representação esquemática do ensaio ENF [20]	49
Figura 59 – Representação esquemática do ensaio 4-ENF [20].....	50
Figura 60 – Representação esquemática do ensaio ELS [20].....	50
Figura 61 – Provete do ensaio SENF [51].....	51
Figura 62 – Representação esquemática do ensaio ADCB [1].....	52
Figura 63 – Representação esquemática do ensaio ATDCB [45]	52
Figura 64 – Representação esquemática do ensaio MMB [1]	53
Figura 65 – Representação esquemática do ensaio MMF [1]	53
Figura 66 – Refinamento geral da malha do modelo utilizado nos provetes 4-ENF.....	62
Figura 67 – Detalhe do refinamento da malha na zona do cilindro de apoio do provete 4-ENF	62
Figura 68 – Detalhe do refinamento da malha na zona do cilindro de aplicação da carga e zona adesiva do provete 4-ENF	62
Figura 69 – Condições fronteira impostas nos modelos numéricos dos ensaios 4-ENF.....	63
Figura 70 - Adesivo epóxico Araldite® AV138/HV998	66
Figura 71 - Curvas σ - ε de provetes maciços do adesivo Araldite® AV138 [13].....	67
Figura 72 - Adesivo epóxico Araldite® 2015	68
Figura 73 - Curvas σ - ε de provetes maciços do adesivo Araldite® 2015 [13]	68
Figura 74 - Adesivo SikaForce® 7752.....	70
Figura 75 - Curvas σ - ε de provetes maciços do adesivo SikaForce® 7752 [72]	70
Figura 76 – Dimensões – provete ENF (a) e 4-ENF (b)	72
Figura 77 – Representação esquemática da geometria da junta com posicionamento dos calços – provete ENF (a) e 4-ENF (b).....	73
Figura 78 – Posicionamento correto da régua (a) e corte das tiras de carbono-epóxico com auxílio de x-ato (b)	74
Figura 79 – Aplicação de calor nas folhas de carbono-epóxico com recurso a pistola de calor	75
Figura 80 – Remoção da camada de revestimento com o x-ato	75
Figura 81 – Aspeto final após o empilhamento das camadas de carbono-epóxico.....	76
Figura 82 – Posicionamento da placa de carbono-epóxico no molde	76

Figura 83 – Ciclo térmico para a cura das placas de carbono-epóxico	77
Figura 84 – Máquina de corte BATISTI MECCANICA s.r.l DV25.....	77
Figura 85 – Preparação dos aderentes recorrendo a técnicas manuais	78
Figura 86 – Limpeza manual dos aderentes com acetona, após processo de lixagem	78
Figura 87 – Posicionamento do calço frontal e traseiro num aderente 4-ENF.....	79
Figura 88 – Fita calibrada com espessura 0,05 mm, utilizada no fabrico dos calços (4-ENF)	80
Figura 89 – Montagem do conjunto Fita Calibrada + Lâmina de Barbear + Fita calibrada (calço frontal) (4-ENF)	80
Figura 90 – Aplicação de desmoldante Loctite® 770-NC nos calços (4-ENF)	80
Figura 91 – Dosagem realizada na preparação do adesivo Araldite® AV138 (4-ENF)	81
Figura 92 - Dosagem realizada na preparação do adesivo SikaForce® 7752 (4-ENF).....	81
Figura 93 – Aplicação do adesivo Araldite® 2015 pelo método “zigue-zague” no aderente inferior de um provete 4-ENF	82
Figura 94 - Aplicação do adesivo Araldite® AV138 com espalhamento manual através de espátula no aderente inferior de um provete 4-ENF.....	82
Figura 95 - Aplicação do adesivo SikaForce® 7752 com espalhamento manual através de espátula no aderente inferior de um provete 4-ENF.....	82
Figura 96 – Aplicação de grampos num provete durante o processo de cura (4-ENF).....	83
Figura 97 – Remoção do excedente de adesivo nos bordos do provete com recurso a alicates (4-ENF).....	83
Figura 98 – Processo de alisamento dos bordos do provete (4-ENF)	84
Figura 99 – Provete com escalas montadas numa das faces do provete (4-ENF)	84
Figura 100 – Dispositivo para aplicação de carga nos ensaios 4-ENF.....	85
Figura 101 – Ferramenta após operações de maquinagem.....	86
Figura 102 – Ferramenta montada na máquina de ensaio preparada para a realização do ensaio 4-ENF	86
Figura 103 – Máquina de ensaios SHIMADZU AG-X 100.....	87
Figura 104 – Disposição do provete ENF na máquina de ensaios [2].....	87
Figura 105 – Disposição do provete para realização do ensaio 4-ENF.....	88
Figura 106 – Imagem obtida no início de um ensaio	89
Figura 107 – Curvas $P-\delta$ para o adesivo Araldite® AV138, ensaio ENF [2]	90
Figura 108 – Curvas $P-\delta$ para o adesivo Araldite® 2015, ensaio ENF [2]	92
Figura 109 – Curvas $P-\delta$ para o adesivo SikaForce® 7752, ensaio ENF [2]	93
Figura 110 – Curvas- R para um provete representativo com o Araldite® AV138, ensaio ENF [2].	94
Figura 111 – Curvas- R para um provete representativo com o Araldite® 2015, ensaio ENF [2]....	95
Figura 112 – Curva- R para um provete representativo com o SikaForce® 7752, ensaio ENF [2] ..	96

Figura 113 – Curvas P - δ para o adesivo Araldite® AV138, ensaio 4-ENF.....	98
Figura 114 – Curvas P - δ para o adesivo Araldite® 2015, ensaio 4-ENF	99
Figura 115 – Curvas P - δ para o adesivo SikaForce® 7752, ensaio 4-ENF	100
Figura 116 – Curvas- R do provete P1 com o adesivo Araldite® AV138	101
Figura 117 – Curvas- R do provete P4 com adesivo Araldite® AV138	102
Figura 118 – Curvas- R do provete P1 com adesivo Araldite® AV138, método CBT ($\mu=13,5$).....	103
Figura 119 – Curvas- R do provete P4 com adesivo Araldite® AV138, método CBT ($\mu=13,5$).....	103
Figura 120 – Comportamento dos valores médios de G_{IIC} para todos os provetes pelo método CBT variando μ para série de juntas com o Araldite® AV138	105
Figura 121 – Curvas- R do provete P2 com o adesivo Araldite® 2015	106
Figura 122 – Curvas- R do provete P5 com o adesivo Araldite® 2015	106
Figura 123 – Curvas- R do provete P2 com o adesivo Araldite® 2015, método CBT ($\mu=12$)	107
Figura 124 – Curvas- R do provete P5 com o adesivo Araldite® 2015, método CBT ($\mu=12$)	107
Figura 125 – Comportamento do valor médio de G_{IIC} para todos os provetes pelo método CBT variando μ para série de juntas com o Araldite® 2015	109
Figura 126 – Curvas- R do provete P3 com o adesivo SikaForce® 7752	109
Figura 127 – Curvas- R do provete P7 com o adesivo SikaForce® 7752	110
Figura 128 – Curvas- R do provete P3 com o adesivo SikaForce® 7752, método CBT ($\mu=9$)	110
Figura 129 – Curvas- R do provete P7 com o adesivo SikaForce® 7752, método CBT ($\mu=9$)	111
Figura 130 – Comportamento do valor médio de G_{IIC} para todos os provetes pelo método CBT variando μ para série de juntas com o adesivo SikaForce® 7752.....	112
Figura 131 – Comparação dos valores de G_{IIC} dos adesivos ensaiados segundo os métodos abordados (4-ENF).....	114
Figura 132 – Comparação dos valores de G_{IIC} dos adesivos ensaiados segundo os métodos abordados (ENF) [2]	115

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Comparação das características dos principais métodos de ligação [6].....	7
Tabela 2 – Comparação dos aspetos produtivos entre os principais métodos de ligação [6]	8
Tabela 3 – Comparação dos métodos de ensaio em modo II [51]	48
Tabela 4 – Combinações de geometria testadas com aderentes em alumínio no ensaio 4-ENF.....	64
Tabela 5 – Combinações de geometria testadas com aderentes em aço no ensaio 4-ENF	64
Tabela 6 – Combinações de geometria testadas com aderentes em material compósito reforçado com fibras de carbono no ensaio 4-ENF.....	65
Tabela 7 - Propriedades elásticas ortotrópicas do compósito reforçado com fibras de carbono, com as fibras alinhadas unidireccionalmente na direção x [70].....	66
Tabela 8 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® AV138 [13, 8].....	67
Tabela 9 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® 2015 [13].....	69
Tabela 10 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo SikaForce® 7752 [72].....	71
Tabela 11 - Valores de pré-fenda (a_0) utilizados nos provetes ENF (adaptado de [2])	73
Tabela 12 – Valores de pré-fenda (a_0) utilizados nos provetes 4-ENF.....	74
Tabela 13 – Controlo dimensional dos aderentes para os ensaios ENF e 4-ENF	79
Tabela 14 – Valores dos ensaios ENF com o adesivo Araldite® AV138 (adaptado de [2])	90
Tabela 15 – Valores dos ensaios ENF com o adesivo Araldite® 2015 (adaptado de [2]).....	91
Tabela 16 - Valores do ensaio ENF com o adesivo SikaForce® 7752 (adaptado de [2]).....	92
Tabela 17 – Valores de G_{IIC} [N/mm] pelos vários métodos para o Araldite® AV138 [2].....	94
Tabela 18 - Valores de G_{IIC} [N/mm] pelos vários métodos para o Araldite® 2015 [2]	95
Tabela 19 – Valores de G_{IIC} [N/mm] pelo método CBBM para o SikaForce® 7752 [2].....	97
Tabela 20 – Valores dos ensaios 4-ENF com o adesivo Araldite® AV138	97
Tabela 21 – Valores dos ensaios 4-ENF com o adesivo Araldite® 2015	99
Tabela 22 – Valores dos ensaios 4-ENF com o adesivo SikaForce® 7752.....	100
Tabela 23 – Valores de G_{IIC} [N/mm] do adesivo Araldite® AV138 pelos métodos CCM e CBT...	104
Tabela 24 – Valores de G_{IIC} [N/mm] do adesivo Araldite® 2015 pelos métodos CCM e CBT	108
Tabela 25 – Valores de G_{IIC} [N/mm] do adesivo SikaForce® 7752 pelos métodos CCM e CBT ...	111
Tabela 26 – Valores médios registados da carga máxima aplicada [N]	113
Tabela 27 – Valores médios registados de deslocamento à carga máxima [mm].....	113
Tabela 28 – Valores médios de G_{IIC} [N/mm] registados pelo método CCM.....	113
Tabela 29 – Valores médios de G_{IIC} [N/mm] registados pelo método CBT com correção de atrito	114

Nomenclatura

Caracteres Romanos

$2L$ – Distancia entre os cilindros de apoio [mm]

a_0 – Pré-fenda [mm]

a – Comprimento da fenda [mm]

a_{eq} – Comprimento da fenda equivalente [mm]

B – Largura do provete ou substrato [mm]

C – Flexibilidade, definida por $C = \delta P$ [mm/N]

C_{corr} – Flexibilidade corrigida [mm/N]

C_0 – Flexibilidade inicial [mm/N]

C_{0corr} – Flexibilidade inicial corrigida [mm/N]

C_0, C_1, C_2, C_3 – Constantes do polinómio cubico para determinação da flexibilidade

E – Módulo de elasticidade ou de *Young* [GPa]

E_1 – Módulo de elasticidade longitudinal [GPa]

E_3 – Módulo de elasticidade longitudinal, segundo a direção 3 [GPa]

E_f – Módulo de flexão [GPa]

G – Critério energético

G_c – Taxa de libertação de energia crítica I [N/mm]

G_{13} – Módulo de corte transversal [MPa]

G_I – Taxa de libertação de energia em modo I [N/mm]

G_{Ic} – Taxa de libertação de energia crítica em modo I [N/mm]

G_{II} – Taxa de libertação de energia em modo II [N/mm]

G_{IIc} – Taxa de libertação de energia crítica em modo II [N/mm]

h – Espessura do substrato ou aderente [mm]

K – Fator de concentração de tensões

K_I – Fator de concentração de tensões em modo I

K_{Ic} – Fator de concentração de tensões crítica para em modo I

L_i – Distância entre os cilindros de solitação [mm]

m – Fator geométrico

P – Carga aplicada, carregamento, força [N]

P_u – Carga por unidade de largura [N/mm]

S – Comprimento do arco [mm]

T_j – Vetor tração

t_a – Espessura do adesivo [mm]

u_j – Vetor deslocamento

w – Densidade de energia

Y – Fator adimensional que depende da geometria e da distribuição de carga

Caracteres Gregos

α e β – são expoentes. Critério linear $\alpha = \beta = 1$ e critério quadrático $\alpha = \beta = 2$

σ_r – Tensão aplicada na direção perpendicular à direção da fenda [N/mm²]

ν – Coeficiente de *Poisson*

μ – Coeficiente de atrito

δ – Deslocamento [mm]

δ – Deslocamento de corte [mm]

τ – Tensão de corte [N/mm²]

Δ_{II} – Correção do comprimento de fenda

Abreviaturas

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

AECMA – *Association Européenne des Constructeurs de Matériel aérospatial*

ADCB – *Asymmetric Double Cantilever Beam*

ATDCB – *Asymmetric Tapered Double Cantilever Beam*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

BS – *British Standards*

CAD – *Computer Aided Design*

CBBM – *Compliance-Based Beam Method*

CBT – *Corrected Beam Theory*

CCC – *Coordinate Conversion Control*

CCM – *Compliance Calibration Method*

CMM – *Compact Mixed-Mode*

CSD – *Crack Share Displacement*

CT – *Compact Tension*

CZM – *Cohesive Zone Models*

DBT – *Direct Beam Theory*

DCB – *Double Cantilever Beam*

ECM – *Effective Crack Method*

END – *Ensaio Não Destrutivo*

ELS – *End Loaded Split*

EN – *European Norm*

ENF – *End Notched Flexure*

EUA – *Estados Unidos da América*

JIS – *Japanese Industrial Standards*

JSS – *Junta de sobreposição simples*

JSD – *Junta de sobreposição dupla*

ISEP – *Instituto Superior de Engenharia do Porto*

ISO – *International Organization for Standardization*

MDC – *Modelos de Dano Coesivo*

MMB – *Mixed-Mode Bending*

MMF – *Mixed-Mode Flexure*

NF – *Norma Francesa*

PWHT – *Post Welding Heat Treatment*

S – *von Mises*

SDEG – *Stiffness Degradation*

SENB – *Single-Edge Notched Bending*

SENF – *Single-Edge Notched Flexure*

TAST – *Thick Adherend Shear*

TDCB – *Tapered Double Cantilever Beam*

TT – *Tratamento Térmico*

ZPF – *Zona de Processo de Fratura*

1 Introdução

1.1 Contextualização

Os adesivos têm sido usados desde há muitos séculos. No entanto, este método de ligação só evoluiu significativamente nos últimos 60 anos [1]. Ao longo destes anos, tem vindo a existir um aumento progressivo na aplicação de juntas adesivas em aplicações estruturais, em detrimento das ligações mecânicas convencionais. Esta alteração de paradigma deve-se às vantagens que as juntas adesivas possuem relativamente aos outros métodos de ligação, nomeadamente a baixa concentração de tensões, maior rigidez, a boa resistência à fadiga, a elevada relação resistência/peso, o bom amortecimento de vibrações e a possibilidade de ligar materiais diferentes. No entanto, a sua utilização em aplicações estruturais ainda é limitada devido a algum desconhecimento por parte de alguns projetistas, fabricantes e instaladores.

Os critérios mais comuns para prever a resistência de uma junta adesiva são:

- Resistência dos Materiais,
- Mecânica da Fratura e
- Modelos de Dano Coesivo (MDC).

A mecânica da fratura e MDC usam como parâmetros fundamentais as taxas de libertação de energia, pelo que se torna essencial conhecer em detalhe todos os ensaios possíveis de utilizar para obter estes parâmetros, bem como as vantagens e desvantagens entre eles. Neste âmbito, o ensaio *4-End Notched Flexure* (4-ENF) aplicado em juntas adesivas ainda está pouco estudado, pelo que é de grande relevância o estudo da sua viabilidade para determinação da taxa crítica de libertação de energia de deformação ao corte (G_{IIc}), nomeadamente através da comparação com ensaios já comumente utilizados para o mesmo fim, como é o ensaio *End-Notched Flexure* (ENF).

1.2 Objetivos

Esta dissertação foi realizada no âmbito do curso de Mestrado em Engenharia Mecânica – Ramo Materiais e Tecnologias de Fabrico, lecionado no Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), e tem como objetivo principal a comparação dos métodos ENF e 4-ENF para determinação da tenacidade ao corte de juntas adesivas. Neste trabalho utilizaram-se 3 adesivos, Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752. Os resultados obtidos nos ensaios 4-ENF são comparados com os resultados de ensaios ENF de um trabalho anterior [2]. Inicialmente, recorreu-se a um estudo numérico que visava a seleção do material dos aderentes e definição das dimensões dos provetes a implementar nos ensaios 4-ENF. Estudaram-se as distribuições de tensões de von Mises (S) dos aderentes e a variável de dano (SDEG) que indica o estado de degradação do adesivo, e que pode variar desde 0 (adesivo não danificado) até 1 (rotura total do adesivo). Após validação numérica procedeu-se à conceção e fabrico de uma ferramenta para realização do ensaio 4-ENF, seguindo-se o fabrico e preparação dos provetes para os ensaios. Pelo facto do ensaio 4-ENF ainda se encontrar pouco divulgado e não se encontrar normalizado, uma parte importante do trabalho passou pela pesquisa e análise de trabalhos de investigação e artigos científicos que reunissem informação acerca do ensaio. A análise dos resultados foi realizada por comparação direta com os resultados obtidos no ensaio ENF, sendo realizada por série de adesivo, através da comparação das curvas P - δ e curvas- R .

1.3 Organização do relatório

A presente dissertação encontra-se estruturada da seguinte forma:

Capítulo 1 – é feita a contextualização do trabalho realizado, são descritos os objetivos e apresenta-se a organização do relatório.

Capítulo 2 – é realizada a revisão bibliográfica, abordando temas como a caracterização das juntas adesivas, a classificação dos adesivos e a determinação das propriedades dos adesivos, nomeadamente através de ensaios de adesivos maciço e ensaios de adesivos em junta. Neste capítulo aborda-se ainda os ensaios de caracterização à fratura para o modo I, modo II e modo misto (I+II). Finalmente são apresentados os métodos de cálculo para determinação da taxa crítica de libertação de energia de deformação para os ensaios ENF e 4-ENF.

Capítulo 3 – é abordada a parte experimental do trabalho. Apresenta-se o trabalho numérico realizado no *software* ABAQUS® que permitiu um estudo prévio do ensaio 4-ENF. Este capítulo disponibiliza também toda a informação acerca dos ensaios realizados, nomeadamente os materiais

utilizados e processo de fabrico dos provetes. Finalmente são apresentados e discutidos os resultados conducentes à determinação de G_{IIC} pelos ensaios ENF e 4-ENF.

Capitulo 4 – são apresentadas as conclusões do trabalho realizado e são apresentadas recomendações para trabalhos futuros.

2 Revisão Bibliográfica

As ligações adesivas são uma tecnologia em expansão devido às suas vantagens relativamente a outros métodos tradicionais, tais como ligações aparafusadas e rebitadas, soldadura e brasagem. As ligações adesivas são consideradas uma solução funcional para muitas situações em que as técnicas tradicionais não são a solução mais versátil e adequada. A indústria aeroespacial tem sido uma das responsáveis pelo desenvolvimento das juntas adesivas devido às rigorosas condições ambientais a que um veículo espacial está sujeito (diferenças extremas de temperatura e humidade durante o voo). De facto, as variações de humidade e temperatura existentes durante o descolar e a aterragem de um vaivém espacial alteram significativamente as propriedades mecânicas dos adesivos [3]. Na Figura 1 apresenta-se a diferença na distribuição de tensões entre uma junta rebitada e uma junta colada por adesivo.

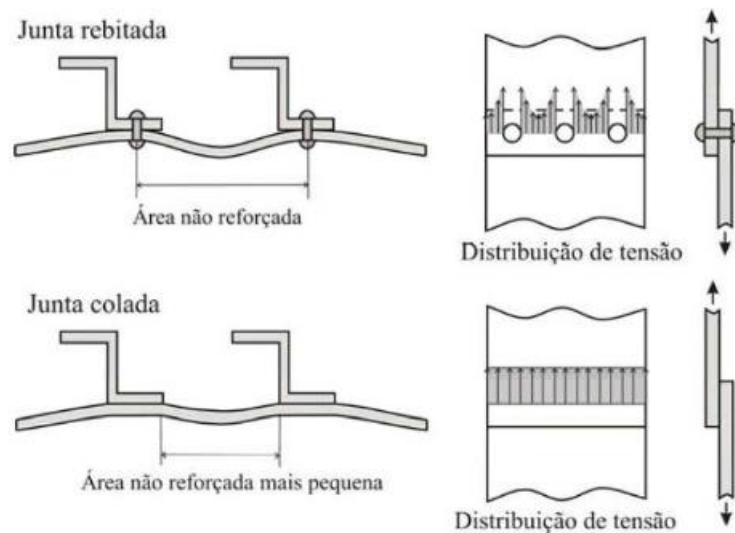


Figura 1 – Diferença de comportamento de soluções rebitadas e ligações adesivas [1]

Por outro lado, com o crescente desenvolvimento dos materiais compósitos, aumento de utilização de novos materiais e necessidade de ligar materiais diferentes, as ligações adesivas tornam-se cada vez mais importantes.

2.1 Ligações adesivas

Neste capítulo aborda-se a caracterização das juntas adesivas, os esforços envolvidos e as configurações possíveis em juntas adesivas.

2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

As ligações adesivas são cada vez mais utilizadas, conforme referido anteriormente, e frequentemente deparamo-nos no nosso dia-a-dia com este tipo de ligações. Na Figura 2 apresenta-se um exemplo de ligação adesiva de sobreposição simples enquanto a Figura 3 mostra um corpo de um automóvel onde são aplicados cerca de 90 m lineares de adesivo, segundo a *Automotive Manufacturing Solutions* [4].

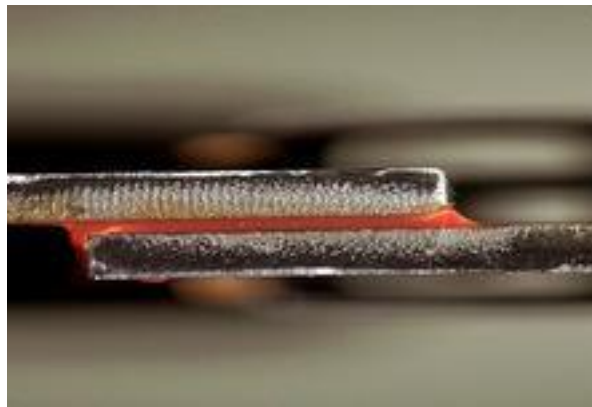


Figura 2 – Exemplo de uma junta de sobreposição simples (JSS) [5]



Figura 3 – Corpo do Mercedes CLS com indicação das ligações adesivas [4]

As ligações adesivas oferecem muitas vantagens quando comparadas com os métodos tradicionais de ligação. Na Tabela 1 e Tabela 2 são apresentadas as diferenças principais entre os principais métodos de ligação.

Tabela 1 – Comparação das características dos principais métodos de ligação [6]

Características da junta				
	Soldadura	Brasagem	Ligações mecânicas	Ligações adesivas
Tipo de junta	<i>Juntas permanentes</i>	<i>Tipicamente permanentes</i>	<i>Aparafusadas (permitindo desmontagem)</i>	<i>Juntas permanentes</i>
Distribuição de tensões	Aparecimento de pontos com tensões localizadas	Bastante boa distribuição de tensões	Pontos com concentração de tensões, sobretudo no elemento amovível	Carga uniforme ao longo da largura, no comprimento da ligação existem picos de tensões nas extremidades
Aparência	Geralmente aceitável. Caso sejam pretendidas superfícies lisas serão necessários trabalhos de maquinagem, polimento ou revestimento	Juntas com boa aparência	Superfícies descontínuadas. Em algumas aplicações não são aceitáveis	Sem marcas na superfície
Materiais de base a ligar	Geralmente limitada a materiais de grupos similares	Alguma capacidade de ligar materiais dissimilares	Podem ser ligados a uma maior variedade de materiais e com combinações diversas	Ideal para ligações com materiais dissimilares. Aplicado em ligações com materiais plásticos e/ou compósitos
Resistência à temperatura	Muito alta	Temperatura limitada pelo metal de adição	Alta resistência a temperatura	Fraca resistência a elevadas temperaturas
Resistência mecânica	Boa resistência à fadiga. A resistência à fadiga pode ser melhorada com tratamento térmico de alívio tensões (PWHT)	Boa resistência a vibrações	Perante solicitações de fadiga devem ser considerados cuidados especiais	Bom comportamento à fadiga. Resistência elétrica reduz a corrosão

Tabela 2 – Comparação dos aspetos produtivos entre os principais métodos de ligação [6]

Aspetos produtivos				
	Soldadura	Brasagem	Ligações mecânicas	Ligações adesivas
Tipo de junta	<i>Juntas permanentes</i>	<i>Tipicamente permanentes</i>	<i>Aparafusadas (permitindo desmontagem)</i>	<i>Juntas permanentes</i>
Preparação da junta	Pequena ou ausência de preparação em materiais pouco espessos. Para materiais mais espessos é necessária execução de chanfros	Muitas vezes é necessário pré-aquecimento	Execução de furos e tamponamento de rosca	Limpeza das superfícies
Pós-Processamento	Por vezes são necessários tratamentos térmicos (TT)	Devem ser removidos os fluxos corrosivos	Usualmente não são necessários (ocasionalmente são necessários reapertos)	Não requerido
Equipamento	Relativamente dispendiosos, geralmente volumosos e requerem significativas potências elétricas	Equipamento manual geralmente económico. Fornos especiais e unidades automáticas são dispendiosas	Relativamente económicos, possibilidade de execução da montagem no próprio local	Robotização possível (indústria automóvel e aeronáutica), mas dispendiosa
Consumíveis	Fio, vareta e eletrodo revestido	Alguns materiais consumíveis para aplicações especiais de brasagem são dispendiosos	Dispendiosos	Adesivos estruturais são um pouco dispendiosos
Produtividade	Pode ser muita alta, dependendo do processo de soldadura	Processos automáticos originam uma boa produtividade	Baixa, quando se efetua a preparação da junta e os aparafusamentos de forma manual	Segundos ou horas, de acordo com o tipo de adesivo
Garantia da qualidade	Ensaio Não Destrutivo (END) são os métodos mais aplicáveis	Dificuldade na realização de inspeções, particularmente na soldadura de componentes elétricos e ou eletrónicos	Necessário garantir binário e controlo nos apertos	Métodos limitados de END

2.1.2 Esforços típicos em juntas adesivas

Os esforços típicos em ligações com juntas adesivas são:

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

2.1.2.1 Esforços de tração

As tensões de tração desenvolvem-se numa junta adesiva quando as forças aplicadas atuam perpendicularmente ao plano da junta (Figura 4) e estão distribuídas uniformemente ao longo da área colada, exceto nas suas extremidades [6].

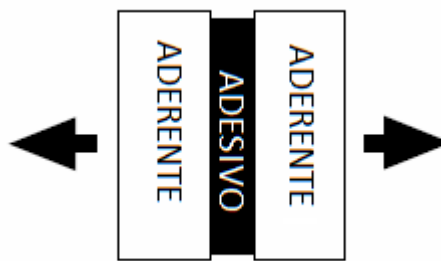


Figura 4 – Esquema representativo de um esforço de tração [7]

Quando solicitado à tração o adesivo desenvolve junto às extremidades da junta picos de tensão de clivagem ou arrancamento, suportando uma carga desproporcional nessa zona (Figura 5). A primeira fissura ocorre assim na zona mais frágil da ligação, junto a uma das extremidades. Após o início da fenda, esta irá propagar-se rapidamente levando à rotura da junta adesiva.

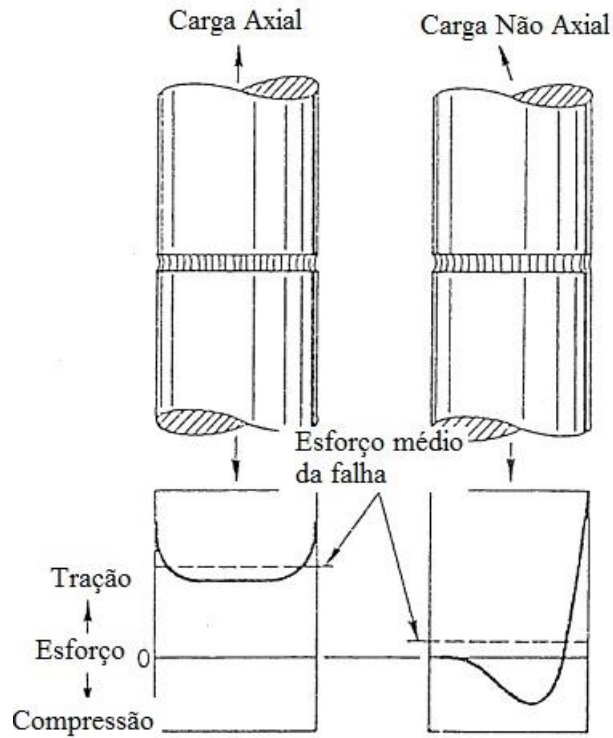


Figura 5 – Distribuição de tensões em esforços de tração [6]

2.1.2.2 Esforços de compressão

Tal como as forças de tração, as forças de compressão devem-se manter alinhadas de modo a que o adesivo fique em compressão pura, sem esforços de corte. Uma junta submetida a esforços de compressão só colapsa se a distribuição de tensões não for uniforme. Pode-se ainda acrescentar que uma junta sujeita a esforço de compressão puro praticamente não necessitaria de adesivo [1] (Figura 6).

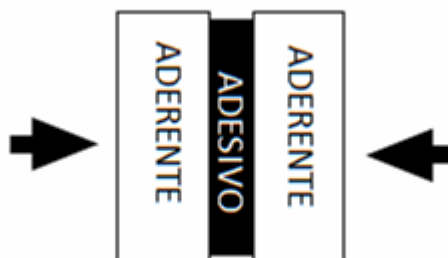


Figura 6 – Esquema representativo de um esforço de compressão [7]

2.1.2.3 Esforços de corte

As forças de corte provocam o escorregamento entre os dois aderentes (Figura 7).



Figura 7 – Esquema representativo de um esforço de corte [7]

Devido ao escorregamento dos aderentes desenvolvem-se no adesivo tensões de corte. Na Figura 8 é apresentada a distribuição de tensões de corte no caso de uma junta de sobreposição simples (JSS).

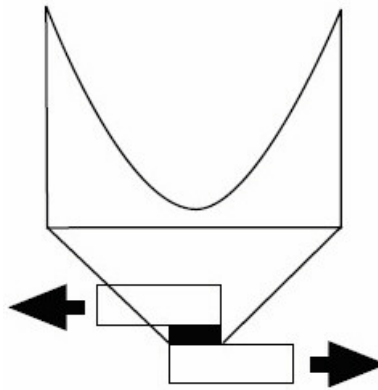


Figura 8 – Distribuição de tensões de corte numa JSS [7]

Na presença de esforços de corte, a largura de sobreposição é mais importante do que o seu comprimento. De facto, tal como mostrado na Figura 9, um aumento da largura da ligação torna a junta mais resistente porque aumenta a área colada em cada um dos extremos da zona de sobreposição, que correspondem aos locais onde o nível de tensões é mais elevado.

Por outro lado, o aumento do comprimento de sobreposição provoca um aumento da resistência da junta mas a uma taxa decrescente, devido ao efeito mais acentuado de deformação diferencial dos aderentes [8].

Segundo Petrie [6], dependendo da geometria da junta, das propriedades físicas do adesivo e dos aderentes, duas faixas de adesivo em cada extremidade da junta podem proporcionar a mesma resistência da ligação, como quando toda a área de sobreposição é ligada com adesivo.

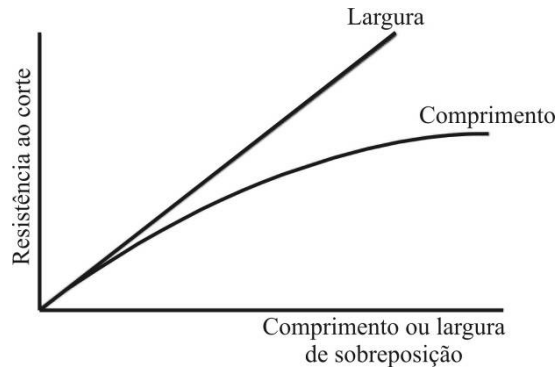


Figura 9 – Efeito da largura ou comprimento de sobreposição na resistência ao corte [7]

2.1.2.4 Esforços de Clivagem

As forças de clivagem, assim como as forças de arrancamento, são o principal inimigo das ligações adesivas [6]. A clivagem ocorre quando são aplicadas ou surgem forças na extremidade de uma junta com aderentes rígidos, de modo a originar a separação dos aderentes (Figura 10).



Figura 10 – Esquema representativo de um esforço de clivagem [7]

As juntas sujeitas a esforços de clivagem são muito menos resistentes do que as sujeitas ao corte devido às tensões estarem concentradas numa área muito mais restrita e concentrada. Toda a tensão fica concentrada apenas numa extremidade da junta, ficando o adesivo da outra extremidade não sujeito a qualquer esforço.

2.1.2.5 Esforços de arrancamento

As forças de arrancamento são semelhantes às forças de clivagem porque ambas ocorrem apenas numa das extremidades da junta. No entanto estes esforços aplicam-se apenas nos casos em que pelo menos um dos aderentes é flexível (Figura 11). Por conseguinte, o ângulo de separação pode ser muito maior no arrancamento do que na clivagem [1].

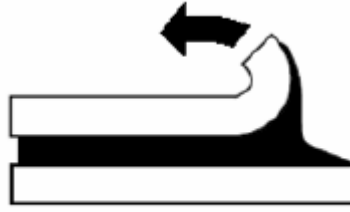


Figura 11 – Esquema representativo de um esforço de arrancamento [7]

Os adesivos frágeis e rígidos são mais sensíveis aos esforços de arrancamento do que os adesivos dúcteis e flexíveis por concentrarem os picos de tensões, em zonas mais reduzidas, e por não permitirem a plastificação do adesivo quando as suas tensões limite são atingidas.

Na Figura 12 são apresentadas as distribuições de tensões normais na presença de esforços de clivagem e arrancamento.

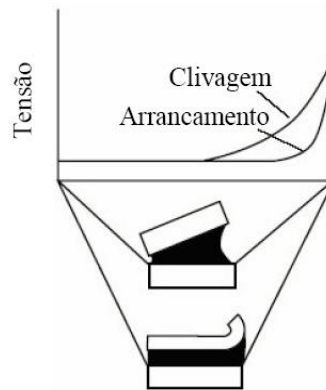


Figura 12 – Distribuição de tensões normais numa junta de sobreposição quando submetida a esforços de tração ou arrancamento [7]

2.1.3 Configurações possíveis de junta

Vulgarmente as ligações adesivas são denominadas por juntas adesivas ou juntas coladas, existindo várias configurações e possibilidades para as suas ligações. Dado o crescente número de aplicações das ligações adesivas torna-se fundamental conhecer quais os tipos de configurações possíveis e existentes em ligações adesivas. As juntas adesivas devem ser projetadas e aplicadas de forma a suportar preferencialmente esforços de corte. Deve-se ainda considerar no projeto de uma ligação adesiva a minimização dos esforços de arrancamento ou de clivagem.

Pode-se dizer que ligação adesiva ideal é aquela que é concebida para resistir a todas as solicitações de carregamento por forma a que o adesivo fique sujeito a tensões na direção em que ele mais

resistirá à falha (ao corte). Durante a fase de projeto devem ser considerados os aspetos relacionados com o fabrico e alinhamento das juntas.

As juntas mais usuais em ligações adesivas são listadas de seguida [2]:

- Topo a topo;
- Chanfro interior;
- Degrau;
- Sobreposição simples (JSS);
- Sobreposição dupla (JSD);
- Chanfro exterior;
- Ressalto (*joggle*);
- Cobre-junta;
- Cobre-junta dupla;
- Tubular;
- Junta em T;
- Canto.

As juntas mais simples de fabricar são as juntas topo-a-topo (Figura 13). Contudo, estas juntas não resistem a esforços de flexão pois nestas condições o adesivo ficaria sujeito a esforços de clivagem. No caso dos aderentes com espessuras elevadas a junta pode ser melhorada recorrendo a técnicas de maquinação dos aderentes, conforme indicado na Figura 13 (chanfro interior e degrau).

A junta de chanfro interior, assim como a junta em degrau, produz a diminuição da variação de tensões ao longo do adesivo, aumentando a sua resistência [9]. A significativa diminuição da excentricidade dos esforços também contribui para este facto, mas o fabrico das rampas ou degraus encarece o seu processo de fabrico [10]. Com a utilização de aderentes em compósito, torna-se mais económico e comum realizar os degraus durante o empilhamento antes da cura, eliminando assim as operações de maquinação [11].

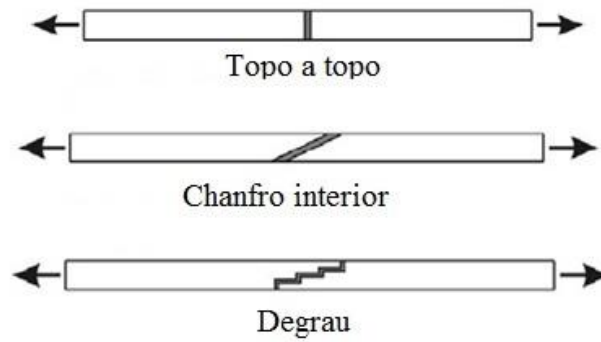


Figura 13 – Juntas topo a topo, com chanfro interior e degrau [7]

A Figura 14 relaciona a resistência da junta com a espessura do aderente [12]. A resistência da junta aumenta com a espessura dos aderentes. Na maior parte das situações terá então de se passar de um projeto de uma junta de sobreposição simples (JSS) para a uma junta dupla e, finalmente, para as juntas sobrepostas em rampa ou em escada.

