



Resistência mecânica de juntas adesivas reforçadas com microfibras de vidro

JOÃO NETO MARCOS

outubro de 2021

RESISTÊNCIA MECÂNICA E DE FRATURA DE JUNTAS ADESIVAS REFORÇADAS COM MICROFIBRAS DE VIDRO

João Neto Marcos

1140241

2020/2021

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Engenharia Mecânica



RESISTÊNCIA MECÂNICA E DE FRATURA DE JUNTAS ADESIVAS REFORÇADAS COM MICROFIBRAS DE VIDRO

João Neto Marcos

1140241

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho e coorientação do Mestre Paulo Jorge Roque de Oliveira Nóvoa e do Doutor Isidro de Jesús Sánchez-Arce.

2020/2021

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

Doutora Sandra Cristina de Faria Ramos

Professor Adjunto, ISEP

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Coorientadores

Mestre Paulo Jorge Roque de Oliveira Nóvoa

Assistente Convidado, ISEP

Doutor Isidro de Jesús Sánchez-Arce

Investigador, INEGI

Arguente

Doutor António Torres Marques

Professor Catedrático, FEUP

AGRADECIMENTOS

Um especial agradecimento ao orientador Doutor Raul Duarte Salgueiral Campilho, e aos coorientadores Mestre Paulo Jorge Roque de Oliveira Nóvoa e Doutor Isidro de Jesús Sánchez-Arce pela disponibilidade, preocupação, incentivo e apoio contínuo durante o tempo de realização desta dissertação, revelando-se fundamental para a conclusão da mesma.

Um agradecimento ao Engenheiro Paulo Silva da empresa Sika Portugal pela oferta da amostra do adesivo de poliuretano SikaForce®-840, fundamental para a realização deste trabalho.

Queria ainda agradecer aos meus pais, ao meu irmão e aos meus amigos por todo o apoio e incentivo que me deram durante este período de tempo que foi fundamental para alcançar os meus objetivos.

Finalmente ao Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) pela oportunidade concedida para a elaboração desta dissertação.

PALAVRAS CHAVE

Juntas adesivas, Aditivção de adesivos, Propriedades mecânicas, Propriedades de Fratura, Propriedades em modo misto, Microfibras.

RESUMO

As juntas adesivas constituem uma boa alternativa às ligações soldadas e aparafusadas, uma vez que permitem evitar alguns problemas a estas associados. As juntas adesivas apresentam várias vantagens, tais como uma distribuição de tensões mais uniforme quando comparada com ligações soldadas ou aparafusadas, amortecimento de vibrações, possibilidade de ligações entre materiais diferentes, projeto mais flexível, acabamentos com contornos regulares, contacto contínuo entre componentes, peso e custo reduzidos, entre outros. As juntas adesivas podem ser solicitadas a vários esforços. Contudo, estão maioritariamente solicitadas a esforços de corte e arrancamento. Assim, é importante compreender o comportamento das juntas nestas solicitações, e o conhecimento de alguns parâmetros tais como o módulo de elasticidade longitudinal (E), a tensão de corte (τ), o módulo de corte (G), a taxa crítica de libertação de energia à tração de corte (G_{Ic} e G_{IIc} , respetivamente), entre outros. Adicionalmente, a modificação de adesivos é também muito usada com o objetivo de alterar o adesivo quer a nível de propriedades mecânicas, como a nível de processo de cura e aspeto. A modificação de adesivos pode ocorrer recorrendo a diferentes reforços como partículas ou fibras.

Este trabalho visa a estudar um adesivo recentemente lançado para o mercado, e que carece de caracterização para facilitar a previsão da resistência das respetivas juntas. Adicionalmente, o adesivo foi também estudado com a adição de microfibras de vidro em quatro percentagens mássicas diferentes (0 phr (phr - *per hundred resin*), 15 phr, 35 phr e 55 phr). Isto visa a compreender o comportamento do adesivo com a adição de microfibras de vidro e qual o impacto nas suas propriedades. São realizados cinco ensaios para caracterizar o adesivo: ensaios à tração de provetes de adesivo maciço, ensaios ao corte com geométrica *block shear* (BS), ensaios *Double-Cantilever Beam* (DCB), ensaios *End-Notched Flexure* (ENF) e ensaios em modo misto com a geometria de junta de sobreposição simples (JSS). Realizando os ensaios referidos são determinadas as propriedades mecânicas e de fratura à tração e ao corte.

Os resultados, na sua grande maioria, foram de encontro com os disponibilizados pelo fabricante, com a exceção do ensaio BS. A adição de microfibras de vidro revelou no geral um aumento da rigidez e das propriedades de fratura, mas uma redução da resistência mecânica.

KEYWORDS

Adhesive joints, Adhesive additivation, Mechanical properties, Fracture properties, Mixed mode properties, Microfibers.

ABSTRACT

Adhesive joints are a good alternative to welded and fastened joints, as they avoid some problems associated with them. Adhesive joints have several advantages, such as a more uniform stress distribution when compared to welded or bolted joints, vibration dampening, possibility of joining different materials, more flexible design, finishing with regular contours, continuous contact between components, weight and reduced cost, among others. Adhesive joints can be loaded under various efforts. However, they are mostly loaded to shear and peel loadings. Thus, it is important to understand the behavior of the joints under these loadings, and the knowledge of some parameters such as the longitudinal elastic modulus (E), the shear stress (τ), the shear modulus (G), the critical strain energy release rate under tension and shear (G_{Ic} and G_{IIc} , respectively), among others. Additionally, the modification of adhesives is also widely used in order to change the adhesive both in terms of mechanical properties, as well as in terms of the curing process and appearance. The modification of adhesives can take place using different reinforcements such as particles or fibers.

This work aims to study an adhesive recently launched on the market, which still requires characterization to facilitate the prediction of the strength of the respective joints. Additionally, the adhesive was also studied with the addition of glass microfibers in four different mass percentages (0 phr (phr - per hundred resin), 15 phr, 35 phr and 55 phr). This aims to understand the behavior of the adhesive with the addition of glass microfibers and the impact on its properties. Five tests are carried out to characterize the adhesive: tensile tests of bulk adhesive specimens, shear tests with block shear (BS) geometry, Double-Cantilever Beam (DCB) tests, End-Notched Flexure (ENF) tests and mixed mode tests with single-lap joints (SLJ). Carrying out the aforementioned tests, the mechanical and fracture properties under tension and shear are determined.

The results were mostly in line with those provided by the manufacturer, with the exception of the BS test. The addition of glass microfibers revealed overall an increase in the stiffness and fracture properties but a reduction of the mechanical strength.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

4ENF	<i>Four-Point End-Notched Flexure</i>
ADCB	<i>Asymmetric double-cantilever beam</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BS	<i>Block Shear</i>
CBBM	<i>Compliance-Based Beam Method</i>
CBT	Corrected Beam Theory
CDCB	<i>Contoured Double-Cantilever Beam</i>
CMM	<i>Compliance Calibration Method</i>
DCB	<i>Double-Cantilever Beam</i>
ELS	<i>End-Loading Split</i>
ENF	<i>End-Notched Flexure</i>
EUA	Estados Unidos da America
FPZ	<i>Fracture Process Zone</i>
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
JSD	Juntas de sobreposição dupla
JSS	Juntas de sobreposição simples
LVDT	<i>Linear variable differential transformers</i>
MMB	<i>Mixed-mode bending</i>

MMF	<i>Mixed-mode flexure</i>
MWCMTs	<i>Multi-walled Nanotubes</i>
NTCs	Nanotubos de carbono
SBT	<i>Simple Beam Theory</i>
SLB	<i>Single-leg bending</i>
PA	Poliamida
PUR	Poliuretano
PP	Polipropileno
TAST	<i>Thick Adherend Shear Test</i>
TDCB	<i>Tapered Double-Cantilever Beam</i>

Lista de Unidades

μm	Micrómetro
kN	Kilo Newton
min	Minutos
mm	Milímetros
nm	Nanómetro
Pa	Pascal

Lista de Símbolos

%	Porcento
a	Comprimento da fenda
a_{eq}	Comprimento equivalente da fenda

b	Largura da junta
C_oV	Coefficiente de variação
dA	Variação da superfície da fenda
$d_{adesivo}$	Deslocamento do adesivo
$d_{substrato}$	Deslocamento do substrato
$d_{transdutor}$	Deslocamento do transdutor
$E; E_x$	Módulo de elasticidade longitudinal ou módulo de Young
E_p	Módulo de elasticidade do aderente
G	Módulo de elasticidade transversal ou módulo de corte, quando se refere a ensaios ao corte, e taxa de libertação da energia, quando se refere a ensaios de fratura
G_{Ic}	Taxa de libertação de energia em modo I
G_{IIc}	Taxa de libertação de energia em modo II
G_{IIIc}	Taxa de libertação de energia em modo III
h	Distancia entre extremidades do entalhe
l	Comprimento de sobreposição
l_e	Comprimento característico do extensómetro
m	Fator geométrico
M_t	Momento torsor
P	Força
phr	<i>Per hundred resin</i>
r_0	Raio interno
r_1	Raio externo

t	Espessura
γ	Deformação de corte
δ	Deslocamento
δ_{\max}	Deslocamento máximo
$\delta_{P_{\max}}$	Deslocamento na carga máxima
ϵ	Deformação
σ	Tensão
τ	Tensão de corte
τ_{med}	Tensão de corte média
ϵ_{τ}	Deformação à tração
σ_{γ}	Tensão de limite elástico
σ_{τ}	Tensão de rotura à tração
ϕ	Angulo de rotação
v_m	Deslocamento total
v_a	Deslocamento no adesivo
v_t	Deslocamento no aderente

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Disciplinas envolvidas na "ciência" da adesão [3].	10
Figura 2 - Distribuição da tensão em juntas adesivas (a), aparafusadas (b) e soldadas (c) [5].	10
Figura 3 - Estrutura <i>sandwich</i> [6].	11
Figura 4 - Forças de clivagem (a) e arrancamento (b) [8].	12
Figura 5 – Forças à tração (a) e ao corte (b) [8].	12
Figura 6 - Esforços de tração (a) e compressão (b) [1].	13
Figura 7- Distribuição de tensão de tração e compressão [1].	13
Figura 8 - Esforço de corte [1].	14
Figura 9 - Distribuição da tensão de corte [1].	14
Figura 10 - Esforços de clivagem (a) e esforços de arrancamento (b) [1].	14
Figura 11 - Distribuição das tensões de clivagem e arrancamento [1].	14
Figura 12 - Alguns tipos de juntas adesivas usadas em engenharia [1].	15
Figura 13 - Representação esquemática da flexão dos aderentes. Junta antes da deformação (a) deformação final da junta (b) [1].	16
Figura 14 - Junta de ressalto [1].	16
Figura 15 - Juntas com tira, a) tira dupla, b) tira simples [13].	16
Figura 16 - Exemplo de juntas topo a topo simples a) e com sobreposição b) [13].	17
Figura 17 - Exemplo de juntas cilíndricas [3].	17
Figura 18 - Exemplo de juntas de canto (a) e juntas em T (b) [3].	17
Figura 19 - Aplicação de adesivos na construção de carros [15].	18
Figura 20 - Aplicação de adesivos no Airbus A380 [16].	18
Figura 21 - Aplicação de adesivos em cirurgias dentárias [17].	18
Figura 22 - Provete de tração de acordo com a norma EN ISO 527-2: a) provete longo e b) provete reduzido (dimensões em mm) [18].	20
Figura 23 - Aprisionamento de ar entre o filme de adesivo e o molde: a) aprisionamento Inicial; b) deslocamento parcial e c) deslocamento completo [20].	20
Figura 24 - Placa de adesivo produzida de acordo com a norma NF T 76-142 [18].	21

Figura 25 - Vista explodida do molde de acordo com a norma NF T 76-142 [18].	21
Figura 26 - Representação esquemática de um molde utilizado para o fabrico de provetes <i>bulk</i> [18].	22
Figura 27 - Diferentes componentes no molde para produção de 6 provetes [21].	22
Figura 28 - Máquina de ensaios mecânicos <i>Shimadzu</i> [22].	23
Figura 29 - Fixadores adicionais para ensaio de provetes em adesivos frágeis [23].	23
Figura 30 - Exemplo de extensómetro mecânico (a) e ótico (b) [24, 25].	24
Figura 31 – Influência da velocidade de ensaio na curva tensão-deformação de um provete de adesivo dúctil [28].	24
Figura 32 - Curva σ - ϵ típica de um adesivo [18].	25
Figura 33 - Métodos para determinação da σ_y [18].	25
Figura 34 - Provetes maciços em torção: provete sólido (a) e provete tubular (b) [11].	26
Figura 35 - Provetes <i>losipescu</i> : provete maciço (a) e em junta adesiva (b) [18, 30].	27
Figura 36 - Ensaio <i>losipescu</i> [31].	27
Figura 37 - Provete <i>arcan</i> (dimensões em mm) [11].	28
Figura 38 - Ensaio de <i>arcan</i> : a) vista explodida do dispositivo de ensaio e b) fixação [11, 18].	28
Figura 39 - Exemplo de uma junta topo a topo com substratos cilíndricos [11].	29
Figura 40 - Junta provete sólido (a) e junta provete tubular (<i>Napkin ring test</i>) (b) [11].	30
Figura 41 - Deslocamentos medido na superfície dos cilindros [3].	31
Figura 42 - Geometria dos provetes TAST de acordo com a norma ISO 11003-2 (dimensões em mm) [18].	31
Figura 43 - Extensómetro LVDT utilizado no ensaio TAST (segundo ISO 11003-3) [11].	32
Figura 44 - <i>Gabarit</i> para produzir provetes TAST [18].	32
Figura 45 – Lâminas para controlar a sobreposição e o filete do adesivo [18].	33
Figura 46 - Medição dos deslocamentos no ensaio TAST [3].	34
Figura 47 - Representação esquemática de uma JSS [36].	34
Figura 48 - Dimensões em mm de uma JSS segundo a norma ASTM D1002 [3].	35
Figura 49 - Modos de rotura em juntas adesivas: a) modo I e b) modo II [37].	35
Figura 50 - Provete DCB a) e provete TDCB b) de acordo com a norma ASTM D3433-99[39].	36
Figura 51 - Representação esquemática do ensaio ENF (a) e 4ENF (b) [44].	38
Figura 52 - Representação esquemática do ensaio ELS [18].	39

Figura 53 - Representação esquemática do ensaio ADCB [50].	41
Figura 54 - Representação esquemática do ensaio MMF [51].	41
Figura 55 - Representação esquemática do ensaio MMB [18].	42
Figura 56 - Análise das cargas sobrepostas no ensaio MMB [54].	43
Figura 57 - Representação esquemática de um adesivo com partículas metálicas [11].	44
Figura 58 - Representação esquemática do crescimento de uma fenda num adesivo sem reforço (a) ou com reforço (b) [2].	45
Figura 59 - Adesivo SikaForce®-840 L07.	54
Figura 60 - Fibras de vidro MF 7980 [79].	56
Figura 61 - Preparação adesivo reforçado.	58
Figura 62 - Dimensões dos provetes maciços de adesivo de acordo com a norma NF T 76-142 (dimensões em mm).	58
Figura 63 - Molde para fabrico dos provetes de adesivo maciço.	59
Figura 64 - Loctite Frekote® 770-NC.	59
Figura 65 - Aplicação de desmoldante no molde.	60
Figura 66 - Aplicação do adesivo através do bico de mistura dos cartuchos.	60
Figura 67 - Pesagem da mistura do adesivo.	61
Figura 68 - Aplicação do adesivo com auxílio de uma espátula.	61
Figura 69 - Molde após aperto.	62
Figura 70 - Molde com os provetes após cura.	62
Figura 71 - Provetes maciços com uma concentração de fibras de 0 phr.	63
Figura 72 - Aplicação do extensómetro num provete de adesivo maciço.	63
Figura 73 - <i>Setup</i> do ensaio de tração dos provetes de adesivo maciço: a) com extensómetro e b) após remoção do extensómetro.	64
Figura 74 - Curvas $P-\delta$ dos provetes maciços com 0 phr de concentração de fibras.	67
Figura 75 - Curvas $P-\delta$ dos provetes maciços com 15 phr de concentração de fibras.	68
Figura 76 - Curvas $P-\delta$ dos provetes maciços com 35 phr de concentração de fibras.	68
Figura 77 - Curvas $P-\delta$ dos provetes maciços com 55 phr de concentração de fibras.	68
Figura 78 - Curvas $\sigma-\varepsilon$ dos provetes maciços com 0 phr de concentração de fibras.	69
Figura 79 - Curvas $\sigma-\varepsilon$ dos provetes maciços com 15 phr de concentração de fibras.	69
Figura 80 - Curvas $\sigma-\varepsilon$ dos provetes maciços com 35 phr de concentração de fibras.	69

Figura 81 - Curvas σ - ε dos provetes maciços com 55 phr de concentração de fibras.	70
Figura 82 - Curva σ - ε do provete P1_15 phr com tangente à zona elástica.....	70
Figura 83 - Rotura dos provetes maciços: a) com 0 phr de concentração de fibras e b) com 15 phr de concentração de fibras.	71
Figura 84 - Rotura dos provetes maciços: a) com 35 phr de concentração de fibras e b) com 55 phr de concentração de fibras.	71
Figura 85 - Evolução da força máxima de acordo com a concentração de fibras no ensaio ao adesivo maciço.....	74
Figura 86 - Evolução da tensão máxima de acordo com a concentração de fibras no ensaio ao adesivo maciço.....	74
Figura 87 - Evolução do módulo de Young de acordo com a concentração de fibras no ensaio ao adesivo maciço.....	74
Figura 88 - Evolução do deslocamento de acordo com a concentração de fibras no ensaio ao adesivo maciço.....	75
Figura 89 - Evolução do alongamento de acordo com a concentração de fibras no ensaio ao adesivo maciço.....	75
Figura 90 - Evolução da tensão de cedência de acordo com a concentração de fibras no ensaio ao adesivo maciço.....	75
Figura 91 - Dimensões do provete BS utilizado.....	76
Figura 92 - Corte de camadas de pré-impregnado.....	77
Figura 93 - Aplicação de calor nas camadas de pré-impregnado.....	77
Figura 94 - Placa posicionada na prensa de pratos quentes.....	78
Figura 95 - Máquina de corte.....	78
Figura 96 - Lixa para preparação dos provetes.....	79
Figura 97 - Junta pressionada por ação de uma mola.....	80
Figura 98 - Remoção do excesso de adesivo de um provete.....	80
Figura 99 - Ferramenta utilizada para o ensaio BS: a) sem provete, b) com provete.....	81
Figura 100 - Curvas P - δ do ensaio BS com 0 phr de concentração de fibras.....	84
Figura 101 - Curvas P - δ do ensaio BS com 15 phr de concentração de fibras.....	84
Figura 102 - Curvas P - δ do ensaio BS com 35 phr de concentração de fibras.....	84
Figura 103 - Curvas P - δ do ensaio BS com 55 phr de concentração de fibras.....	85
Figura 104 - Curvas τ - γ do ensaio BS com 0 phr de concentração de fibras.....	85

Figura 105 - Curvas τ - γ do ensaio BS com 15 phr de concentração de fibras.	85
Figura 106 - Curvas τ - γ do ensaio BS com 35 phr de concentração de fibras.	86
Figura 107 - Curvas τ - γ do ensaio BS com 55 phr de concentração de fibras.	86
Figura 108 - Curva τ - γ do provete P2_35 phr com tangente à zona elástica	87
Figura 109 - Rotura dos provetes BS com 0 phr de concentração de fibras.	87
Figura 110 - Rotura dos provetes BS com 15 phr de concentração de fibras.	87
Figura 111 - Rotura dos provetes BS com 35 phr de concentração de fibras.	88
Figura 112 - Rotura dos provetes BS com 55 phr de concentração de fibras.	88
Figura 113 - Evolução da força máxima de acordo com a concentração de fibras no ensaio BS.	90
Figura 114 - Evolução da tensão máxima de corte de acordo com a concentração de fibras no ensaio BS.	91
Figura 115 - Evolução da deformação máxima de corte de acordo com a concentração de fibras no ensaio BS.	91
Figura 116 - Evolução do módulo de corte de acordo com a concentração de fibras no ensaio BS.	91
Figura 117 - Evolução da tensão de limite elástico de acordo com a concentração de fibras no ensaio BS.	92
Figura 118 - Esquema do provete DCB.	93
Figura 119 - Calços para criar pré-fenda inicial.	93
Figura 120 - Aplicação de desmoldante nos calços.	94
Figura 121 - Substratos DCB com calços.	94
Figura 122 - Aplicação do adesivo com bico de mistura no provete.	95
Figura 123 - Provetes DCB com molas para aplicar pressão durante a cura.	95
Figura 124 - Provede DCB com escala milimétrica colada na lateral.	96
Figura 125 - Amarração do provete DCB na máquina de ensaios.	99
Figura 126 - Registo fotográfico durante o ensaio DCB momentos antes da rotura.	100
Figura 127 - Esquema simplificado do circuito do <i>Arduíno</i>	100
Figura 128 - <i>Setup</i> usando o <i>Arduíno</i>	101
Figura 129 - Curvas P - δ do ensaio DCB com 0 phr de concentração de fibras.	101
Figura 130 - Curvas P - δ do ensaio DCB com 15 phr de concentração de fibras.	102
Figura 131 - Curvas P - δ do ensaio DCB com 35 phr de concentração de fibras.	102
Figura 132 - Curvas P - δ do ensaio DCB com 55 phr de concentração de fibras.	102