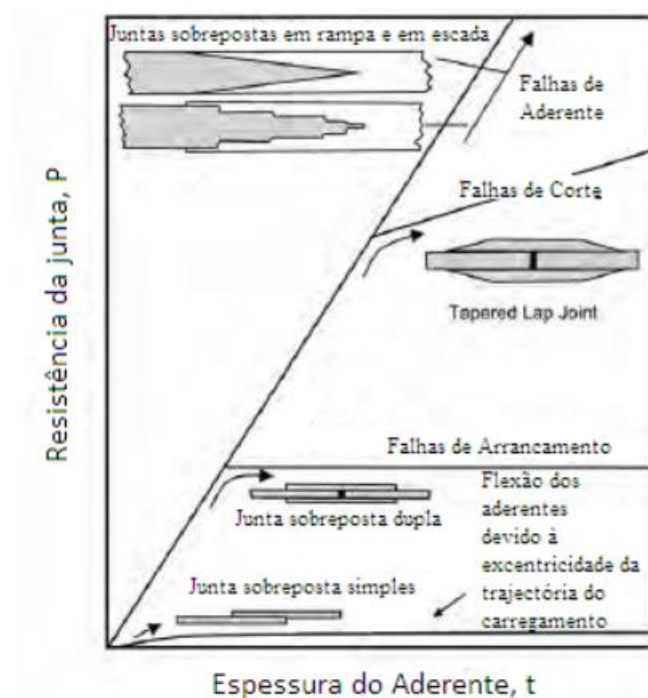


Figura 14 – Efeito da espessura do aderente na resistência de juntas adesivas de sobreposição [12]

As juntas de sobreposição (Figura 16) são o tipo de juntas mais comuns por serem fáceis de fabricar e implantar, sujeitando o adesivo maioritariamente a esforços de corte. No entanto, a aplicação de uma carga descentrada, especialmente na JSS, introduz tensões de arrancamento (*peel*), reduzindo a resistência da junta [13].

Mesmo a junta de sobreposição dupla (JSD) tem flexão interna. Além das tensões de corte existem também tensões de arrancamento. De facto, apesar de o aderente central não fletir, os aderentes exteriores fletem dando origem ao aparecimento de esforços de tração numa das extremidades da JSD (Figura 15) [1]. A JSD apresenta uma construção mais equilibrada e diminui drasticamente o momento fletor, no entanto é de fabrico mais complexo/trabalhoso [14].

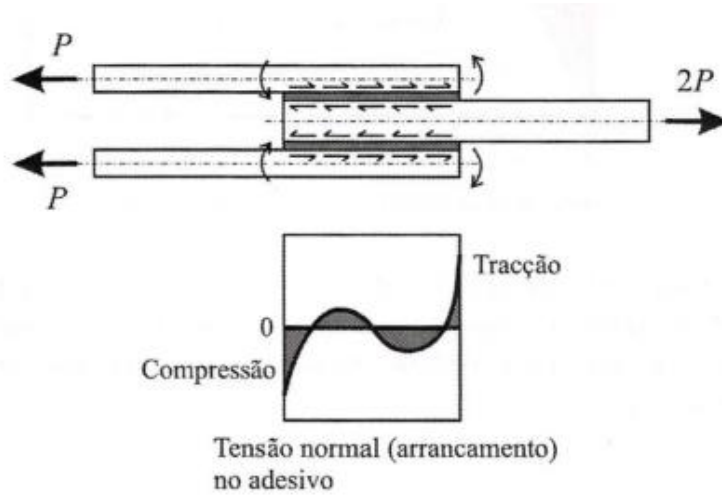


Figura 15 – Tensões de arrancamento no adesivo numa JSD [1]

A junta de ressalto (*joggle*, Figura 16) é a solução mais simples e prática de forma a garantir-se a carga alinhada, no entanto os aderentes devem ser dúcteis e fáceis de deformar.

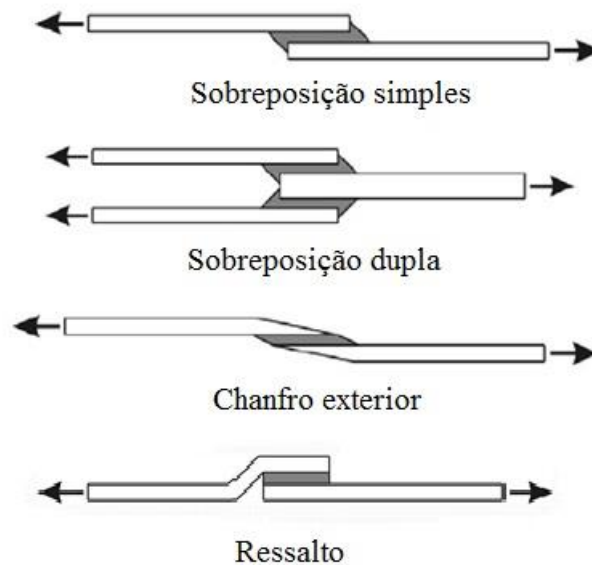


Figura 16 - Tipos de juntas de sobreposição [7]

As juntas com configuração cobre-junta (*strap joints*) estão representadas na Figura 17. Tal como no caso da JSS, a cobre-junta está sujeita a esforços de arrancamento (*peel*) significativos devido à presença de uma carga não colinear. A cobre-junta dupla reduz o momento fletor e, por conseguinte, torna-se uma ligação mais resistente [14].

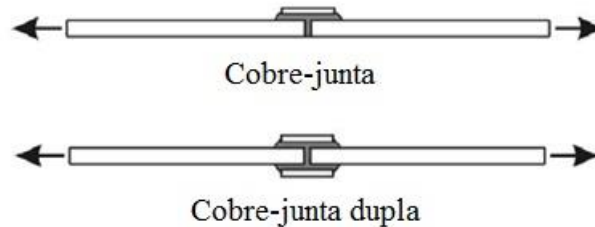


Figura 17 – Tipos de junta com cobre-junta [7]

A junta tubular (Figura 18) pode ser submetida a carregamentos axiais ou de torção. Quando submetida a uma carga axial, as concentrações de tensões vão ocorrer no final da sobreposição. No caso de ser submetida à torção, existe apenas um diferencial de tensão ao longo do comprimento de sobreposição [1, 15]. A Figura 18 apresenta um tipo de ligações utilizada em tubos e virolas de secção circular, quando na presença de elementos tubulares de espessura reduzida.

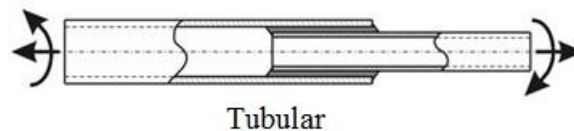


Figura 18 - Junta tubular [7]

As juntas em T tipicamente apresentam uma orientação perpendicular entre os dois aderentes (Figura 19). Contudo, as juntas em T também podem ter uma orientação de Θ diferente de 90° . O carregamento pode ocorrer no plano normal (N) e ou no plano transversal (T). O objetivo fundamental deste tipo de juntas é a minimização das forças de arrancamento e a maximização das solicitações de corte no adesivo [1].

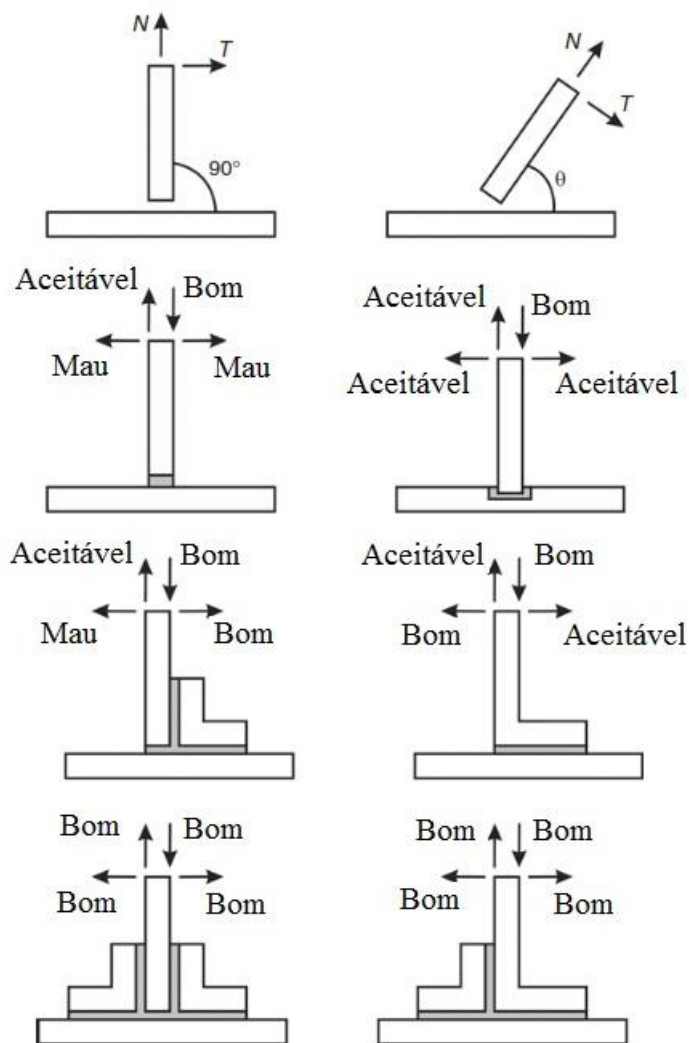


Figura 19 – Tipos de juntas em T e seu comportamento perante solicitação [14]

As juntas de canto representadas na Figura 20 são similares às juntas em T, apresentadas anteriormente, com a diferença de um dos aderentes estar ligado na extremidade. O objetivo principal é a minimização das forças de arrancamento e a maximização da transferência de esforços por corte no adesivo [14].

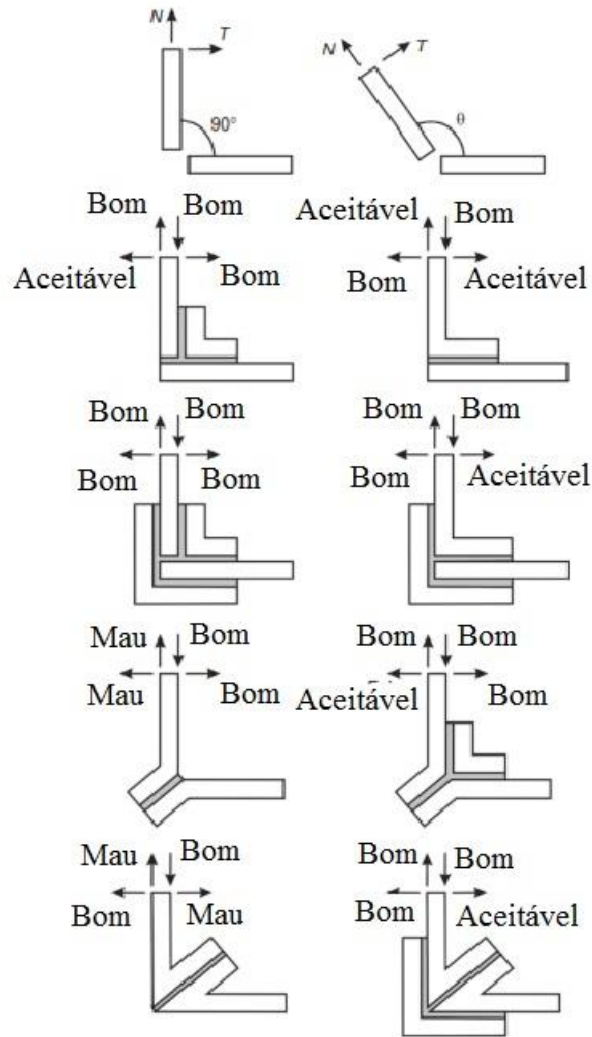


Figura 20 – Tipos de juntas de canto e seu comportamento perante solicitação [14]

2.2 Classificação dos adesivos

Existem muitos tipos de adesivos e diversos critérios para agrupar os adesivos. Os adesivos podem ser classificados segundo a sua natureza, tipo de estrutura molecular, composição química, modo de apresentação e de aplicação, modo de endurecimento, tipo de aderente em que podem ser utilizados, custos, desempenho ou função, etc [7]. Os adesivos podem apresentar-se sob a forma de pastas ou líquidos, podendo uma ou mais partes não possuir solvente. Também podem apresentar-se apenas sob a forma líquida, ou seja, adesivos com solvente ou água, ou ainda sob a forma sólida, caso de adesivos em pó, fita e filme [16].

2.2.1 Caracterização dos adesivos estruturais

Os adesivos estruturais são os adesivos que são utilizados em aplicações permanentes onde normalmente é necessária uma resistência mecânica elevada. Um adesivo estrutural pode ser 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 [1].

2.2.2 Tipos de adesivos estruturais

Os adesivos estruturais estão organizados e subdivididos em subclasses baseados nas resinas químicas usadas na sua formulação, que se podem apresentar sob a forma sólida, líquida, em pasta ou em filme. Algumas categorias podem ainda ser subdivididas em adesivos de 1 ou de 2 componentes. Os adesivos estruturais de um componente usualmente requerem a necessidade de adição de energia ou efeito de cura sob a forma de calor ou radiação. Em alternativa, o processo de cura pode ser ativado pela reação dos componentes com a atmosfera, por exemplo oxigénio [17]. De seguida descrevem-se as diferentes categorias de adesivos estruturais (Figura 21).

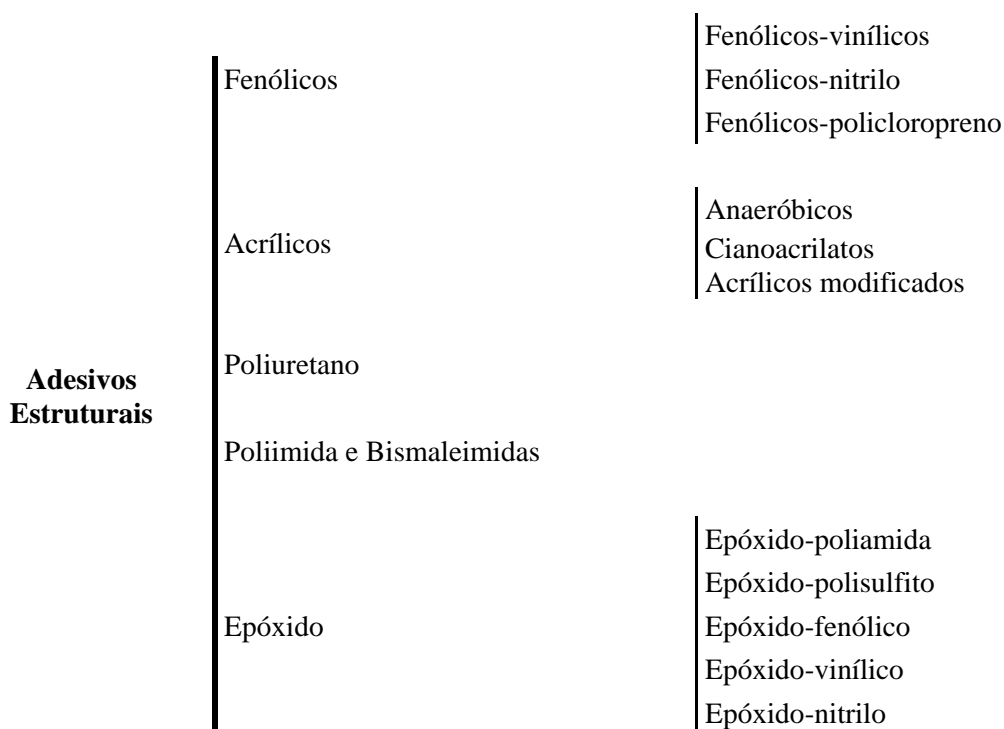


Figura 21 – Diferentes tipos de adesivos estruturais

2.2.2.1 Adesivos Fenólicos

As resinas fenólicas são o produto da condensação de fenol e formaldeído. Devido à sua boa resistência ao calor e estabilidade dimensional usualmente são utilizadas em calços de travão, discos abrasivos e lixas, entre outras aplicações [1]. Relativamente à sua aplicação, geralmente este adesivo é aplicado no substrato como uma solução de álcool, acetona ou água, e depois é curado sob efeito da pressão e temperatura. A cura é feita a aproximadamente 140°C durante vários minutos e geralmente envolve a libertação de água, ocorrendo condensações.

Estes adesivos são económicos, garantem uma boa durabilidade da junta, apresentam boa resistência mecânica, boa resistência a temperaturas elevadas e as suas propriedades não se degradam quando em contacto com o ambiente. Como limitações registam-se a baixa resistência a solventes e fragilidade ao impacto. Para melhorar estas limitações têm sido desenvolvidos adesivos que combinam a resina fenólica com a resina vinílica ou elastómeros de nitrilo ou policloropreno. Como indicado na Figura 21, os adesivos estruturais fenólicos são divididos em fenólicos-vinílicos, fenólicos-nitrilo e fenólicos-policloropreno.

Fenólicos-Vinílicos: São fornecidos como soluções de solvente e como filmes. Apresentam excelente resistência ao corte e ao arrancamento. Em ligações metálicas, estes adesivos são os que apresentam melhor desempenho, sendo possível atingir uma resistência ao corte de 35 MPa à temperatura ambiente. Apresentam ainda uma boa resistência ao impacto e a resistência a agentes químicos é excelente. A sua temperatura limite de serviço ronda os 95°C.

Fenólicos-Nitrilo: Encontram-se geralmente disponíveis em soluções de solvente ou em filmes. Para o processo de cura requerem pressões na ordem dos 1,4 MPa e temperaturas entre os 150-260°C. Em metais, estes adesivos apresentam boa resistência ao corte, tendo simultaneamente excelentes propriedades de arrancamento e de fadiga.

Fenólicos-Policloropreno: São disponibilizados geralmente em soluções de solvente e em filme. Durante a cura estes adesivos são muito sensíveis à contaminação da superfície. Relativamente à sua aplicação, podem ser utilizados em atmosferas e/ou ambientes com temperaturas negativas até -55°C. Apresentam alta resistência à fluência, no entanto, a resistência ao corte é inferior aos outros fenólicos.

2.2.2.2 Adesivos Acrílicos

Nos adesivos acrílicos estão incluídos os adesivos anaeróbicos, cianoacrilatos e acrílicos modificados. Estes adesivos são conhecidos por serem fáceis de usar, pois geralmente não requerem uma preparação de junta muito exigente [17].

Anaeróbicos: Os adesivos anaeróbicos são adequados para aplicações estruturais e de maquinaria, sendo as suas aplicações típicas como vedantes e como travão líquido em ligações aparafusadas (*liquid lock washers*). São geralmente líquidos finos monoméricos, com boa penetração, que polimerizam para formar uma ligação plástica tenaz quando montados entre metais. São caracterizados por serem fáceis de aplicar, com uma cura rápida à temperatura ambiente. O processo de endurecimento dá-se por reação de polimerização do tipo radical livre, uma vez eliminado o oxigénio. Alguns anaeróbicos podem resistir até 230°C, embora geralmente as suas temperaturas máximas rondem os 150°C. Apresentam ainda boa resistência a solventes e à água.

Cianoacrilatos: Estes adesivos são líquidos de baixa viscosidade de um só componente, têm uma cura rápida à temperatura ambiente, apresentam uma excelente resistência ao corte e boa durabilidade. Estes adesivos são ainda vulgarmente conhecidos como “supercola” ou “cola-tudo”. Têm geralmente uma baixa resistência ao calor, à humidade, ao arrancamento e ao impacto.

Acrílicos modificados: Os adesivos acrílicos modificados são termoendurecíveis e por vezes também são designados por acrílicos reativos. Os acrílicos modificados possuem duas partes e são normalmente utilizados em aplicações termoplásticas sensíveis à pressão. Devido à sua cura rápida e à alta resistência (20 a 35 MPa), geralmente são utilizados em operações altamente automatizadas. Como vantagens apresentam a cura rápida, boa resistência ao arrancamento, corte e impacto entre -100 e 120°C e boa resistência à humidade. Como principal desvantagem apresentam um módulo de elasticidade mais baixo do que os epóxidos.

2.2.2.3 Adesivos Poliuretanos

Os adesivos poliuretanos são fornecidos em sistemas de um ou dois componentes, tal como nos adesivos epóxidos, apresentando viscosidades variáveis que podem ir desde líquidos até pastas. Os adesivos de poliuretano são flexíveis e têm resistência ao corte e ao arrancamento relativamente elevadas. Estes adesivos podem curar à temperatura ambiente ou a altas temperaturas e são fabricados a partir de polímeros de uretano com químicos base de grupo de isocianato.

São três os diferentes tipos de adesivos poliuretanos [18]:

- Adesivos poliuretanos de dois componentes;
- Adesivos poliuretanos de um componente com cura por ação do calor (rígido);
- Adesivos poliuretanos de um componente com cura por mistura (elástico).

No caso dos adesivos de um componente, as reações de polimerização dão-se devido a fatores exteriores ao adesivo após a sua aplicação. São exemplo os adesivos à base de diisocianatos ou triisocianatos, que curam reagindo com hidrogénios ativos pertencentes à superfície do substrato ou

com a humidade presente no ar ou no aderente. Este processo de polimerização produz dióxido de carbono, não devendo ser utilizado nos casos em que esta substância é prejudicial para as propriedades do adesivo. Outro exemplo de adesivos de um componente são os adesivos à base de isocianatos bloqueados, sendo a temperatura o agente que provoca a polimerização. O segundo tipo de adesivos, de dois componentes ou bi-componente, é o mais utilizado e aplica-se quando é necessária uma elevada velocidade de cura, iniciando-se esta assim que existe contacto entre os dois componentes. Geralmente, este tipo de adesivo de dois componentes apresenta um tempo limite de aplicação (*pot life*) de cerca de poucos segundos até 16 horas. Um dos componentes é constituído por isocianatos e o segundo componente por poliois, sendo a sua correta mistura essencial para a maximização do desempenho do adesivo. Para garantir a distinção dos dois componentes, são utilizados pigmentos com cores distintas [19].

Destacam-se as seguintes características deste tipo de adesivos [1]:

- Formam ligações com boa tenacidade;
- Elevada resistência a temperaturas baixas (criogénicas);
- Elevada resistência à tração;
- Elevada resistência química (não tão boa como os epoxídicos);
- Fraca resistência a temperaturas altas;
- Suscetibilidade quando expostos a níveis de humidade elevados.

Devido à sua boa mobilidade e flexibilidade, os poliuretanos aderem bem a diferentes tipos de aderentes.

2.2.2.4 Adesivos Poliimididas e Bismaleimididas

São os adesivos adequados para aplicações de alta temperatura, acima dos 200°C. Encontram-se disponíveis geralmente sob a forma de líquidos ou filmes. No entanto, são dispendiosos e difíceis de utilizar. Estes adesivos são caracterizados por apresentarem um longo tempo de cura a elevadas temperaturas e a elevadas pressões, requerendo ainda processos de pós-cura. Estes adesivos são os que apresentam melhores resultados a altas temperaturas, quando aplicados em regime de longo prazo.

2.2.2.5 Adesivos Epóxidos

São provavelmente a família de adesivos mais versátil e mais frequentemente utilizada. Os adesivos epóxidos podem ser de uma ou duas partes. Os adesivos de uma parte curam com calor, enquanto os adesivos epóxidos de duas partes podem curar à temperatura ambiente ou a altas

temperaturas. Os epóxicos que curam a altas temperaturas têm maior resistência ao corte e uma maior resistência ao meio ambiente. No entanto, possuem menor tenacidade e menor resistência ao arrancamento.

Os epóxicos de duas partes que curam à temperatura ambiente geralmente necessitam de um período significativo de cura, entre 18 a 72 horas. No entanto, este tempo de cura pode ser minimizado pela ação da temperatura, já que um aumento de temperatura acelera a reação. Nos epóxicos de duas partes é fundamental que o doseamento/proporção da resina e do endurecedor seja o indicado pelo fabricante, garantindo uma boa homogeneidade final. Neste caso, após a mistura da resina com o endurecedor, existe um tempo limite para a sua aplicação. Nos adesivos de um componente a mistura é feita pelo fabricante e o tempo de aplicação é relativamente longo. O processo de cura destes adesivos não necessita da aplicação de pressão, pelo que basta o simples posicionamento das juntas a serem coladas.

As propriedades dos adesivos epóxicos podem ser modificadas pela adição de outras resinas (fenólicos, poliamida, polisulfito, vinílico, etc.) ou por um elastómero (nitrilo), formando os designados epóxicos híbridos ou modificados.

Epóxido-fenólico: Visam melhorar a resistência a altas temperaturas dos epóxicos. Podem ser utilizados em regime contínuo até temperaturas de 175°C e em regime intermitente até 260°C. A resistência ao meio ambiente, óleo, solventes e humidade é muito boa. Como limitações apresentam baixa resistência ao impacto e ao arrancamento.

Epóxido-poliámidá: A resina de poliámidá tem o papel de endurecedor e de agente flexibilizante. Estes adesivos possuem uma cura lenta à temperatura ambiente (12 a 16 horas). Como vantagens, relativamente aos epóxicos-fenólicos, apresentam maior flexibilidade e uma maior resistência ao arrancamento. Como limitações apresentam fraca resistência à humidade e baixa resistência à fluência e a temperaturas elevadas (limitados a temperaturas máximas de 80°C).

Epóxido-polisulfito: Caracterizam-se por apresentarem uma excelente flexibilidade e resistência química. As resinas de polisulfito, quando combinadas com o epóxido, apresentam uma boa resistência a forças de arrancamento e a baixas temperaturas. Como limitação apresentam uma baixa resistência ao corte e a altas temperaturas. O processo de cura ocorre com uma reação extremamente lenta, necessitando de uma boa ventilação devido ao odor libertado.

Epóxido-vinílico: A adição de polímeros de vinilo nas resinas de epóxido melhora a resistência ao impacto e ao arrancamento, embora provoque uma diminuição da resistência a altas temperaturas.

Epóxico-nitrilo: Pequenas inclusões de borracha de nitrilo melhoram a resistência ao arrancamento e aumentam a tenacidade das resinas de epóxico. As pequenas partículas de borracha constituem barreiras à propagação de fendas e mecanismos internos de relaxação de tensões [1].

2.3 Determinação das propriedades de adesivos

Torna-se necessário e fundamental compreender as propriedades físicas, térmicas e mecânicas dos adesivos de modo a que estes possam ser selecionados e utilizados com sucesso em juntas adesivas. As propriedades físicas e térmicas são propriedades intrínsecas do adesivo que condicionam a sua preparação, aplicação e comportamento em diferentes condições ambientais e solicitações mecânicas [1]. Para a determinação das propriedades mecânicas dos adesivos recorre-se a ensaios mecânicos de provetes de adesivos maciço ou ensaios em junta.

2.3.1 Ensaios de adesivo maciço

Para a caracterização mecânica dos adesivos podem ser utilizados provetes de adesivo maciço. Geralmente, os provetes podem ser obtidos pelos processos de prensagem hidrostática (Figura 22 e Figura 23), moldação (Figura 24) e ou injeção (Figura 25).

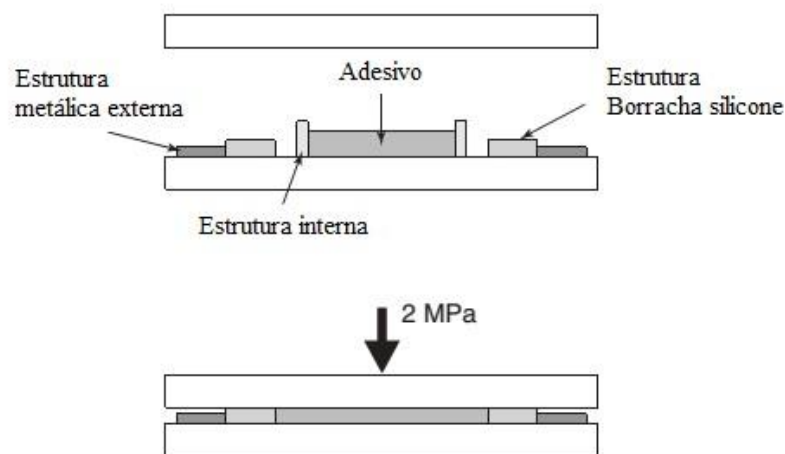


Figura 22 – Produção de placa de adesivo por prensagem hidrostática [20] de acordo com a norma **NF T 76-**

142 [21]

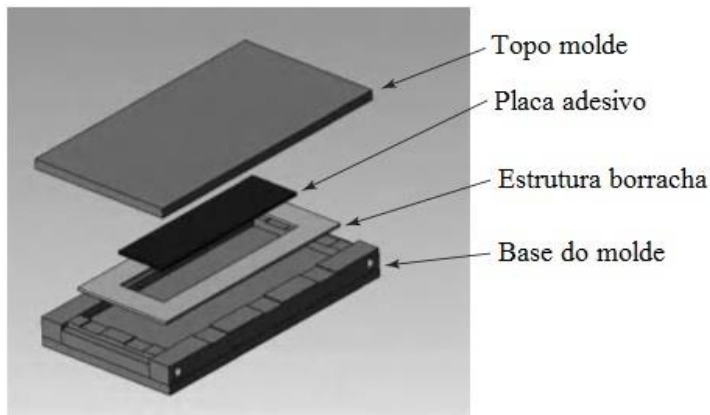


Figura 23 – Vista explodida do molde destinado à produção de placas de adesivo através de pressão hidrostática [20]

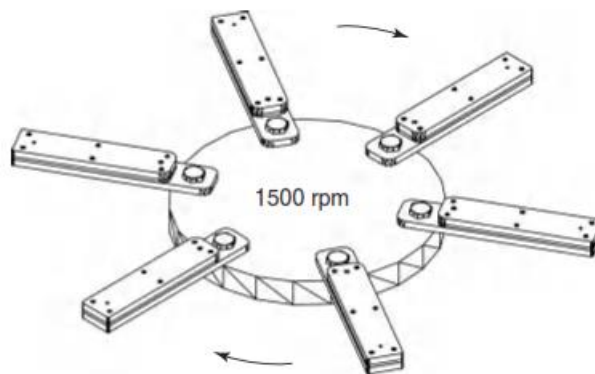


Figura 24 – Esquema de princípio da produção de provetes através de moldação rotacional [20]

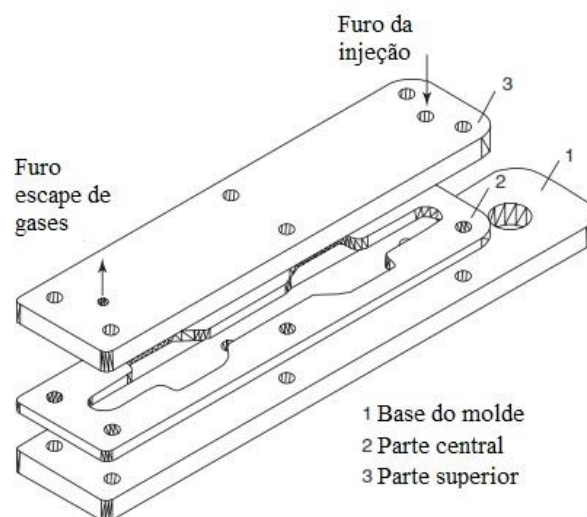


Figura 25 – Vista explodida de um molde destinado à produção de provetes por injeção [20]

2.3.1.1 Ensaios de tração em provetes maciços

A determinação das propriedades à tração de um adesivo pode ser realizada através do ensaio de um provete de adesivo maciço de acordo com a norma **EN ISO 527-2** [22] onde os provetes de ensaio têm a forma de “osso de cão” [23]. As propriedades dos adesivos são sensíveis ao modo como os provetes se apresentam, ou seja, sob a forma de provetes maciços ou filme [1].

A realização do ensaio de tração consiste em solicitar o provete segundo a sua direção longitudinal até à ocorrência da fratura, determinando a curva de *tensão vs deformação*. Desta curva podem-se retirar algumas propriedades mecânicas como o módulo de elasticidade ou de *Young*. A geometria e as dimensões dos provetes utilizados no ensaio de tração devem estar de acordo com a norma **EN ISO 527-2** [22] e apresentam-se na Figura 26.

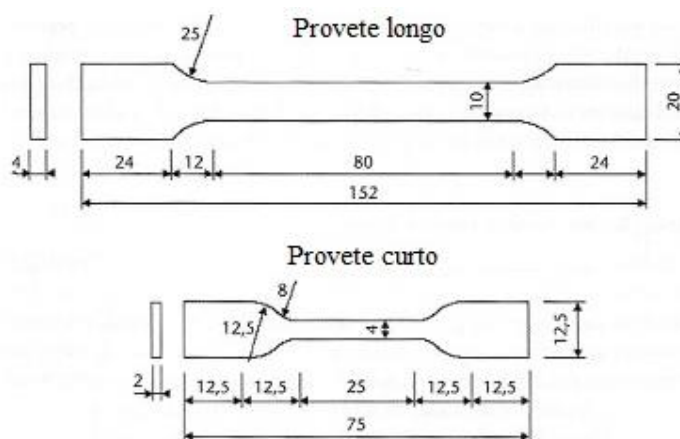


Figura 26 – Geometria e dimensões (mm) dos provetes de tração [1] de acordo com a norma **EN ISO 527-2** [22]

Nos adesivos mais rígidos, as deformações são menores, pelo que o provete mais longo se adapta melhor. O provete curto é aplicado em adesivos mais dúcteis onde as deformações são maiores.

A tensão correspondente à transição elasto-plástica é obtida considerando a força correspondente a essa transição e a tensão máxima corresponde ao ponto em que a força aplicada atinge o seu 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%) [1]. Para a medição das deformações podem ser utilizados transdutores montados diretamente sobre o provete ou utilizadas técnicas de medição sem contacto, por exemplo com base no registo fotográfico (Figura 27).



Figura 27 – Medição da deformação sem contacto, registo fotográfico [1]

As técnicas de medição sem contacto são preferíveis por não interferirem com o provete de adesivo e com isto não condicionarem de modo algum as propriedades obtidas. O maior problema das técnicas de medição sem contacto é quando as deformações são de baixa amplitude. Neste caso a resolução pode ser baixa e conduzir a resultados pouco fiáveis [1].

2.3.1.2 Ensaios de compressão em provetes maciços

O ensaio de compressão é menos habitual, pois as propriedades mecânicas podem ser obtidas a partir do ensaio de tração. Os ensaios de compressão podem ser realizados em provetes com diferentes geometrias previstas nas normas **NF T 51-101** [24] ou **ASTM D695** [25], conforme representado na Figura 28, na Figura 29 e na Figura 30.

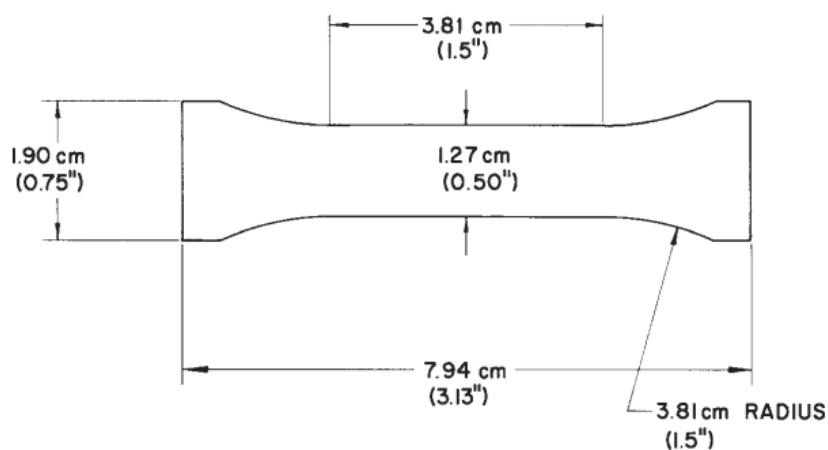


Figura 28 – Geometria e dimensões do provete maciço plano para espessura inferiores a 3,2 mm de acordo com a norma **ASTM D695** [25]

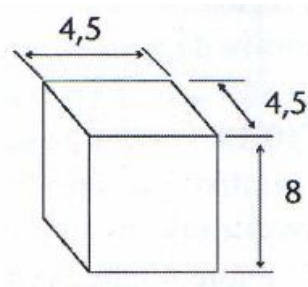


Figura 29 – Geometria e dimensões (mm) de provete cúbico para ensaio de compressão segundo a norma **NF T 51-10** [24]

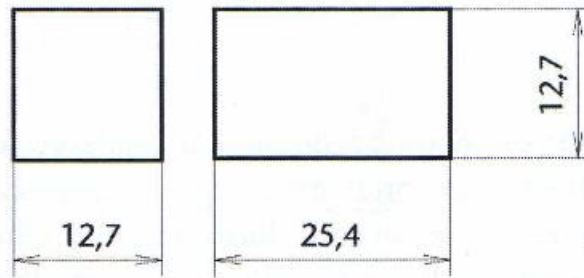


Figura 30- Geometria e dimensões (mm) de provete paralelepípedo para ensaio de compressão [1]segundo a norma **ASTM D695** [25]

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

O ensaio *V-Notched beam* foi inicialmente proposto por Iosipescu para caracterizar o comportamento de materiais metálicos sujeitos a esforços de corte. No seguimento dos estudos, o ensaio Iosipescu foi normalizado e adotado pela norma **ASTM D5379** [26] para materiais compósitos [20]. O provete associado a este ensaio consiste numa viga retangular, de reduzidas dimensões, com dois entalhes em V centrados e simétricos, como se representa na Figura 31 [27]. O ensaio Iosipescu pode ser realizado em provetes de adesivo maciço ou em junta.

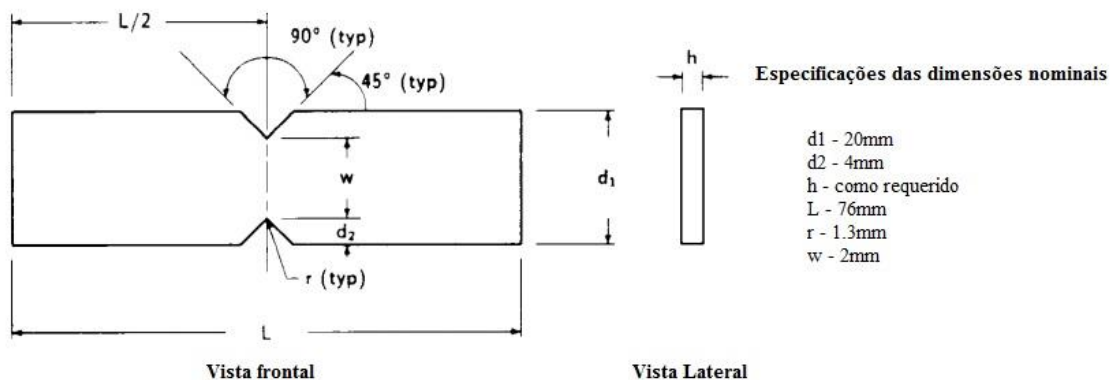


Figura 31 – Geometria e dimensões (mm) do provete para o ensaio Iosipescu (adaptado de [26])

Este ensaio oferece algumas vantagens como a utilização de um provete compacto e de fácil execução. As propriedades ao corte são determinadas com facilidade a partir do conhecimento da carga aplicada e das dimensões adotadas no provete do ensaio. O ensaio permite também determinar o módulo de corte (G) [1]. Na Figura 32 é apresentado o esquema da amarra utilizada no ensaio de Iosipescu.

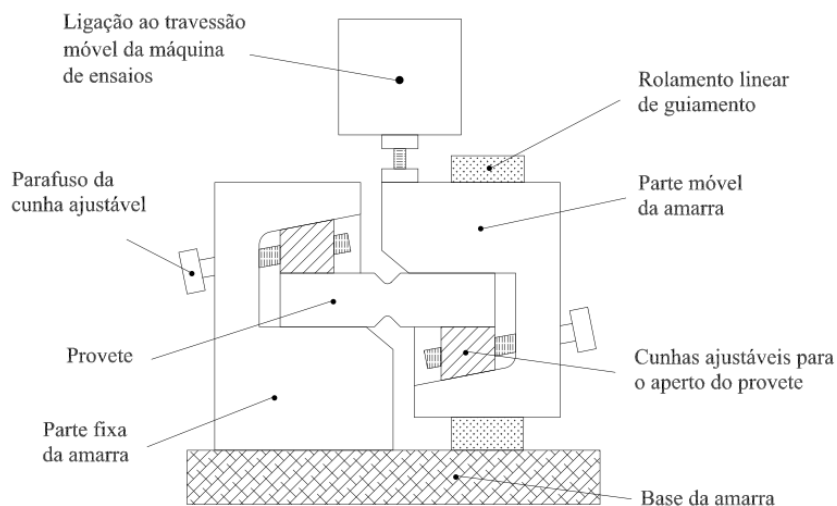


Figura 32 – Esquema da amarra associada ao ensaio de Iosipescu [27]

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

O ensaio *Notched plate shear method*, também designado por Arcan, é um ensaio não normalizado utilizado para a obtenção das propriedades de corte de adesivos, utilizando para o efeito provetes com uma configuração semelhante à de uma borboleta, conforme indicado na Figura 33.

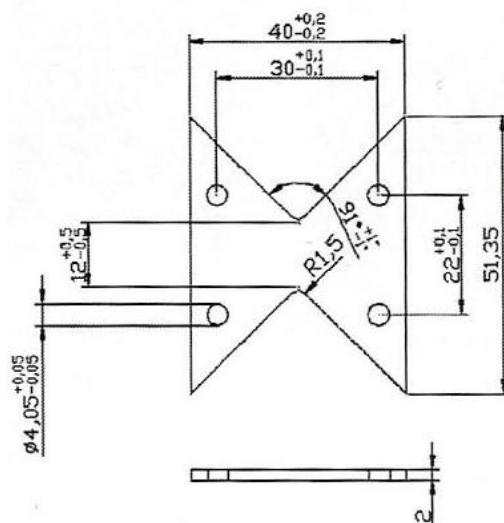


Figura 33 – Dimensões (mm) do provete Arcan [1]

Este ensaio apresenta um bom desempenho em todos os tipos de adesivos, incluindo os mais dúcteis, e pode ser realizado utilizando espessuras de adesivo mais finas, o que o aproxima às condições observadas em juntas coladas [1].

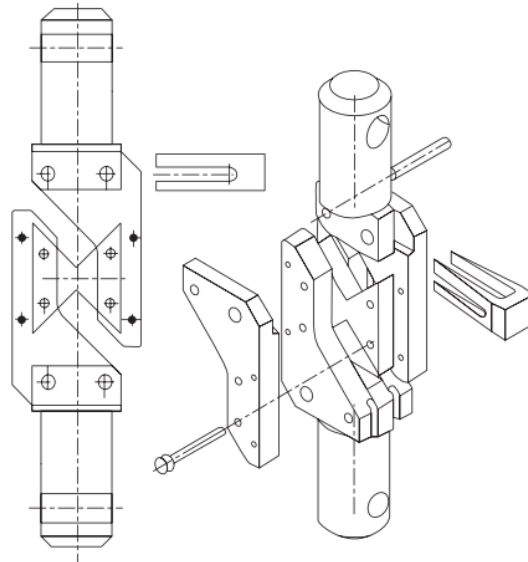


Figura 34 – Acessório e respectivas fixações para o ensaio Arcan [20]

O dispositivo na Figura 34 é montado numa máquina universal de ensaios e sujeito a um deslocamento axial, provocando um esforço de corte na secção entre os dois entalhes do provete. O ensaio Arcan pode ser realizado em provetes maciços ou provetes em junta.

2.3.2 Ensaio de adesivos em junta

Os ensaios em juntas adesivas visam reportar uma realidade mais próxima da sua aplicação prática. Permitem também determinar as propriedades mecânicas dos adesivos, combinando diferentes solicitações e configurações de juntas. Assim sendo, os testes são realizados para as mais diversas finalidades, incluindo a seleção de materiais, aquisição de dados para o projeto, validação das propriedades do adesivo, avaliação da durabilidade da junta, entre outras. Praticamente todos os testes estão normalizados pelas normas **ISO** e **ASTM**, sendo fundamental seleccionar o ensaio mais adequado para a determinação e obtenção das propriedades mecânicas desejadas.

2.3.2.1 Ensaio de tração em juntas topo a topo ou *butt-joints*

O ensaio de uma ligação topo a topo é um dos ensaios mais comuns para determinação das propriedades à tração. Dois cilindros maciços são ligados nos seus extremos através de uma junta

adesiva e testados através da aplicação de uma força axial (Figura 35). O ensaio permite obter informação respeitante ao módulo de elasticidade (E) e ao coeficiente de *Poisson* (ν).

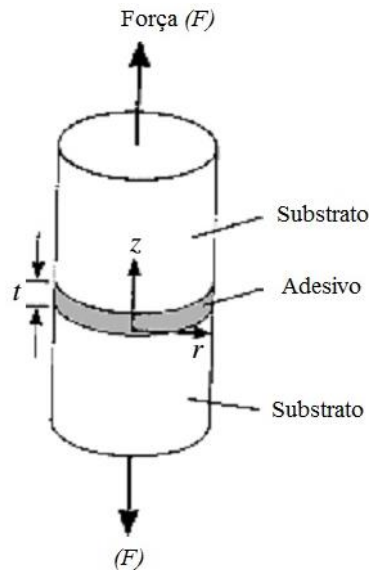


Figura 35 – Carga axial aplicada num provete cilíndrico com ligação *butt-joint* [17]

Aparentemente, a junta carregada axialmente apresenta um estado uniaxial de tensão uniforme. Contudo, na prática a sua distribuição de tensões é não uniforme. Tal resulta do efeito de *Poisson* e da restrição às deformações na camada de adesivo provocada pelos substratos devido às diferenças de rigidez entre ambos, e ainda do possível desalinhamento dos substratos, o que origina esforços de flexão que reduzem as propriedades de resistência da junta.

Geralmente considera-se a utilização de *gabarits* de posicionamento para garantir o alinhamento deste tipo de juntas durante o seu fabrico, e conseqüentemente, a reprodutibilidade dos resultados. A resistência mecânica é também afetada pela presença do adesivo excedentário [1]. Até ao momento, não existe nenhuma metodologia normalizada para este ensaio.

2.3.2.2 Ensaio de tração em juntas de sobreposição simples

O ensaio de tração de uma JSS é um dos métodos mais comuns para caracterizar uma junta adesiva por ser um ensaio fácil de realizar [11]. Com a realização deste ensaio são analisadas as propriedades ao corte do adesivo. A carga é transferida de uma peça para a outra através do esforço de corte na zona adesiva. Neste tipo de juntas, a aplicação descentrada da carga provoca a flexão dos aderentes, produzindo uma rotação da junta que altera a linha de aplicação da carga na zona de sobreposição, originando o aparecimento de tensões normais na direção da espessura do adesivo (arrancamento) [11]. Para além deste facto, devido à distribuição de tensões não uniforme na junta adesiva, os valores de resistência são de pouca utilidade para efeitos de projeto de engenharia [6].

A norma **ASTM D 1002** [28] define as condições em que os provetes devem ser preparados. A Figura 36 mostra as dimensões de um provete de junta de sobreposição simples.

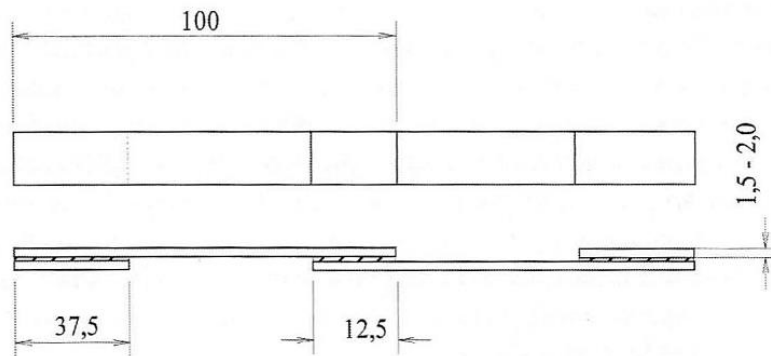


Figura 36 – Geometria e dimensões (mm) de uma JSS [1] pela norma **ASTM D1002** [28]

2.3.2.3 Ensaio com junta topo a topo em torção ou *Napkin ring test*

As juntas topo a topo são frequentemente usadas para testar adesivos em formato filme com espessuras finas em esforços de torção. O ensaio de *Napkin ring* consiste na medição das propriedades de um adesivo com base num ensaio de torção. O ensaio é realizado em juntas de topo a topo entre dois cilindros de paredes finas com o objetivo de reduzir a variação das tensões de corte ao longo do adesivo. Se os dois cilindros estiverem perfeitamente alinhados promove-se um estado de tensão de corte puro [1]. A Figura 37 mostra a geometria e dimensão do provete.

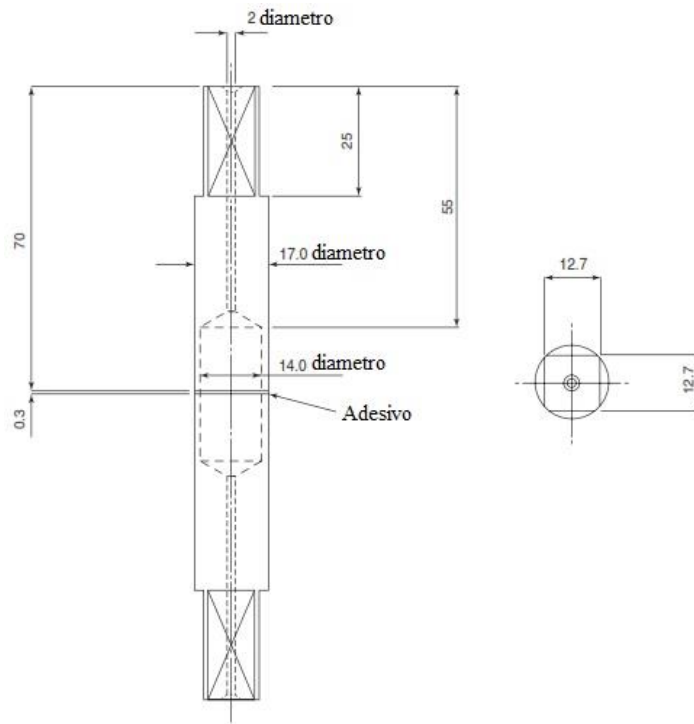


Figura 37 – Geometria e dimensões (mm) do provete *Napkin ring* [20]

2.3.2.4 Ensaio *Thick Adherent Shear Test* (TAST)

O ensaio TAST é um dos mais populares para a determinação de propriedades de adesivos ao corte, uma vez que tanto os dispositivos de ensaio como a execução dos provetes são de relativa fácil execução. Este ensaio encontra-se normalizado, sendo as dimensões indicadas na norma **ISO 11003-2.2** [29] e na **ASTM D3983** [30], Figura 38 [1, 23].

Este ensaio é exclusivamente realizado em junta e consiste na ligação adesiva de dois aderentes metálicos, espessos e com elevada rigidez, de forma a não provocar flexão dos aderentes, conseguindo assim sujeitar o adesivo a um esforço quase exclusivamente de corte. De facto, o estado de tensão predominante é o corte mas existem tensões de arrancamento mínimas nos extremos da ligação adesiva [23].

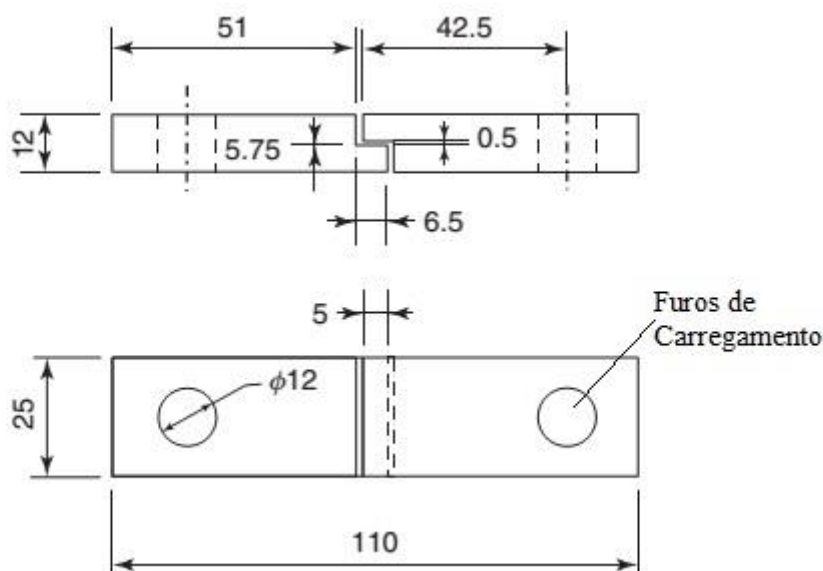


Figura 38 – Geometria e dimensões (mm) do provete TAST [1] de acordo com a norma **ISO 11003-2.2** [29]

São utilizadas duas formas no ensaio TAST [20], uma desenvolvida por Krieger nos EUA (**ASTM D3983**) e outra desenvolvida na Europa por Althof e Neumann (**ISO 11003-2**). A principal diferença entre os dois testes é a dimensão do provete [20]. O provete de acordo com a **ISO 11003-2** [29] é metade do indicado pela norma **ASTM D3983** [30]. A Norma **ISO 11003-2** [29] recomenda a maquinação de provetes conforme indicado na Figura 38.

2.3.2.5 Ensaios de arrancamento

Uma das propriedades mais relevantes dos adesivos é a sua resistência ao arrancamento. Para determinar a resistência ao arrancamento de uma ligação adesiva são executados ensaios

mecânicos, conforme descrito de seguida. No ensaio de arrancamento em junta tipo T ambos os aderentes devem ser flexíveis, enquanto os restantes ensaios utilizam um aderente rígido e outro flexível.

2.3.2.5.1 Ensaio de arrancamento em junta tipo T

O ensaio de arrancamento em junta tipo T encontra-se normalizado pela norma **ASTM D1876** [31]. É aplicado na caracterização da resistência ao arrancamento em ligações adesivas com substratos flexíveis [1]. A configuração e a geometria dos provetes encontra-se definida na Figura 39.

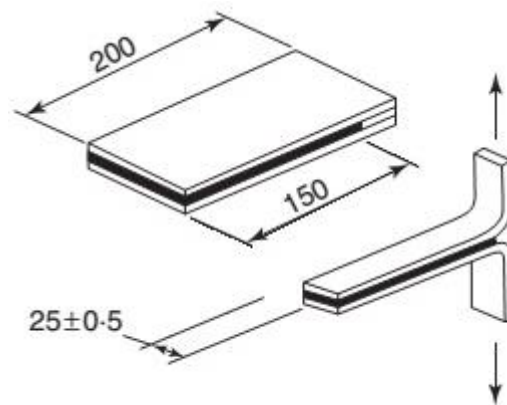


Figura 39 – Geometria e dimensões (mm) do provete para ensaio de arrancamento em junta T de acordo com norma **ASTM D1876** [31] (adaptado de [1])

2.3.2.5.2 Ensaio de arrancamento a 180°

O ensaio de arrancamento a 180° encontra-se representado na Figura 40 e está normalizado pela norma **ASTM D903-49** [32]. Este ensaio tem a particularidade de um dos aderentes ser suficientemente flexível de forma a ser dobrado a 180° [1].

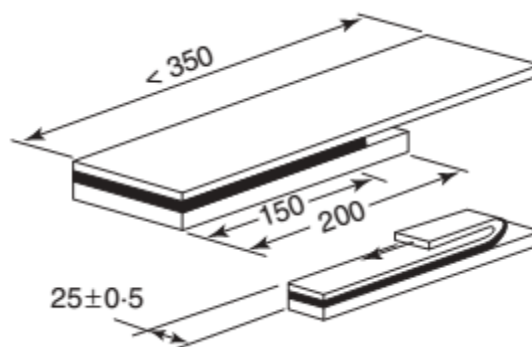


Figura 40 – Geometria e dimensões (mm) do provete para ensaio de arrancamento a 180° [1] de acordo com a norma **ASTM D903-49** [32]

2.3.2.5.3 Ensaio de rolete flutuante (*floating roller test*)

O ensaio de rolete flutuante permite determinar a resistência ao arrancamento numa ligação adesiva entre um aderente rígido e outro flexível e está normalizado pela norma **ASTM D3167** [33]. O mecanismo de rolete permite um ângulo constante durante a realização do ensaio, conforme indicado na Figura 41 [20].

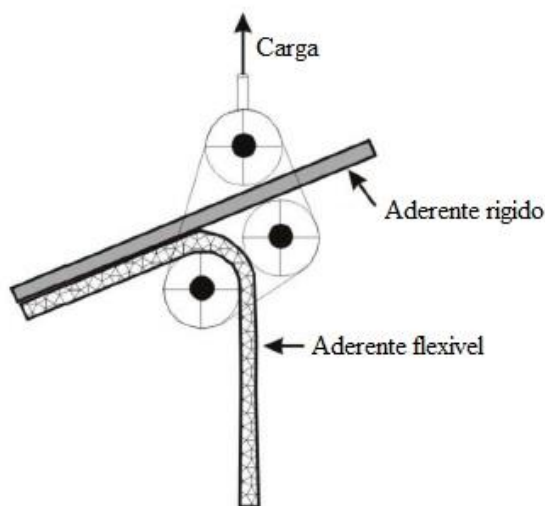


Figura 41 – Ensaio de rolete flutuante de acordo com a norma **ASTM D3167** [33] (adaptado de [1])

2.3.2.5.4 Ensaio de *climbing* ou *climbing drum test*

O ensaio de *climbing* (Figura 42) é normalizado pela norma **ASTM D1781** [34] e permite determinar a resistência ao arrancamento de uma ligação entre um aderente rígido e outro flexível. Este ensaio é mais utilizado em estruturas *sandwich* em que se pretende saber a resistência à separação das camadas [1].

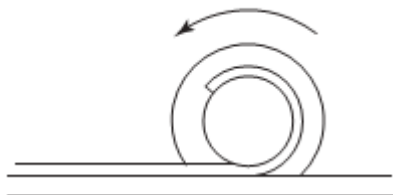


Figura 42 – Esquema de princípio de ensaio *climbing* de acordo com a norma **ASTM D1781** [34]

2.3.2.6 Ensaios de impacto

O comportamento perante solicitações de impacto torna-se particularmente importante em veículos e estruturas. De facto, na etapa de projeto devem ser consideradas as condições de impacto. A resistência que um adesivo oferece nestas condições pode ser determinada recorrendo a ensaios de impacto/pêndulo semelhantes aos realizados nas ligas metálicas.

A norma **ASTM D950** (*ASTM Block Impact Test*) [35] indica os procedimentos para medir a energia absorvida no impacto em ligações adesivas. O teste tem vindo a ser redefinido para o sistema métrico e está normalizado pelas normas **EN ISO 29653** e **EN ISO 9653** [36].

A norma **ISO 9653** [36] define claramente a forma como a carga de impacto é aplicada no provete. O resultado do ensaio é apresentado como a energia absorvida (J/m^2) para produzir a rotura do provete. Na Figura 43 é apresentada a geometria do provete segundo a norma **ASTM D950** [35].

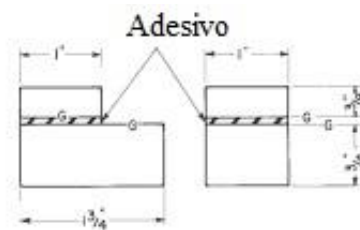


Figura 43 – Geometria e dimensões (polegada) do provete com substratos metálicos de acordo com a norma **ASTM D950** [35]

Na Figura 44 apresenta-se um dispositivo-tipo para fixação dos provetes utilizados no ensaio de impacto.

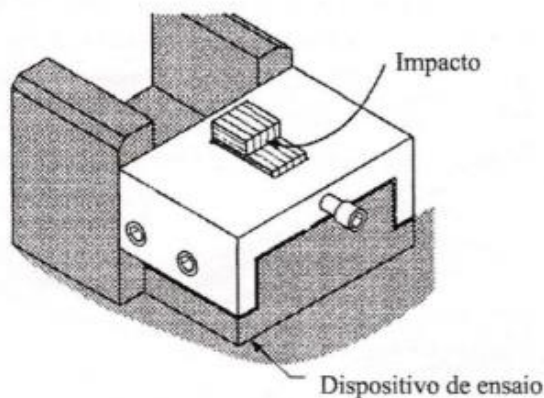


Figura 44 – Exemplo de fixação para ensaios de impacto em juntas adesivas de acordo com a norma **ASTM D950** [35]

2.3.2.7 Ensaios de fadiga

Os ensaios de fadiga fazem parte do grupo dos ensaios dinâmicos, de longa duração, e são feitos considerando a aplicação de tensões cíclicas, sendo os resultados apresentados sob a forma de curvas que relacionam a tensão com o número de ciclos [37].

A norma **ASTM D3166** [38] indica o procedimento que deve ser adotado para a avaliação do comportamento à fadiga em JSS. Os ensaios realizados têm o objetivo de permitir a representação de um diagrama de tensão máxima vs. número de ciclos até à rotura da ligação. Este diagrama é designado por curva S-N ou curva de Wöhler [1].

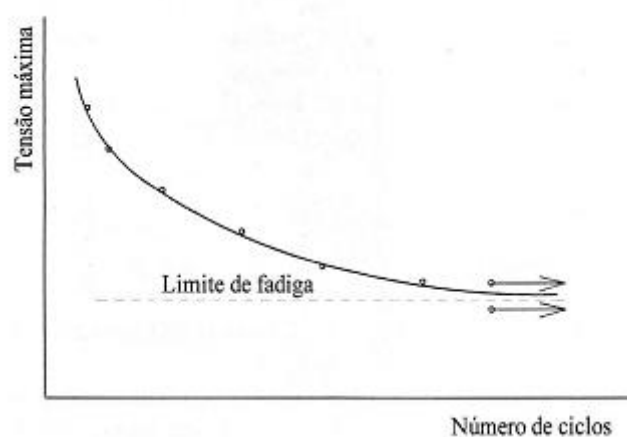


Figura 45 – Curva S-N ou de Wöhler [1]

2.3.2.8 Ensaios de fluência

Quando uma junta adesiva se mantém sob carga durante um período de tempo suficientemente longo, sofre alterações, resultante do efeito de fluência no adesivo [1]. Para melhor conhecer o comportamento mecânico nestas condições recorrem-se a ensaios normalizados, designados por ensaios de fluência. Estes ensaios são realizados carregando axialmente os provetes, normalmente JSS, segundo as dimensões previstas pela norma **ASTM D1002** [28]. Dependendo das características do adesivo, da carga aplicada e das condições de ensaio, o tempo para se registarem deformações pode ser longo.

Na Figura 46 são apresentados os dispositivos mecânicos utilizados no ensaio de fluência. O primeiro caso (Figura 46) evidencia a aplicação de uma força de tração solicitada no provete, enquanto no outro caso (Figura 47) se encontra a aplicação de uma força de compressão exercida no provete.

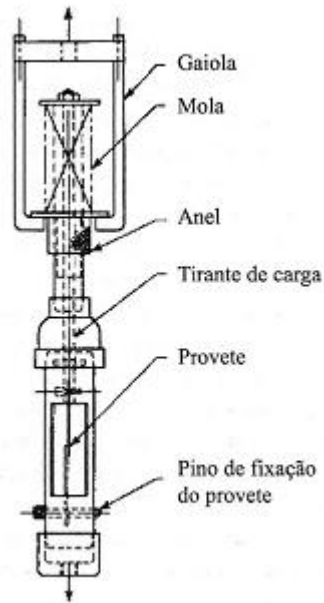


Figura 46 – Dispositivo mecânico para a realização do ensaio de fluência à tração [1] – ASTM D2294 [39]

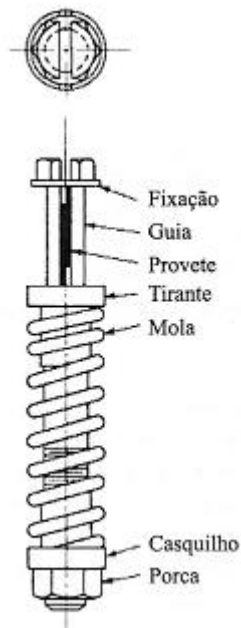


Figura 47 – Dispositivo mecânico para a realização do ensaio de fluência à compressão [1] – ASTM D2293 [40]

2.3.2.9 Ensaios de durabilidade

Os ensaios de durabilidade permitem avaliar o desempenho da junta, avaliar o efeito da preparação da junta e o efeito dos aderentes numa ligação adesiva quando esta se encontra exposta a condições ambientais ou outras devidamente controladas num determinado período de tempo. O ensaio deve

idealmente ser realizado em condições e tipo de carregamento semelhantes aos de serviço por um período de tempo igual ao previsto no projeto. Contudo, em laboratório é impensável realizar ensaios com essa duração. Deste modo existem ensaios que podem ser de curta duração e outros poderão ser de longa duração.

2.3.2.9.1 *Determinação da durabilidade em junta de sobreposição simples*

O ensaio com JSS para determinação da durabilidade consiste num ensaio de tração que se encontra normalizado pela norma **ASTM D1002** [28]. Os provetes sofrem um acondicionamento prévio de pelo menos 40 horas, nas condições descritas na norma **ASTM D2919** [1, 41].

2.3.2.9.2 *Determinação da durabilidade através do ensaio de cunha ou wedge test*

O ensaio de cunha ou *wedge test* encontra-se esquematizado na Figura 48 e está normalizado de acordo com a norma **ASTM D3762** [42]. O teste consiste na criação de uma fenda inicial através da inserção de uma cunha, seguindo-se a propagação da fenda com o tempo. Este ensaio é bastante sensível a variações de preparação da superfície dos aderentes e à durabilidade do adesivo às condições ambientais. O ensaio é simples e económico. O objetivo do ensaio é caracterizar o tipo de fratura, adesiva ou coesiva. De referir que neste ensaio é assumido que os aderentes não se deformam plasticamente [1].

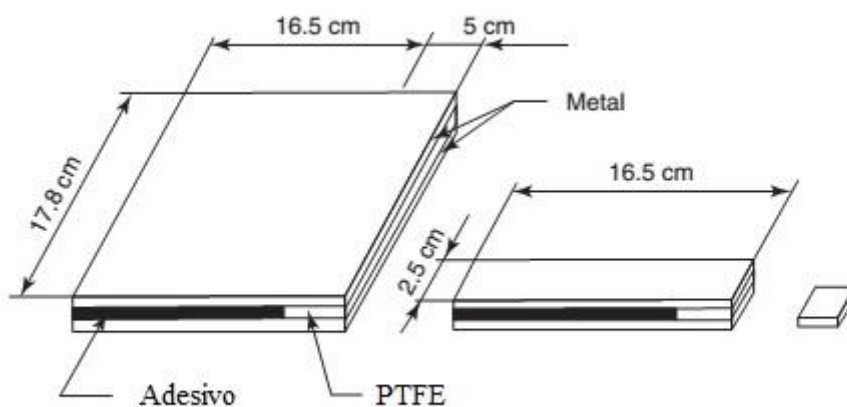


Figura 48 – Geometria e dimensões (cm) do ensaio de cunha ou *wedge test* [20] de acordo com a norma **ASTM D3762** [42]

2.3.2.9.3 *Determinação da durabilidade de juntas de sobreposição simples em tração*

O ensaio é normalizado de acordo com a norma **ASTM D2919** [41] e é provavelmente o ensaio de durabilidade mais utilizado. Na Figura 46 e Figura 49 são apresentados os dispositivos para realizar ensaios de durabilidade em JSS. Em ambos os casos o provete é submetido a um esforço de tração

por ação de uma ou mais molas, devendo a força aplicada ter uma precisão de $\pm 1\%$. Os dispositivos são colocados sob as condições ambientais desejadas, realizando-se observações periódicas aos provetes.

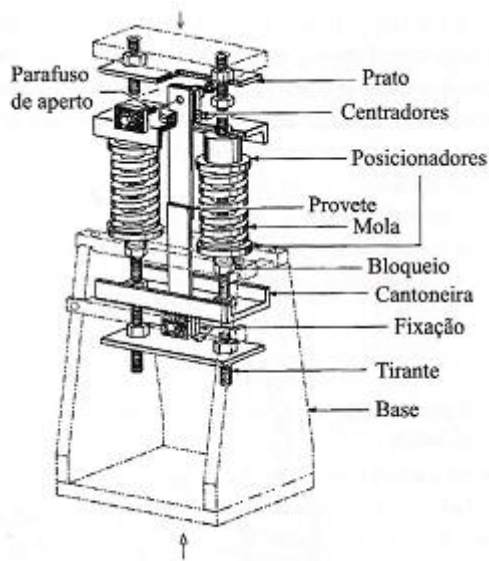


Figura 49 – Dispositivo para a realização do ensaio de durabilidade [1] pela norma **ATSM D2919** [41]

2.3.2.9.4 *Determinação da durabilidade por ensaios de arrancamento (junta em T)*

No ensaio de arrancamento é frequente a utilização de aderentes flexíveis. O ensaio de arrancamento com junta em T implica a utilização dos dois aderentes flexíveis. A norma **ASTM D2918** [43] refere um método para medir a durabilidade de juntas adesivas nestas condições [1]. O dispositivo de ensaio pode ser preparado para três cenários distintos:

- Exposição ambiental exterior;
- Exposição em câmara com atmosfera controlada;
- Imersão do provete em banho com temperatura controlada.

A Figura 50 representa um dispositivo para ensaios de imersão em água.

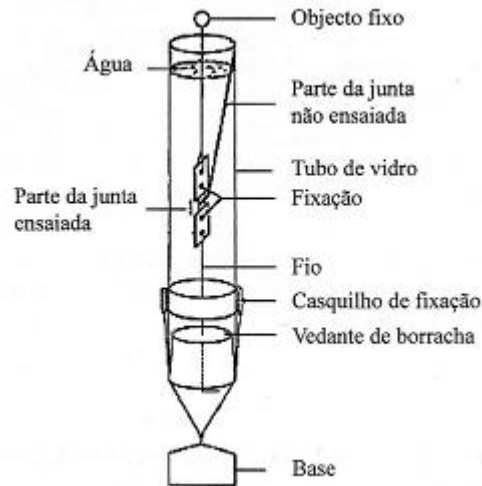


Figura 50 – Dispositivo de ensaio a utilizar em juntas em T sujeitas a arrancamento quando se pretende medir a durabilidade em condições de imersão [1]

2.4 Ensaio de caracterização à fratura

A caracterização à fratura de juntas adesivas é altamente relevante no projeto de estruturas com ligações adesivas. O objetivo principal da mecânica da fratura é fornecer um parâmetro que permita descrever o início e crescimento da fenda, independentemente da geometria de teste [17]. Na mecânica da fratura assume-se que a estrutura não é necessariamente um meio contínuo, podendo conter defeitos causados pelo próprio processo de fabrico ou por qualquer acidente durante o seu funcionamento. O objetivo é saber se os defeitos existentes serão suscetíveis de causar uma rotura catastrófica ou se, durante o período de vida da estrutura, as suas dimensões se mantêm inferiores às críticas [1].

A mecânica da fratura baseia-se em duas abordagens típicas. Uma abordagem típica tem por base o fator intensidade de tensão (K), um parâmetro altamente dependente da geometria, o que traz mais uma vez dificuldade no método experimental para determinação deste parâmetro em diferentes casos e impede a sua aplicação sob a forma de uma ferramenta genérica. A outra abordagem baseia-se em critérios energéticos (G). Nesta perspetiva, o material dissipa uma quantidade de energia até atingir a sua taxa de libertação de energia crítica (G_c), altura em que inicia a propagação de um defeito sob a forma de fenda. Esta abordagem atualmente é a mais vantajosa por G apresentar um importante significado físico diretamente relacionado com o processo de absorção de energia, enquanto K não é fácil de calcular, sobretudo se a fenda estiver localizada numa interface ou na sua vizinhança [44].

Como ilustrado na Figura 51, a fenda pode propagar-se em três modos diferentes. O modo I é o modo de abertura, onde o adesivo se encontra submetido a esforços de tração, enquanto no modo II e modo III o adesivo é submetido a esforços de corte. No modo III o movimento das superfícies da fenda é paralelo à frente da fenda, enquanto no modo II o movimento das superfícies da fenda tem movimento relativo perpendicular à frente da fenda.

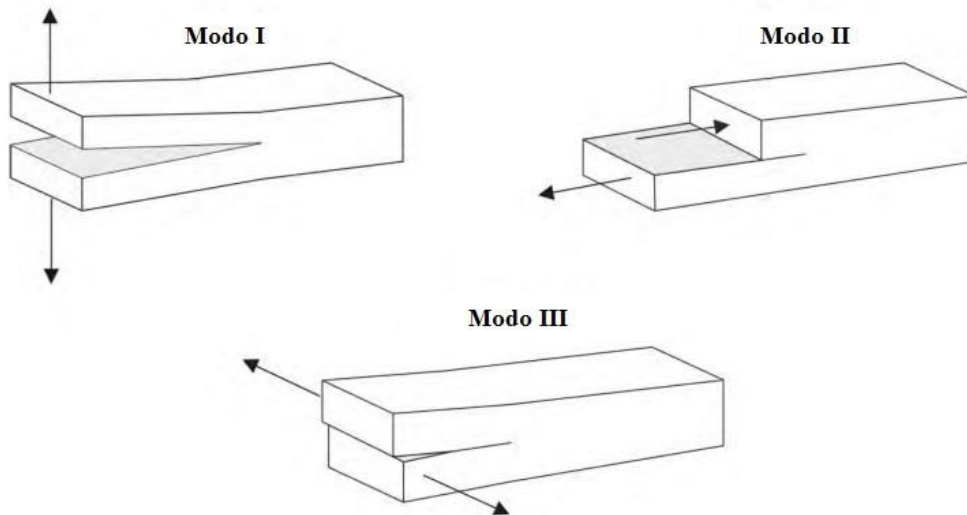


Figura 51 – Modos puros de propagação de fendas [45]

Considerando o critério que tem por base o fator intensidade de tensão, no modo I este é definido por

$$K_I = Y\sigma_r \sqrt{\pi a}, \quad (1)$$

e a propagação da fenda ocorre quando K_I atinge o seu valor crítico K_{Ic}

$$K_I = K_{Ic}, \quad (2)$$

em que K_{Ic} é uma propriedade intrínseca do material e não depende da geometria.

Pela abordagem energética, a propagação da fenda ocorre quando a taxa de libertação de deformação na extremidade do defeito (G) atinge a taxa de energia de deformação crítica (G_c), sendo esta última uma propriedade intrínseca do material [46]

$$G \leq G_c. \quad (3)$$

Os parâmetros K e G são relacionados pela seguinte expressão [45]

$$G = \frac{K^2}{E}, \quad (4)$$

considerando

$$\bar{E} = E, \quad (5)$$

para estado plano de tensão, ou

$$\bar{E} = E / (1 - \nu^2), \quad (6)$$

para estado plano de deformação. Esta equação é válida também para os respetivos valores críticos. Na maioria das situações, a carga aplicada origina uma combinação de tensões de tração e de corte, que ocorrem simultaneamente na fenda, o que requer a aplicação de um critério de modo misto. De facto, em provetes de adesivo maciço, a fenda tende a propagar em modo I, independentemente da sua orientação inicial. No entanto, quando a fenda se propaga no interior de uma junta adesiva, os substratos irão restringir o crescimento da fenda, forçando a sua propagação em modo misto (I+II). Deste modo torna-se necessário utilizar critérios energéticos adequados para a propagação da fenda em modo misto, que se podem apresentar na forma [45]

$$\left(\frac{G_I}{G_{II}} \right)^\alpha + \left(\frac{G_I}{G_{II}} \right)^\beta = 1, \quad (7)$$

em que α e β são expoentes. No critério linear $\alpha = \beta = 1$ enquanto no critério quadrático $\alpha = \beta = 2$ (mais comum). A fim de caracterizar a rotura em modo misto (I+II) deve ser definido o rácio de modos, muito útil para caracterizar a fratura em problemas planares, dado por [45]

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{K_{II}}{K_I} \right) = \tan^{-1} \sqrt{\left(\frac{G_{II}}{G_I} \right)}. \quad (8)$$

2.4.1 Modo I

O ensaio *Double-Cantilever Beam* (DCB) é o mais usual na determinação da resistência à fratura em juntas adesivas em modo I (tração). O ensaio foi inicialmente normalizado pela norma **ASTM D3433** [47]. O método foi desenvolvido para substratos metálicos, nomeadamente bronze, cobre, alumínio, aço e titânio. Mais recentemente, em parte devido à popularidade dos materiais compósitos, o teste foi revisto e publicado pela norma **ISO 25217** [48], para análise deste tipo de materiais.