Figura 133 - Curvas R obtidas pelo ensaio DCB para o provete P2 com 0 phr de concentração de fibras de vidro, através dos métodos CCM, CBT e CBBM.	103
Figura 134 - Curvas R obtidas pelo ensaio DCB para o provete P3 com 15 phr de concentração de fibras de vidro, através dos métodos CCM, CBT e CBBM.	103
Figura 135 - Curvas R obtidas pelo ensaio DCB para o provete P1 com 35 phr de concentração de fibras de vidro, através dos métodos CCM, CBT e CBBM.	104
Figura 136 - Curvas R obtidas pelo ensaio DCB para o provete P2 com 55 phr de concentração de fibras de vidro, através dos métodos CCM, CBT e CBBM.	104
Figura 137 - Rotura dos provetes DCB com 0 phr de concentração de fibras.	105
Figura 138 - Rotura dos provetes DCB com 15 phr de concentração de fibras.	105
Figura 139 - Rotura dos provetes DCB com 35 phr de concentração de fibras.	106
Figura 140 - Rotura dos provetes DCB com 55 phr de concentração de fibras.	106
Figura 141 - Gráfico comparativo dos métodos CCM, CBT e CBBM no ensaio DCB.	108
Figura 142 - Provete ENF com grampos para aplicação de pressão durante a cura.	110
Figura 143 - Marcação de um dos pontos no provete ENF.	110
Figura 144 - Ensaio ENF: a) <i>Setup</i> de ensaio e b) ferramenta utilizada.	113
Figura 145 - Registo fotográfico durante o ensaio ENF.	113
Figura 146 - Folhas de Teflon® entre os substratos ENF.	114
Figura 147 - Curvas P - δ do ensaio ENF com 0 phr de concentração de fibras.	115
Figura 148 - Curvas P - δ do ensaio ENF com 15 phr de concentração de fibras.	115
Figura 149 - Curvas P - δ do ensaio ENF com 35 phr de concentração de fibras.	115
Figura 150 - Curvas P - δ do ensaio ENF com 55 phr de concentração de fibras.	116
Figura 151 - Curvas R obtidas pelo ensaio ENF para o provete P1 com 0 phr de concentração de fibras de vidro, através dos métodos CCM, DBT, CBT e CBBM.	116
Figura 152 - Curvas R obtidas pelo ensaio ENF para o provete P1 com 15 phr de concentração de fibras de vidro, através dos métodos CCM, DBT, CBT e CBBM.	116
Figura 153 - Curvas R obtidas pelo ensaio ENF para o provete P1 com 35 phr de concentração de fibras de vidro, através dos métodos CCM, DBT, CBT e CBBM.	117
Figura 154 - Curvas R obtidas pelo ensaio ENF para o provete P1 com 55 phr de concentração de fibras de vidro, através dos métodos CCM, DBT, CBT e CBBM.	117
Figura 155 - Rotura dos provetes ENF com: a) 0 phr de concentração de fibras e b) 15 phr de concentração de fibras.	118

Figura 156 - Rotura dos provetes ENF com: a) 35 phr de concentração de fibras e b) 55 phr de concentração de fibras.	118
Figura 157 - Gráfico comparativo dos métodos CCM, DBT, CBT e CBBM no ensaio ENF.	121
Figura 158 - Dimensões do provete JSS utilizadas.	121
Figura 159 - Junta de sobreposição simples pressionada por ação de um grampo.	122
Figura 160 - <i>Setup</i> de ensaio JSS.	123
Figura 161 - Curvas $P-\delta$ do ensaio JSS com 0 phr de concentração de fibras.	125
Figura 162 - Curvas $P-\delta$ do ensaio JSS com 15 phr de concentração de fibras.	125
Figura 163 - Curvas $P-\delta$ do ensaio JSS com 35 phr de concentração de fibras.	126
Figura 164 - Curvas $P-\delta$ do ensaio JSS com 55 phr de concentração de fibras.	126
Figura 165 - Rotura dos provetes JSS: a) com 0 phr de concentração de fibras e b) com 15 phr de concentração de fibras.	127
Figura 166 - Rotura dos provetes JSS: a) com 35 phr de concentração de fibras e b) com 55 phr de concentração de fibras.	127
Figura 167 - Evolução da força máxima de acordo com a concentração de fibras no ensaio JSS.	130
Figura 168 - Evolução da tensão máxima de acordo com a concentração de fibras no ensaio JSS.	130
Figura 169 - Evolução do deslocamento máximo de acordo com a concentração de fibras no ensaio JSS.	130
Figura 170 - Evolução do deslocamento na carga máxima de acordo com a concentração de fibras no ensaio JSS.	131

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 -Melhoria associada às partículas/fibra adicionadas nos adesivos [23, 55].	44
Tabela 2 – Principais propriedades da fibra de vidro e da fibra de carbono [56, 64]	46
Tabela 3 - Casos de estudo de adesivos reforçados com fibras.	48
Tabela 4 - Casos de estudo de adesivos reforçados com cortiça.	49
Tabela 5 - Casos de estudo de adesivos reforçados com nanotubos.	50
Tabela 6 - Propriedades elásticas ortotrópicas do compósito reforçado com fibras de carbono, com as fibras alinhadas unidireccionalmente na direção 1 (a direção 2 corresponde à direção transversa e a direção 3 à direção fora do plano) [77].	53
Tabela 7 - Características técnicas do adesivo SikaForce®-840 L07 [78]	55
Tabela 8 - Principais características da fibra de vidro MF 7980 [79]	56
Tabela 9 - Dimensões dos provetes maciços com uma concentração de fibras de 0 phr.	65
Tabela 10 - Dimensões dos provetes maciços com uma concentração de fibras de 15 phr.	65
Tabela 11 - Dimensões dos provetes maciços com uma concentração de fibras de 35 phr.	66
Tabela 12 - Dimensões dos provetes maciços com uma concentração de fibras de 55 phr.	66
Tabela 13 - Propriedades mecânicas obtidas à tração de um provete maciço com 0 phr de fibras de vidro.	72
Tabela 14 - Propriedades mecânicas obtidas à tração de um provete maciço com 15 phr de fibras de vidro.	72
Tabela 15 - Propriedades mecânicas obtidas à tração de um provete maciço com 35 phr de fibras de vidro.	73
Tabela 16 - Propriedades mecânicas obtidas à tração de um provete maciço com 55 phr de fibras de vidro.	73
Tabela 17 - Ciclo aplicado à placa na prensa de pratos quentes.	78
Tabela 18 - Dimensões dos provetes BS com uma concentração de fibras de 0 phr.	81
Tabela 19 - Dimensões dos provetes BS com uma concentração de fibras de 15 phr.	82
Tabela 20 - Dimensões dos provetes BS com uma concentração de fibras de 35 phr.	82
Tabela 21 - Dimensões dos provetes BS com uma concentração de fibras de 55 phr.	82

Tabela 22 - Propriedades mecânicas obtidas ao corte para os provetes BS com 0 phr de fibras de vidro.	89
Tabela 23 - Propriedades mecânicas obtidas ao corte para os provetes BS com 15 phr de fibras de vidro.	89
Tabela 24 - Propriedades mecânicas obtidas ao corte para os provetes BS com 35 phr de fibras de vidro.	89
Tabela 25 - Propriedades mecânicas obtidas ao corte para os provetes BS com 55 phr de fibras de vidro.	90
Tabela 26 - Dimensões teóricas dos provetes DCB em mm	92
Tabela 27 - Dimensões dos provetes DCB com uma concentração de fibras de 0 phr.	97
Tabela 28 - Dimensões dos provetes DCB com uma concentração de fibras de 15 phr.	97
Tabela 29 - Dimensões dos provetes DCB com uma concentração de fibras de 35 phr.	98
Tabela 30 - Dimensões dos provetes DCB com uma concentração de fibras de 55 phr.	98
Tabela 31 - Valores de G_{Ic} obtidos pelos métodos CCM, CBT e CBBM.	107
Tabela 32 - Valores médios de G_{Ic} obtidos pelos métodos CCM, CBT e CBBM	107
Tabela 33 - Dimensões teóricas dos provetes ENF em mm	109
Tabela 34 - Dimensões dos provetes ENF com uma concentração de fibras de 0 phr.....	111
Tabela 35 - Dimensões dos provetes ENF com uma concentração de fibras de 15 phr.....	111
Tabela 36 - Dimensões dos provetes ENF com uma concentração de fibras de 35 phr.....	112
Tabela 37 - Dimensões dos provetes ENF com uma concentração de fibras de 55 phr.....	112
Tabela 38 - Propriedades de fratura ao corte para os provetes ENF com 0 phr concentração de fibras de vidro.	119
Tabela 39 - Propriedades de fratura ao corte para os provetes ENF com 15 phr concentração de fibras de vidro.	119
Tabela 40 - Propriedades de fratura ao corte para os provetes ENF com 35 phr concentração de fibras de vidro.	119
Tabela 41 - Propriedades de fratura ao corte para os provetes ENF com 55 phr concentração de fibras de vidro.	120
Tabela 42 - Valores médios de G_{IIc} , obtidos pelos métodos CCM, DBT, CBT e CBBM.	120
Tabela 43 -Dimensões dos provetes JSS com uma concentração de fibras de 0 phr.	123
Tabela 44 - Dimensões dos provetes JSS com uma concentração de fibras de 15 phr.	124
Tabela 45 - Dimensões dos provetes JSS com uma concentração de fibras de 35 phr.	124

Tabela 46 - Dimensões dos provetes JSS com uma concentração de fibras de 55 phr	124
Tabela 47 - Propriedades mecânicas obtidas em modo misto para os provetes JSS com 0 phr concentração fibras.	128
Tabela 48 - Propriedades mecânicas obtidas em modo misto para os provetes JSS com 15 phr concentração fibras.	128
Tabela 49 - Propriedades mecânicas obtidas em modo misto para os provetes JSS com 35 phr concentração fibras.	129
Tabela 50 - Propriedades mecânicas obtidas em modo misto para os provetes JSS com 55 phr concentração fibras.	129

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Contextualização	3
1.2	Objetivos	4
1.3	Estrutura da dissertação	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1	Ligações adesivas	9
2.1.1	Considerações gerais.....	9
2.1.2	Esforços	12
2.1.3	Configurações de junta.....	15
2.1.4	Aplicações.....	17
2.2	Ensaio de adesivos.....	19
2.2.1	Propriedades mecânicas	19
2.2.1.1	Provetes de adesivo maciço (Bulk)	19
2.2.1.1.1	Ensaio à tração	19
2.2.1.1.2	Ensaio ao corte	25
2.2.1.2	Juntas adesivas	29
2.2.1.2.1	Ensaio à tração	29
2.2.1.2.2	Ensaio ao corte	29
2.2.2	Propriedades de fratura	35
2.2.2.1	Fratura à tração	36
2.2.2.2	Fratura ao corte	38
2.2.2.3	Fratura em modo-misto.....	40
2.3	Modificação de adesivos.....	43
2.3.1	Aditivação por partículas.....	45

2.3.1.1	Partículas minerais.....	45
2.3.1.2	Partículas orgânicas	46
2.3.2	Aditivação por microfibras	46
2.3.3	Outros aditivos	47
2.4	Casos de estudo	47
2.4.1	Fibras	47
2.4.2	Cortiça	49
2.4.3	Nanotubos de carbono.....	49
3	DESENVOLVIMENTO	53
3.1	Materiais utilizados	53
3.1.1	Aderentes	53
3.1.2	Adesivo	54
3.1.3	Fibras de vidro de reforço	56
3.1.4	Preparação do adesivo reforçado	56
3.2	Ensaio mecânico à tração.....	58
3.2.1	Definição do ensaio	58
3.2.2	Fabrico e ensaio dos provetes.....	58
3.2.2.1	Fabrico dos provetes.....	58
3.2.2.2	Ensaio dos provetes	63
3.2.3	Resultados	67
3.2.3.1	Curvas P- δ e σ - ϵ	67
3.2.3.2	Modos de rotura	70
3.2.3.3	Propriedades mecânicas à tração	72
3.3	Ensaio mecânico ao corte	76
3.3.1	Definição dos ensaios	76
3.3.2	Fabrico e ensaio dos provetes.....	76
3.3.2.1	Fabrico e preparação dos substratos.....	76
3.3.2.2	Fabrico e ensaio dos provetes BS	79