O ensaio *Tapered Double-Cantilever Beam* (TDCB) pode ser realizado de acordo com a norma **ASTM D3433** [47] ou **ISO 25217** [48], tal como o ensaio anterior DCB. Os ensaios *Compact Tension* (CT) e *Single-Edge Notched Bending* (SENB) utilizam provetes de adesivo com um entalhe/fenda inicial.

2.4.1.1 *Double-Cantilever Beam* (DCB)

A Figura 52 mostra a geometria e dimensões do provete, que compreende a utilização de 2 aderentes ligados em conjunto por uma camada fina de adesivo. Durante a fabricação da junta é criada uma pré-fenda (a_0), isenta de adesivo numa das extremidades da junta, a partir da qual a propagação do dano se inicia durante o ensaio. O ensaio DCB está atualmente normalizado para a medição de G_{IC} em juntas adesivas através das normas **ASTM D3433** [47] e **ISO 25217** [48].

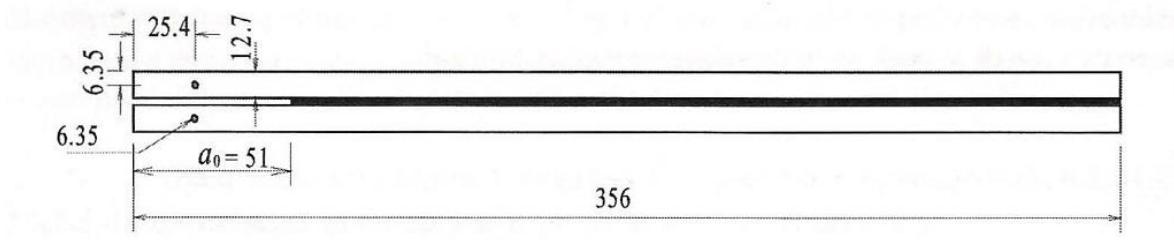


Figura 52 – Geometria e dimensões (mm) do provete DCB [1] pela norma **ASTM D3433** [47]

O pré-tratamento superficial dos aderentes antes da ligação é um aspeto importante na preparação da junta. Deste modo pretende-se evitar a propagação interfacial da fenda (entre o adesivo e o aderente). Para este efeito deve ser considerado um pré-tratamento da superfície nos aderentes antes da colagem [14]. Deve-se ainda providenciar um sistema de fixação auto-alinhante à máquina de ensaios, de modo a garantir um correto alinhamento. Durante o ensaio, regista-se a carga (P) e o deslocamento (δ) para os correspondentes valores de comprimento de fenda a (Figura 53).

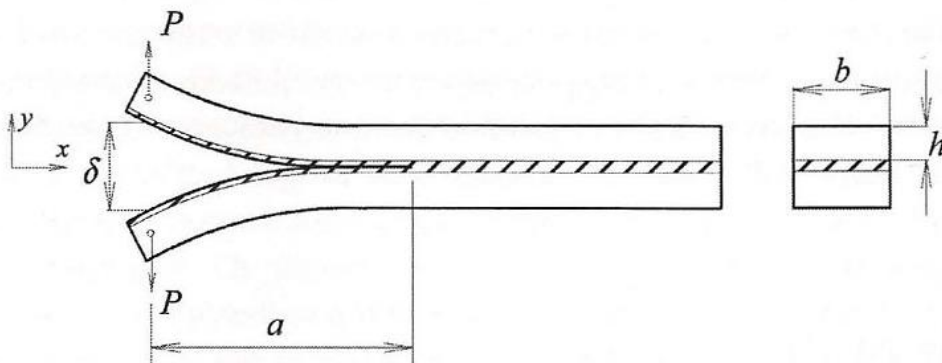


Figura 53 – Representação esquemática do ensaio DCB [1]

O provete DCB tem a vantagem de ser relativamente simples de fabricar. No entanto, apresenta a desvantagem de possibilidade de propagação da fenda instável ao longo do comprimento do provete, especialmente para adesivos frágeis [20].

2.4.1.2 *Tapered Double-Cantilever Beam (TDCB)*

Os provetes utilizados no ensaio TDCB são mais complexos e dispendiosos no fabrico, quando comparados com o ensaio anterior, o ensaio DCB. Este provete torna-se ainda mais pesado do que o provete utilizado no ensaio DCB. A vantagem deste ensaio está relacionada com o facto de este permitir obter G_{Ic} sem a necessidade de medição do comprimento de fenda (a). A relação entre a flexibilidade ($C=\delta/P$) e a é linear devido à geometria do provete utilizada (espessura variável em função do comprimento). Esta particularidade permite a dedução de uma expressão de G_{Ic} que não depende do comprimento de fenda. Como referido anteriormente, o ensaio encontra-se regulamentado e poderá ser realizado em conformidade com a norma **ASTM D3433** [47] (Figura 54) ou segundo a norma **ISO 25217** [48] (Figura 55).

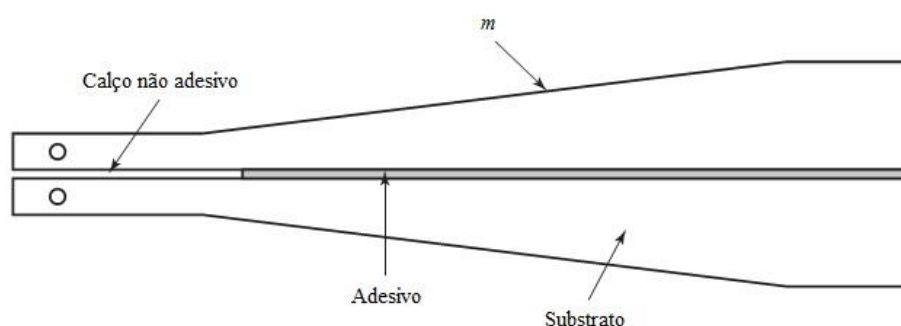


Figura 54 – Provede típico para ensaio TDCB [20] segundo a norma **ASTM D3433** [47]

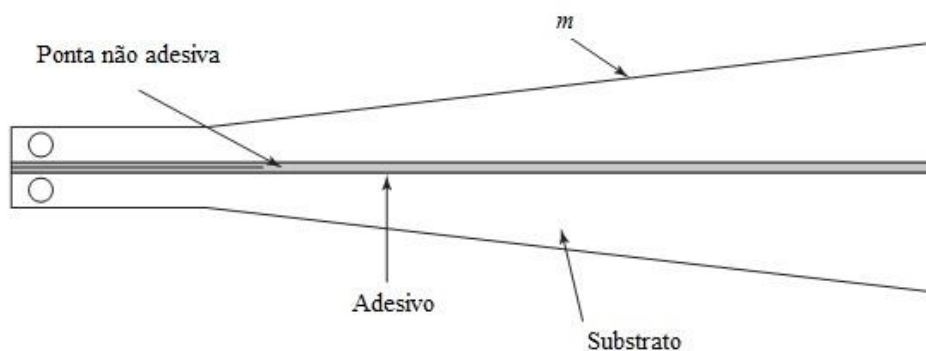


Figura 55 - Provede típico para ensaio TDCB [20] segundo a norma **ISO 25217** [48]

Os procedimentos para a realização do teste TDCB são idênticos aos preconizados para o ensaio DCB. A norma **ISO 25217** [48] não prescreve as dimensões dos substratos a serem adotados, apenas refere o valor para o fator geométrico (m) [20].

2.4.1.3 *Compact Tension (CT)*

O ensaio *Compact Tension (CT)* utiliza provetes em adesivo e utiliza-se para medir a resistência à fratura de polímeros rígidos (tais como adesivos). O ensaio encontra-se normalizado pelas normas **ASTM D5045** [49] e **ISO 13586** [50]. O ensaio CT tipicamente utiliza espessuras que podem variar entre 6 a 100 mm. O provete numa das faces possui uma fenda a (Figura 56). O provete é carregado perpendicularmente ao plano da fenda e a carga aplicada irá permitir a propagação da fenda até à rotura [17].

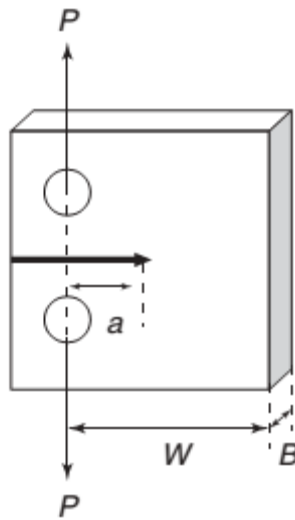


Figura 56 – Representação esquemática do ensaio CT [20]

2.4.1.4 *Single-Edge Notched Bending (SENB)*

O ensaio *Single-Edge Notched Bending (SENB)* usa provetes em adesivo tal como no ensaio CT. O ensaio SENB é mais utilizado relativamente ao ensaio CT devido à maior facilidade na maquinação dos provetes, que muitas vezes podem ser moldados diretamente na sua forma final (Figura 57). Este ensaio também é normalizado pelas normas **ASTM D5045** [49] e **ISO 13586** [50].

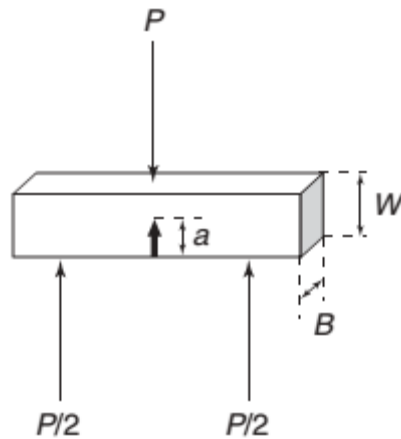


Figura 57 – Representação esquemática do ensaio SENB [20]

2.4.2 Modo II

Os ensaios à fratura em modo II (corte) em juntas adesivas são de maior complexidade relativamente aos ensaios em modo I. Diferentes testes têm sido propostos e utilizados por vários investigadores para obter a caracterização da fratura em modo II de juntas adesivas. Para caracterizar a fratura em modo II usualmente tem-se recorrido ao ensaio ENF (Figura 58), ao ensaio 4-ENF (Figura 59), ao ensaio *End-Loaded Split* (ELS; Figura 60) e ao ensaio *Stabilized End-Notched Flexure* (SENF, Figura 61). O ensaio mais utilizado, sobretudo pela sua simplicidade, é o ensaio ENF. Na Tabela 3 apresentam-se as principais vantagens e desvantagens de cada um dos ensaios em modo II.

Tabela 3 – Comparação dos métodos de ensaio em modo II [51]

Ensaio	Vantagem	Desvantagem
ENF	Simples e o mais utilizado	Propagação da fenda instável
ELS	Propagação da fenda estável	Variabilidade de fixação
4-ENF	Propagação da fenda estável	Exigida experiência e um pouco de desenvolvimento
SENF	Propagação da fenda estável	Complicado, necessário equipamento especial

2.4.2.1 *End-Notched Flexure (ENF)*

O ensaio ENF foi inicialmente utilizado por Chai [6], num estudo detalhado para a caracterização da fratura de juntas adesivas em modo II. O ensaio ENF encontra-se normalizado para compósitos [20] pela norma japonesa **JIS K 7086** [52] e pela norma **AECMA DIN EN 6034** [53], e consiste numa viga simples com a_0 numa das suas extremidades, que se encontra apoiada em 2 apoios e que é carregada a meio do seu comprimento (Figura 58). Durante o ensaio são medidos o deslocamento do punção de carregamento, a força e a . No entanto, existem alguns problemas que estão relacionados com a propagação instável da fenda e consequente monitorização da sua posição ao longo do ensaio [54]. O ensaio ENF é o ensaio mais divulgado para a caracterização de G_{IIc} em juntas adesivas, apesar dos problemas referidos de propagação instável da fenda.

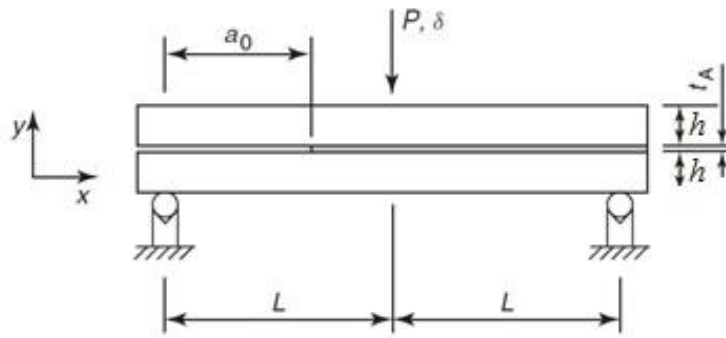


Figura 58 – Representação esquemática do ensaio ENF [20]

em que t_a é a espessura da camada de adesivo e h a espessura dos aderentes.

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

Esta versão modificada da configuração ENF (Figura 59), foi proposta por Martin e Davidson [51]. O ensaio 4-ENF, embora não se encontre normalizado, tem vindo a aumentar a sua utilização e popularidade. O ensaio 4-ENF apresenta como vantagem uma propagação de fenda mais estável, contornando a limitação do ensaio ENF [14]. O provete utilizado neste ensaio é similar ao do ensaio ENF, sendo o *setup* do ensaio 4-ENF composto por uma placa superior que gira livremente e que acompanha os dois cilindros superiores de aplicação da carga no corpo de prova (Figura 59). A propagação da fenda ocorre quando é aplicada a carga (P). Uma maior estabilidade na propagação da fenda (a) depende de P uniforme.

Como principal limitação, o ensaio 4-ENF apresenta um *setup* mais complexo, necessitando mesmo da construção de uma ferramenta especial para a aplicação da solicitação durante o ensaio.

Verifica-se também que este ensaio apresenta forças de atrito superiores entre os aderentes, pelo que este efeito deve ser considerado na análise do ensaio conducente para determinação de G_{IIc} . O efeito do atrito aumenta sempre que a razão entre a distância entre os cilindros superiores e inferiores aumenta, ou seja, $L_i/2L$. O ensaio 4-ENF requer a aplicação de uma carga P maior quando comparado com o ensaio ENF.

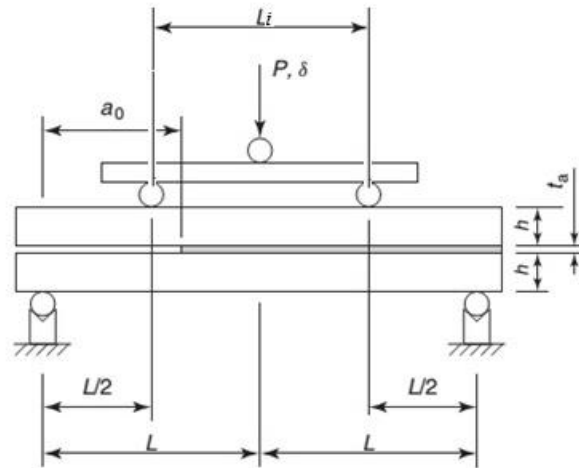


Figura 59 – Representação esquemática do ensaio 4-ENF [20]

2.4.2.3 End-Loaded Split (ELS)

O ensaio ELS, embora esteja associado à propagação estável da fenda, apresenta um *setup* mais complexo, já que envolve a fixação da extremidade ligada do provete, o que constitui uma fonte de variabilidade nos resultados obtidos.

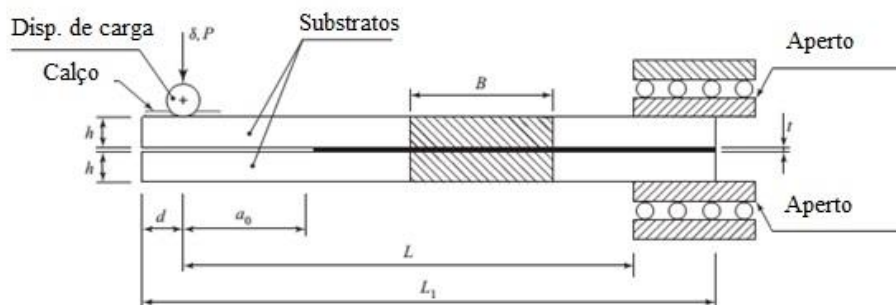


Figura 60 – Representação esquemática do ensaio ELS [20]

2.4.2.4 *Stabilized End-Notched Flexure (SENF)*

O ensaio SENF foi desenvolvido no Japão e visa a estabilização do ensaio ENF pelo controlo do *feedback* da máquina de ensaios [52]. Foram adotadas duas abordagens para o ensaio SENF. A primeira refere-se à monitorização e controlo do deslocamento da fenda (CSD) e é medido como mostrado na Figura 61.

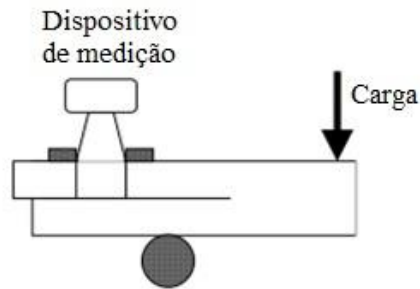


Figura 61– Provete do ensaio SENF [51]

O método alternativo é usar controlo de conversão de coordenadas (CCC). Neste caso a P e o δ são variáveis de entrada que originam um resultado de saída, $C = \delta - a \times P$. Quando C aumenta, a propagação de a está estabilizada. Para ambos os métodos CSD e CCC é necessário que a máquina de ensaios tenha um servo-controlador instalado [51]. Estes dois procedimentos baseados no ensaio SENF foram propostos pela JIS [51].

2.4.3 **Modo misto I + II**

Em aplicações reais, as juntas adesivas estão geralmente submetidas ao efeito combinado de tensões normais e de corte, ou seja, sollicitações no modo misto I + II. Os ensaios utilizados no modo misto utilizam provetes similares aos ensaios em modo puro I e II. Os ensaios mais utilizados para a caracterização à fratura em modo misto são o *Asymmetric Double-Cantilever Beam* (ADCB; Figura 62), *Asymmetric Tapered Double-Cantilever Beam* (ATDCB; Figura 63), *Mixed-Mode Bending* (MMB; Figura 64) e *Mixed-Mode Flexure* (MMF; Figura 65).

2.4.3.1 *Asymmetric Double-Cantilever Beam (ADCB)*

O ensaio ADCB representado na Figura 62 é caracterizado por apresentar um provete com aderentes com diferentes espessuras, o que provoca uma combinação de esforços de tração e corte na frente da fenda.

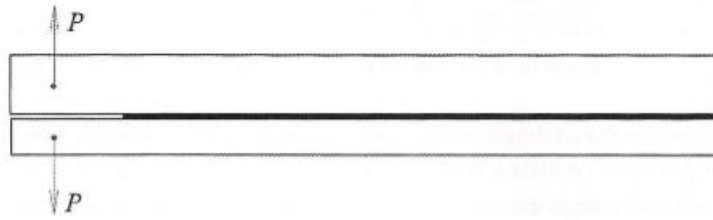


Figura 62 – Representação esquemática do ensaio ADCB [1]

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

O ensaio ATDCB consiste numa configuração híbrida, onde um dos aderentes apresenta uma secção constante, enquanto o outro apresenta uma configuração típica do ensaio TDCB, já descrita anteriormente no ponto 2.4.1.2, conforme mostra a Figura 63.

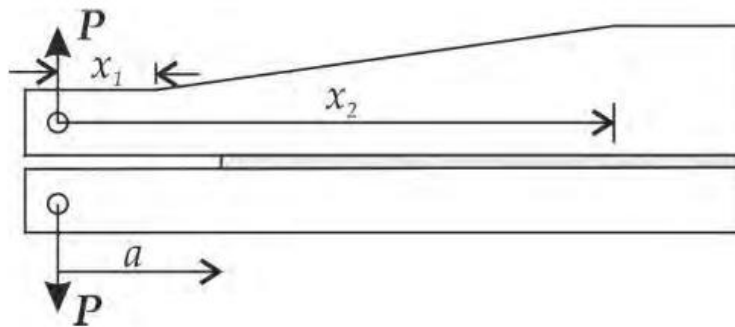


Figura 63 – Representação esquemática do ensaio ATDCB [45]

2.4.3.3 *Mixed-Mode Bending (MMB)*

O ensaio MMB (Figura 64) encontra-se normalizado pela norma **ASTM D6671** [55]. Este ensaio baseia-se na combinação do ensaio DCB para o modo I puro com o ensaio ENF para o modo II puro. Basicamente trata-se de um ensaio ENF ao qual é adicionada uma solicitação em modo de abertura da fenda [1]. 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 no ensaio.

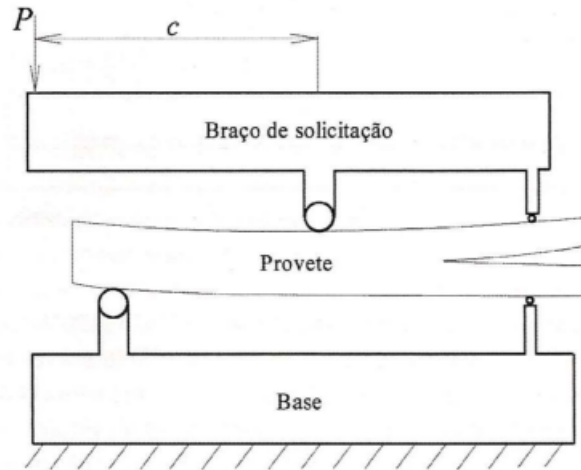


Figura 64 – Representação esquemática do ensaio MMB [1]

Este ensaio permite-nos poder testar diferentes rácios de modo misto sem que para tal seja necessário alterar a geometria dos provetes, bastando variar a distância c [1].

2.4.3.4 *Mixed-Mode Flexure (MMF)*

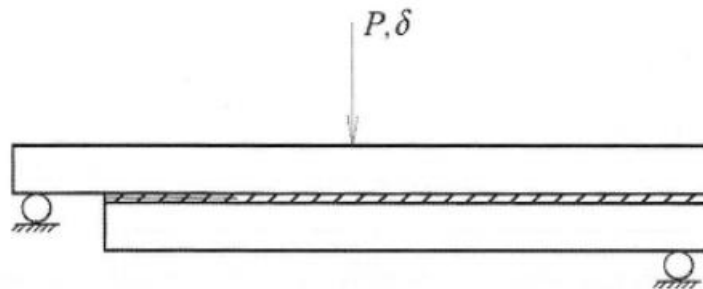


Figura 65 – Representação esquemática do ensaio MMF [1]

O ensaio MMF (Figura 65), também conhecido por *Single-Leg Bending (SLB)* [17], encontra-se normalizado pela norma **ASTM 2004**. O ensaio é similar ao ensaio ENF, apresentando a particularidade de o aderente inferior apresentar um menor comprimento, o que faz com que uma das extremidades do provete apoie apenas no aderente superior. Esta configuração de ensaio provoca a combinação do modo de abertura/tracção (modo I) com o modo de corte (modo II).

2.5 Métodos para determinação de G_{IIC}

Neste capítulo descrevem-se os métodos mais relevantes para a determinação de G_{IIC} para os ensaios ENF e 4-ENF.

2.5.1 Ensaio *End-Notched Flexure* (ENF)

A determinação de G_{IIC} no ensaio ENF pode ser baseada em três tipos de métodos [2]:

- Métodos analíticos baseados na medição de a ;
- Métodos analíticos baseados num comprimento de fenda equivalente (a_{eq});
- Método do integral- J .

2.5.1.1 Métodos analíticos baseados na medição de a

Os métodos *Compliance Calibration Method* (CCM), *Compliance Beam Theory* (CBT) e *Direct Beam Theory* (DBT) dependem da medição da fenda durante a propagação e baseiam-se na teoria das vigas. Assim, assume-se que os dois braços do provete na zona da fenda atuam como duas vigas independentes, cada uma delas suportando metade da carga aplicada.

No método CCM o valor de G_{IIC} é dado pela equação de Irwin-Kies

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

onde B é a largura do provete. A função C (flexibilidade) pode ser expressa em função de a , através

$$C = f(a), \quad (10)$$

podendo ser aproximada a um polinómio de 3º grau do tipo [56]

$$C = C_0 + C_1a + C_2a^2 + C_3a^3, \quad (11)$$

resultando em

$$G_{IIC} = \frac{P^2}{2B} \times (C_1 + 2C_2a + 3C_3a^2). \quad (12)$$

O método DBT, baseado na aplicação direta da teoria das vigas, é descrito pela seguinte equação [2]

$$G_{IIC} = \frac{9P^2\delta a^2}{2B(2L^3 + 3a^3)}, \quad (13)$$

onde L é metade da distância entre apoios de suporte (Figura 58). O método CBT pode ser utilizado em alternativa e de acordo com a expressão abaixo

$$G_{IIc} = \frac{9P^2 (a + |\Delta_{II}|)^2}{4B^2 h^3 E_1}, \quad (14)$$

em que, Δ_{II} é a correção do comprimento de fenda responsável pelos efeitos de rotação e de corte ($\Delta_{II}=0,42\Delta_I$), onde

$$\Delta_I = h \sqrt{\frac{E_1}{11G_{13}} \left[3 - 2 \left(\frac{\Gamma}{1 + \Gamma} \right)^2 \right]}, \quad (15)$$

com,

$$\Gamma = 1,18 \frac{\sqrt{E_1 E_3}}{G_{13}}. \quad (16)$$

Enquanto os métodos CCM e CBT já 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 [57].

2.5.1.2 Métodos analíticos baseado em comprimento de fenda equivalente (a_{eq})

O método *Compliance Based Beam Method* (CBBM) foi anteriormente desenvolvido [54] e é utilizado para avaliar o valor de G_{IIc} . Este método baseia-se no conceito de comprimento de fenda equivalente (a_{eq}), dependendo apenas da flexibilidade durante o ensaio. Assim, este método não requer a monitorização e medição de a durante o ensaio, o que normalmente está associado a algumas dificuldades [57].

O valor de a_{eq} é calculado em função da flexibilidade total do provete, ou seja, a_{eq} pode ser diretamente obtido a partir da curva $P-\delta$ e considerando os efeitos da ZPF. A partir do teorema das vigas pode-se escrever para o provete ENF [54]

$$C = \frac{3a^3 + 2L^3}{8E_1 B h^3} + \frac{3L}{10G_{13} B h}. \quad (17)$$

Como o módulo de flexão desempenha um papel fundamental na 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

$$E_f = \frac{3a_0^3 + 2L^3}{8Bh^3C_{0\text{corr}}}, \quad (18)$$

onde $C_{0\text{corr}}$ é dado por

$$C_{0\text{corr}} = C_0 - \frac{3L}{10G_{13}Bh}. \quad (19)$$

Na determinação de a_{eq} deve-se considerar a correção ao comprimento de fenda real (20) considerando a ZPF, conforme descrito [54]:

$$a_{\text{eq}} = a + \Delta a_{\text{ZPF}} = \left[\frac{C_{\text{corr}}}{C_{0\text{corr}}} a_0^3 + \frac{2}{3} \left(\frac{C_{\text{corr}}}{C_{0\text{corr}}} - 1 \right) L^3 \right]^{\frac{1}{3}}, \quad (20)$$

onde C_{corr} é dado pela expressão (19) substituindo C_0 por C . G_{IIC} pode ser determinado através da equação Irwin-Kies, resultando em [54]

$$G_{\text{IIC}} = \frac{9P^2 a_{\text{eq}}^2}{16B^2 h^3 E_f}. \quad (21)$$

O método depende apenas dos dados de P - δ obtidos durante o ensaio experimental, sendo desnecessária a monitorização de a durante o ensaio. Os adesivos dúcteis são caracterizados por apresentarem uma ZPF extensa, que deve ser considerada, uma vez que a sua presença afeta o comportamento de fratura. O método CBBM evita assim a medição de a . A parte ascendente inicial da curva- R , que relaciona G_{IIC} com a_{eq} , corresponde ao desenvolvimento da ZPF à frente da ponta d. Quando a ZPF está completamente desenvolvida, a fenda começa a propagar, e observa-se um patamar evidente na curva- R . Este patamar define o valor de G_{IIC} [2].

2.5.1.3 Método do integral- J

O conceito de Integral- J foi proposto inicialmente por Rice e Rosengren [58]. A definição analítica foi apresentada por Rice como

$$J = \int_c w dx_2 - T_j \frac{\partial u_j}{\partial x_1} dS, \quad (22)$$

onde C denota a curva em torno da propagação da fenda, a variável S indica o comprimento do arco, w é a densidade de energia, T_j é o vetor de tração, u_j é o vetor deslocamento e x_1 - x_2 é o sistema de coordenadas [44]. O caminho do integral pode ser arbitrário desde que se desloque de uma superfície de fenda para a outra no sentido anti-horário.

A abordagem pelo integral- J foi utilizada por diversos investigadores para prever o estado de tensão de juntas adesivas com fendas, apresentando bons resultados. Kinloch e Shaw [59] e Hunston verificaram que para adesivos dúcteis o valor de G_{IIc} não é independente da geometria da junta. Isto deve-se principalmente aos aderentes restringirem o desenvolvimento de uma zona de cedência na ligação adesiva. Chen et al. [60] mostraram que o vetor integral- J é o comprimento da interface dependente de um sistema de ligação bi-material. Stigh et al. [61], num trabalho realizado baseado no pressuposto da existência de uma lei coesiva, concluíram que, para camadas de adesivo, a lei coesiva é independente das partes ligadas, refletindo as propriedades do adesivo. Nestas condições, o integral- J pode ser calculado ao longo de um caminho arbitrário que contorna a fenda [2]. Para a fratura em modo II pelo ensaio ENF, o valor de G_{II} pelo integral- J é dado por [62]

$$G_{II} = \frac{9}{16} \times \frac{(P_u a)^2}{Eh^3} + \frac{3}{8} \times \frac{P_u \delta_t}{h}, \quad (23)$$

onde P_u representa a carga por unidade de largura, h a espessura dos aderentes, E o módulo de Young dos aderentes e δ_t o deslocamento de corte entre os aderentes superior e inferior na extremidade da fenda. Pela avaliação do integral- J ao longo de um caminho exterior à zona de processo de fratura, pode escrever-se

$$G_{II} = \int_0^{\delta_{tc}} \tau(\delta_t) d\delta_t, \quad (24)$$

onde δ_{tc} é o deslocamento de rotura ao corte na ponta da fenda. Pela derivação da expressão anterior vem que

$$\tau(\delta_t) = \frac{\partial G_{II}}{\partial \delta_t}. \quad (25)$$

A expressão resultante permite assim a obtenção da lei coesiva em corte do adesivo.

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

O ensaio 4-ENF não se encontra normalizado. O ensaio é uma versão modificada do ensaio ENF e foi proposto por Martin e Davidson [51]. Como visto anteriormente, o ensaio 4-ENF consiste na aplicação de uma carga através de rolos em dois pontos ao longo da amostra (Figura 59).

Relativamente aos métodos para a determinação de G_{IIc} pelo ensaio 4-ENF, existem dois tipos de métodos:

- Métodos analíticos baseados na medição de a ;
- Métodos analíticos que não necessitam da medição de a .

De facto, para este ensaio o método do integral- J ainda não está disponível [20].

2.5.2.1 Métodos baseados na medição de a

A determinação de G_{IIC} pelo ensaio 4-ENF pode ser realizada através do método CCM, onde G_{IIC} é dado pela equação de Irwin-Kies, abaixo indicada [56, 63].

$$G_{II} = \frac{P^2}{2B} \times \frac{dC}{da}, \quad (26)$$

onde C é a flexibilidade que, para o ensaio 4-ENF, é dada por $C_{4-ENF} = C_0 + C_1 a$ [56]. Desta função resulta que G_{IIC} pode ser determinado por

$$G_{II} = \frac{P^2}{2B} \times C_1. \quad (27)$$

Esta metodologia não considera eventuais forças de atrito que possam existir. O método CCM é o mais frequente e utilizado para determinação de G_{IIC} a partir de dados experimentais no ensaio 4-ENF em ligações adesivas [64].

2.5.2.2 Métodos que não necessitam da medição de a

Shuecker e Davidson [65] chegaram à conclusão, através do Método de Elementos Finitos (MEF), que as diferenças nos valores de G_{IIC} em delaminação de compósitos obtidos nos ensaios ENF e 4-ENF pode ser atribuída às forças de atrito entre os aderentes na zona da pré-fenda. Verificou-se que o efeito do atrito na determinação de G_{IIC} é maior no ensaio 4-ENF do que no ensaio ENF. Este efeito aumenta sempre que a relação entre o vão superior (L_i) e o vão inferior ($2L$) aumenta. Através da comparação entre os diferentes métodos, constatou-se que os métodos que não necessitam da medição de a no ensaio 4-ENF devem considerar o efeito de atrito.

G_{IIC} pode ser determinado quantificando o efeito do atrito pelos métodos que se apresentam de seguida. O método CBT permite obter G_{IIC} pela seguinte expressão [63]

$$G_{\text{IIC}(4\text{ENF})} = \frac{9P^2 s^2}{16E_1 B^2 h^3} \left(1 - \frac{8\mu h}{3s} + \frac{16\mu^2 h^2}{9s^2} \right), \quad (28)$$

onde s é L de acordo com Figura 59 e μ é o coeficiente de atrito entre as faces. O método CBT é também abordado por Sun e Davidson [66], no entanto estes não abordam as correções do atrito entre os aderentes na zona da pré-fenda. Arrese e Mujika [65] abordam também o método CBT sem correções de atrito, resultando em

$$G_{\text{IIC}(4\text{ENF})} = \frac{9P^2 L_i^2}{64E_1 B^2 h^3}. \quad (29)$$

Morais e Pereira [67] referem o método *Effective Crack Method*, designado por ECM, que pode ser calculado de acordo com a expressão

$$G_{\text{IIC}(4\text{ENF})} = \frac{9P^2 (2L - L_i)^2}{64B^2 E_1 h^3}. \quad (30)$$

No entanto, verifica-se que este método é exatamente igual ao método CBT.

3 Desenvolvimento

O presente capítulo visa reportar o trabalho experimental realizado no âmbito desta dissertação bem como apresentar e discutir os resultados obtidos. O trabalho experimental foi realizado nos laboratórios do ISEP, nomeadamente no Laboratório de Materiais Compósitos (fabrico dos aderentes) e no Laboratório de Ensaios Mecânicos (fabrico dos provetes e realização dos ensaios mecânicos). Para o fabrico da ferramenta necessária ao ensaio 4-ENF foram utilizadas as máquinas-ferramenta existentes nas Oficinas Mecânicas do ISEP. O trabalho experimental relativo aos ensaios ENF foi realizado num trabalho anterior [2], apresentando a presente dissertação uma descrição do trabalho experimental e o tratamento de dados conducentes à obtenção de G_{IIc} .

3.1 Seleção da geometria e material dos aderentes dos ensaios 4-ENF

O estudo numérico que se apresenta, realizado no ABAQUS® versão 6.14-1, tem como objetivo a seleção das dimensões dos provetes e material dos aderentes por forma a prevenir a existência de deformação plástica dos aderentes na fase de medição de G_{II} o que, caso ocorresse, invalidaria os valores medidos. O referido *software* baseia-se no Método de Elementos Finitos (MEF) e a sua escolha recai pela possibilidade de utilização do módulo integrado de Modelos de Dano Coesivo (MDC) para prever o comportamento de juntas em ensaios. Foi utilizado um MDC com leis triangulares em modo puro e misto, cuja formulação detalhada pode ser encontrada na referência [68]. A modelação das juntas foi feita em duas dimensões, com elementos sólidos de estado plano de deformação de 4 nós para a modelação dos aderentes e elementos coesivos também de 4 nós para a modelação do adesivo. Para a análise de rotura por MDC foram consideradas não linearidades geométricas, com diferentes dimensões de malhas. As malhas utilizadas nos modelos são bastante refinadas, com elementos na camada adesiva de dimensões $0,2 \text{ mm} \times 0,2 \text{ mm}$. Na Figura 66 representa-se o aspeto geral do refinamento de malha utilizado nos modelos dos provetes 4-ENF.

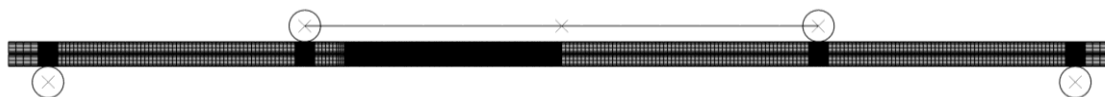


Figura 66 – Refinamento geral da malha do modelo utilizado nos provetes 4-ENF

Na Figura 67 encontra-se representado o detalhe de malha da zona de contacto com o cilindro de apoio do ensaio 4-ENF onde se aplica uma malha com tamanho de 0,05 mm na direção horizontal. Ainda pela Figura 67 observa-se que à esquerda do cilindro é considerada uma malha menos refinada com dimensões de 2,0 mm na direção horizontal pelo facto de não ser uma zona crítica em forma de esforço. À direita do cilindro de apoio e na zona de pré-fenda a malha tem dimensões de 1,0 mm (direção horizontal).

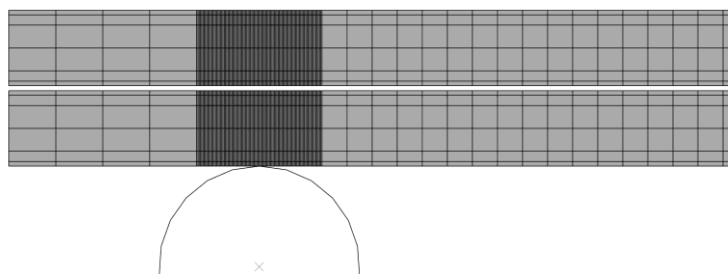


Figura 67 – Detalhe do refinamento da malha na zona do cilindro de apoio do provete 4-ENF

Na Figura 68 apresentam-se os detalhes da região próxima de a_0 , da região colada e da região do cilindro onde é exercida a carga no provete. Verifica-se que na região do cilindro de solicitação a malha apresenta o mesmo refinamento horizontal de 0,05 mm, enquanto a região colada apresenta uma malha com dimensão de 0,2 mm na mesma direção.

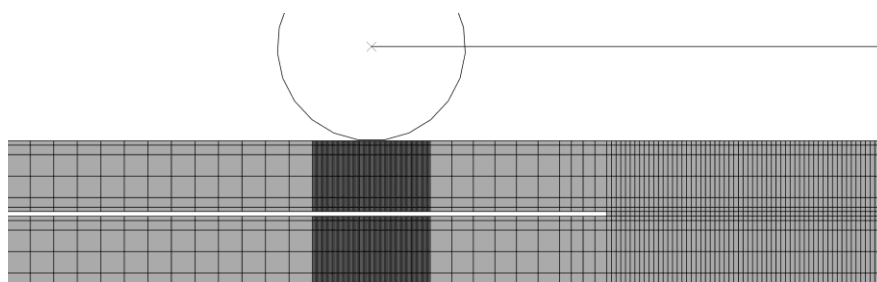


Figura 68 – Detalhe do refinamento da malha na zona do cilindro de aplicação da carga e zona adesiva do provete 4-ENF

No que diz respeito às condições fronteira (Figura 69), por forma a simular as condições reais dos ensaios experimentais, criaram-se as seguintes restrições:

- Cilindros de suporte restringidos nas duas direções do plano (x, y) e na rotação segundo o eixo perpendicular ao plano;
- Fixou-se um nó do provete em x para evitar movimento de corpo rígido;
- União dos 2 cilindros de solicação através de uma barra sem criação de momento fletor;
- Barra de união dos 2 cilindros de solicação com restrição em x , sendo aplicado um deslocamento vertical descendente.

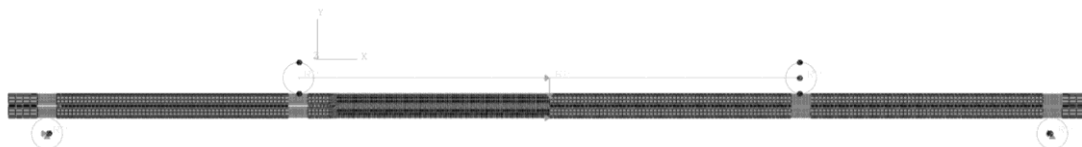


Figura 69 – Condições fronteira impostas nos modelos numéricos dos ensaios 4-ENF

Neste estudo numérico consideram-se diferentes abordagens, combinando o material dos aderentes, o comprimento a_0 , as distâncias entre os cilindros de solicação (L) e a distância entre os cilindros de suporte ($2L$), conforme indicado na Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6. Na Tabela 4 apresenta-se o estudo realizado com os aderentes na liga 6082 T651, na Tabela 5 descreve-se o estudo realizado com um aço de alto limite elástico e na Tabela 6 aborda-se o comportamento das juntas adesivas com os aderentes em material compósito. A variável S representa a tensão de von Mises máxima e a variável SDEG (*stiffness degradation*) indica a degradação de rigidez entre 0% e 100%, em que 0% corresponde ao adesivo ainda não ter iniciado o processo de amaciamento e 100% corresponde à rotura do adesivo. Considerou-se uma tensão de cedência para a liga 6082 T651 de 261,7 MPa [68] e para o material compósito de 2000 MPa [69]. O material compósito adotado apresenta uma matriz polimérica de resina epóxida reforçada com fibra de carbono.

No estudo realizado considerou-se apenas o adesivo SikaForce[®] 7752 por este apresentar uma deformação de rotura ao corte superior aos restantes adesivos, o que o torna o mais crítico em termos de tensões instaladas nos aderentes durante o ensaio. De facto, confirmou-se que, entre os três tipos de adesivos utilizados, o SikaForce[®] 7752 é aquele que mais soliciava os aderentes, pelo motivo anteriormente exposto.

Tabela 4 – Combinações de geometria testadas com aderentes em alumínio no ensaio 4-ENF

Aderente	Adesivo	Rácio		L_i	a_0	S [N/mm ²]	SDEG [%]	Espessura do aderente [mm]
		$L_i/2L$	2L					
Liga 6082								
T651	7752	0,4	200	80	10	267	48,5	3,0
Liga 6082								
T651	7752	0,5	200	100	10	267	49,5	3,0
Liga 6082								
T651	7752	0,6	200	120	10	270	45,0	3,0
Liga 6082								
T651	7752	0,5	200	100	30	267	26,1	3,0
Liga 6082								
T651	7752	0,5	200	100	50	267	26,7	3,0
Liga 6082								
T651	7752	0,5	100	50	5	267	7,6	3,0

De início, ponderou-se utilizar uma liga de alumínio (6082-T651) para o material dos substratos. No entanto, verificou-se que essa escolha daria problemas a nível do comportamento elasto-plástico do material, para qualquer dimensão de junta que fosse adotada. Pela Tabela 4 constata-se que os aderentes iniciam a deformação plástica muito antes do adesivo atingir a rotura.

Tabela 5 – Combinações de geometria testadas com aderentes em aço no ensaio 4-ENF

Aderente	Adesivo	Rácio		L_i	a_0	S [N/mm ²]	SDEG [%]	Espessura do aderente [mm]
		$L_i/2L$	2L					
Aço	7752	0,5	200	100	10	1.668	100,00%	3,0mm
Aço	7752	0,5	200	100	10	1.555	100,00%	2,0mm

Pela Tabela 5 verifica-se que para, uma rotura total do adesivo, seria necessário um aço ou liga metálica de muito alto limite elástico. Assim o valor de von Mises inviabiliza a utilização deste material.

Tabela 6 – Combinações de geometria testadas com aderentes em material compósito reforçado com fibras de carbono no ensaio 4-ENF

Aderente	Adesivo	Rácio $L_i/2L$	$2L$	L_i	a_0	S [N/mm²]	SDEG [%]	Espessura do aderente [mm]
Fibra Carbono	7752	0,5	200	100	10	971,9	97,8	3,0
Fibra Carbono	7752	0,5	260	130	10	839,2	90,4	2,0
Fibra Carbono	7752	0,5	260	130	10	816,9	97,7	4,0
Fibra Carbono	2015	0,5	260	130	10	872,3	100,0	3,0
Fibra Carbono	AV138	0,5	260	130	10	313,6	100,0	3,0
Fibra Carbono	7752	0,5	260	130	10	910,0	97,7	3,0

Perante os resultados obtidos, persistiu a necessidade de escolher um novo material para os aderentes. De acordo com a Tabela 6 optou-se por um compósito de matriz polimérica de resina epóxida reforçada com fibra de carbono com espessura de 3,0 mm, por este permitir uma rotura total do adesivo sem ser atingida a cedência dos aderentes.

3.2 Materiais

Neste capítulo descrevem-se os materiais utilizados no trabalho experimental, nomeadamente o material compósito de matriz polimérica reforçada com fibra de carbono, o adesivo Araldite[®] AV138, o adesivo Araldite[®] 2015 e o adesivo SikaForce[®] 7752.

3.2.1 Aderentes

Os aderentes utilizados neste trabalho experimental foram em material compósito de matriz polimérica de resina epóxida reforçada com fibra de carbono, na forma de pré-impregnado unidirecional (SEAL[®] Texipreg HS 160 RM), por ter melhores propriedades mecânicas do que a liga de alumínio e de aço, e pela disponibilidade imediata de fabrico. Na Tabela 7 apresentam-se as propriedades elásticas ortotrópicas do compósito.

Tabela 7 - Propriedades elásticas ortotrópicas do compósito reforçado com fibras de carbono, com as fibras alinhadas unidireccionalmente na direção x [70]

$E_x=1,09E+05$ MPa	$\nu_{xy}=0,342$	$G_{xy}=4315$ MPa
$E_y=8819$ MPa	$\nu_{xz}=0,342$	$G_{xz}=4315$ MPa
$E_z=8819$ MPa	$\nu_{yz}=0,380$	$G_{yz}=3200$ MPa

3.2.2 Adesivos

Este capítulo descreve os três adesivos utilizados neste trabalho. Dos três 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 película, 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 de G_{IIC} em condições diferentes.

3.2.2.1 Adesivo Araldite® AV138

O Araldite® AV138 (Figura 70), juntamente com o endurecedor HV998, é um adesivo do fabricante *Huntsman Advanced Materials*, considerado estrutural de base epóxida, termoendurecível de dois componentes. É um adesivo que se apresenta 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 70 - Adesivo epóxico Araldite® AV138/HV998

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 [13]. A Figura 71 apresenta curvas típicas de tensão normal-deformação (σ - ε) de provetes maciços deste adesivo ensaiados à tração, obtidas experimentalmente no trabalho [13].

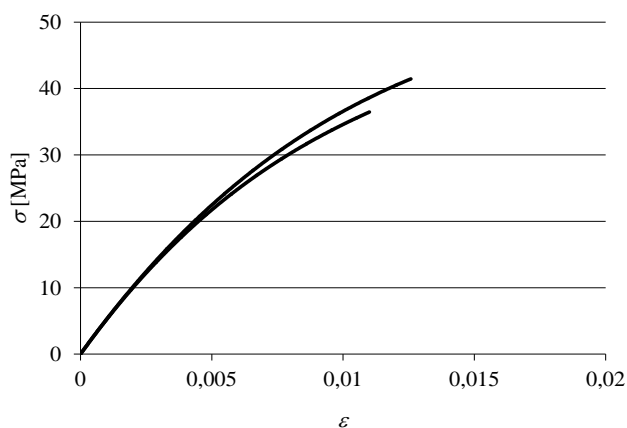


Figura 71 - Curvas σ - ε de provetes maciços do adesivo Araldite® AV138 [13]

A Tabela 8 indica as propriedades mecânicas e de fratura mais relevantes do adesivo, obtidas em trabalhos realizados anteriormente [13, 8].

Tabela 8 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® AV138 [13, 8]

Propriedades	Araldite® AV138
Módulo de Young, E [GPa]	4,89±0,81
Coefficiente de Poisson, ν	0,35 ^a
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	36,49±2,47
Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa]	39,45±3,18
Deformação de rotura à tração, ε_f [%]	1,21±0,10
Módulo de elasticidade transversal, G_{xy} [GPa]	1,56±0,01
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	25,1±0,33
Tensão de rotura ao corte, τ_f [MPa]	30,2±0,40
Deformação de rotura ao corte, γ_f [%]	7,8±0,7
Tenacidade à tração, G_{Ic} [N/mm]	0,20 ^b
Tenacidade ao corte, G_{IIc} [N/mm]	0,38 ^b
^a valor do fabricante	
^b valores estimados na referência [71]	

3.2.2.2 Adesivo Araldite® 2015

O Araldite® 2015 (Figura 72) é um adesivo do fabricante *Huntsman Advanced Materials* considerado estrutural, de base epóxida, termoendurecível de dois componentes, apresentado na forma de pasta tixotrópica de cura à temperatura ambiente, com baixa contração de volume, alta resistência ao corte e clivagem, e ductilidade moderada.



Figura 72 - Adesivo epóxido Araldite® 2015

A resistência e durabilidade das ligações efetuadas por este adesivo estão 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 σ - ϵ dos provetes maciços, ensaiados à tração, são dadas na Figura 73 [13].

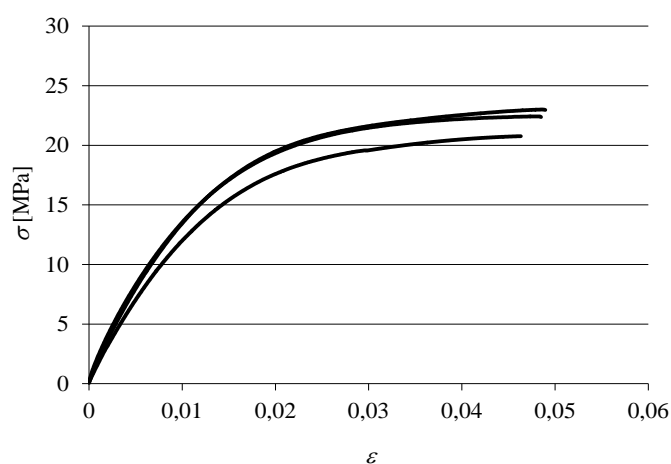


Figura 73 - Curvas σ - ϵ de provetes maciços do adesivo Araldite® 2015 [13]

O adesivo Araldite® 2015, quando comparado com o adesivo Araldite® AV138, oferece uma resistência à tração e corte inferior. No entanto, o facto de ser um adesivo dúctil possibilita a redistribuição de tensões nas regiões de concentrações de tensões, tipicamente nas extremidades da zona de ligação, devido à existência de assimetria da junta e do efeito de deformação diferencial dos aderentes [1]. A Tabela 9 indica as propriedades mecânicas e de fratura mais relevantes deste adesivo, obtidas em trabalhos realizados anteriormente [13].

Tabela 9 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® 2015 [13]

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

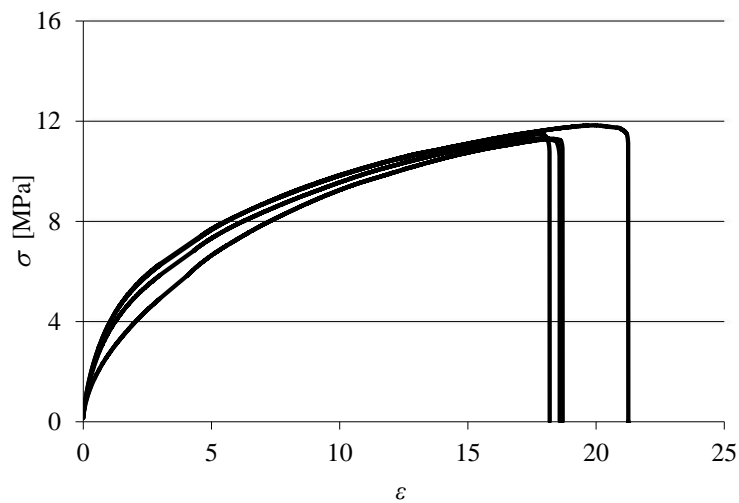
3.2.2.3 Adesivo SikaForce® 7752

O SikaForce® 7752 L60 (VP) (Figura 74) é um adesivo à base de 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 74 - Adesivo SikaForce® 7752

O SikaForce® 7752 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. É um adesivo bastante dúctil, o que pode ser comprovado nos valores de tenacidade obtidos anteriormente [72]. As curvas σ - ε dos provetes maciços ensaiados à tração estão apresentadas na Figura 75 [72].

Figura 75 - Curvas σ - ε de provetes maciços do adesivo SikaForce® 7752 [72]

A Tabela 10 indica os valores mais relevantes das propriedades mecânicas e de fratura do adesivo, obtidas num trabalho realizado anteriormente [72].

Tabela 10 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo SikaForce® 7752 [72]

Propriedades	SikaForce® 7752
Módulo de Young, E [GPa]	0,49±0,09
Coefficiente de Poisson, ν	0,30 ^a
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	3,24±0,48
Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa]	11,48±0,25
Deformação de rotura à tração, ε_f [%]	19,18±1,40
Módulo de elasticidade transversal, G_{xy} [GPa]	0,19±0,01
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	5,16±1,14
Tensão de rotura ao corte, τ_f [MPa]	10,17±0,64
Deformação de rotura ao corte, γ_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
^a valor do fabricante	

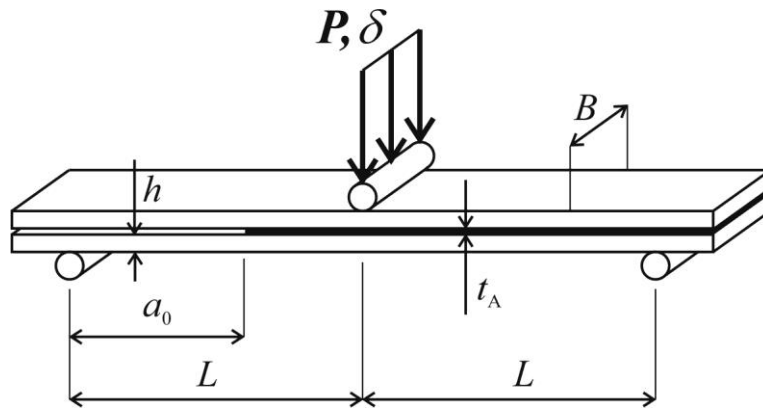
3.3 Procedimento experimental

Neste capítulo descreve-se em simultâneo o procedimento experimental para fabrico, preparação para ensaio e teste dos provetes ENF e 4-ENF devido à semelhança entre estes dois provetes, enfatizando nas diferenças entre eles sempre que necessário. Enquanto para os ensaios ENF se consideraram 8 ensaios para cada adesivo [2], para os ensaios 4-ENF foram fabricados 21 provetes, 7 para cada adesivo testado.

3.3.1 Geometria das juntas

As juntas adesivas utilizadas nos ensaios ENF e 4-ENF são constituídas por dois aderentes unidos entre si por meio de adesivo e com uma pré-fenda numa das extremidades. A Figura 76 mostra as dimensões das juntas ENF (a) e 4-ENF (b), enquanto a Figura 77 representa esquematicamente a geometria das juntas com o posicionamento dos calços usados durante o fabrico para garantir o valor de t_a .

a) - ENF



b) - 4-ENF

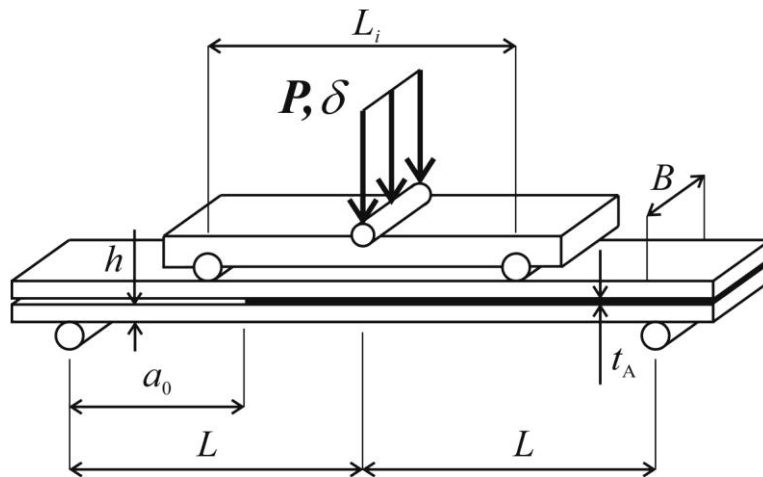
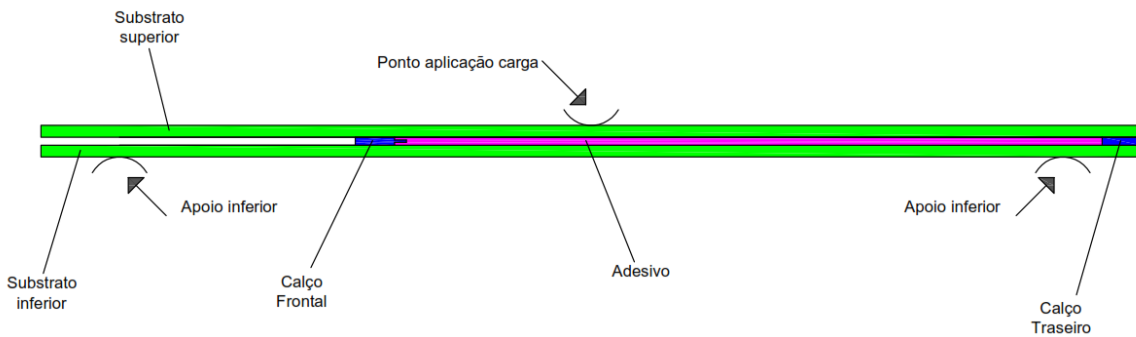


Figura 76 – Dimensões – provete ENF (a) e 4-ENF (b)

a) - ENF



b) - 4-ENF

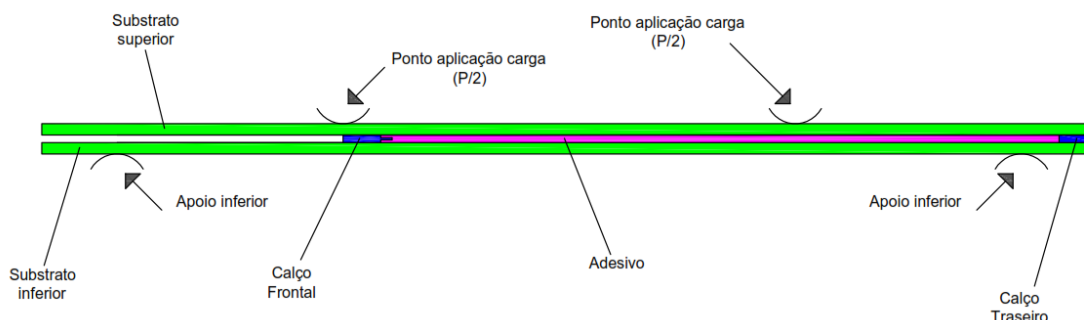


Figura 77 – Representação esquemática da geometria da junta com posicionamento dos calços – provete ENF (a) e 4-ENF (b)

A Tabela 11 e Tabela 12 apresentam os valores medidos de a_0 em cada provete ENF e 4-ENF, respectivamente. Os valores foram medidos através de multímetro digital. Devido à propagação da fenda ter sido realizada manualmente existem algumas oscilações nos valores de a_0 medidos, realçando-se que nos provetes de Araldite® AV138 a variação é mais acentuada por se tratar de um adesivo mais frágil, o que conduziria a incrementos maiores de fenda pelo processo de propagação manual.

Tabela 11 - Valores de pré-fenda (a_0) utilizados nos provetes ENF (adaptado de [2])

Proвете	a_0 [mm] –		
	Araldite® AV138	Araldite® 2015	SikaForce® 7752
1	65,90	48,84	49,92
2	51,65	53,87	60,13
3	50,60	51,60	58,02
4	84,80	48,76	58,84
5	66,10	49,67	53,31
6	64,15	48,93	51,49
7	67,80	52,19	54,53
8	66,15	51,22	55,97

Tabela 12 – Valores de pré-fenda (a_0) utilizados nos provetes 4-ENF

Provete	a_0 [mm] – Araldite®AV138	a_0 [mm] – Araldite®2015	a_0 [mm] – SikaForce®7752
1	61,02	60,95	60,35
2	60,70	60,83	60,41
3	60,57	62,14	60,52
4	59,76	61,39	59,80
5	64,72	62,34	59,79
6	62,57	69,24	60,26
7	63,45	61,34	58,36

3.3.2 Processo de fabrico

O processo de fabrico iniciou-se com a produção de uma placa de material compósito de carbono-epóxico com 3,0 mm de espessura para posterior corte em provetes. Foi utilizado um pré-impregnado unidirecional da SEAL® Texipreg HS160 RM para o fabrico das placas com uma sequência de empilhamento de $[0]_{20}$. O fabrico das placas seguiu os seguintes passos:

1. Retirou-se o rolo de compósito de carbono-epóxico da arca congeladora, deixando-o estabilizar à temperatura ambiente por alguns minutos;
2. Com o auxílio de uma chapa metálica de dimensão 300×300 mm², posicionou-se corretamente a régua para se proceder ao corte (Figura 78 a);
3. Depois de dimensionar as folhas (300×610 mm²), cortaram-se 10 tiras com o auxílio de um x-ato (Figura 78 b);

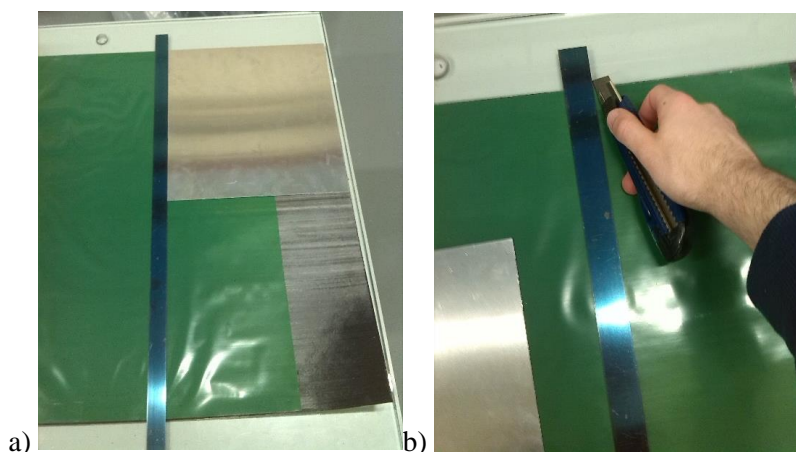


Figura 78 – Posicionamento correto da régua (a) e corte das tiras de carbono-epóxico com auxílio de x-ato (b)

4. Cortaram-se as tiras anteriores (300×610 mm²) a meio de modo a se obter 20 folhas (300×305 mm²);
5. De seguida efetuou-se o empilhamento, considerando todas as camadas a 0°. Inicialmente empilharam-se duas folhas de carbono-epóxico, em cima da mesa de trabalho e, com uma pistola de calor, passou-se 2 vezes em cada folha (Figura 79);
6. Seguiu-se, com cuidado, a sobreposição das folhas com a compressão manual;
7. Para evitar a formação de vazios entre camadas, recorreu-se a um calço rígido para a compressão das folhas em questão;



Figura 79 – Aplicação de calor nas folhas de carbono-epóxico com recurso a pistola de calor

8. Recorreu-se a um x-ato para remover a folha de revestimento, garantindo que esta é destacada de uma só vez (Figura 80);



Figura 80 – Remoção da camada de revestimento com o x-ato

- Repetiu-se os quatro passos anteriores até se empilharem 20 camadas de carbono-epóxico, totalizando uma espessura de 3,30 mm (espessura de carbono-epóxico + espessura das folhas do papel inferior e superior, Figura 81);

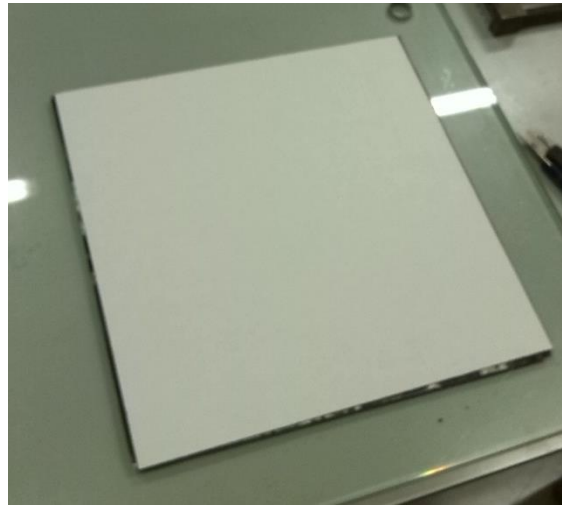


Figura 81 – Aspecto final após o empilhamento das camadas de carbono-epóxico

- Após a conclusão da placa foi necessário preparar o molde. Através de uma espátula removeu-se qualquer vestígio de resina agarrado às placas, moldura ou tiras metálicas apresentadas na Figura 82, utilizadas para permitir obter a forma desejada da placa empilhada durante a cura (dimensões no plano e espessura);
- Depois aplicou-se desmoldante às duas placas, à moldura de 3 mm e às quatro tiras metálicas de 0,3 mm. Repetiu-se este processo 3 vezes de cada lado;
- Por fim, posicionou-se a placa de carbono-epóxico no molde (Figura 82) e colocou-se na prensa de pratos quentes.

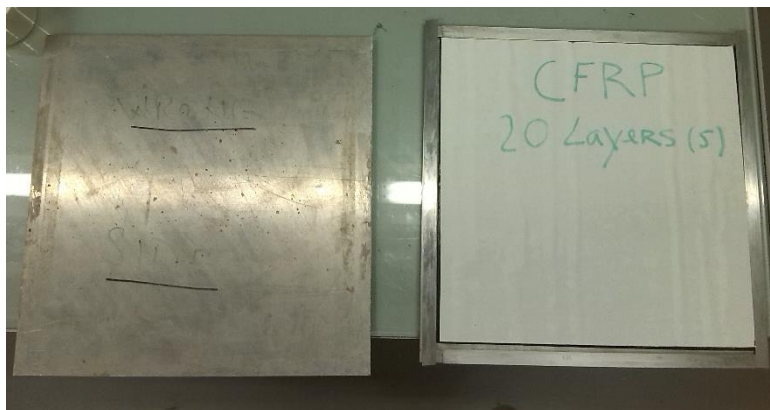


Figura 82 – Posicionamento da placa de carbono-epóxico no molde

Para que a placa fosse sujeita e submetida ao ciclo térmico utilizou-se a prensa de pratos quentes existente no Laboratório de Materiais Compósitos do ISEP, sendo os parâmetros de controlo a

pressão e a temperatura. As placas foram submetidas ao ciclo térmico representado na Figura 83, recomendado pelo fabricante, a uma pressão de 2 bar.

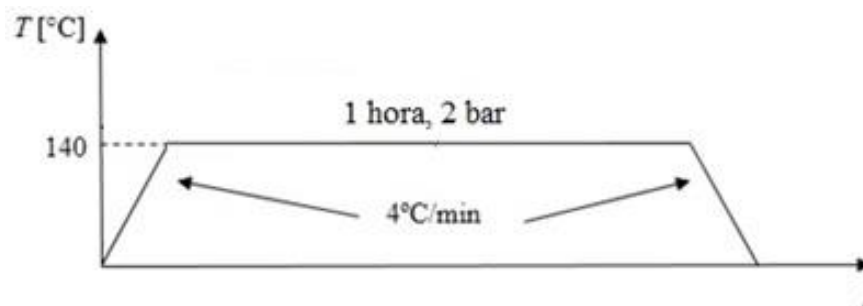


Figura 83 – Ciclo térmico para a cura das placas de carbono-epóxico

Após a conclusão do fabrico da placa de carbono-epóxico procedeu-se à marcação prévia dos provetes na placa de material composto. Foram cortados 42 aderentes recorrendo à máquina de corte existente no Laboratório de Materiais Compósitos do ISEP (Figura 84).



Figura 84 – Máquina de corte BATISTI MECCANICA s.r.l DV25

A preparação da superfície é um passo crítico numa ligação adesiva. Uma preparação da superfície correta é essencial para obter uma superfície limpa e molhável, e garantir uma manutenção da integridade a longo prazo das juntas adesivas [1]. Deste modo, e concluído o corte dos 42 aderentes, procedeu-se à preparação das superfícies dos aderentes (lixagem manual) e respetiva limpeza com acetona (Figura 85 e Figura 86, respetivamente).

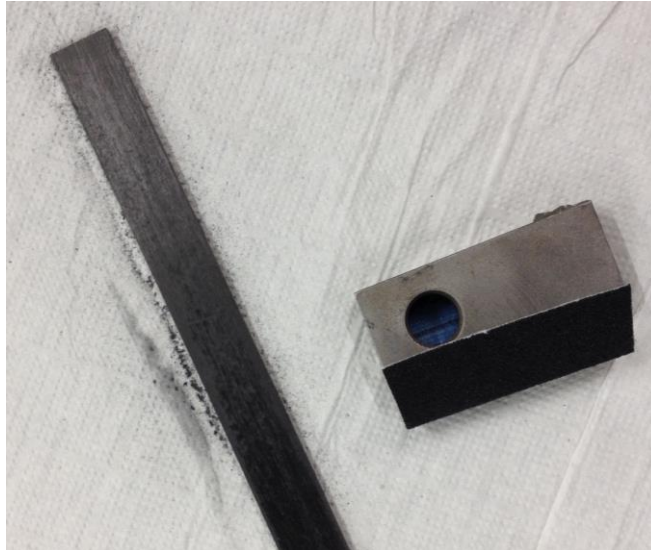


Figura 85 – Preparação dos aderentes recorrendo a técnicas manuais



Figura 86 – Limpeza manual dos aderentes com acetona, após processo de lixagem

A avaliação e a aceitação das operações anteriores, de preparação e limpeza, realizou-se através de inspeção visual. Após a limpeza teve-se o cuidado de evitar os contactos entre as mãos e as superfícies dos aderentes.

Concluída a etapa anterior, procedeu-se ao controlo dimensional dos aderentes, cujo resultado é indicado na Tabela 13. No ensaio ENF [2] não se encontram disponíveis os valores de tolerância dimensional dos aderentes. Este controlo dimensional não foi realizado nos provetes ENF.

Tabela 13 – Controlo dimensional dos aderentes para os ensaios ENF e 4-ENF

Propriedades	ENF	4-ENF
	Valor medido	Valor medido
Comprimento	230,0 mm	280,0 ± 2,0 mm
Largura, <i>B</i>	25,0 mm	15,0 ± 0,41 mm
Espessura, <i>h</i>	3,0 mm	3,0 ± 0,04 mm

Seguiu-se a identificação dos aderentes de cada provete para cada adesivo. Executaram-se marcações e posicionaram-se os calços nos aderentes inferiores dos provetes por forma a garantir uma espessura de adesivo constante e também para obter a pré-fenda através da montagem de uma lâmina como parte integrante do calço frontal (Figura 87).

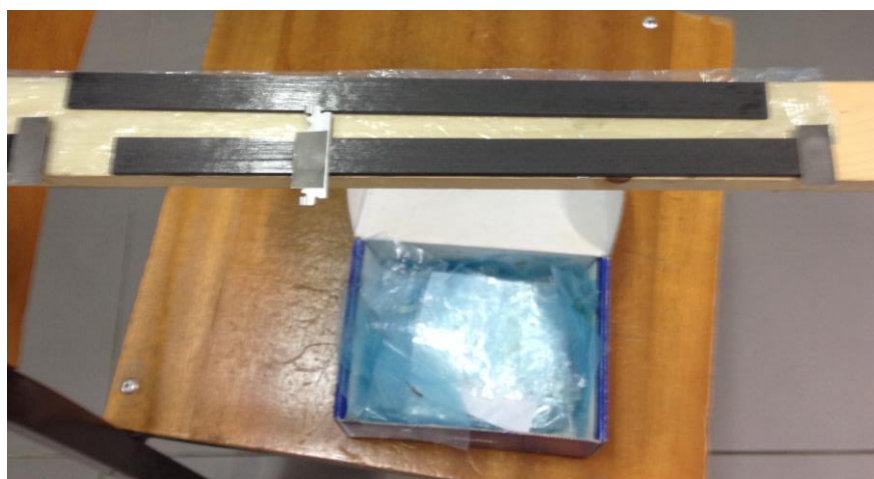


Figura 87 – Posicionamento do calço frontal e traseiro num aderente 4-ENF.

Para o fabrico do calço frontal utilizou-se a seguinte metodologia:

1. Corte de segmentos de fita calibrada com espessura de 0,05 mm (Figura 88);
2. Limpeza com acetona das lâminas de barbear “*Gillette*” (espessura 0,10 mm) e segmentos de fita calibrada;
3. Montagem do conjunto Fita Calibrada + Lâmina de Barbear + Fita calibrada, pelo processo de colagem com Loctite® Super Cola3 (Figura 89);
4. Introdução dos calços num forno elétrico à temperatura aproximada de 100°C durante 15 minutos;

5. Aplicação de desmoldante nos calços. Esta operação repetiu-se 3 vezes de ambos os lados de cada calço (Figura 90).



Figura 88 – Fita calibrada com espessura 0,05 mm, utilizada no fabrico dos calços (4-ENF)



Figura 89 – Montagem do conjunto Fita Calibrada + Lâmina de Barbear + Fita calibrada (calço frontal) (4-ENF)



Figura 90 – Aplicação de desmoldante Loctite® 770-NC nos calços (4-ENF)

Concluída a etapa anterior procedeu-se à preparação dos adesivos, conforme se indica:

- Araldite® AV138 - Dosagem na relação mássica de 10:4 e posterior mistura até o adesivo ficar homogeneizado (Figura 91);
- Araldite® 2015 – Sem preparação, aplicação direta com recurso a pistola manual;
- SikaForce® 7752 – Dosagem na relação mássica de 5:1 e posterior mistura até o adesivo ficar homogeneizado (Figura 92).



Figura 91 – Dosagem realizada na preparação do adesivo Araldite® AV138 (4-ENF)



Figura 92 - Dosagem realizada na preparação do adesivo SikaForce® 7752 (4-ENF)

Na Figura 93 é apresentado o aspeto do adesivo Araldite® 2015 após a sua deposição no aderente inferior de um provete 4 ENF.



Figura 93 – Aplicação do adesivo Araldite® 2015 pelo método “zigue-zague” no aderente inferior de um provete 4-ENF

Na Figura 94 e Figura 95 é apresentado o aspeto dos adesivos Araldite® AV138 e SikaForce® 7752, respetivamente, após a sua aplicação no aderente inferior de provetes 4-ENF, antes de se proceder à sobreposição do aderente superior.



Figura 94 - Aplicação do adesivo Araldite® AV138 com espalhamento manual através de espátula no aderente inferior de um provete 4-ENF



Figura 95 - Aplicação do adesivo SikaForce® 7752 com espalhamento manual através de espátula no aderente inferior de um provete 4-ENF

Posteriormente procedeu-se à colocação do substrato superior garantindo o correto alinhamento com o substrato inferior. O processo de cura decorreu à temperatura ambiente, de cerca de 22°C, e

com os substratos pressionados por aplicação de grampos para garantir a espessura desejada do adesivo (Figura 96).



Figura 96 – Aplicação de grampos num provete durante o processo de cura (4-ENF)

Após o processo de cura estar concluído procedeu-se à remoção do excedente de adesivo nos bordos do provete. Para tal, inicialmente recorreu-se a um simples alicate para partir esse excedente (Figura 97) e foi posteriormente utilizada uma mó para alisar e uniformizar os bordos (Figura 98).