3.3.3	Resultados	83
3.3.3.1	Curvas $P-\delta$ e $\tau-\gamma$	83
3.3.3.2	Modos de rotura.....	87
3.3.3.3	Propriedades mecânicas ao corte.....	88
3.4	Ensaio de fratura à tração	92
3.4.1	Definição do ensaio	92
3.4.2	Fabrico e ensaio dos provetes.....	92
3.4.3	Resultados.....	101
3.4.3.1	Curvas $P-\delta$ e R	101
3.4.3.2	Modos de rotura.....	104
3.4.3.3	Propriedades de fratura à tração.....	107
3.5	Ensaio de fratura ao corte	108
3.5.1	Definição do ensaio	109
3.5.2	Fabrico e ensaio dos provetes.....	109
3.5.3	Resultados.....	114
3.5.3.1	Curvas $P-\delta$ e R	114
3.5.3.2	Modos de rotura.....	117
3.5.3.3	Propriedades de fratura ao corte	119
3.6	Ensaio em modo misto	121
3.6.1	Definição do ensaio	121
3.6.2	Fabrico e ensaio dos provetes.....	121
3.6.3	Resultados.....	125
3.6.3.1	Curvas $P-\delta$	125
3.6.3.2	Modos de rotura.....	126
3.6.3.3	Propriedades em modo misto	128
3.7	Discussão dos resultados obtidos	131
3.7.1	Ensaio à tração.....	131
3.7.2	Ensaio ao corte	132
3.7.3	Ensaio DCB.....	133

3.7.4	Ensaio ENF	134
3.7.5	Ensaio em modo misto	135
3.8	Comparação com dados da literatura	136
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	141
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO	147

INTRODUÇÃO

- 1.1 Contextualização
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Estrutura da dissertação

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A crescente utilização de ligações adesivas como forma alternativa às ligações mecânicas comuns tem vindo a ser cada vez mais desenvolvida nos últimos anos devido à necessidade constante de combinar resistência com leveza, e ainda elevar o tempo de vida das estruturas, contribuindo para isso a elevada resistência à fadiga inerente a esta tecnologia. As ligações adesivas tornam-se uma solução viável quando se pretende ligar diferentes materiais sem ligação, e ainda previne a corrosão galvânica que sucede nas ligações entre dois materiais metálicos diferentes. Atualmente, esta é uma técnica de ligação bastante utilizada na indústria aeronáutica e automóvel. No entanto, esta técnica ainda não está tão desenvolvida como outras técnicas de ligação como a soldada, a rebitada ou as ligações aparafusadas.

Torna-se desta forma importante estudar as configurações geométricas das juntas adesivas de modo a conceber a melhor alternativa e obter maior resistência e durabilidade das estruturas ligadas com adesivos. As ligações adesivas podem estar sujeitas a quatro modos elementares de carregamento, que passam pela tração, corte, arrancamento e clivagem. Na prática, pode ser encontrada qualquer combinação ou variação destes modos, pelo que é importante conhecer as propriedades respetivas dos adesivos.

Atualmente, a cadência de criação e desenvolvimento de novos adesivos e técnicas têm sido elevadas, criando uma carência na caracterização dos mesmos, o que leva a que muitos adesivos recentes no mercado possam não vir a ser tidos em conta como alternativa viável a outros adesivos já conhecidos. Quanto maior o número de adesivos caracterizados, maior o leque de escolhas possíveis.

Um método comum para melhorar as propriedades das juntas é a modificação de adesivos com partículas de reforço ou microfibras. Esta modificação permite alterar as propriedades da junta e assim providenciar uma melhoria na propriedade desejada para a aplicação. A modificação do adesivo pode melhorar as propriedades estruturais, de resistência à corrosão, cor entre outras, dependendo da partícula ou microfibra utilizada.

A motivação deste trabalho passa pela caracterização de um adesivo recentemente lançado no mercado e análise da influência da adição de microfibras como reforço do

adesivo. Com a informação recolhida, passa a ser possível a previsão de resistência de juntas com este adesivo por técnicas analíticas e numéricas, com todas as vantagens daí provenientes.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal a caracterização das propriedades mecânicas e de fratura de um adesivo recentemente lançado no mercado e estudar o efeito da adição do reforço de microfibras de vidro em diferentes concentrações na mistura, para facilitar a previsão da resistência de estruturas adesivas ligadas com a mistura estudada. Para este efeito são realizados ensaios de tração, corte, de fratura em modo I e em modo II e ensaios em modo misto, com o objetivo de determinar o efeito do aumento da concentração de microfibras de vidro nas propriedades do adesivo.

Para a concretização deste objetivo, é necessária a conceção de amostras apropriadas para a realização dos ensaios mencionados, utilizando provetes de adesivo maciço para determinação das propriedades mecânicas à tração, provetes *block shear* (BS) para determinação das propriedades mecânicas ao corte, provetes *Double-Cantilever Beam* (DCB) e *End-Notched Flexure* (ENF), para determinação das propriedades de fratura em modo I (tração) e em modo II (corte), respetivamente. De forma a determinar a tenacidade à fratura ou taxa crítica de libertação de energia de deformação à tração (G_{Ic}) e corte (G_{IIc}) utilizaram-se métodos que requerem a medição do comprimento de fenda e métodos baseados num comprimento de fenda equivalente. Para determinar as propriedades em modo misto utilizaram-se provetes de junta de sobreposição simples (JSS).

1.3 Estrutura da dissertação

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

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

Capítulo 2 – É realizada uma revisão bibliográfica ou estado da arte sobre adesivos, sendo abordadas e dando a conhecer as vantagens e desvantagens, configurações de junta e esforços a que podem ser sujeitas, tipos de ensaios utilizados para determinação de propriedades dos adesivos, metodologias utilizadas para obtenção das mesmas, e estado de arte.

Capítulo 3 – É apresentado todo o desenvolvimento do trabalho realizado, envolvendo as primeiras abordagens ao adesivo selecionado, produção dos provetes, descrição e

realização dos ensaios realizados, análise dos resultados obtidos, e comparação com elementos bibliográficos.

Capítulo 4 – São apresentadas as conclusões relevantes deste trabalho, apresentadas propriedades e resultados obtidos, e dadas sugestões de trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 Ligações adesivas
- 2.2 Ensaio de adesivos
- 2.3 Modificação de adesivos
- 2.4 Casos de estudo

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ligações adesivas

A união realizada através do uso de um adesivo é denominada por junta colada, junta adesiva ou ligação adesiva. Os componentes estruturais ligados entre si através do adesivo são chamados de substrato ou aderente [1].

A evolução crescente na tecnologia de juntas adesivas permite ultrapassar muitos problemas associados às técnicas de ligação tradicionais (parafusos, rebites, soldadura, entre outros). As ligações adesivas podem contribuir para a modernização dos métodos de produção usados. As ligações adesivas são especialmente indicadas para estabelecer a ligação entre materiais não soldáveis, reduzindo as possibilidades de problemas de fadiga e corrosão comparativamente às juntas soldadas ou rebitadas [2].

As juntas adesivas correspondem também ao método preferencial para a ligação de materiais compósitos pois possibilitam uma boa distribuição de carga sobre uma superfície maior, o que origina uma menor concentração de tensões e resulta num melhor desempenho da ligação. De facto, os compósitos e os adesivos são duas tecnologias que usadas em comum possibilitam uma redução do peso dos componentes em que são utilizadas [3].

2.1.1 Considerações gerais

A ciência e tecnologia das juntas adesivas é uma área verdadeiramente pluridisciplinar. A Figura 1 ilustra as várias disciplinas que podem ser relevantes para a ciência da adesão. As ciências principais de física, mecânica e química sobrepõem-se em certas áreas para formar as disciplinas de ciência das superfícies, materiais poliméricos e projeto da junta, que são todas importantes na ciência da adesão. Estas disciplinas contêm ramos mais específicos como a reologia de polímeros e mecânica da fratura que são também muito revelantes. Cada uma destas matérias contribui significativamente para a ciência da adesão e para a sua aplicação em produtos industriais. A sobreposição de todas estas disciplinas poderia ser referida como a ciência necessária para aplicar os adesivos com sucesso, sendo de salientar que a componente de gestão e economia são igualmente importantes [3].



Figura 1 - Disciplinas envolvidas na "ciência" da adesão [3].

Como referido no início do capítulo, as ligações adesivas são muito utilizadas na ligação de materiais não soldáveis e compósitos. As principais vantagens das juntas adesivas são [1, 3, 4]:

- Distribuição mais uniforme das tensões ao longo da área ligada, permitindo uma maior rigidez e transmissão de carga, proporcionando assim uma redução de peso e menor custo. A Figura 2 compara as distribuições de tensão teórica numa junta aparafusada, soldada e adesiva. A distribuição de tensão mais uniforme verifica-se na junta adesiva, o que conduz a uma maior resistência à fadiga;

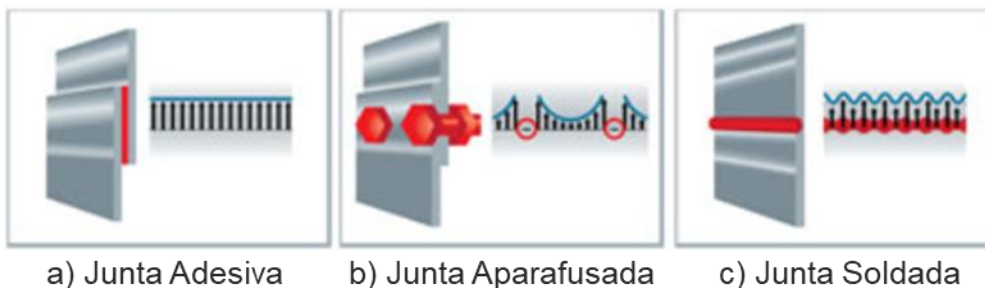


Figura 2 - Distribuição da tensão em juntas adesivas (a), aparafusadas (b) e soldadas (c) [5].

- A sua natureza viscoelástica promove o amortecimento de vibrações, o que permite a absorção parcial das tensões, e melhora a resistência à fadiga dos componentes ligados;
- Ligação de materiais com diferentes composições e coeficiente de expansão distintos;
- Eficiente ligação de chapas, podendo contribuir para uma aplicação importante dos adesivos para ligar materiais metálicos e não metálicos;
- Representa um dos métodos mais convenientes e efetivo de ligar dois materiais, uma vez que pode ser automatizado, o que permite o aumento de produtividade e redução de custos de mão de obra. A mistura e aplicação do adesivo podem ser realizadas por um *robot*;

- Permite projetos mais flexíveis possibilitando o uso de novos conceitos e materiais. Um exemplo são as estruturas em ninho de abelha (Figura 3) onde o núcleo é colado a duas peles de metal ou compósito, resultando numa excelente rigidez específica;

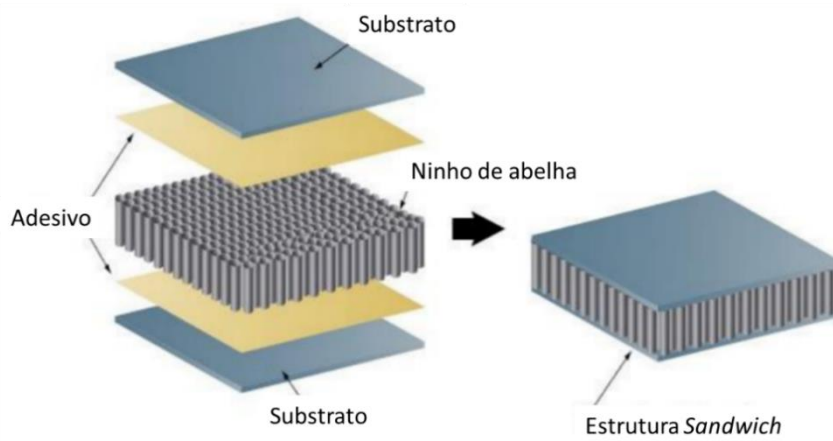


Figura 3 - Estrutura *sandwich* [6].