Figura 97 – Remoção do excedente de adesivo nos bordos do provete com recurso a alicate (4-ENF)



Figura 98 – Processo de alisamento dos bordos do provete (4-ENF)

Antes da preparação da face lateral dos provetes, a ponta da fenda foi propagada manualmente com o auxílio de uma chave de fendas, seguido da medição. Com o objetivo de melhorar a visualização da propagação da fenda durante o ensaio, procedeu-se à pintura de uma das faces laterais dos provetes com tinta de corretor. Para a monitorização da propagação da fenda durante o ensaio colocaram-se escalas graduadas de 0 a 100 mm na face pintada. As escalas foram impressas, cortadas e coladas, uma no substrato inferior e outra no substrato superior de cada provete (Figura 99). A escala colada no substrato inferior deve ficar rigorosamente alinhada com a escala do substrato superior e ambas afastadas da linha do adesivo, para que não obstruam a visualização da propagação da fenda.



Figura 99 – Provelte com escalas montadas numa das faces do provete (4-ENF)

Para posicionar a escala, considerou-se que a marcação de 10 mm coincide com a posição da ponta da fenda. Para a medição do valor de a durante o ensaio, considera-se que este é igual ao

comprimento até ao zero da escala, adicionado do valor medido através da observação da fenda na escala por registo fotográfico. Procedeu-se ainda à marcação do centro dos apoios dos provetes distanciados de $2L$, de forma a posicionar corretamente os provetes no dispositivo de ensaio.

3.3.3 Ferramenta para realização do ensaio 4-ENF

Definidas as dimensões das juntas adesivas, procedeu-se a um breve estudo visando a conceção e fabrico de uma ferramenta para possibilitar a realização do ensaio de flexão a 4 pontos (4-ENF), cujo *setup* é ligeiramente diferente do utilizado para os ensaios ENF (flexão a 3 pontos) e que se encontra disponível para utilização. Para tal começou-se por efetuar um levantamento acerca das dimensões do cabeçote de carga da máquina SHIMADZU AG-X 100 existente no Laboratório de Ensaios Mecânicos do ISEP.

A ferramenta (Figura 100) foi assim construída em aço inoxidável austenítico da qualidade AISI 304 e é constituída por:

- Um punção para ligação ao cabeçote da máquina de ensaios,
- Cilindros/ pinos retificados adquiridos à empresa Fabory Portugal e
- 1 barra para o posicionamento dos cilindros de solicitação.

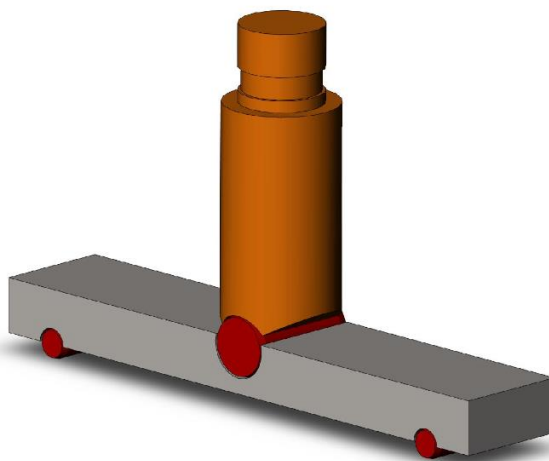


Figura 100 – Dispositivo para aplicação de carga nos ensaios 4-ENF

Após a conceção do suporte em CAD, o punção e a barra foram maquinados nas Oficinas Mecânicas do ISEP. A Figura 101 mostra o conjunto completo já fabricado. De referir que a barra apresenta na sua parte central um furo aberto com ângulo superior 180° de forma a bloquear a posição do pino, embora permitindo a sua rotação.



Figura 101 – Ferramenta após operações de maquinagem

Na Figura 102 apresenta-se a montagem da ferramenta na máquina de ensaios mecânicos. A fixação dos cilindros de solicitação à barra e do cilindro de rotação ao punção foi conseguida por intermédio de elásticos.

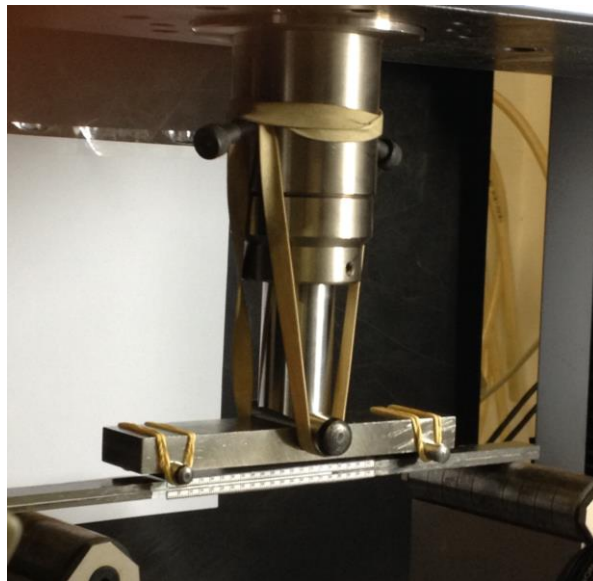


Figura 102 – Ferramenta montada na máquina de ensaio preparada para a realização do ensaio 4-ENF

3.3.4 Ensaio das juntas

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaio Mecânicos do ISEP. Todos os provetes foram sujeitos a um carregamento contínuo com velocidade constante na máquina de ensaios existente, SHIMADZU AG-X 100 (Figura 103), que se encontra ligada a um computador externo

para aquisição de dados de força e deslocamento. A máquina encontra-se equipada com uma célula de carga de 100 kN e todos os ensaios decorreram à temperatura ambiente de 22 °C.

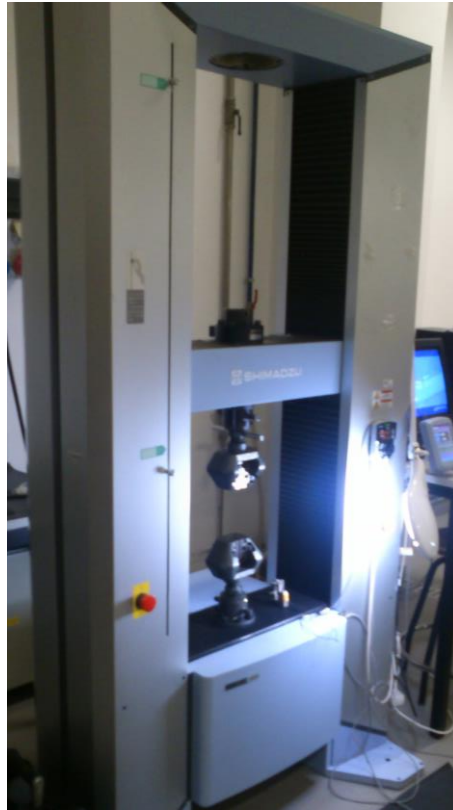


Figura 103 – Máquina de ensaios SHIMADZU AG-X 100

O ensaio ENF é caracterizado pela montagem do provete na horizontal simplesmente apoiado nos seus extremos, sendo aplicada uma carga a meio do vão, conforme Figura 104.

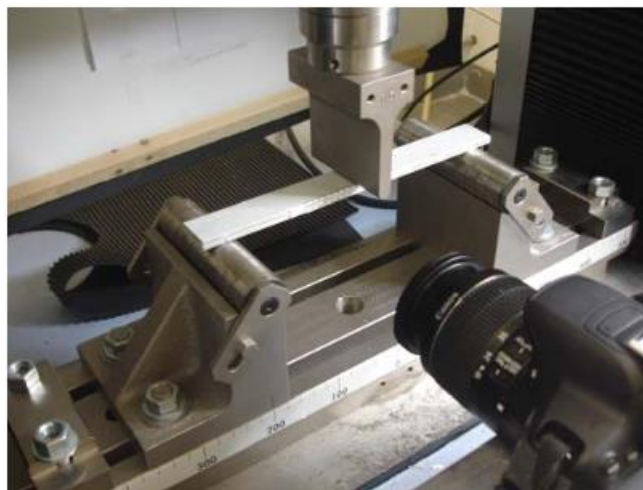


Figura 104 – Disposição do provete ENF na máquina de ensaios [2]

O ensaio 4-ENF consiste na montagem de um provete na disposição horizontal, sob a forma de viga apoiada nos seus extremos, sendo aplicada uma carga através de 2 cilindros de solicitação. A Figura 105 mostra o provete disposto na máquina de ensaios.

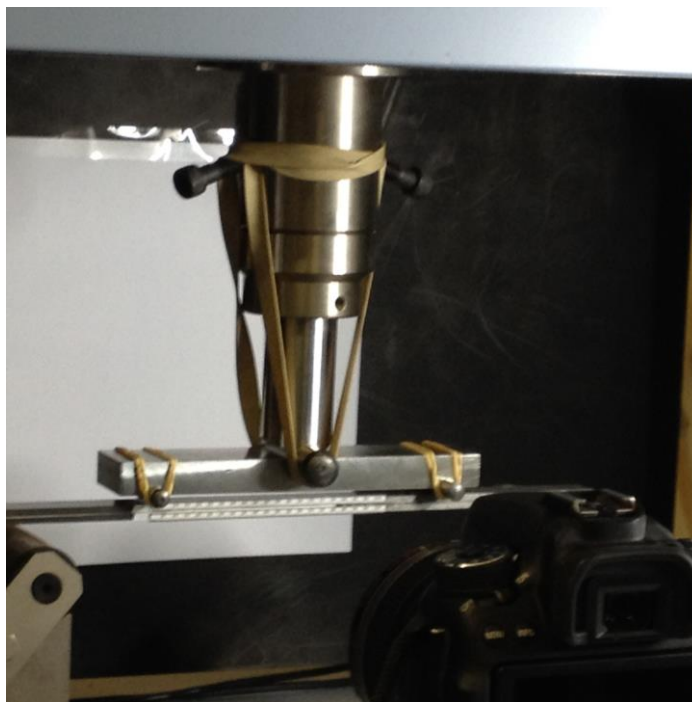


Figura 105 – Disposição do provete para realização do ensaio 4-ENF

Os cilindros de suporte são rolamentos que rodam sem atrito em torno de um eixo fixo, para que o provete possa deformar livremente durante a aplicação da carga. Os cilindros de suporte foram distanciados de $2L$ com uma distância de 200 mm e 260 mm nos ensaios ENF e 4-ENF, respetivamente, com auxílio de uma escala existente no seu suporte. A ferramenta construída e descrita no capítulo 3.3.3 foi fixa ao apoio da máquina através do sistema de fixação existente. Os pinos/cilindros da ferramenta ficaram sustentados através de elásticos. Após a preparação do dispositivo de ensaio, o provete foi colocado sobre os dois rolos de suporte. Para auxiliar esta operação foram efetuadas marcações na face lateral dos provetes, identificando a localização dos pontos de apoio, por forma a centrar essa marca no centro dos cilindros de suporte (distância de $2L$). 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 da fenda ocorre a um valor constante de G_{IIC} , são sugeridas pelo menos 20-30 medições para construir a curva- R [54]. No ensaio ENF foram adotadas as velocidades de teste de 0,75 mm/min para o adesivo Araldite® AV138 e 2,0 mm/min para os adesivos Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, enquanto no ensaio 4-ENF as velocidades foram de 1,5 mm/min para o adesivo Araldite® AV138 e 2,5 mm/min para os adesivos Araldite® 2015 e SikaForce® 7752. Esta diferença nas velocidades de ensaio deve-se ao facto de o ensaio ENF propiciar uma propagação da fenda

mais instável, logo a utilização de velocidades de ensaio reduzidas será benéfica. 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 com intervalos de tempo de 5 s. A câmara de alta resolução ficou posicionada de forma a capturar a face lateral do provete, com um afastamento aproximado de 120 mm, garantindo o paralelismo entre a câmara e o adesivo, e permitindo a visualização da escala desde a_0 , para assegurar a captação de imagens da propagação de fenda na região de medição de G_{II} (Figura 106). Conforme anteriormente referido, os 10 mm da escala (Figura 106) correspondem ao início da propagação da fenda.

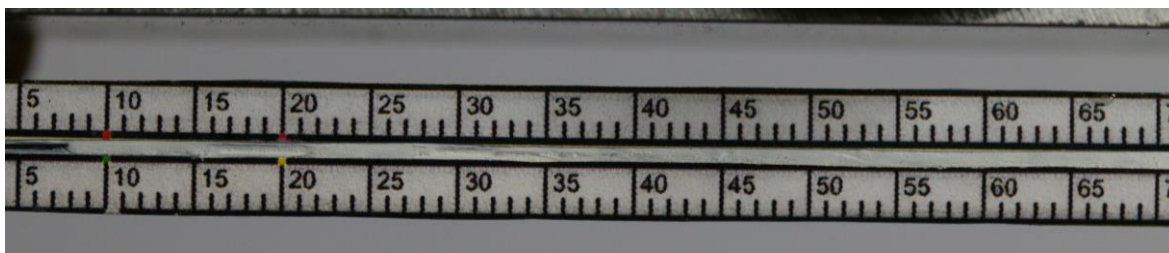


Figura 106 – Imagem obtida no início de um ensaio

Antes do início do ensaio é capturada uma imagem "0" ou de referência. Iniciado o ensaio, as fotos são tiradas com intervalos de 5 s até que a fenda atinja o final da zona útil de propagação.

3.4 Resultados

Neste capítulo apresentam-se os resultados dos ensaios ENF e 4-ENF, nomeadamente as curvas $P-\delta$ e respetivas curvas- R relativas aos 3 tipos de adesivos utilizados, bem como a discussão dos resultados obtidos. Refere-se mais uma vez que os resultados dos ensaios ENF foram obtidos de um trabalho anterior [2].

3.4.1 Ensaio *End-Notched Flexure* (ENF)

Inicialmente descrevem-se os resultados dos ensaios ENF [2]. Para tal são apresentadas as curvas $P-\delta$ e curvas- R referentes a cada tipo de adesivo, estas últimas conducentes à determinação de G_{IIc} .

3.4.1.1 Curvas $P-\delta$

O registo dos valores de carga (P) e de deslocamento (δ) durante a realização dos ensaios foi realizado através do sistema de aquisição de dados existente no equipamento SHIMADZU AG-X 100. Após o devido tratamento dos dados para as três séries de juntas adesivas de 8 provetes obtiveram-se as curvas $P-\delta$ conforme apresentado de seguida.

3.4.1.1.1 Curvas P - δ com o Araldite® AV138

A Tabela 14 apresenta os valores de a_0 , velocidade de ensaio, carga máxima e respectivo deslocamento obtidos dos ensaios ENF com o adesivo Araldite® AV138. O provete 4 não foi considerado nesta análise por apresentar um deslocamento à carga máxima muito diferente dos outros provetes da série.

Tabela 14 – Valores dos ensaios ENF com o adesivo Araldite® AV138 (adaptado de [2])

Provete	a_0 [mm]	Velocidade [mm/min.]	Carga máxima [N]	Deslocamento à carga máxima [mm]
P1	65,90	0,75	458,956	4,30000
P2	51,65	0,75	681,575	4,97148
P3	50,60	0,75	671,005	4,54958
P4 a)	84,80	0,75	451,040	8,98829
P5	66,10	0,75	471,290	4,07458
P6	64,15	0,75	464,535	4,07773
P7	67,80	0,75	439,533	4,05583
P8	66,15	0,75	431,877	4,03708

a)- Ensaio não considerado

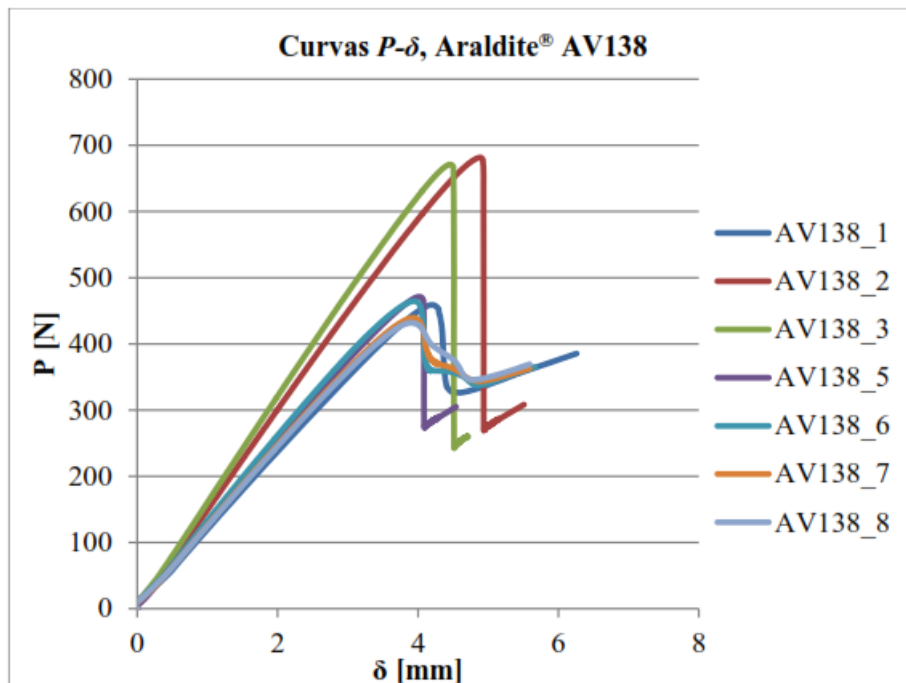


Figura 107 – Curvas P - δ para o adesivo Araldite® AV138, ensaio ENF [2]

Na Figura 107 encontram-se representadas as curvas P - δ obtidas dos ensaios ENF com o adesivo Araldite® AV138. Os provetes 1, 5, 6, 7 e 8 apresentam uma boa reprodutibilidade na rigidez, no valor de carga máxima e apresentam um comportamento semelhante durante a propagação da fenda. Os provetes 2 e 3 apresentam uma rigidez e uma carga máxima superiores em relação aos anteriores, devido aos valores de a_0 bastante inferiores aos restantes ensaios.

3.4.1.1.2 Curvas P - δ com o Araldite® 2015

Os valores utilizados na série de provetes com o Araldite® 2015 encontram-se representados na Tabela 15. Verifica-se que o provete 2 não foi considerado para efeitos estatísticos nem de análise por apresentar um deslocamento bastante superior aos restantes ensaios.

Tabela 15 – Valores dos ensaios ENF com o adesivo Araldite® 2015 (adaptado de [2])

Provete	a_0 [mm]	Velocidade [mm/min.]	Carga máxima [N]	Deslocamento à carga máxima [mm]
P1	48,84	2,00	1193,22	8,49056
P2 a)	53,87	2,00	1162,62	9,30723
P3	51,60	2,00	1097,85	7,94058
P4	48,76	2,00	1192,65	8,52392
P5	49,67	2,00	1170,06	8,27390
P6	48,93	2,00	1272,76	8,89056
P7	52,19	2,00	1082,77	7,82390
P8	51,22	2,00	1076,84	7,96556
a)- Ensaio não considerado				

A Figura 108 apresenta as curvas P - δ registadas durante o ensaio ENF com o adesivo Araldite® 2015. Os provetes apresentam uma boa reprodutibilidade na rigidez, no valor de carga máxima e apresentam um comportamento semelhante durante a propagação da fenda.

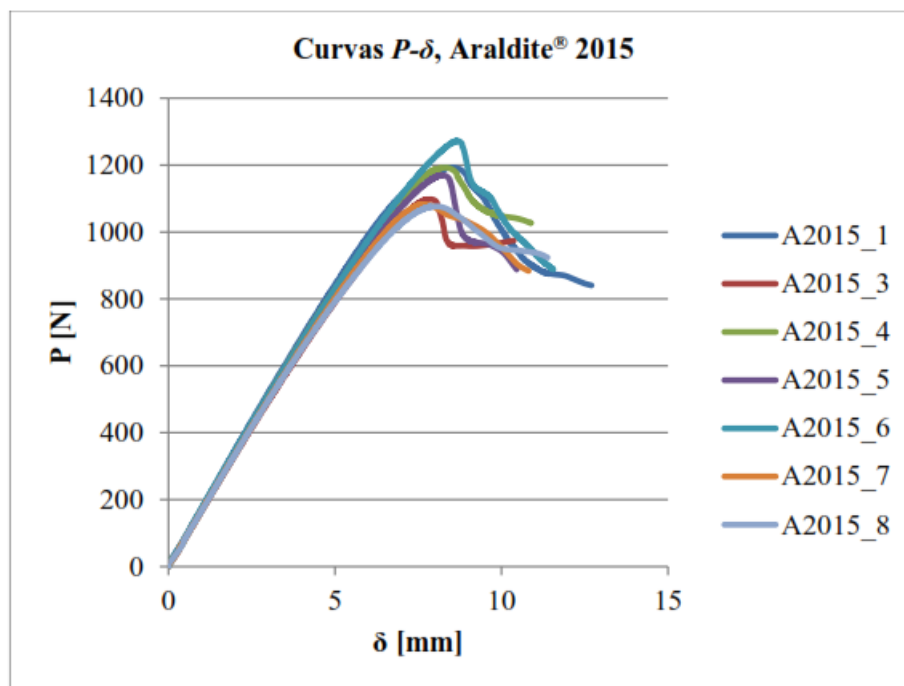


Figura 108 – Curvas P - δ para o adesivo Araldite® 2015, ensaio ENF [2]

3.4.1.1.3 Curvas P - δ com o SikaForce® 7752

Os valores das juntas coladas com o SikaForce® 7752 encontram-se apresentados na Tabela 16. O ensaio do provete 8 não foi considerado por ter registado um comportamento durante a propagação da fenda bastante distinto do observado para os restantes provetes da série.

Tabela 16 - Valores do ensaio ENF com o adesivo SikaForce® 7752 (adaptado de [2])

Provete	a_0 [mm]	Velocidade [mm/min.]	Carga máxima [N]	Deslocamento à carga máxima [mm]
P1	49,92	2,00	1191,70	15,1578
P2	60,13	2,00	1106,93	13,0322
P3	58,02	2,00	1103,61	14,8656
P4	58,84	2,00	1079,21	13,7156
P5	53,31	2,00	1127,82	14,7822
P6	51,49	2,00	1187,12	15,6656
P7	54,53	2,00	1181,81	13,6739
P8 a)	55,97	2,00	1062,62	13,6489
a)- Ensaio não considerado				

A Figura 108 apresenta as curvas P - δ registadas durante os ensaios ENF com o adesivo SikaForce® 7752. Todos os provetes apresentam uma boa reprodutibilidade na rigidez e no valor de carga máxima.

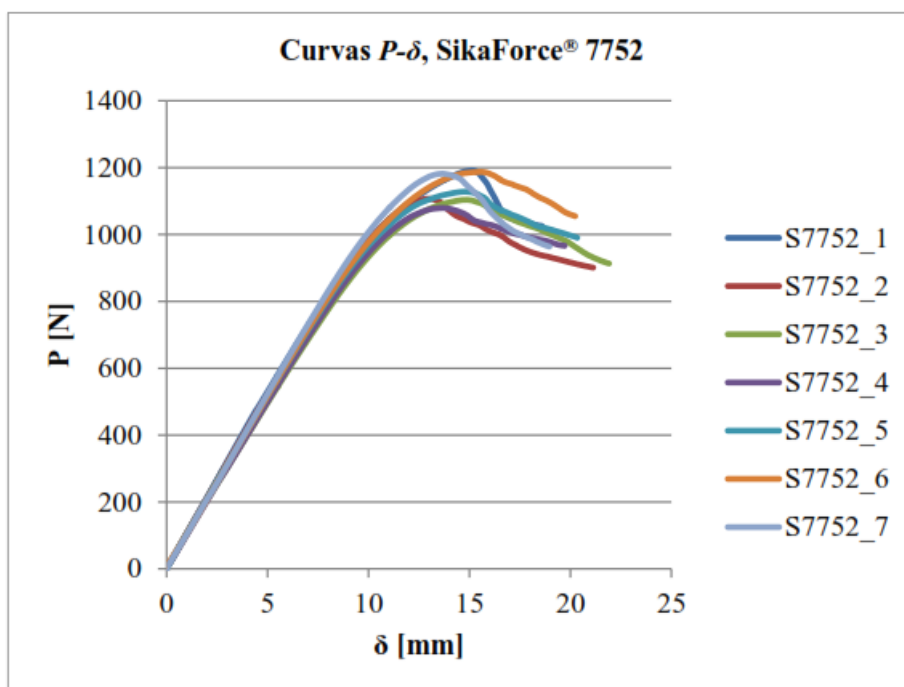


Figura 109 – Curvas P - δ para o adesivo SikaForce® 7752, ensaio ENF [2]

3.4.1.2 Determinação de G_{IIc}

A determinação de G_{IIc} baseou-se nas 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. A determinação do valor de G_{IIc} foi realizada de acordo com os métodos disponíveis para o ensaio ENF anteriormente referidos (CCM, DBT, CBT e CBBM). Para o adesivo SikaForce® 7752 apenas se determinou G_{IIc} pelo método CBBM devido ao facto da visualização da propagação da fenda não ter sido possível, uma vez que a camada de tinta de corretor utilizada para melhorar a visualização da fenda estalou antes da propagação real da fenda, devido à grande ductilidade deste adesivo.

3.4.1.2.1 Juntas adesivas com o Araldite® AV138

Na Figura 110 encontram-se representadas as curvas- R relativas a um provete representativo dos ensaios com o Araldite® AV138 para os diferentes métodos de determinação de G_{IIc} . 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} .

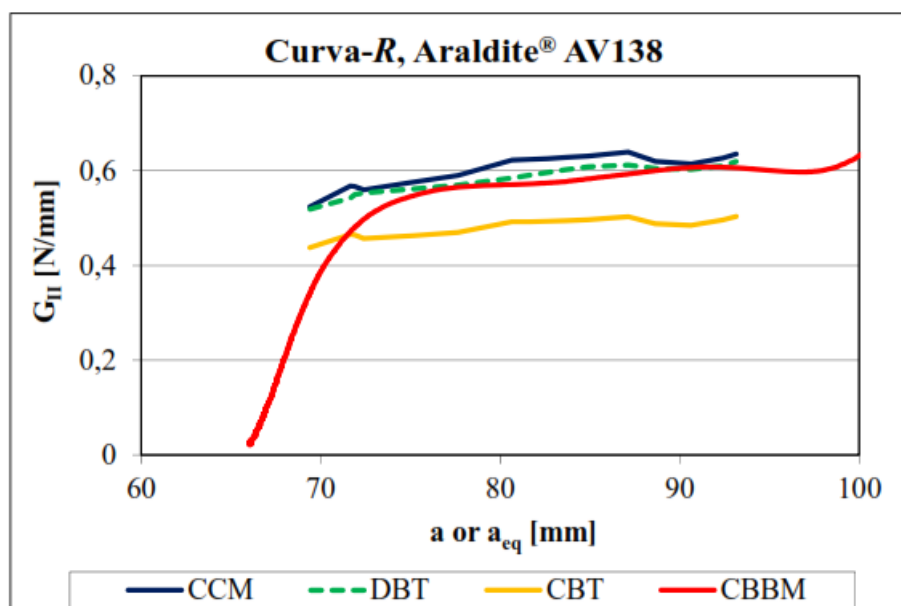


Figura 110 – Curvas-R para um provete representativo com o Araldite® AV138, ensaio ENF [2]

Na Tabela 17 apresentam-se os valores de G_{IIc} relativos a cada método para as juntas com o adesivo Araldite® AV138. A Tabela 17 apresenta ainda a média e o desvio padrão.

Tabela 17 – Valores de G_{IIc} [N/mm] pelos vários métodos para o Araldite® AV138 [2]

Provete	CCM	DBT	CBT	CBBM
P1	0,469	0,566	0,440	0,572
P2	*	0,709	0,566	0,712
P3	*	0,650	0,608	0,724
P4 a)	--	--	--	--
P5	*	0,578	0,519	0,594
P6	0,568	0,579	0,487	0,562
P7	0,605	0,581	0,478	0,576
P8	0,603	0,583	0,481	0,585
Média	0,561	0,606	0,511	0,585
Desvio Padrão	0,064	0,053	0,058	0,069
a)- Ensaio não considerado				
* não foi possível ajustar o polinómio $C=f(a)$				

De acordo com a Tabela 17 constata-se que existe uma boa repetibilidade entre os valores médios para os vários métodos, exceto pelo CBT. Por outro lado, os desvios padrão obtidos ($\approx 10\%$) comprovam a realização de provetes com condições idênticas, contribuindo assim para a veracidade dos resultados obtidos. O método CBT subestima o valor de G_{IIc} [73].

3.4.1.2.2 Juntas adesivas com o Araldite® 2015

Na Figura 111 representam-se as curvas-R de um provete com o Araldite® 2015.

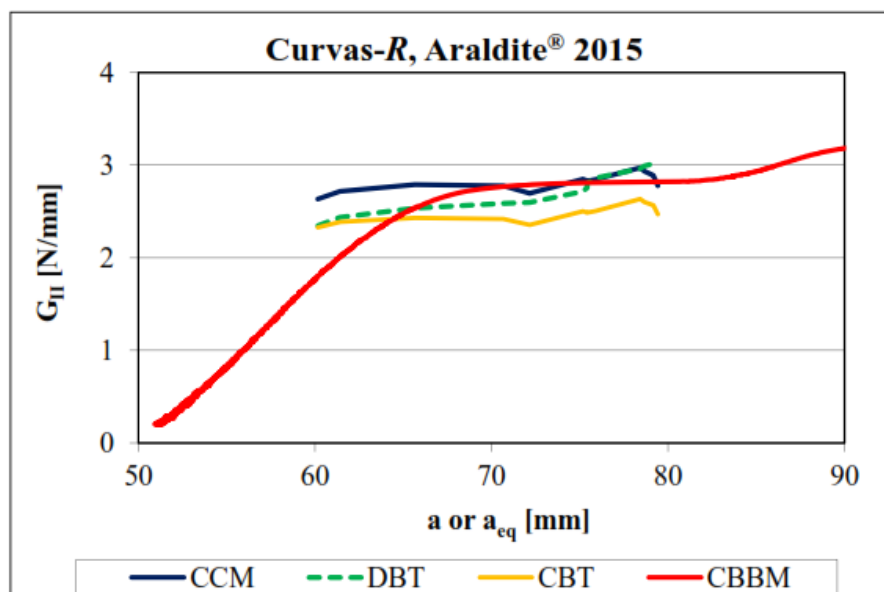


Figura 111 – Curvas-R para um provete representativo com o Araldite® 2015, ensaio ENF [2]

De forma idêntica ao ensaio de juntas com o adesivo Araldite® AV138, neste ensaio observa-se também uma boa repetibilidade no valor de patamar. A extensão do patamar de medição de G_{IIc} é substancialmente inferior à obtida com o adesivo Araldite® AV138, o que se deve à maior ductilidade do adesivo Araldite® 2015. Nas curvas-R apresentadas constata-se o crescimento de fenda de G_{II} aproximadamente constante para todos os métodos. Observa-se uma boa repetibilidade de patamar exceto para o CBT.

Tabela 18 - Valores de G_{IIc} [N/mm] pelos vários métodos para o Araldite® 2015 [2]

Provete	CCM	DBT	CBT	CBBM
P 1	3,029	3,083	2,644	3,420
P2 a)	--	--	--	--
P3	3,675	2,401	2,177	2,545
P4	3,214	2,916	2,544	2,943
P5	2,812	2,741	2,476	2,801
P6	3,357	3,088	2,644	3,136
P7	2,696	2,831	2,624	2,901
P8	3,008	2,952	2,512	3,025
Média	3,113	2,859	2,517	2,697
Desvio Padrão	0,334	0,238	0,164	0,273
a)- Ensaio não considerado				

Na Tabela 18 representam-se os valores de G_{IIc} relativos a cada método para as juntas adesivas com Araldite® 2015. Apresenta-se ainda a média e o desvio padrão para cada método dos ensaios realizados, verificando-se uma concordância razoável para cada método entre as amostras. Tal como já referido, o método CBT subestima o valor de G_{IIc} . O método CCM apresenta algumas oscilações, o que está relacionado com o ajuste do polinómio de $C=f(a)$ [73].

3.4.1.2.3 Juntas adesivas com o SikaForce® 7752

Na Figura 112 representa-se a curva- R de um provete representativo com o SikaForce® 7752 pelo método CBBM. Conforme referido em 3.4.1.2, por este adesivo apresentar um comportamento extremamente dúctil, a visualização da fenda não foi perceptível. Assim sendo, apresenta-se só a curva relativa ao método CBBM, que não requer a medição de a .

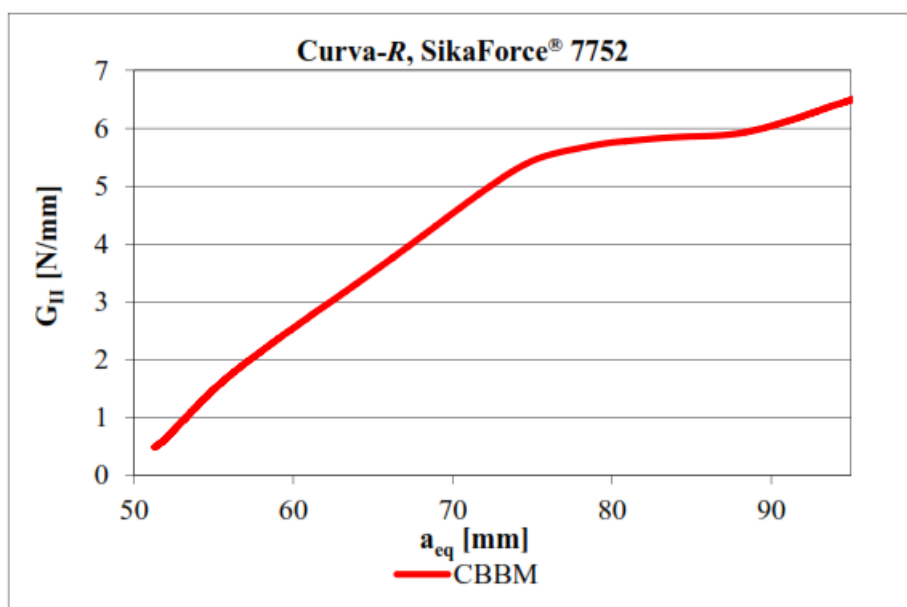


Figura 112 – Curva- R para um provete representativo com o SikaForce® 7752, ensaio ENF [2]

Na Tabela 19 apresentam-se os valores de G_{IIc} relativos ao método CBBM para as juntas com adesivo SikaForce® 7752, com indicação da respetiva média e desvio padrão. Pela Tabela 19 verifica-se uma concordância razoável entre as amostras, exceto para o provete 4 que apresenta um valor de $G_{IIc} = 4,813$ N/mm.

Tabela 19 – Valores de G_{IIC} [N/mm] pelo método CBBM para o SikaForce® 7752 [2]

Provete	CBBM
P1	5,825
P2	5,877
P3	5,474
P4	4,813
P5	5,676
P6	5,648
P7	5,619
P8 a)	--
Média	5,562
Desvio Padrão	0,356

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

Neste capítulo apresentam-se os resultados dos ensaios 4-ENF no âmbito da presente dissertação. Tal como no ensaio ENF, o adesivo é maioritariamente solicitado a esforços de corte durante este ensaio.

3.4.2.1 Curvas $P-\delta$

O registo dos valores P e δ durante a realização dos ensaios foi realizado através do sistema de aquisição de dados existente no equipamento SHIMADZU AG-X 100. Tal como nos ensaios anteriores, realizou-se o tratamento dos dados para as três séries de juntas adesivas de 7 provetes, de onde se obtiveram inicialmente as curvas $P-\delta$.

3.4.2.1.1 Curvas $P-\delta$ com o Araldite® AV138

A Tabela 20 indica os valores de a_0 , velocidade de ensaio, carga máxima e respetivo deslocamento utilizados no ensaio dos provetes com o adesivo Araldite® AV138.

Tabela 20 – Valores dos ensaios 4-ENF com o adesivo Araldite® AV138

Provete	a_0 [mm]	Velocidade [mm/min.]	Carga máxima [N]	Deslocamento à carga máxima [mm]
P1	61,02	1,5	789,32	6,74
P2	60,70	1,5	813,36	8,90
P3	60,57	1,5	815,42	7,19
P4	59,76	1,5	807,39	6,81
P5	64,72	1,5	757,96	7,63
P6	62,57	1,5	770,63	8,22
P7	63,45	1,5	801,28	7,06

Na Figura 113 apresentam-se as curvas P - δ obtidas para os 7 provetes ensaiados com o adesivo Araldite® AV138. Para esta série de provetes verifica-se uma boa repetibilidade e concordância entre todas as curvas P - δ dos vários provetes a nível de rigidez no domínio elástico, carga máxima e respetivo deslocamento, o que evidencia que os provetes foram testados em condições idênticas. As curvas P - δ obtidas nos ensaios 4-ENF apresentam um comportamento diferente das obtidas nos ensaios ENF, na medida em que a propagação da fenda ocorre a um valor de P idealmente constante. Este comportamento foi observado nas curvas P - δ , em que o valor de patamar também se apresenta com boa repetibilidade entre provetes. Observando as curvas P - δ obtidas no ensaio 4-ENF, verificamos que estas apresentam valores de carga e deslocamento máximos superiores às do ensaio ENF. Comparando os resultados médios dos ensaios de juntas com este adesivo, o valor de carga é superior em 56% e o de deslocamento em 53,8%.