- Evita furos (rebites, parafusos) e marcas de soldadura o que possibilita ter estruturas com contornos regulares;
- Cria um contacto contínuo entre estruturas ligadas;
- Redução de custos, uma vez que projetos que envolvem ligações adesivas tendem a ser mais ligeiros e mais económicos;
- Capacidade de vedação e de isolamento térmico;
- Prevenção contra a corrosão ao evitar o contacto entre metais diferentes;
- Ligação de matérias com superfícies irregulares, o que produz uma montagem com pouca ou nenhuma alteração dimensional e geométrica;
- Permite ligações sem alterações estruturais dos materiais a ligar;
- Economia no número de peças e no peso.

No entanto, assim como outras tecnologias de ligação, também existem desvantagem associadas a este método de ligação. As principais desvantagens das ligações adesivas são as seguintes [1, 4, 7]:

- Necessidade de um projeto da ligação que elimine ao máximo as forças de arrancamento (principal inimigo das ligações), clivagem e impacto. Quando um dos dois materiais não é rígido a ligação pode estar sujeita a forças de arrancamento. Por outro lado, quando os dois materiais são rígidos a ligação pode estar sujeita a forças de clivagem (Figura 4);

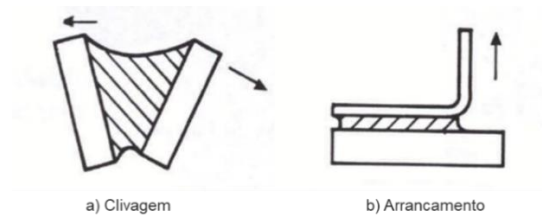


Figura 4 - Forças de clivagem (a) e arrancamento (b) [8].

- Importância do uso de geometrias que evitem as tensões localizadas e garantam uma distribuição uniforme de tensões. A melhor solução é conceber uma ligação em que o adesivo esteja sujeito maioritariamente a tensões de corte (Figura 5);

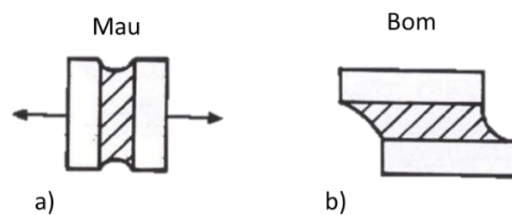


Figura 5 – Forças à tração (a) e ao corte (b) [8].

- Os adesivos apresentam uma resistência limitada em condições extremas tais como o calor e a humidade;
- Normalmente a ligação não é realizada instantaneamente, o que leva à necessidade de utilização de ferramentas de fixação;
- É necessária uma cuidada preparação das superfícies (abrasão mecânica, desengorduramento com solventes, ataque químico, primários, entre outros) para que se consigam bons resultados;
- A cura dos adesivos é geralmente a elevadas temperaturas (forno, prensa, entre outros);
- Difícil inspeção para verificação da qualidade da junta;
- Problemas de saúde associados à toxicidade e de segurança inerentes à inflamabilidade da maioria dos adesivos.

2.1.2 Esforços

As ligações podem estar sujeitas a diversos tipos de esforços, pelo que é importante estudos de modo a aumentar a resistência da junta. Os tipos de esforços que podem estar presentes numa ligação adesiva são:

- Tração / Compressão;
- Corte;
- Clivagem;
- Arrancamento.

Esforços de tração e compressão [1, 3]

Quando as forças atuam perpendicularmente ao plano da junta desenvolvem-se esforços de tração (Figura 6 – a) ou de compressão (Figura 6 – b), devendo estes manter-se alinhados para que o adesivo permaneça em tração ou compressão pura respetivamente, criando uma distribuição de tensões normais uniformes através do comprimento da ligação (Figura 7). As juntas devem ser projetadas de forma a ter os substratos paralelos e forças normais. Contudo, a espessura do adesivo é difícil de controlar e as forças raramente são rigorosamente axiais, originando tensões indesejáveis de clivagem ou arrancamento (explicado posteriormente). Quando as juntas estão sujeitas essencialmente a esforços de tração, estas devem ser projetadas com guias para um carregamento axial contínuo.

A rotura de uma junta adesiva, quando exposta à compressão, apenas ocorre se a distribuição de tensões não for uniforme. Por este motivo, uma junta somente à compressão pura praticamente não precisa de adesivo.

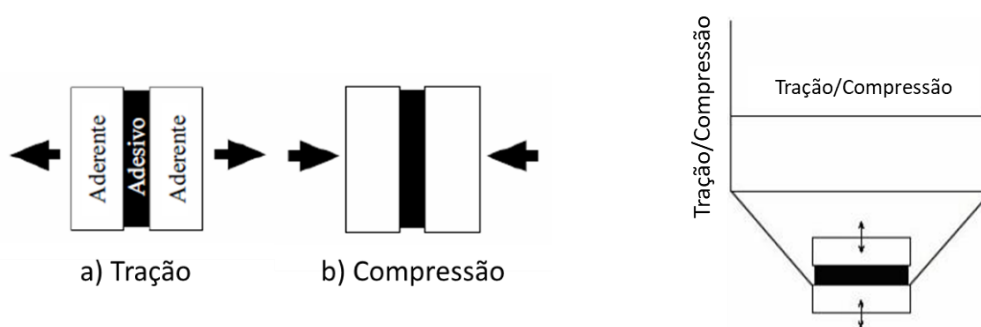


Figura 6 - Esforços de tração (a) e compressão (b) [1].

Figura 7- Distribuição de tensão de tração e compressão [1].

Esforços de corte [1, 3, 9]

Quando as forças atuam no plano do adesivo e tendem a separar os substratos aparecem os esforços de corte (Figura 8). Quando solicitadas ao corte, as juntas são normalmente mais resistentes, porque toda a área colada contribui e é realmente mais fácil manter os substratos alinhados. Numa junta de sobreposição simples as tensões são obtidas dividindo simplesmente a força aplicada pela área colada. De notar que a maior parte da tensão está localizada nos extremos da sobreposição (Figura 9), enquanto a região central da sobreposição pouco contribui para a sustentação da carga. Este resultado deve-se à deformação diferencial entre os substratos ao longo do comprimento de sobreposição, uma vez que a deformação longitudinal do substrato ocorre a uma taxa crescente desde a sua extremidade até à extremidade oposta de sobreposição.

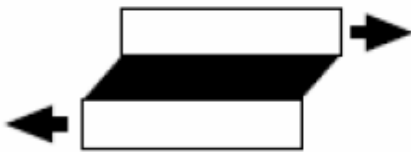


Figura 8 - Esforço de corte [1].

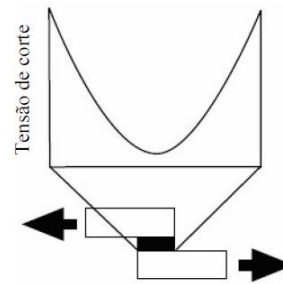


Figura 9 - Distribuição da tensão de corte [1].

Esforços de clivagem [1, 3]

Os esforços de clivagem ocorrem quando as forças na extremidade de uma junta rígida atuam de modo a separar os substratos (Figura 10 - a). Nestes casos existe uma forte concentração de tensões na extremidade da junta onde o esforço de clivagem é aplicado (Figura 11). O adesivo que está na outra extremidade pouco contribui para a resistência da junta.

Esforços de arrancamento [1, 3]

Os esforços de arrancamento são bastante idênticos aos esforços de clivagem. No entanto, dizem respeito ao caso onde um ou ambos os substratos são flexíveis (Figura 10 - b), o que leva à concentração de tensões numa zona muito mais localizada numa das extremidades da ligação (Figura 11). Consequentemente, o ângulo de separação pode ser maior para o arrancamento do que para a clivagem.

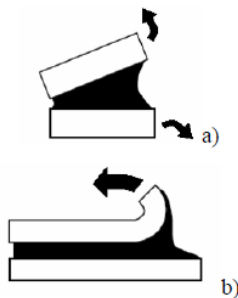


Figura 10 - Esforços de clivagem (a) e esforços de arrancamento (b) [1].

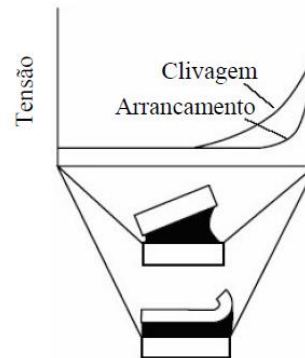


Figura 11 - Distribuição das tensões de clivagem e arrancamento [1].

Os adesivos frágeis e rígidos são particularmente sensíveis às forças de arrancamento. Por outro lado, os adesivos mais dúcteis e flexíveis permitem uma distribuição de tensões mais uniforme e uma maior resistência. Os esforços de clivagem e arrancamento devem, sempre que possível, ser evitados em juntas adesivas, devendo utilizar-se configurações que suportem maioritariamente esforços de corte.

2.1.3 Configurações de junta

Geralmente evita-se o uso de adesivos em tração direta. Sobrepor ou usar juntas de chanfro aumenta significativamente a área de ligação. Portanto, a capacidade de carga aumenta também significativamente [10]. Numa configuração de junta ideal o adesivo deve ser solicitado maioritariamente ao corte e a área que suporta o esforço deve ser a maior possível. No entanto, isso nem sempre é possível [11].

Existem várias configurações possíveis de juntas adesivas. Contudo, algumas geometrias podem tornar-se difíceis de realizar ou até mesmo de custo elevado devido à sua complexidade. Na Figura 12 estão representadas as principais configurações de juntas utilizadas em engenharia [3, 4].

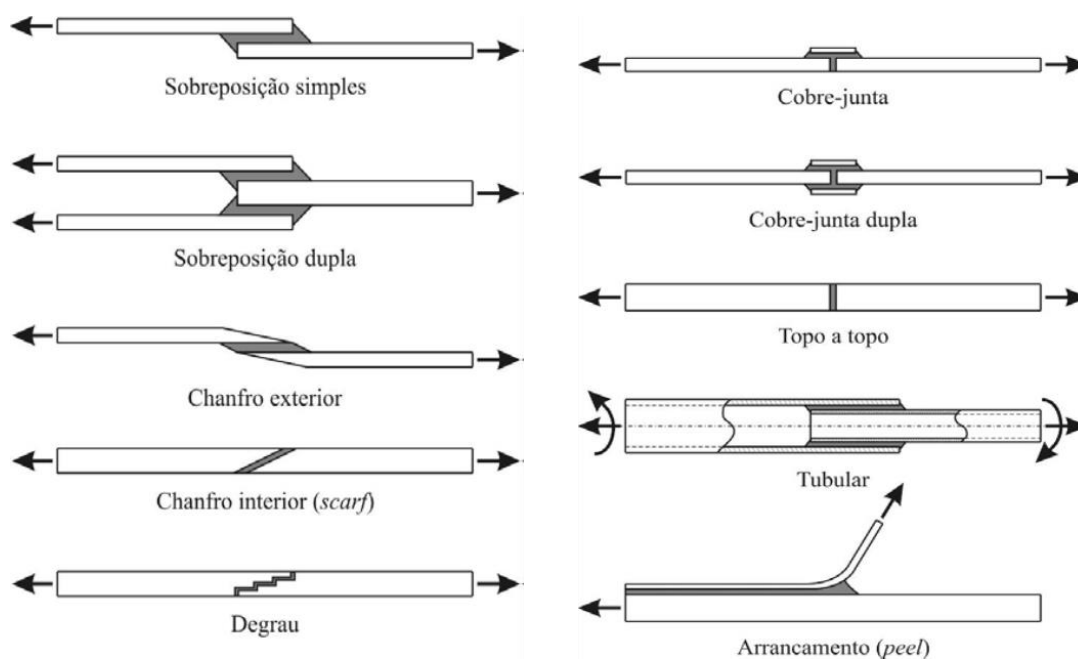


Figura 12 - Alguns tipos de juntas adesivas usadas em engenharia [1].

As juntas de sobreposição simples (JSS), juntas de sobreposição dupla (JSD), juntas de chanfro (*scarf joint*), e as juntas de degrau são as mais comuns. As juntas topo a topo planas são as mais simples de fabricar. No entanto, não apresentam uma eficiência elevada, devido às acentuadas concentrações de tensões de corte e de arrancamento nas extremidades da ligação. Este tipo de ligação também não suporta esforços de flexão porque o adesivo neste caso estaria sujeito a clivagem. As JSS, devido à sua facilidade de fabricação, têm sido as mais estudadas. No entanto, a aplicação descentrada da carga provoca flexão nos substratos (Figura 13) que origina o aparecimento de tensões de arrancamento nas extremidades da sobreposição. As JSD, juntas de chanfro e juntas de degrau foram projetadas para diminuir o arrancamento. Contudo, a dificuldade de maquinar os degraus limita as vantagens deste tipo de junta e tornam o processo de fabrico mais dispendioso [1, 3, 10, 12].



Figura 13 - Representação esquemática da flexão dos aderentes. Junta antes da deformação (a) deformação final da junta (b) [1].

Uma forma a reduzir as tensões de arrancamento nas extremidades da sobreposição das JSS é a utilização de uma junta de ressalto (*joggle*), ilustrada na Figura 14. Esta é a solução mais simples para que se consiga obter um alinhamento das forças, sendo o substrato facilmente dobrado, caso o mesmo não seja muito frágil ou de elevada resistência. As JSD também têm uma construção mais balanceada que faz diminuir drasticamente o momento fletor, mas é de fabricação mais difícil [1, 3].



Figura 14 - Junta de ressalto [1].

As juntas com tira (*strap joint*) tal como as JSS, estão sujeitas a esforços de arrancamento. As juntas de sobreposição dupla reduzem o momento-fletor e por isso são preferíveis [3].

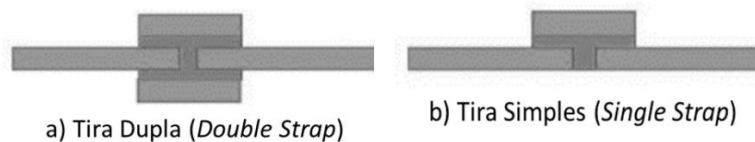


Figura 15 - Juntas com tira, a) tira dupla, b) tira simples [13].

Existem também outras configurações de juntas possíveis, como juntas topo a topo (Figura 16), juntas cilíndricas (Figura 17), juntas de canto (Figura 18-a) e juntas em T (Figura 18-b).



Figura 16 - Exemplo de juntas topo a topo simples a) e com sobreposição b) [13].

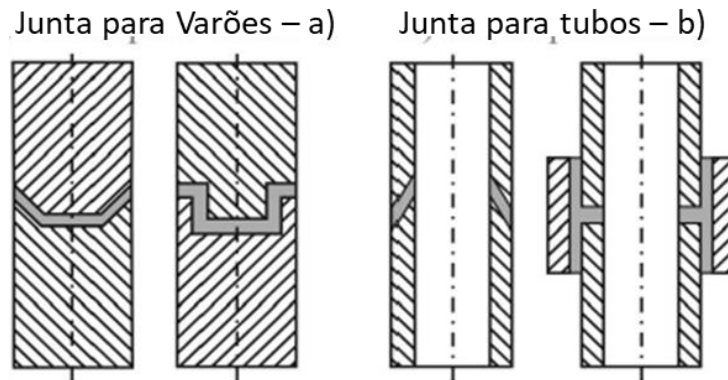


Figura 17 - Exemplo de juntas cilíndricas [3].

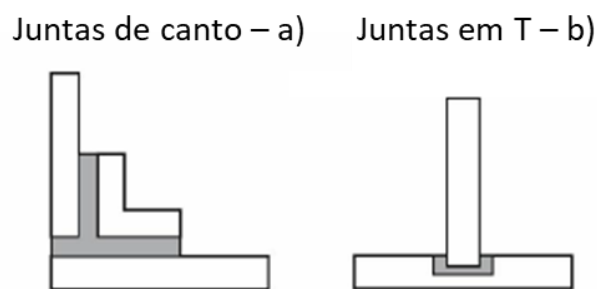


Figura 18 - Exemplo de juntas de canto (a) e juntas em T (b) [3].

2.1.4 Aplicações

Devido aos conseguidos avanços na tecnologia das ligações adesivas, as juntas adesivas tornam-se cada vez mais atrativas para uso em vários campos de aplicação, nomeadamente na indústria automóvel (Figura 19) e aeroespacial (Figura 20). Com estes avanços, as juntas adesivas tornam-se cada vez mais eficientes e com maior resistência ao arrancamento e clivagem. Com as sucessivas melhorias relativas as características mecânicas, as ligações adesivas têm substituído progressivamente os métodos tradicionais de união [12]. As ligações adesivas estão em elevado crescimento e podem também ser encontradas na indústria naval, construção civil, desporto, medicina (Figura 21) e energias renováveis [1, 3, 14].

Na Figura 19, Figura 20 e Figura 21 é possível ver algumas das aplicações das ligações adesivas distribuídas pelas diferentes áreas e indústrias.

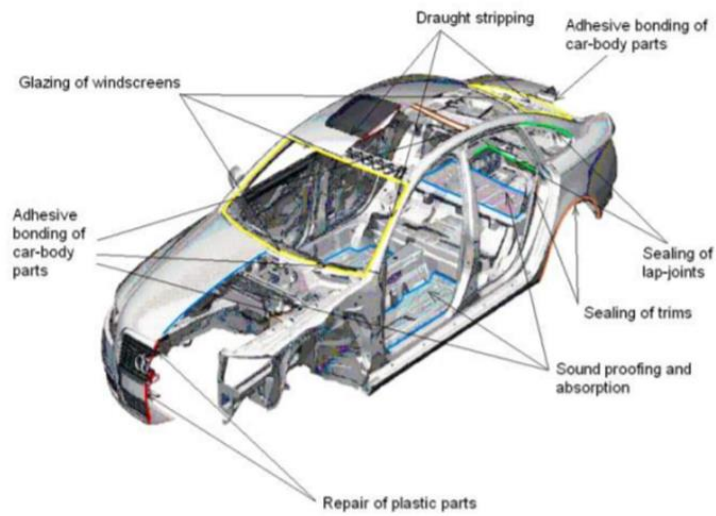


Figura 19 - Aplicação de adesivos na construção de carros [15].

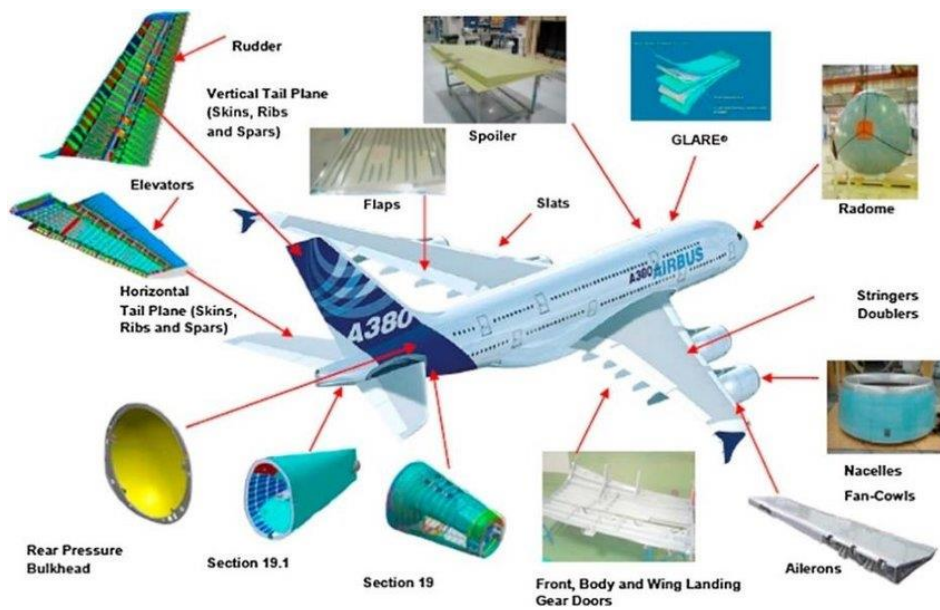


Figura 20 - Aplicação de adesivos no Airbus A380 [16].



Figura 21 - Aplicação de adesivos em cirurgias dentárias [17].

2.2 Ensaios de adesivos

Durante vários anos recorreu-se a diferentes tipos de ensaios para analisar as propriedades mecânicas dos adesivos. O desempenho de um adesivo, quer na sua forma maciça quer principalmente quando aplicado numa junta, depende de um conjunto de propriedades. Para a caracterização de um adesivo é necessário determinar vários parâmetros de carácter elástico, plástico e de fratura, onde cada um envolve a realização de testes específicos [1]. A caracterização mecânica (capítulo 2.2.1) admite ensaios em provetes de adesivo maciço (provetes *bulk*) e em juntas adesivas que respeitam as normas existentes para o efeito. A caracterização à fratura (capítulo 2.2.2) admite ensaios à tração (Modo I), ao corte (Modo II) e em modo misto (Modo I + II) [1, 3, 7].

2.2.1 Propriedades mecânicas

2.2.1.1 Provetes de adesivo maciço (*Bulk*)

Usando um provete de adesivo maciço, é possível a obtenção das propriedades à tração e ao corte do adesivo. O primeiro é um dos ensaios destrutivos mais utilizado em engenharia mecânica, sendo os provetes e métodos usados normalmente comparados com os usados em materiais plásticos. O ensaio ao corte é um dos mais importantes pois é aquele em que as tensões apresentam distribuições mais favoráveis, devendo-se assim sempre que possível projetar as estruturas de maneira a que estejam essencialmente sujeitas a esforços de corte [1].

2.2.1.1.1 Ensaios à tração

As propriedades são intrínsecas ao adesivo e são obtidas sob o estado de tensão uniforme e uniaxial, sem influencia dos aderentes. Contudo, as propriedades obtidas através deste teste podem ser ligeiramente diferentes das obtidas em ensaios de juntas [18]. Os provetes maciços podem ser obtidos através de um molde fechado ou por pressão entre placas. Esta última técnica é aplicável para adesivos relativamente mais rígidos e frágeis [19].