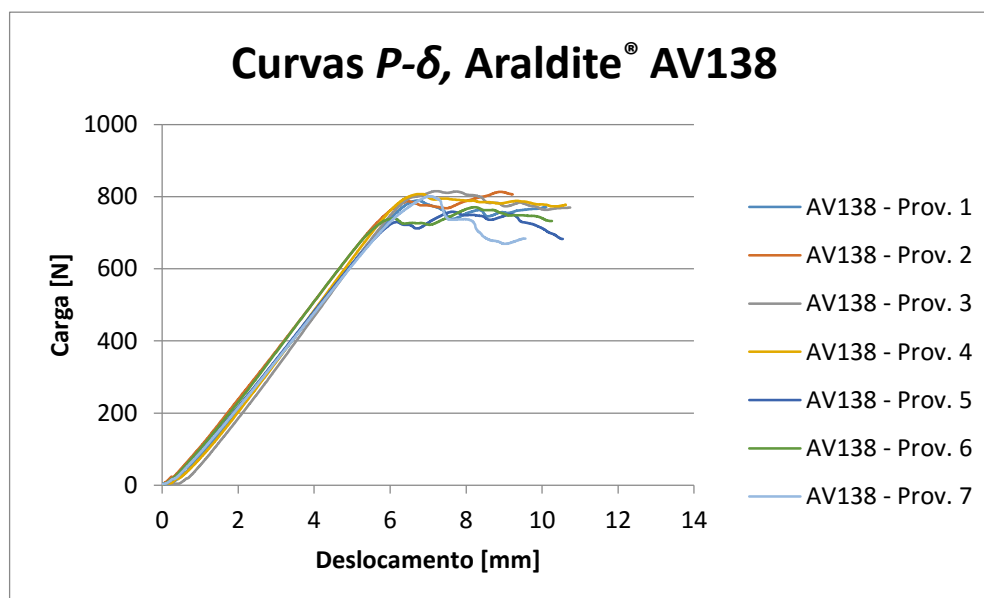


Figura 113 – Curvas P - δ para o adesivo Araldite® AV138, ensaio 4-ENF

3.4.2.1.2 Curvas P - δ com o Araldite® 2015

Pela Tabela 21 observam-se os valores de a_0 , velocidade de ensaio, carga máxima e deslocamento utilizados nos ensaios dos provetes com o adesivo Araldite® 2015.

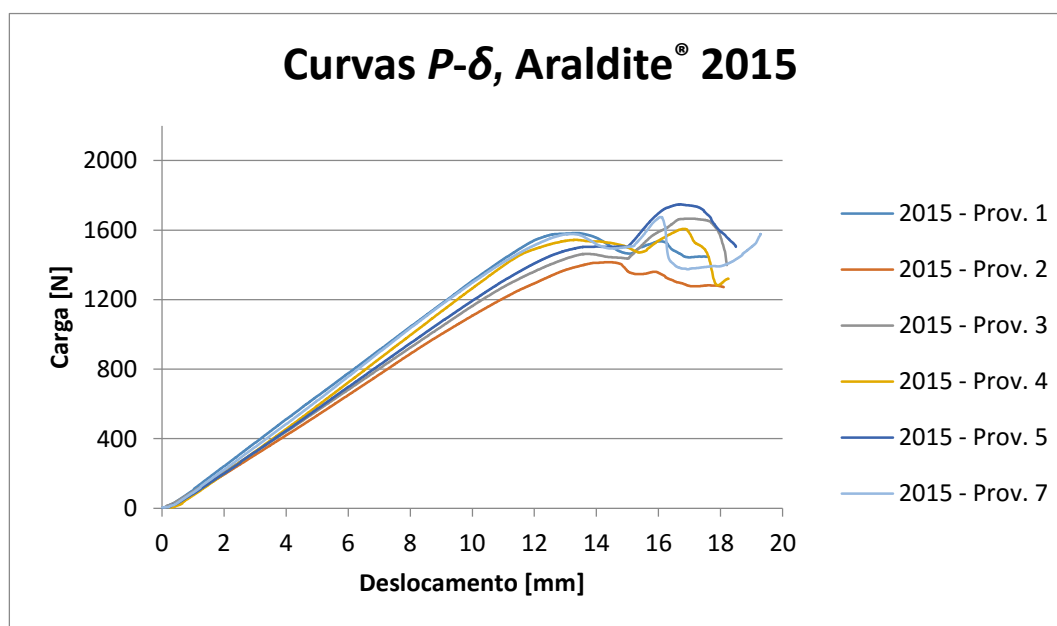
Na Figura 114 apresentam-se as curvas obtidas para os provetes ensaiados com o adesivo Araldite® 2015. Para estas juntas também se verifica uma repetibilidade e concordância bastante aceitável entre todas as curvas P - δ a nível de rigidez no domínio elástico, carga máxima e deslocamento, à exceção do provete P6. O provete P6 apresenta uma carga máxima de 2081,06 N, valor bastante superior aos valores registados nos outros provetes. No provete 6 verificou-se também um comportamento bastante distinto dos restantes provetes durante a propagação da fenda. Tendo em

conta estes desvios, optou-se por não considerar o ensaio do provete P6. Efetuando uma análise comparativa entre os resultados médios obtidos nos ensaios ENF e 4-ENF, com adesivo Araldite® 2015, verifica-se que o valor de carga máxima (1615,7 N) é superior em cerca de 40% e o seu deslocamento de carga máxima (15,7 mm) é superior em cerca de 90%.

Tabela 21 – Valores dos ensaios 4-ENF com o adesivo Araldite® 2015

Provete	a_0 [mm]	Velocidade [mm/min.]	Carga máxima [N]	Deslocamento à carga máxima [mm]
P1	60,95	2,5	1582,94	13,34
P2	60,83	2,5	1415,17	14,44
P3	62,14	2,5	1665,97	17,05
P4	61,39	2,5	1607,47	16,80
P5	62,34	2,5	1747,70	16,67
P6 a)	69,24	2,5	2081,06	17,46
P7	61,34	2,5	1675,00	16,07

a)- Ensaio não considerado

Figura 114 – Curvas $P-\delta$ para o adesivo Araldite® 2015, ensaio 4-ENF

3.4.2.1.3 Curvas $P-\delta$ com o SikaForce® 7752

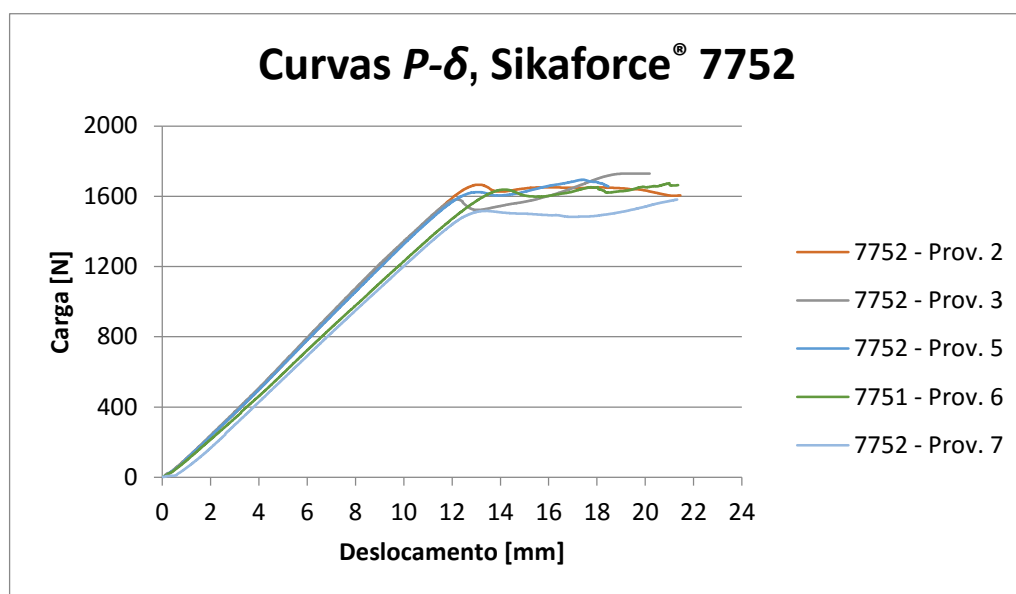
A Tabela 22 apresenta os valores de a_0 , velocidade de ensaio, carga máxima e respetivo deslocamento utilizados nos ensaios dos provetes com o adesivo SikaForce® 7752.

Na Figura 115 apresentam-se as curvas obtidas para cinco ensaios válidos com o adesivo SikaForce® 7752. Os provetes P1 e P4 não foram considerados, como tal, não estão presentes na análise que se segue. Verifica-se também um valor de patamar com boa concordância e repetibilidade. Analisando os resultados médios obtidos nos ensaios ENF e 4-ENF, com este adesivo, o valor de carga máxima (1669,2 N) é superior em 46,5% e o deslocamento à carga máxima (18,4 mm) é superior em cerca de 27,7%.

Tabela 22 – Valores dos ensaios 4-ENF com o adesivo SikaForce® 7752

Provete	a_0 [mm]	Velocidade [mm/min.]	Carga máxima [N]	Deslocamento à carga máxima [mm]
P1 a)	60,35	2,5	1832,79	21,81
P2	60,41	2,5	1666,05	13,12
P3	60,52	2,5	1729,95	19,17
P4 a)	59,80	2,5	1914,58	20,12
P5	59,79	2,5	1694,17	17,44
P6	60,26	2,5	1674,19	21,00
P7	58,36	2,5	1581,78	21,33

a)- Ensaio não considerado

Figura 115 – Curvas $P-\delta$ para o adesivo SikaForce® 7752, ensaio 4-ENF

3.4.2.2 Determinação de G_{IIc}

Para a determinação de G_{IIc} foram aplicados os métodos indicados no capítulo 2.5.2. Ao contrário do ensaio ENF, o ensaio 4-ENF apresenta apenas 2 métodos disponíveis para determinação de G_{IIc} :

o método CCM que requer a medição de a e o método CBT que não depende da medição de a . Os resultados apresentados dos provetes selecionados são considerados como representativos dos resultados globais de cada adesivo.

3.4.2.2.1 Juntas adesivas com o Araldite® AV138

A Figura 116 apresenta as curvas- R obtidas pelos métodos CCM e CBT (sem correção do valor de atrito, ou seja, considerar $\mu=0$ na equação (31)) relativas ao provete P1 utilizando o adesivo Araldite® AV138. O método CCM requer a medição de a , enquanto o método CBT não requer a monitorização de a durante o ensaio. O valor de patamar obtido pelo método CBT quando $\mu=0$ é superior em 288,5 % ao valor de patamar do método CCM, verificando-se assim que o método não é adequado.

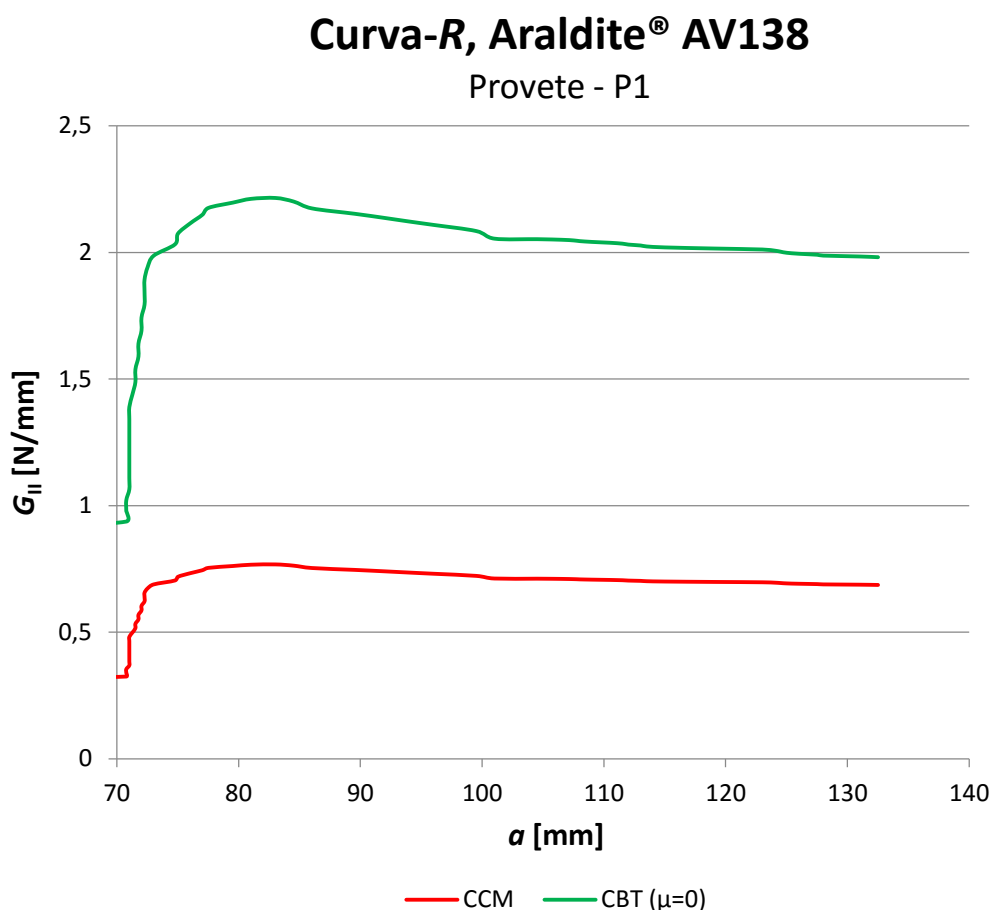


Figura 116 – Curvas- R do provete P1 com o adesivo Araldite® AV138

Na Figura 117 apresentam-se as curvas- R relativas ao provete P4, utilizando o mesmo adesivo. Neste provete o valor de patamar é superior em 315,5 % ao valor de patamar do CCM, o que indica claramente que este método não deverá ser considerado quando se despreza o efeito do atrito.

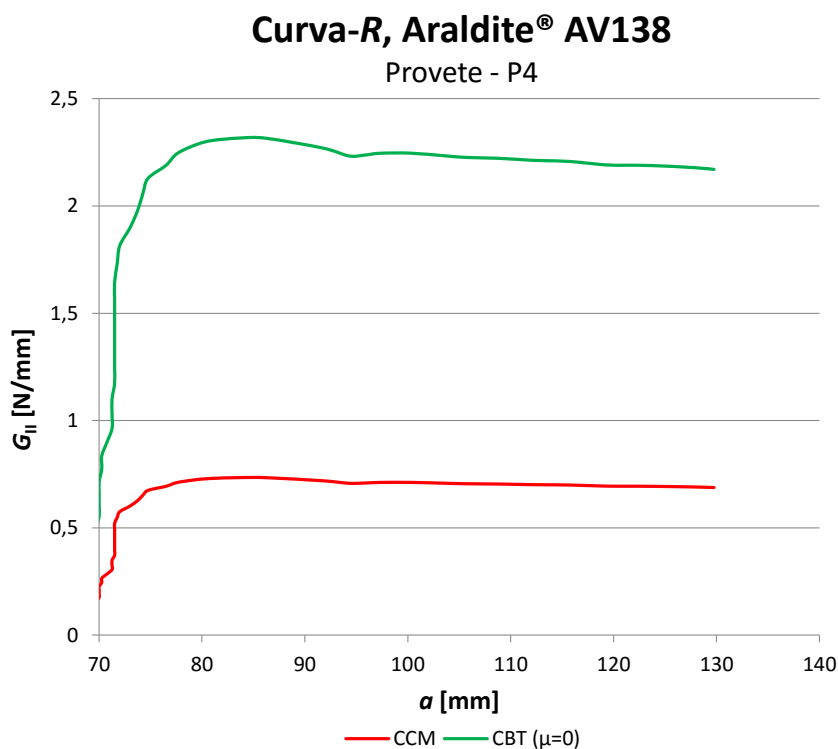
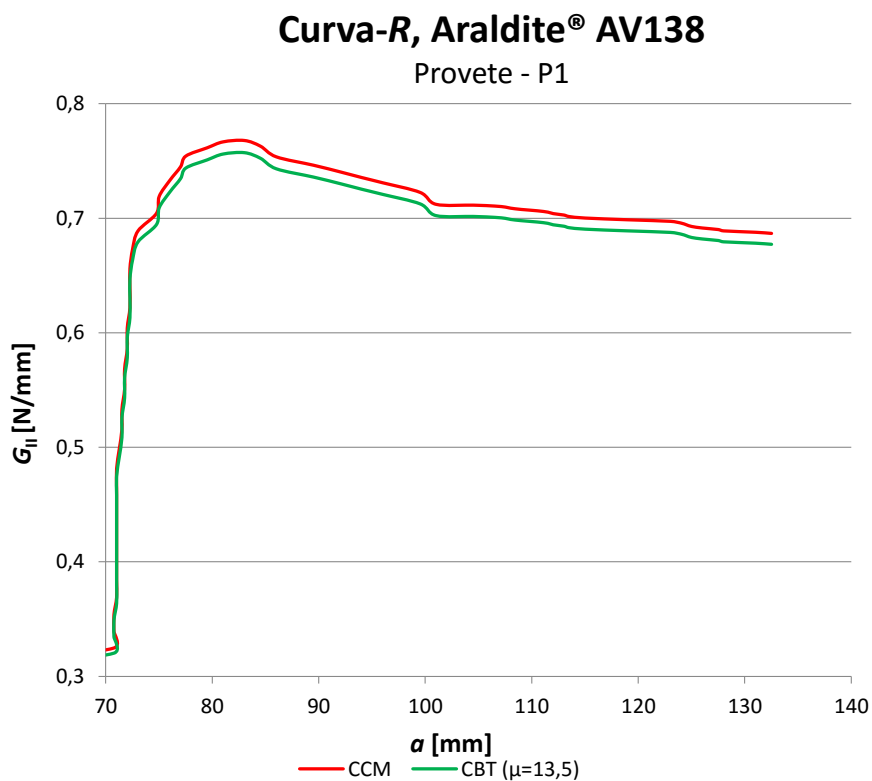
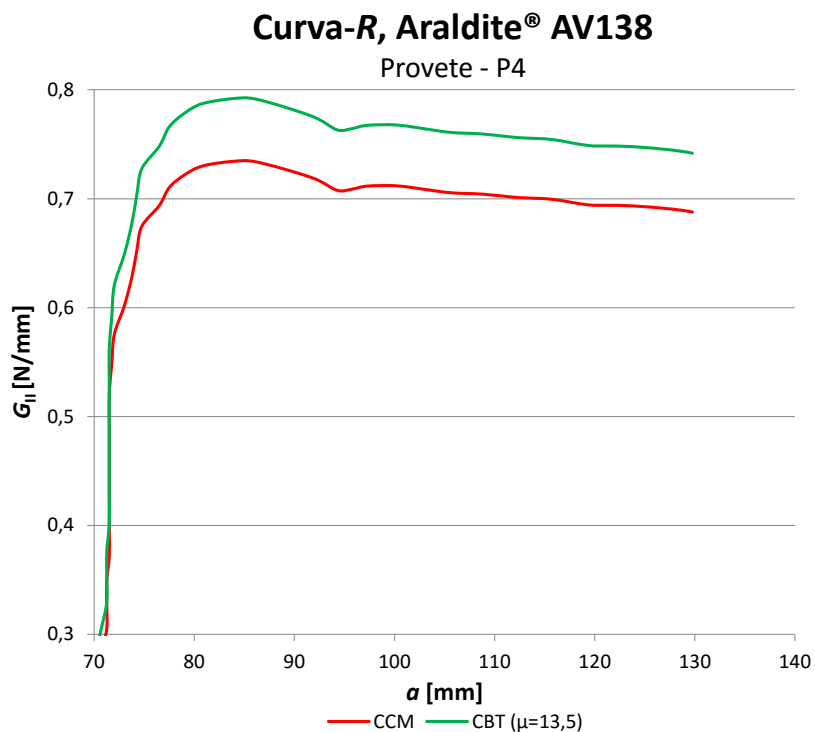


Figura 117 – Curvas-R do provete P4 com adesivo Araldite® AV138

Em todas as curvas-R representativas do adesivo Araldite® AV138 observou-se uma boa repetibilidade no valor de patamar (G_{IIc}). O método CBT, sem correção de atrito, apresenta um valor de G_{IIc} bastante superior ao método CCM, o que indica que o método não é adequado quando se despreza o efeito do atrito. Perante a impossibilidade no apuramento ou medição do valor do coeficiente de atrito (μ) requerido no método CBT, só através de um método iterativo por aproximações sucessivas foi possível estimar o valor de μ que aproxima o valor de G_{IIc} pelos 2 métodos. Deste modo, apenas para um valor de $\mu \approx 13,5$ se verifica uma boa concordância entre os 2 métodos, conforme se observa na Figura 118 e na Figura 119. O valor do coeficiente de atrito é bastante elevado e pode estar relacionado com o efeito de encravamento mecânico na fenda provocado pela alta rugosidade das superfícies em contacto, e sujeitas a um esforço de corte associado aos efeitos de compressão existentes devido ao carregamento. Assim sendo, considera-se que o método CBT não é o mais adequado para a medição de G_{IIc} em adesivos estruturais.

Figura 118 – Curvas-R do provete P1 com adesivo Araldite® AV138, método CBT ($\mu=13,5$)Figura 119 – Curvas-R do provete P4 com adesivo Araldite® AV138, método CBT ($\mu=13,5$)

A Tabela 23 apresenta os valores de G_{IIC} para a série de juntas testadas com o Araldite® AV138, considerando os métodos CCM e CBT, este último com e sem correção de atrito. A Tabela 23 apresenta também os respetivos valores médios e o desvio padrão.

Tabela 23 – Valores de G_{IIC} [N/mm] do adesivo Araldite® AV138 pelos métodos CCM e CBT

Provete	CCM	CBT ($\mu=0$)	CBT ($\mu=13,5$)
P1	0,7002	2,0203	0,6905
P2	0,6688	2,1392	0,7311
P3	0,6992	2,2612	0,7728
P4	0,7013	2,2129	0,7563
P5	0,6738	1,9262	0,6583
P6	0,7409	1,8810	0,6429
P7	0,7598	1,8458	0,6308
Média	0,7063	2,0409	0,6975
Desvio Padrão	0,0333	0,1658	0,0567

Verifica-se pela Tabela 23 que o valor médio de G_{IIC} obtido pelo método CBT sem correção de atrito é 288,96 % superior ao do CCM, o que demonstra que para adesivos estruturais a utilização direta deste método sem medição prévia de μ não é adequada. Por outro lado, como já referido, com a consideração de $\mu \approx 13,5$ o valor médio obtido aproxima-se do CCM. Os valores de desvio padrão para cada método revelaram desvios percentuais de 4,71% para o CCM, 8,12% para o CBT ($\mu=0$) e 8,13% para o CBT ($\mu \approx 13,5$), o que mostra que existe um acordo bastante aceitável entre provetes do mesmo adesivo. Comparando os valores obtidos no ensaio 4-ENF com os do ensaio ENF (Tabela 14) verifica-se que os valores médios obtidos no ensaio 4-ENF são superiores aos obtidos no ensaio ENF. De facto, os valores médios de G_{IIC} obtidos pelo ensaio 4-ENF registam um aumento de 25,9% relativamente aos obtidos pelo ensaio ENF (CCM), de 299,4% (CBT sem correção de atrito) e de 36,5% (CBT com correção de atrito). Estes desvios encontrados pelo método CCM devem-se a diferenças no ajuste do polinómio e eventuais diferenças das condições experimentais, nomeadamente a utilização de um novo adesivo com um lote diferente do anterior. Relativamente ao método CBT verifica-se que o método é inviável quando não se considera o efeito de atrito, o que confirma o citado no capítulo 2.5.2.2.

Na Figura 120 apresentam-se os diferentes valores médios de G_{IIC} para todos os provetes deste adesivo obtidos durante as iterações sucessivas de μ . A Figura 120 mostra o impacto de μ no valor de G_{IIC} (valores médios de todos os provetes deste adesivo).

Evolução de G_{IIc} pelo método CBT Araldite® AV138

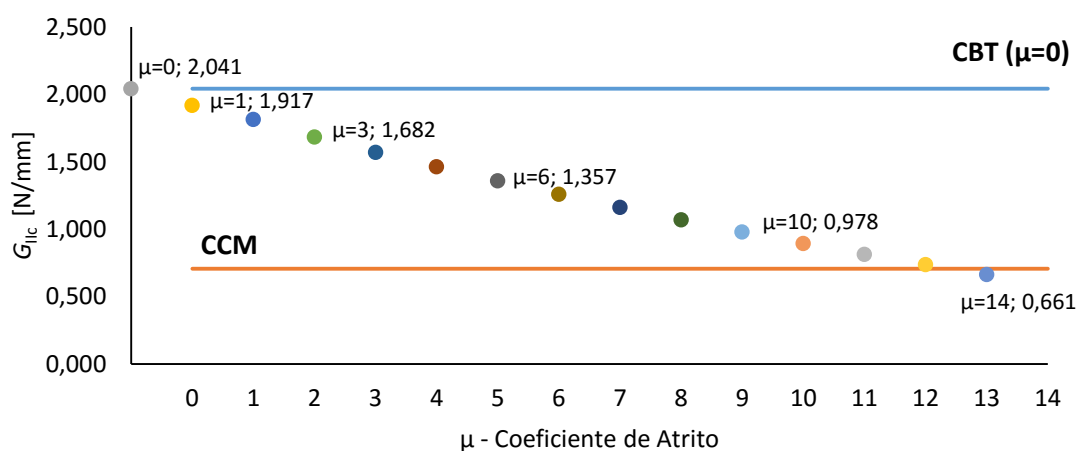


Figura 120 – Comportamento dos valores médios de G_{IIc} para todos os provetes pelo método CBT variando μ para série de juntas com o Araldite® AV138

3.4.2.2.2 Juntas adesivas com o Araldite® 2015

A Figura 121 e Figura 122 representam as curvas- R obtidas pelos métodos CCM e CBT (sem correção do valor de atrito, ou seja, $\mu=0$) para os provetes P2 e P5, respetivamente, ambas com o adesivo Araldite® 2015. Relativamente à curva- R do provete P2, verifica-se que o valor de patamar obtido pelo método CBT quando $\mu=0$ é superior em 112,0 % ao valor de patamar obtido pelo método CCM, constatando-se que o método não é adequado. No provete P5 o valor de patamar é superior em 143,3 %.

Curva-R, Araldite® 2015

Provete - P2

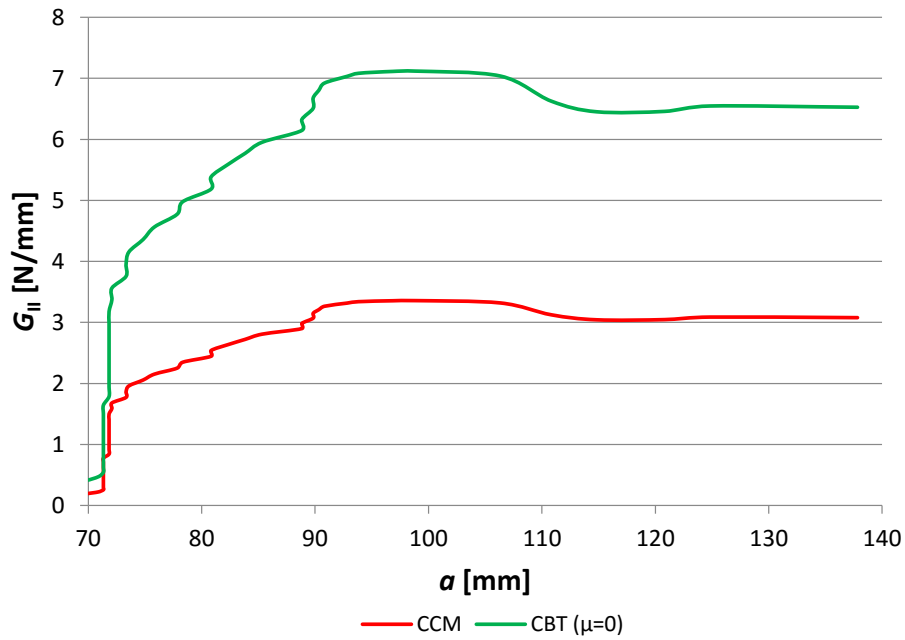


Figura 121 – Curvas-R do provete P2 com o adesivo Araldite® 2015

Curva-R, Araldite® 2015

Provete - P5

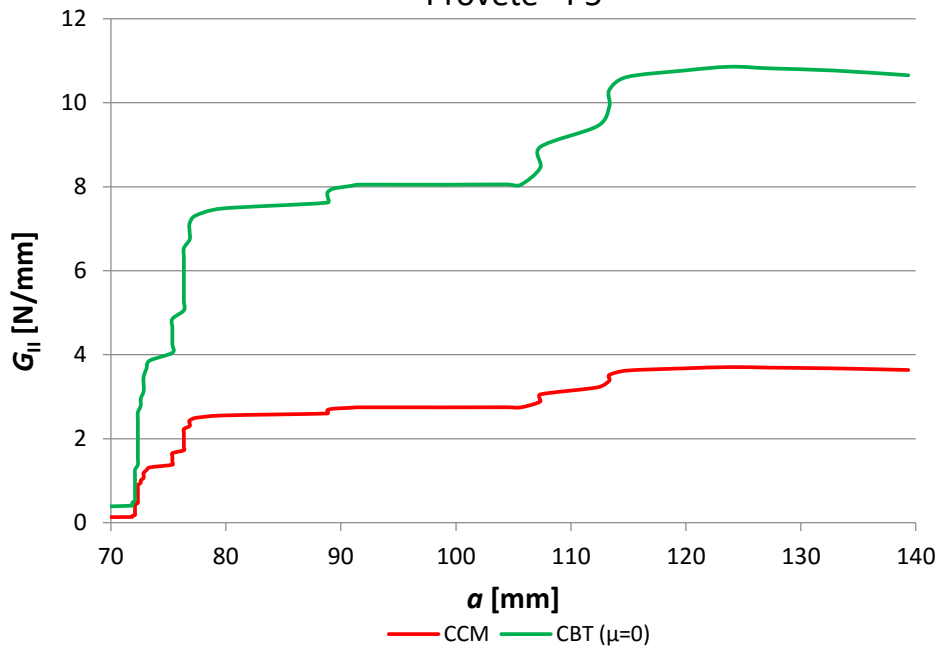


Figura 122 – Curvas-R do provete P5 com o adesivo Araldite® 2015

Na Figura 123 e na Figura 124 apresentam-se as curvas- R obtidas após aplicação de iterações com aproximações sucessivas para determinação do valor de μ . Verificou-se que, para $\mu=12$, a curva- R referente ao método CBT se aproxima da curva- R do método CCM.

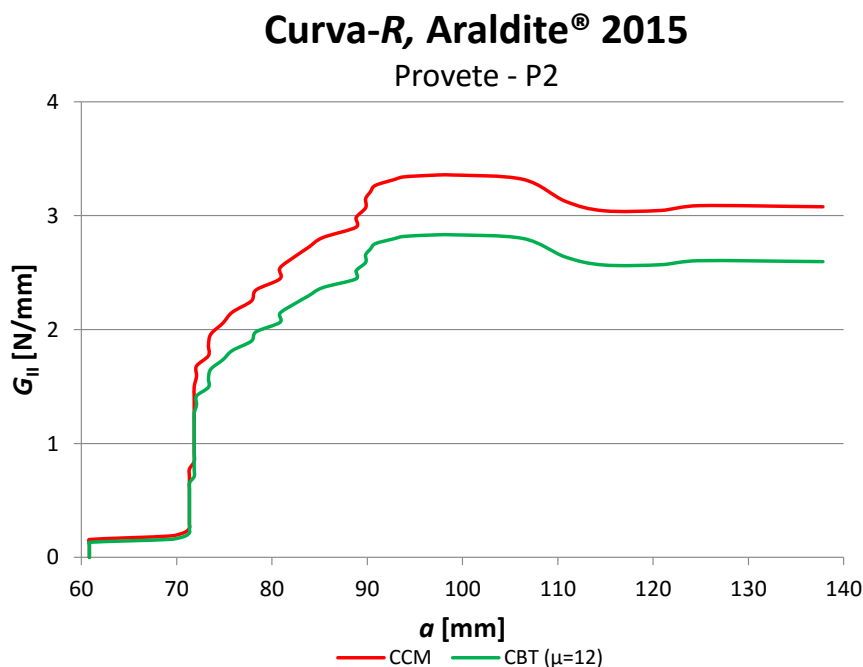


Figura 123 – Curvas- R do provete P2 com o adesivo Araldite® 2015, método CBT ($\mu=12$)

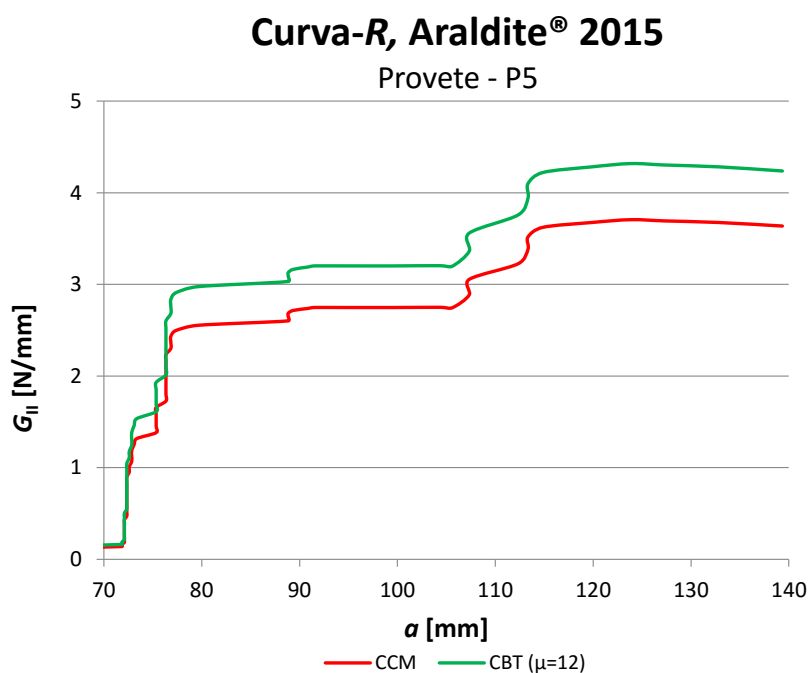


Figura 124 – Curvas- R do provete P5 com o adesivo Araldite® 2015, método CBT ($\mu=12$)

A Tabela 24 mostra os valores de G_{IIC} para a série de provetes testados com o adesivo Araldite® 2015 obtidos pelos métodos CCM e CBT, com indicação da respetiva média e do desvio padrão.

Tabela 24 – Valores de G_{IIC} [N/mm] do adesivo Araldite® 2015 pelos métodos CCM e CBT

Provete	CCM	CBT ($\mu=0$)	CBT ($\mu=12$)
P1	3,3643	8,1171	3,2296
P2	3,2120	6,8101	2,7095
P3	2,7806	8,3016	3,3030
P4	3,0525	7,8726	3,1323
P5	3,6738	8,9396	3,5568
P6 a)	--	--	--
P7	3,2151	8,5285	3,3932
Média	3,0866	8,0949	3,2207
Desvio Padrão	0,2195	0,7273	0,2894

a)- Ensaio não considerado

O valor médio de G_{IIC} com o adesivo Araldite® 2015 pelo método CCM é de $\approx 3,087$ N/mm, de acordo com a Tabela 24. Por não considerar o efeito de atrito ($\mu=0$) o método CBT não deverá ser considerado. Como já referido em 3.4.2.2.1, a utilização direta deste método sem a medição prévia de μ não é adequada em ligações adesivas. Pela Tabela 24 verifica-se que o valor médio de G_{IIC} obtido pelo método CBT sem correção de atrito é 262,26 % superior ao do CCM. Quando se efetua uma correção do valor de atrito, considerando $\mu \approx 12$, o valor de G_{IIC} aproxima-se do valor de CCM. Os valores de desvio padrão para cada método revelaram desvios percentuais de 7,11% para o CCM, 8,98% para o CBT ($\mu=0$) e 8,99% para o CBT ($\mu \approx 12$), o que mostra que existe um acordo bastante aceitável entre provetes do mesmo adesivo. Comparando os valores obtidos no ensaio 4-ENF com os do ensaio ENF (Tabela 15) verifica-se que os valores médios de G_{IIC} obtidos no ensaio 4-ENF são superiores aos obtidos no ensaio ENF, exceto pelo método CCM. Pelo método CCM verifica-se uma diminuição de -0,85 %, enquanto pelo método CBT se verifica um aumento de 221,61% e 27,96% sem e com correção de atrito, respetivamente. Na Figura 125 apresentam-se os diferentes valores médios de G_{IIC} para todos os provetes deste adesivo obtidos durante as iterações sucessivas de μ (valores médios de todos os provetes de este adesivo).

Evolução de G_{IIc} pelo método CBT Araldite® 2015

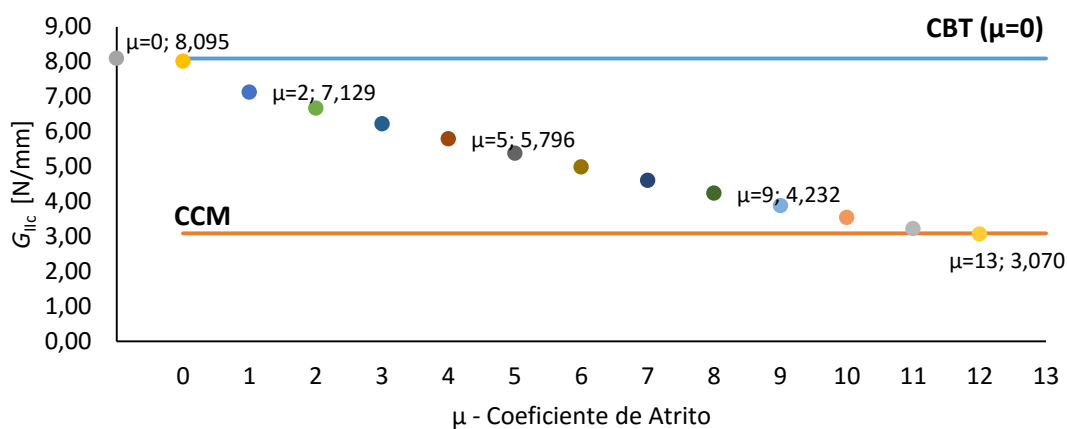


Figura 125 – Comportamento do valor médio de G_{IIc} para todos os provetes pelo método CBT variando μ para série de juntas com o Araldite® 2015

3.4.2.2.3 Juntas adesivas com o SikaForce® 7752

As curvas-R obtidas através dos métodos CCM e CBT para os provetes P3 e P7 com o adesivo SikaForce® 7752 encontram-se representadas na Figura 126 e Figura 127, respetivamente.