Geometria e preparação do provete de adesivo maciço

A geometria geralmente usada para os provetes executados para ensaios à tração em adesivo maciço está de acordo com o previsto na norma EN ISO 527-2 e representada na Figura 22.

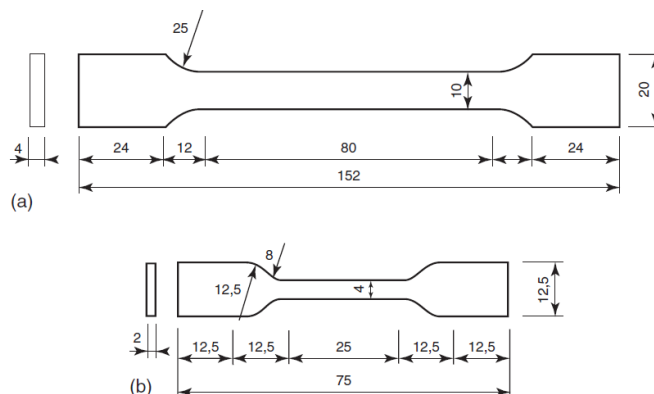


Figura 22 - Provete de tração de acordo com a norma EN ISO 527-2: a) provete longo e b) provete reduzido (dimensões em mm) [18].

O provete longo é usado para adesivos rígidos onde os deslocamentos são mais pequenos, e as amostras curtas são usadas para adesivos mais flexíveis onde os alongamentos podem exceder a capacidade do instrumento de medida [3, 18]. Um problema associado a este tipo de provetes é a possibilidade do aparecimento de porosidades ou vazios durante a sua produção. Este tipo de defeito é causado pela entrada de ar entre o filme de adesivo e o molde. A progressão das pequenas bolhas de ar está ilustrada na Figura 23 [20].

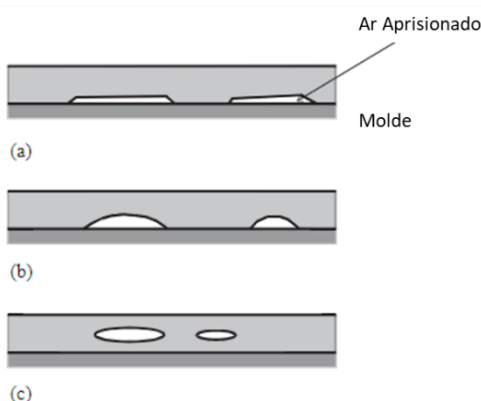


Figura 23 - Aprisionamento de ar entre o filme de adesivo e o molde: a) aprisionamento Inicial; b) deslocamento parcial e c) deslocamento completo [20].

Uma forma de remover as bolhas de ar entre o adesivo e o molde é usar a “técnica de libertação de vácuo” em que o molde é colocado sobre vácuo e a temperatura é aumentada até ao ponto em que o adesivo se torna mais fluido, de modo a que na libertação do vácuo os espaços vazios se transformem num volume insignificante. Outra técnica consiste na “aplicação de uma pressão hidrostática” usando um autoclave para remover as bolhas de ar. Quanto mais elevada a pressão hidrostática mais o ar é pressurizado para um volume reduzido [20].

Os provetes *bulk* são normalmente produzidos por duas técnicas: através da injeção do adesivo num molde (moldação), ou por pressão entre pratos. O método por injeção é utilizado quando o adesivo se apresenta numa forma relativamente líquida. Por sua vez quando o adesivo é demasiado viscoso é recomendada a produção dos provetes por pressão entre pratos [20].

A produção dos provetes por pressão entre pratos está descrita na norma francesa NF T 76-142. O molde consiste em duas placas separadas por uma moldura de silicone, como demonstrado na Figura 24. A moldura está rodeada por suportes constituídos por quatro barras fixadas através de parafusos. Na Figura 25 está demonstrada a vista explodida do molde para melhor compreensão. De forma a garantir a desmoldagem dos provetes é necessária a aplicação de desmoldante em todas as superfícies, e também o uso de uma quantidade de adesivo 5% superior ao volume da cavidade do molde, de forma ao enchimento completo quando aplicada a pressão de 2 MPa [18].

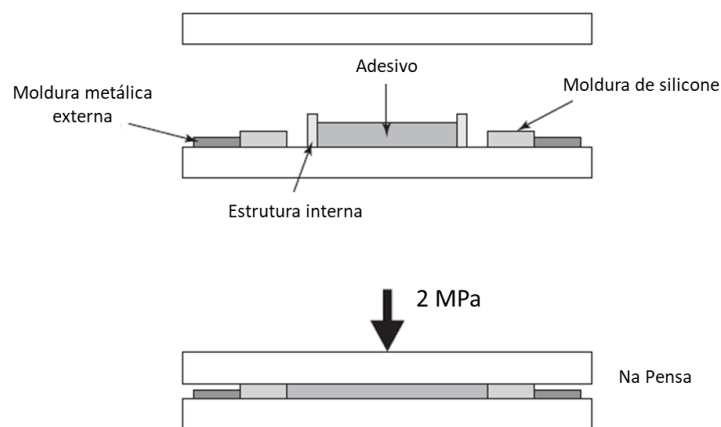


Figura 24 - Placa de adesivo produzida de acordo com a norma NF T 76-142 [18].

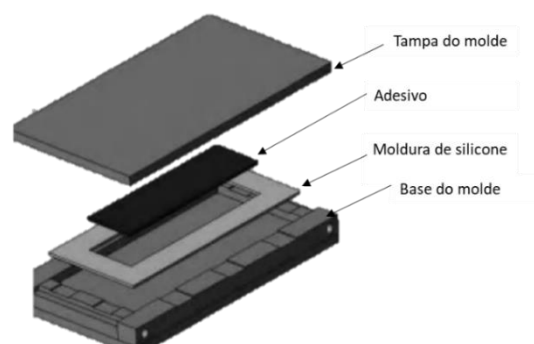


Figura 25 - Vista explodida do molde de acordo com a norma NF T 76-142 [18].

Quanto à produção de provetes para adesivos mais líquidos o processo de moldação pode ser dividido em dois métodos: injeção em molde fechado ou injeção em molde aberto. Para a produção de provetes através do molde fechado é usado um molde

como o representado na Figura 26. O molde é constituído por três componentes metálicos, onde o topo apresenta furos para poder fazer a alimentação do adesivo e o escape do ar existente no interior. A aplicação do adesivo nos moldes fechados é realizada através de uma pistola.

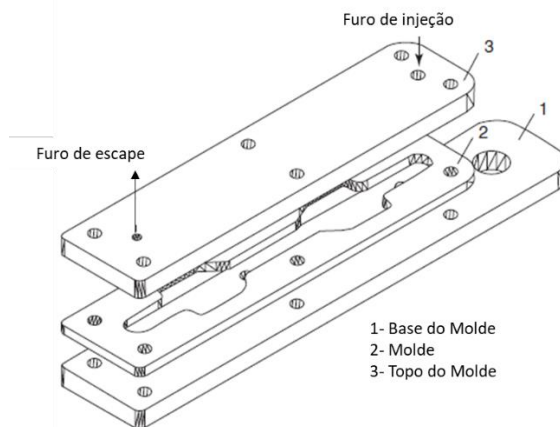


Figura 26 - Representação esquemática de um molde utilizado para o fabrico de provetes *bulk* [18].

Na utilização do molde aberto o adesivo é colocado na cavidade do molde (previamente colocado sobre a base) e posteriormente colocado o topo do molde. Nesta aplicação, a furação é utilizada para expulsar o ar existente no molde [18]. É aconselhável que o molde tenha um bom acabamento e que seja sempre realizada uma limpeza e aplicação de desmoldante antes de uma nova utilização para facilitar a remoção do provete [21].

Na Figura 27 é possível ver os diferentes componentes de um molde para produção de 6 provetes em simultâneo.



Figura 27 - Diferentes componentes no molde para produção de 6 provetes [21].

Procedimento de ensaio

A realização dos ensaios mecânicos deve sempre respeitar a norma correspondente ao tipo de ensaio em questão. A norma define todas as condições necessárias para os bons resultados dos ensaios, procedimentos, geometrias dos provetes, preparação das amostras, velocidades de ensaio, tratamentos superfícies (se aplicável), entre outros.

Para o ensaio de tração num provete de adesivo maciço serão destacadas a norma ASTM D897 e EN ISO 527-2 [1, 18].

De realçar que as condições de temperatura e humidade do laboratório podem ter uma forte influência no resultado e nas características mecânicas dos provetes. Assim, os ensaios devem ser realizados em condições de temperatura e humidade típicas de laboratório (25°C e 50%, respetivamente). Para a realização de ensaios de tração utiliza-se uma máquina de ensaios mecânicos como a apresentada na Figura 28. A grande parte dos adesivos pode ser testada usando as garras da máquina. No entanto alguns adesivos de alta resistência podem ser difíceis de segurar. Nestes casos, são usados fixadores adicionais como os representados na Figura 29 [11].



Figura 28 - Máquina de ensaios mecânicos Shimadzu [22].

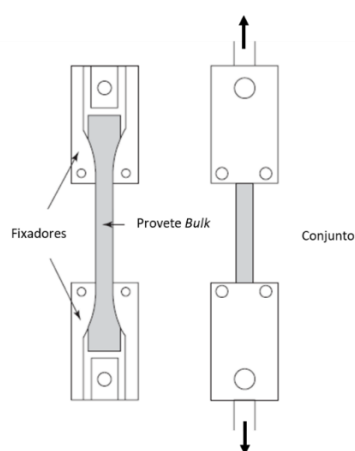


Figura 29 - Fixadores adicionais para ensaio de provetes em adesivos frágeis [23].

Deve sempre garantir-se o correto alinhamento do provete e que os mesmos estejam bem presos através das amarras para impedir o escorregamento. As amarras deverão garantir que a rotura do provete ocorre sempre na zona útil do provete, enquanto o seu alinhamento evita o aparecimento de esforços transversais e de flexão, assim como a rotação das amarras [23].

A carga usada deve ser compatível com o tipo de provete que se está a testar. Para provetes idênticos aos da Figura 22 os adesivos de alta resistência podem ser testados usando uma célula de carga de 5 kN de capacidade, enquanto em adesivos de baixa resistência é suficiente usar uma célula de carga de 1 kN [18].

Para a medição dos deslocamentos é possível o uso de extensómetros mecânicos (Figura 30 - a) ou óticos sem contacto para evitar possíveis interferências no comportamento do material (Figura 30 - b).



Figura 30 - Exemplo de extensômetro mecânico (a) e ótico (b) [24, 25].

O teste à tração implica carregar o provete da direção longitudinal até à falha. A velocidade do ensaio pode variar entre 1 mm/min e 100 mm/min sendo usada para o ensaio a velocidade de 1mm/min para determinação do módulo de elasticidade longitudinal (E) [26, 27]. Para a determinação das restantes propriedades, dependendo da velocidade a que se pretendem as propriedades, podem ser usadas velocidades superiores já que conduzem a um aumento da resistência mecânica dos provetes como é possível ver na Figura 31 [28].