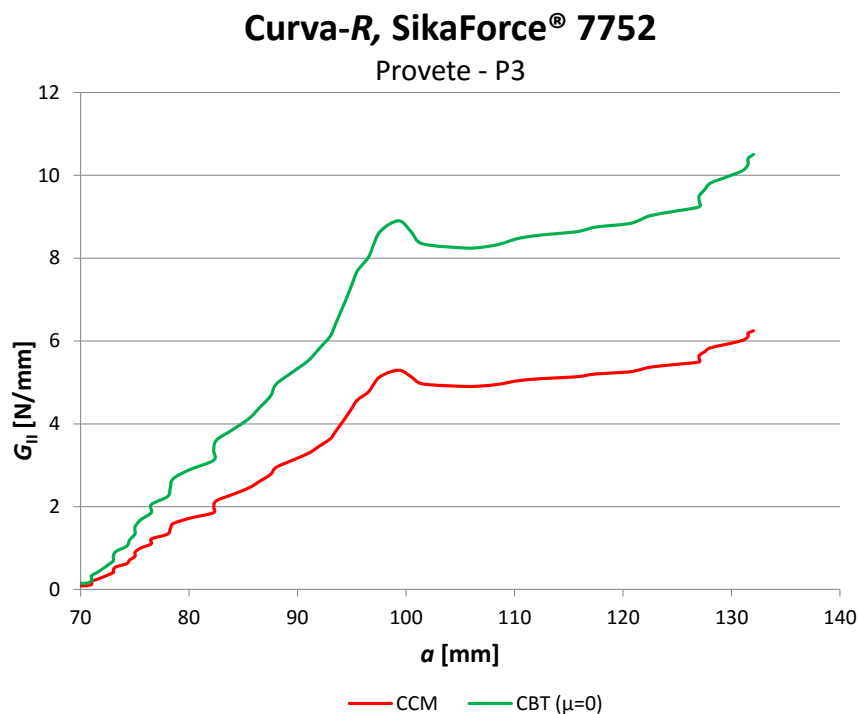


Figura 126 – Curvas-R do provete P3 com o adesivo SikaForce® 7752

Curva-R, SikaForce® 7752

Provete - P7

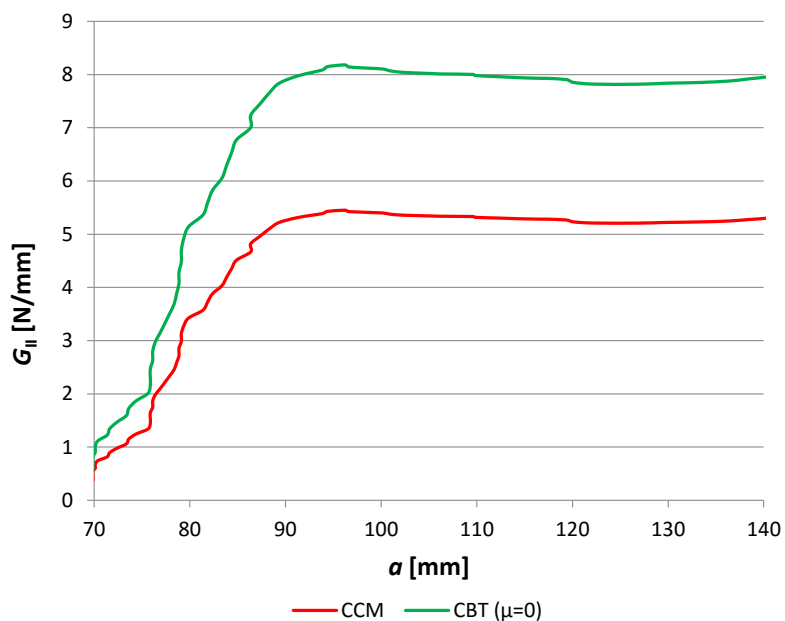
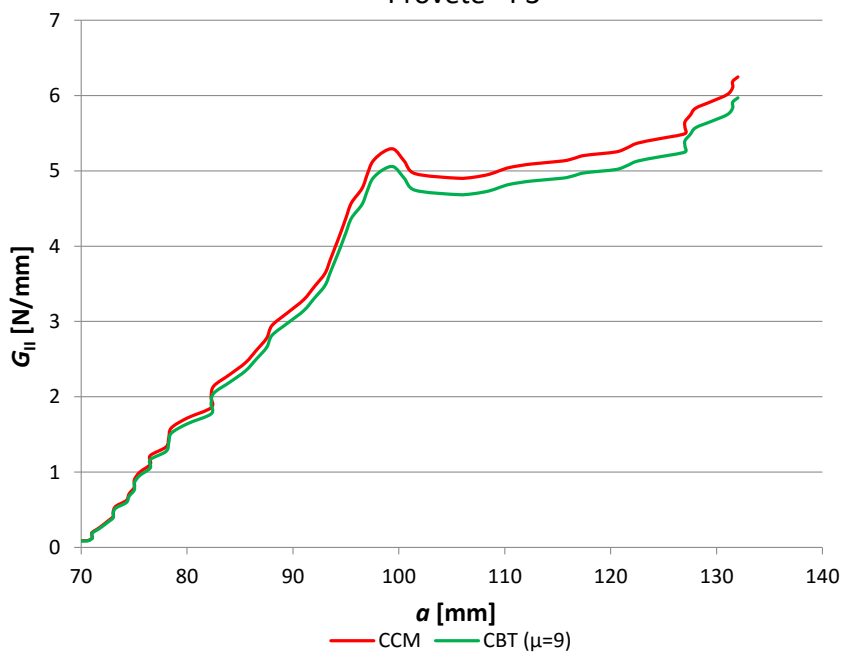


Figura 127 – Curvas-R do provete P7 com o adesivo SikaForce® 7752

De acordo com os procedimentos anteriores determinou-se o valor de correção de atrito no método CBT, que permite aproximar o valor de patamar obtido pelo método CBT ao valor de patamar do método CCM, tendo-se obtido por aproximações sucessivas um valor de $\mu \approx 9$. As curvas-R correspondentes encontram-se representadas na Figura 128 e Figura 129.

Curva-R, SikaForce® 7752

Provete - P3

Figura 128 – Curvas-R do provete P3 com o adesivo SikaForce® 7752, método CBT ($\mu=9$)

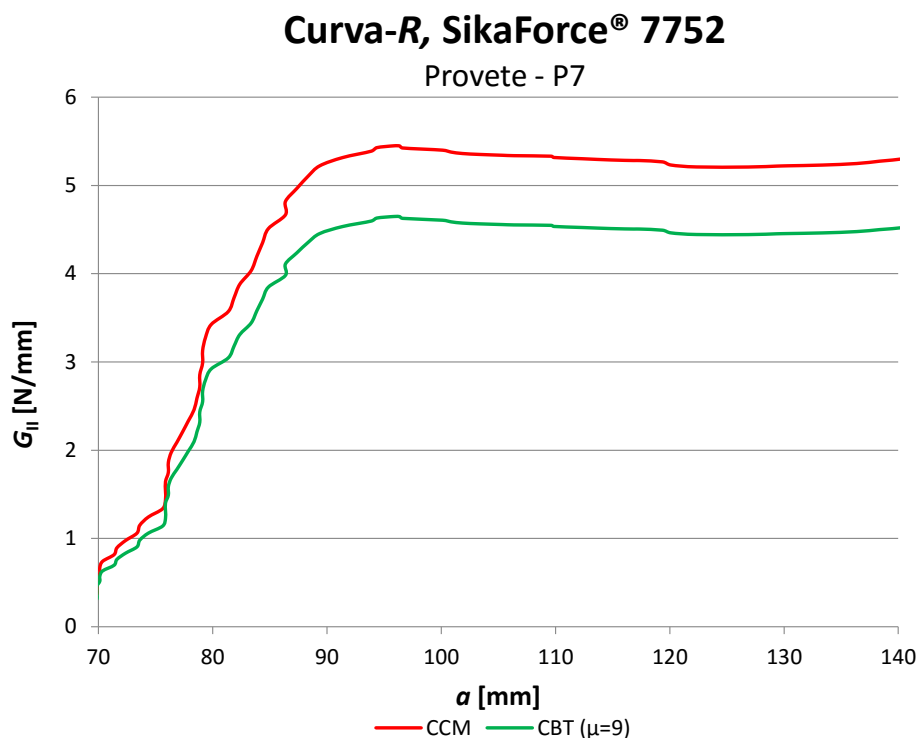


Figura 129 – Curvas-R do provete P7 com o adesivo SikaForce® 7752, método CBT ($\mu=9$)

A Tabela 25 mostra os valores de G_{IIc} para o adesivo SikaForce® 7752 obtidos pelos métodos CCM e CBT. Na Tabela 25 são ainda apresentados os valores médios de G_{IIc} e o desvio padrão.

Tabela 25 – Valores de G_{IIc} [N/mm] do adesivo SikaForce® 7752 pelos métodos CCM e CBT

Provete	CCM	CBT ($\mu=0$)	CBT ($\mu=9$)
P1 a)	--	--	--
P2	5,2758	9,6292	5,4721
P3	5,4250	9,1222	5,1840
P4 a)	--	--	--
P5	5,2929	9,6322	5,4738
P6	5,5554	9,3656	5,3223
P7	5,3179	7,9825	4,5363
Média	5,3734	9,1463	5,1977
Desvio Padrão	0,1171	0,6842	0,3888
a) Ensaio não considerado			

Através da Tabela 25 verifica-se que o valor médio de G_{IIc} obtido pelo método CBT com correção de atrito, com $\mu=9$, se aproxima do valor obtido pelo método CCM, tal como demonstrado nos ensaios anteriores. O método CBT sem correção de atrito não deverá ser considerado. A Tabela 25 apresenta um valor médio de G_{IIc} obtido pelo método CBT sem correção de atrito 170,21 % superior ao valor do CCM. Os valores de desvio padrão para cada método revelaram desvios percentuais de 2,18% para o

CCM, 7,48% para o CBT ($\mu=0$) e 7,48 % para CBT ($\mu\approx 9$), o que mostra que existe concordância entre provetes. Comparando os valores obtidos no ensaio 4-ENF com os do ensaio ENF (Tabela 16) verifica-se que os valores médios de G_{IIC} obtidos no ensaio ENF pelo método CBBM são superiores aos obtidos no ensaio 4-ENF. O método CCM verifica uma diminuição de -3,39 %, o método CBT regista um aumento de 64,44% e uma diminuição de -6,55 % sem e com correção de atrito, respetivamente. Na Figura 130 apresentam-se os diferentes valores médios de G_{IIC} obtidos durante as iterações sucessivas de μ .

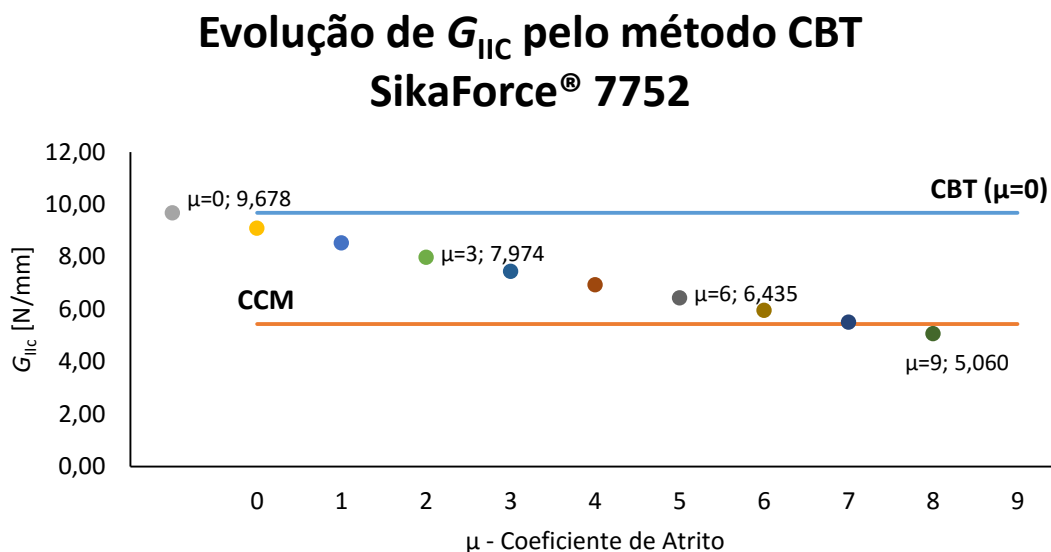


Figura 130 – Comportamento do valor médio de G_{IIC} para todos os provetes pelo método CBT variando μ para série de juntas com o adesivo SikaForce® 7752

3.5 Discussão dos resultados obtidos

Neste capítulo são discutidos os resultados obtidos nos ensaios ENF e 4-ENF e é feita uma análise comparativa dos 2 ensaios para determinação de G_{IIC} em adesivos estruturais. Pela Tabela 26 verifica-se que os valores médios da carga máxima aplicada nos ensaios 4-ENF são sempre superiores aos dos ensaios ENF. Nas juntas com os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752 os valores médios de carga máxima obtidos são superiores em cerca de 53%, 39% e 46%, respetivamente, aos valores médios dos ensaios ENF. Este aumento é devido ao facto dos ensaios 4-ENF apresentarem uma sollicitação de flexão em quatro pontos.

Tabela 26 – Valores médios registados da carga máxima aplicada [N]

	Araldite® AV138	Araldite® 2015	SikaForce® 7752
Ensaio – ENF	516,97	1155,2	1139,7
Ensaio – 4-ENF	793,62	1615,7	1669,2
Δ (4-ENF e ENF)	276,65	460,5	529,5
Δ (%)	53,51%	39,86%	46,46%

Na Tabela 27 indicam-se os valores médios de deslocamento à carga máxima. O ensaio 4-ENF também apresenta deslocamentos à carga máxima superiores aos verificados no ensaio ENF. Este comportamento está relacionado com a maior distância $2L$ no caso dos provetes 4-ENF comparativamente aos ENF.

Tabela 27 – Valores médios registados de deslocamento à carga máxima [mm]

	Araldite® AV138	Araldite® 2015	SikaForce® 7752
Ensaio – ENF	4,2952	8,2723	14,413
Ensaio – 4-ENF	7,5071	15,7283	18,697
Δ (4-ENF e ENF)	3,2119	7,4560	4,284
Δ (%)	74,78%	90,13%	29,72%

Os valores médios de G_{IIC} pelo método CCM dos três tipos de adesivos utilizados, obtidos nos ensaios ENF e 4-ENF, encontram-se na Tabela 28. Verifica-se que os desvios nos valores médios de G_{IIC} pelo método CCM não são significativos entre os dois tipos de ensaios, à exceção dos obtidos para o Araldite® AV138. Este último apresenta um desvio de 25,9% relativamente ao valor médio do ensaio ENF, sendo as razões para esta diferença o ajuste do polinómio $C=f(a)$ e diferenças nas condições de ensaio, nomeadamente, a utilização deste adesivo de um lote diferente.

Tabela 28 – Valores médios de G_{IIC} [N/mm] registados pelo método CCM

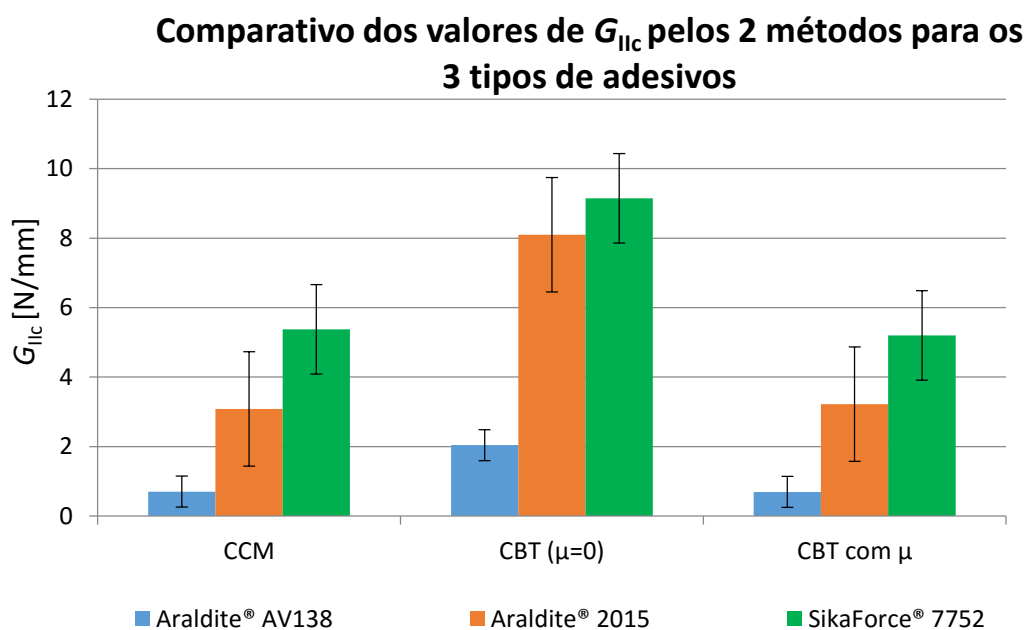
	Araldite® AV138	Araldite® 2015	SikaForce® 7752
Ensaio – ENF	0,561	3,113	5,562
Ensaio – 4-ENF	0,7063	3,0866	5,3734
Δ (4-ENF e ENF)	0,1453	-0,0264	-0,2466
Δ (%)	25,90%	-0,85%	-3,39%

De acordo com o descrito nos capítulos anteriores, o método CBT para $\mu=0$ não é aceitável. Pela Tabela 29 verifica-se que o método CBT com correção de atrito não apresenta grandes desvios comparativamente com o método CCM, apresentado na Tabela 28. Assim, verifica-se que o método CBT só é funcional quando se considera a correção do valor de atrito. No entanto, em juntas adesivas o valor μ é muito difícil de determinar. As diferenças encontradas pelo método CBT no ensaio 4-ENF são notáveis, pelo que este método não é adequado para medir a tenacidade à fratura de adesivos estruturais.

Tabela 29 – Valores médios de G_{IIC} [N/mm] registados pelo método CBT com correção de atrito

	Araldite® AV138	Araldite® 2015	SikaForce® 7752
μ	13,5	12,0	9,0
Ensaio – ENF	0,511	2,517	5,562
Ensaio – 4-ENF	0,6975	3,2207	5,1977
Δ (4-ENF e ENF)	0,1865	0,7037	-0,3643
Δ %	36,50%	27,96%	-6,55%

A Figura 131 e Figura 132 apresentam sob a forma gráfica uma comparação dos valores de G_{IIC} dos adesivos ensaiados segundo os métodos abordados no ensaio ENF e 4-ENF, respetivamente.

Figura 131 – Comparação dos valores de G_{IIC} dos adesivos ensaiados segundo os métodos abordados (4-ENF)

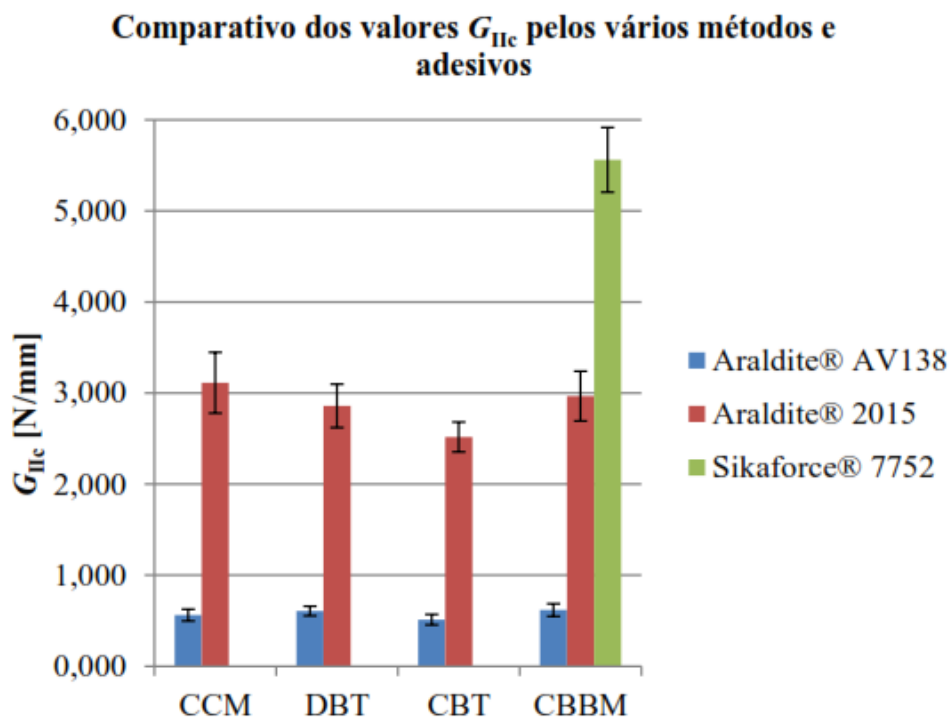


Figura 132 – Comparação dos valores de G_{IIc} dos adesivos ensaiados segundo os métodos abordados (ENF)

[2]

Em suma, relativamente ao ensaio 4-ENF, não se verifica a adequabilidade de um dos métodos (CBT) para caracterização de G_{IIc} em juntas adesivas. De facto, o método CBT não é indicado para juntas adesivas, pela dificuldade na determinação de μ . O método CCM é viável, no entanto necessita de ajustes do polinómio e requer a mediação de a . Por outro lado, o ensaio 4-ENF apresenta um *setup* de ensaio mais complexo, tem menor disponibilidade de métodos para a determinação de G_{IIc} e não está normalizado. Este ensaio diferencia-se ainda do ensaio ENF pelo facto de apresentar uma propagação de fenda com maior estabilidade. O ensaio 4-ENF, nas mesmas condições, requer uma maior solicação (P maior).

4 Conclusões

O objetivo deste trabalho foi estabelecer uma comparação direta entre os métodos ENF e 4-ENF na determinação de G_{IIc} , recorrendo à realização de ensaios práticos laboratoriais. O ensaio ENF apresenta a vantagem de ter um *setup* mais simples e de não necessitar de ferramentas especiais para a sua realização. O efeito do atrito neste ensaio é desprezável, ao contrário do que acontece no ensaio 4-ENF. Conforme referido na Tabela 3, o ensaio ENF é o mais utilizado por ser mais simples, embora apresente como principal desvantagem o facto de apresentar uma propagação de fenda mais instável. Por outro lado, este ensaio apresentou valores de carga máxima inferiores ao ensaio 4-ENF, requerendo assim uma menor solicitação por parte da máquina de ensaios para a execução dos mesmos apesar de, para a geometria dos provetes envolvidos neste trabalho, as cargas envolvidas não serem significativas relativamente à capacidade da máquina. O deslocamento à carga máxima apresentando foi inferior no ensaio ENF. No que concerne aos métodos de tratamento de dados disponíveis, o ensaio ENF disponibiliza mais métodos para determinação do valor de G_{IIc} do que o 4-ENF, pelo primeiro estar mais difundido.

O ensaio 4-ENF apresenta como grande vantagem o facto de apresentar uma propagação de fenda mais estável quando comparado com o ensaio anterior. Os valores de carga máxima registados são superiores no ensaio 4-ENF. No que se refere ao deslocamento à carga máxima, obtido através das curvas $P-\delta$, o ensaio 4-ENF apresenta um valor superior quando comparado com o ensaio ENF. Como desvantagem apresenta o facto de requerer uma ferramenta especial para a realização do ensaio e também o facto de ser necessário quantificar o efeito de atrito entre aderentes durante a realização do ensaio para a medição de G_{IIc} pelo método CBT. Outra grande desvantagem deste ensaio é a limitação dos métodos disponíveis para determinação de G_{IIc} . Em juntas adesivas, apenas se revelou viável a utilização do método CCM. O método CBT não é aplicável em ensaios com juntas adesivas devido à dificuldade em quantificar o efeito do atrito na zona da fenda. A não existência de um método fiável para medição de G_{IIc} de juntas adesivas que não necessite da medição de a é outra grande limitação deste ensaio. Apesar de todas estas dificuldades e, como referido no capítulo 3.5, verificou-se uma boa concordância dos valores de G_{IIc} medidos pelo método CCM nos 2 ensaios. A comparação dos valores de G_{IIc} obtidos por cada método mostrou que no ensaio 4-ENF o método CCM pode ser aplicado em juntas adesivas apesar da dificuldade do

ajuste do polinómio. A comparação entre o ensaio ENF e 4-ENF mostrou valores bastante aceitáveis. Através do método CCM verificaram-se desvios de 25,9 %, 0,85 % e 3,39 % para as juntas com Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, respetivamente. O desvio mais significativo verifica-se com as juntas de Araldite® AV138, sendo este motivado por problemas de ajuste no polinómio de $C=f(a)$, já que no adesivo frágil há mais problemas de propagação instável quando comparado com um adesivo mais dúctil. Este desvio também poderá estar relacionado com a alteração das condições de ensaio, nomeadamente devido à utilização de um lote diferente neste adesivo.

No ensaio 4-ENF, considerando o método CBT com $\mu=0$, verificou-se que este não funcionava sem haver uma correção de atrito. Só foi possível aproximar os valores de G_{IIc} com os do método CCM aplicando um método iterativo para determinação de um valor de μ , aproximando assim a curva- R representativa do método CBT à curva- R representativa do método CCM. Os valores de μ obtidos variam entre 9 a 13,5, conforme enunciado no capítulo 3.4.2.2, sendo que valores desta grandeza só poderão ser justificados com a existência de um esforço de compressão associado ao corte, o que poderá causar encravamento das duas superfícies em deslizamento devido à alta rugosidade das superfícies de fratura. Pelo exposto, e dificuldade na determinação do valor de μ , conclui-se que o método CBT não é adequado para o ensaio 4-ENF em juntas adesivas.

Perante o exposto, e considerando as limitações existentes no ensaio 4-ENF em ligações adesivas, comprova-se que efetivamente o ensaio ENF é o mais versátil devido a uma maior disponibilidade de métodos para a determinação do valor de G_{IIc} e por apresentar um *setup* mais simples. Conclui-se assim que o ensaio 4-ENF, embora sendo uma alternativa ao ensaio ENF, deverá ter mais aplicabilidade em ensaios com materiais não ligados por adesivos.

Como sugestão de trabalhos futuros considera-se a avaliação do ensaio 4-ENF em provetes de um único material, como materiais compósitos ou madeira, para melhor compreender o comportamento dos diferentes métodos noutros materiais. Outra recomendação será efetuar novamente o ensaio 4-ENF utilizando dimensões diferentes no *setup* do ensaio, nomeadamente variando e combinando as distâncias entre os cilindros de solicitação e os cilindros de suporte, aprofundando assim o impacto destas variáveis no ensaio. Por fim, a realização de um estudo numérico pelo MEF permitiria avaliar em detalhe o efeito do atrito pela comparação, para cada método de redução, dos valores de G_{IIc} introduzidos no modelo com os valores previstos por aplicação dos métodos aos outputs dos ensaios numéricos.

Referências

- [1] L. F. M. da Silva, A. G. de Magalhães e M. F. S. F. de Moura, *Juntas Adesivas Estruturais*, Porto: Publindústria, 2007.
- [2] J. C. S. Azevedo, “Determinação da tenacidade à fratura em corte (GIIC) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF),” Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2014.
- [3] A. Higgins, “Adhesive bonding of aircraft structures,” *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 20, pp. 367-376, 2000.
- [4] “Still the poor relation,” AMS - Automotive Manufacturing Solutions, 1 Novembro 2010. [Online]. Available: <http://www.automotivemanufacturingsolutions.com/focus/still-the-poor-relation>. [Acedido em 29 Dezembro 2015].
- [5] “National Physical Laboratory,” [Online]. Available: <http://www.npl.co.uk>. [Acedido em 08 08 2015].
- [6] E. M. Petrie, *Handbook of Adhesives and Sealants*, McGraw-Hill, 2000.
- [7] A. M. G. Pinto, “Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos,” Tese de Doutoramento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2007.
- [8] J. A. B. P. Neto, R. D. S. G. Campilho e L. F. M. da Silva, “Parametric study of adhesive joints with composites,” *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 37, pp. 96-101, 2012.
- [9] S. L. S. Nunes, “Estudo comparativo da resistência à tração de juntas adesivas de sobreposição simples e dupla,” Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2015.
- [10] D. Manabendra, M. Erdogan e R. A. Damodar, “Tree-dimensional nonlinear analyses of scarf,” *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, vol. 3, pp. 1641-1658, 2008.
- [11] C. J. Constante, “Utilização de métodos ópticos de correlação de imagem para a determinação da tenacidade à fractura de adesivos estruturais,” Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2014.
- [12] S. A. d. C. Almeida, “Análise Computacional de Juntas Adesivas Simples e Duplas em Materiais Compósitos,” Tese de mestrado. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2012.

- [13] R. D. S. G. Campilho, M. D. Banea, J. A. B. P. Neto e L. F. M. da Silva, “Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer,” *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 44, pp. 48-56, 2013.
- [14] L. F. M. d. Silva, A. Ochsner e R. D. Adams, *Handbook of Adhesion Technology*, Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 2011.
- [15] R. M. Lopes, “Comparação dos ensaios DCB e TDCB para determinação da tenacidade em tração de adesivos estruturais,” Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2014.
- [16] G. P. Marques, “Influência do tipo de adesivo em juntas híbridas,” Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2014.
- [17] D. E. Packham, *Handbook of Adhesion*, Second Edition, John Wiley & Sons, Ltd, 2005.
- [18] E. A. Association, *EAA Aluminium Automotive Manual – Joining*, European Aluminium Association, 2015.
- [19] J. A. O. V. de Carvalho, “Durabilidade de ligações coladas com adesivos epóxico e de poliuretano entre perfis de PRFV,” Tese de Mestrado. Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2013.
- [20] L. F. M. da Silva, D. A. Dillard, B. Blackman e R. D. Adams, *Testing Adhesive Joints*, Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2012.
- [21] Association Francaise de Normalisation; *Structural adhesives - preparation method of structural adhesive plates for characterization test pieces*, Afnor, 1988.
- [22] EN-ISO-527-2, *Determination of tensile properties of plastics Test and conditions for moulding and extrusion plastics*, Berlin: German Standards (DIN-Normen), 1996.
- [23] F. S. M. de Sousa, “Caracterização de adesivos de altas temperaturas para aplicações aeroespaciais,” Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2010.
- [24] NFT-51-101, *Plastics - Determination of compressive properties*, Afnor, 2004.
- [25] ASTM-D695-02a, *Test method for compressive properties of rigid plastics*, West Conshohocken, USA, 2002.
- [26] ASTM-D5379/D5379M-98, *Test method for shear properties of composite materials by the v-notched beam method*, West Conshohocken, USA, 1998.
- [27] J. M. C. Xavier, “Caracterização do comportamento ao corte da madeira usando o ensaio de Iosipescu,” Tese de Mestrado. Universidade de Trás os Montes e Alto Douro, Vila Real, 2003.
- [28] ASTM-D1002, *Apparent shear strength of the single-lap-joint adhesively bonded metal specimens by tension loading*, West Conshohocken: ASTM Standards, 1999.

- [29] ISO-11003-2, Adhesives -- Determination of shear behaviour of structural adhesives -- Part 2: Tensile test method using thick adherends, 2012.
- [30] ASTM-D3983-98, Test method for measuring strength and shear modulus of non-rigid adhesives by the thick-adherend tensile-lap specimen, 1998.
- [31] ASTM-D1876, Peel resistance of adhesives (T-Peel Test), ASTM Standards, 2008.
- [32] ASTM-D903-49, Test method for peel or stripping strength of adhesive bonds, 1983.
- [33] ASTM-D3167, Floating roller peel resistance of adhesives, 2003.
- [34] ASTM-D1781, Climbing drum peel for adhesives, 1998.
- [35] ASTM-D950-03, Impact strength of adhesive bonds, 2003.
- [36] EN-ISO-29653, Test method for shear impact strength of adhesive bonds, 2000.
- [37] L. M. B. S. Teixeira, "Caracterização do comportamento mecânico de juntas de sobreposição simples coladas com adesivos estruturais," Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2000.
- [38] ASTM-D3166-99, Standard test method for fatigue properties of adhesives in shear by tension loading (metal/metal), 1999.
- [39] ASTM-D2294-96, Standard test method for creep properties of adhesives in shear by tension loading (metal-to-metal), 1996.
- [40] ASTM-D2293-96, Standard test method for creep properties of adhesives in shear by compression loading (metal-to-metal), 1996.
- [41] ASTM-D2919-01, Standard test method for determining durability of adhesive joints stressed in shear by tension loading, 2001.
- [42] ASTM-D3762-03, Standard test method for adhesive-bonded surface durability of aluminum (wedge test), 2003.
- [43] ASTM-D2918-99, Standard test method for durability assessment of adhesive joints stressed in peel, 1999.
- [44] L. F. M. da Silva e R. D. S. G. Campilho, *Advances in Numerical Modelling of Adhesive Joints*, Heidelberg, Germany: Springer, 2012.
- [45] F. J. P. Chaves, "Fracture mechanics applied to the design of adhesively bonded joints," Tese de Doutoramento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2013.
- [46] G. Fernlund e J. K. Spelt, "Mixed-mode fracture characterization of adhesive joints," *Composites Science and Technology*, vol. 50, pp. 441-449, 1994.
- [47] ASTM-D3433-99, Standard test method for fracture strength in cleavage of adhesives in bonded metal joints, 1999.

- [48] ISO-25217-09, Determination of the mode I adhesive fracture energy of structural adhesive joints using double cantilever beam and tapered double cantilever beam specimens, 2009.
- [49] ASTM-D5045-14, Standard test methods for plane-strain fracture toughness and strain energy release rate of plastic materials, 2014.
- [50] ISO-13586-00, Determination of fracture toughness (GIC and KIC) - linear elastic fracture mechanics (LEFM) approach, 2000.
- [51] M. Kuwata, "Mechanisms of interlaminar fracture toughness using non-woven veils as interleaf materials," Tese de Doutorado. Universidade de Londres, Londres, 2010.
- [52] JIS-K-7086-93, Testing methods for interlaminar fracture toughness of carbon fibre reinforced plastics, 1993.
- [53] DIN-EN-6034, Test method - Determination of interlaminar fracture toughness energy - Mode II, 2013.
- [54] M. F. S. F. de Moura, R. D. S. G. Campilho e J. P. M. Gonçalves, "Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 46, p. 1589–1595, 2008.
- [55] ASTM-D6671-06, Standard test method for Mixed Mode I-Mode II interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber reinforced polymer matrix composites, 2006.
- [56] C. Schuecker e B. D. Davidson, "Evaluation of the accuracy of the four-point bend end-notched flexure test for mode II delamination toughness determination," *Composites Science and Technology*, vol. 60, pp. 2137 - 2146, 2000.
- [57] M. D. Banea, L. F. M. da Silva e R. D. S. G. Campilho, "Mode II fracture toughness of adhesively bonded joints as a function of temperature: experimental and numerical study," *The Journal of Adhesion*, vol. 88, pp. 534-551, 2012.
- [58] J. Rice e G. Rosengren, "Plane strain deformation near a crack tip in a powerlaw hardening material," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 16, pp. 1-12, 1968.
- [59] A. J. Kinloch e S. J. Shaw, "The fracture-resistance of a toughened epoxy adhesive," *Journal of Adhesion*, vol. 12, pp. 59-77, 1981.
- [60] Z. Chen, R. Adams e L. F. M. da Silva, "The use of the J-integral vector to analyse adhesive bonds with and without a crack," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 1, p. 48–55, 2011.
- [61] T. Carlberger e U. Stigh, "Influence of layer thickness on cohesive properties of an epoxy-based," *Journal of Adhesion*, vol. 86, p. 814–833, 2010.
- [62] Y. Zhu, K. M. Liechti e K. Ravi-Chandar, "Direct extraction of rate-dependent traction-separation," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 46, p. 31–51, 2009.

- [63] W.-X. Wang, M. Nakata, Y. Takao e T. Matsubara, “Experimental investigation on test methods for mode II interlaminar fracture testing of carbon fiber reinforced composites,” *Composites*, vol. 40, p. 1447–1455, 2009.
- [64] J. Reeder, K. Demarco e K. Whitley, “The Use of Doublers in Delamination Toughness Testing,” em *Proceedings of the American Society for Composites 17 th Technical Conference*.
- [65] A. Arrese e F. Mujika, “Influence of bending rotations on three and four-point bend end notched flexure tests,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 75, p. 4234–4246, 2008.
- [66] X. Sun e B. D. Davidson, “Numerical evaluation of the effects of friction and geometric nonlinearities on the energy release rate in three and four-point bend end-notched flexure tests,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 73, p. 1343–1361, 2006.
- [67] A. d. Morais e A. Pereira, “Application of the effective crack method to mode I and mode II interlaminar fracture of carbon epoxy unidirectional laminates,” *Composites*, vol. 38, p. 785–794, 2007.
- [68] R. D. S. G. Campilho, M. D. Banea, A. M. G. Pinto, L. F. M. da Silva e A. M. P. de Jesus, “Strength prediction of single- and double-lap joints by standard and extended finite element modeling,” *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 31, pp. 363-372, 2011.
- [69] R. D. S. G. Campilho, M. F. S. F. de Moura, A. M. G. Pinto, J. J. L. Morais e J. J. M. S. Domingues, “Modeling the tensile fracture behaviour of CFRP scarf repairs,” *Composites: Part B*, vol. 40, pp. 149-157, 2009.
- [70] R. D. S. G. Campilho, M. F. S. F. de Moura e J. J. M. S. Domingues, “Modelling single and double-lap repairs on composite materials,” *Composites Science and Technology*, vol. 65, pp. 1948-1958, 2005.
- [71] J. A. B. P. Neto, “Estudo paramétrico de juntas adesivas em material compósito,” Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2011.
- [72] T. M. S. Faneco, “Caraterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade,” Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2014.
- [73] R. D. S. G. Campilho, M. F. S. F. de Moura e J. P. M. Gonçalves, “Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints,” *International of Solids and Structures*, vol. 46, pp. 1589-1595, 2009.