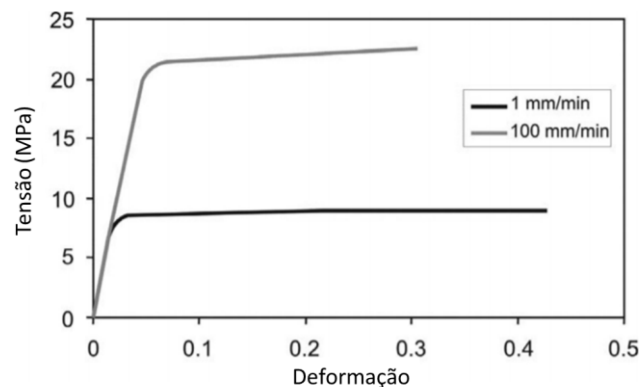


Figura 31 – Influência da velocidade de ensaio na curva tensão-deformação de um provete de adesivo dúctil [28].

Após finalizar o ensaio é possível determinar as propriedades mecânicas através do gráfico tensão-deformação (σ - ϵ) idêntico ao da Figura 32. A partir do gráfico é possível calcular a tensão de limite elástico (σ_y), tensão de rotura à tração (σ_t) e a deformação à tração (ϵ_t). Para o cálculo do módulo de elasticidade (E) existem métodos diferentes, um dos quais descrito na norma EN ISO 527-2 [29]. Através deste método o E é calculado no intervalo de 0,05% a 0,25% de ϵ dentro do regime elástico selecionando dois pontos na curva. A interseção das deformações na curva do gráfico corresponde a dois valores de σ que serão utilizados para o cálculo de E [MPa] baseando-se na equação (1) [11, 18]

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon}, \quad (1)$$

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

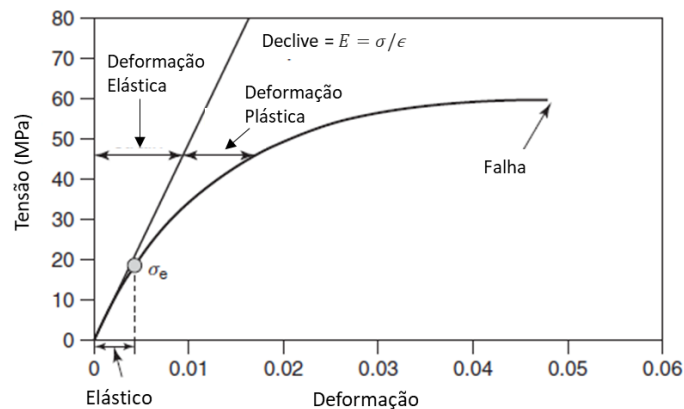


Figura 32 - Curva σ - ε típica de um adesivo [18].

Existem também outros métodos para obtenção do E , nomeadamente através da aplicação de uma reta tangente à zona elástica do adesivo iniciada desde a origem da curva σ - ε , como demonstrado na Figura 32 [18]. Nos adesivos, o cálculo para obtenção de σ_y não é tão linear, uma vez que os polímeros não apresentam patamares de cedência na transição do regime elástico-plástico. Quando se está perante adesivos rígidos (E de 3 a 5 GPa) deve considerar-se que σ_y é aproximadamente igual a σ_r . No caso de adesivos flexíveis ($E \pm 0,1$ GPa) deve interseccionar-se uma reta tangente à zona elástica do adesivo com uma reta tangente a zona plástica do mesmo, como representado na Figura 33 [11, 18].

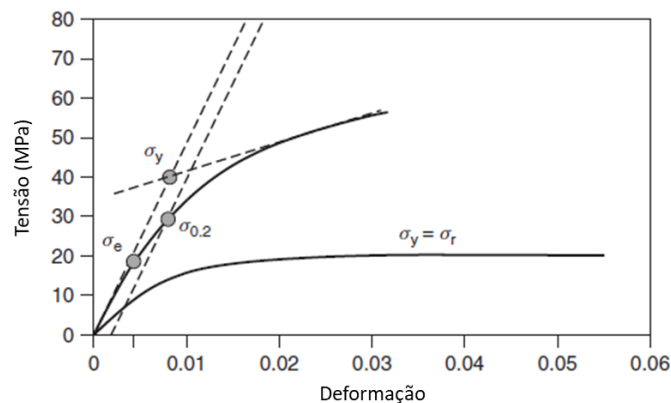


Figura 33 - Métodos para determinação da σ_y [18].

2.2.1.1.2 Ensaios ao corte

Como já foi referido, o ensaio ao corte é um dos mais importantes e a sua realização em provetes de adesivo maciço fornece resultados mais precisos porque o comprimento de medida é maior. Existem alguns ensaios diferentes para determinar

as propriedades mecânicas ao corte, cada um com o objetivo de tentar produzir o estado puro de tensões de corte. Os ensaios mais comuns com provetes de adesivo maciço são [1, 11]:

- Torção em provetes maciços;
- Ensaio *Iosipescu* (*V-Notched beam shear method*);
- Ensaio *Arcan* (*Notched plate shear method*).

Torção em Provetes Maciços

As propriedades ao corte podem ser obtidas através deste ensaio usando um provete sólido ou tubular sujeito à torção. As dimensões do provete podem variar de autor para autor. Na Figura 34 estão representadas as duas formas de provete tipicamente usadas. A forma redonda é obtida através da maquinagem dos provetes, o que significa que não é viável para adesivos muito flexíveis. As secções quadradas nas extremidades são usadas para fixação das garras da máquina durante o teste.

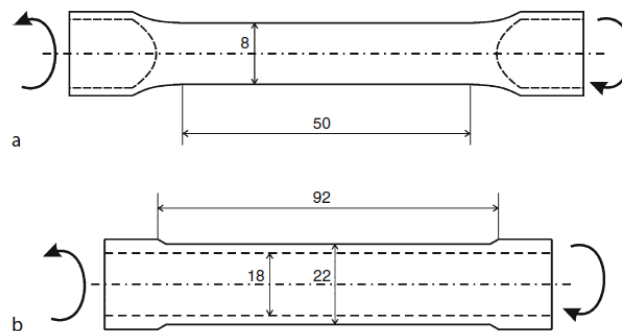


Figura 34 - Provetes maciços em torção: provete sólido (a) e provete tubular (b) [11].

A forma redonda está livre da concentração de tensões e, portanto, é possível medir as verdadeiras propriedades adesivas [11].

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

O ensaio de *V-notched* foi originalmente proposto para testar a resistência de metais e juntas soldadas sobre carregamentos de corte puro. Atualmente este ensaio tem sido amplamente utilizado para testar materiais compósitos e adotado pela norma ASTM D5379. Este ensaio também pode ser aplicado em adesivos maciços (Figura 35 -a) ou juntas adesivas (Figura 35 -b) [18]. O ensaio é realizado num provete retangular com dois entalhes simétricos no centro do provete, como ilustrado na Figura 35. As arestas devem ser maquinadas de forma a que sejam planas e formem planos paralelos entre si e perpendiculares a face do provete, a fim de se evitar a torção quando a carga é aplicada. Contudo, a existência de um esforço de corte puro pode também estar condicionada pela aplicação precisa da carga e pela precisão dimensional do provete [3, 30].

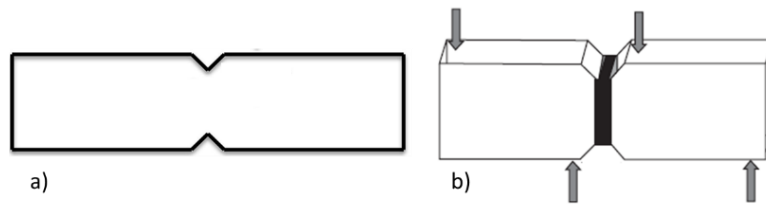


Figura 35 - Provetes *Iosipescu*: provete maciço (a) e em junta adesiva (b) [18, 30].

Na zona dos entalhes devem ser colados extensómetros a 45° e -45° com o eixo do provete de forma a medir as respectivas deformações. O provete é carregado à compressão em quatro pontos diferentes como ilustrado na Figura 36 [11, 31].

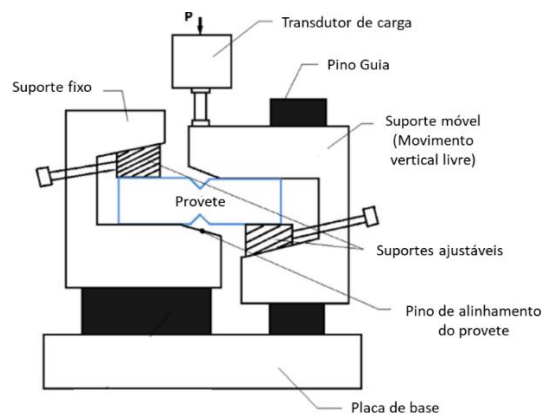


Figura 36 - Ensaio *Iosipescu* [31].

Este ensaio oferece vantagens pois o provete é de fabrico fácil e possibilita a obtenção do módulo de corte (G) e da tensão ao corte (τ). Sendo P a força aplicada, t a espessura do provete e h a distância entre extremidades dos entalhes, τ é dado por através da equação (2),

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

e G por:

$$G = \frac{P}{th(\varepsilon_{45} - \varepsilon_{-45})}, \quad (3)$$

em que ε_{45} e ε_{-45} representa a deformação determinada pelos extensómetros a 45° e -45° , respetivamente [3].

Ensaio *arcán* ou *Notched plate shear method*

O ensaio de *arcán* também conhecido como *Notchen plate shear method* usa provetes que se assemelham a uma borboleta. O provete (Figura 37) contém dois entalhes simétricos a 90° com um raio de curvatura de 1,5 mm para diminuir a concentração de tensões [3, 18]. O provete contém quatro furos o que permite a aplicação de uma

carga de corte mais uniforme. Esta configuração evita problemas de instabilidade nas bordas, como ocorre no teste de *Iosipescu*, e permite testar provetes mais finos [1, 11, 32]. Existem, no entanto, concentrações de tensão perto dos entalhes que podem provocar falhas prematuras.

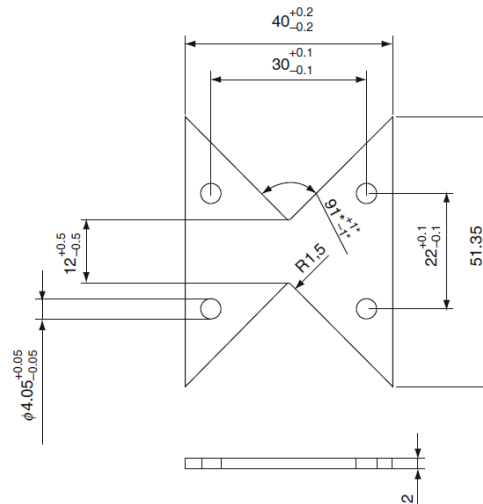


Figura 37 - Provette *arcan* (dimensões em mm) [11].

O ensaio é realizado através de um dispositivo de fixação biaxial como o demonstrado na Figura 38 para produzir estados de tensão biaxiais. A τ é obtida dividindo a carga pela superfície resistente entre os dois entalhes do provete. O deslocamento da zona de deformação de corte uniforme entre os dois entalhes pode ser medido com extensómetros montados sobre o provete, orientados a 45° e -45° com o eixo do carregamento, ou recorrendo a métodos sem contacto [11, 32]. Com os deslocamentos obtidos podem calcular-se as deformações de corte (γ). O cálculo de τ e de G é realizado com expressões idênticas às equações (2) e (3), respetivamente [1].

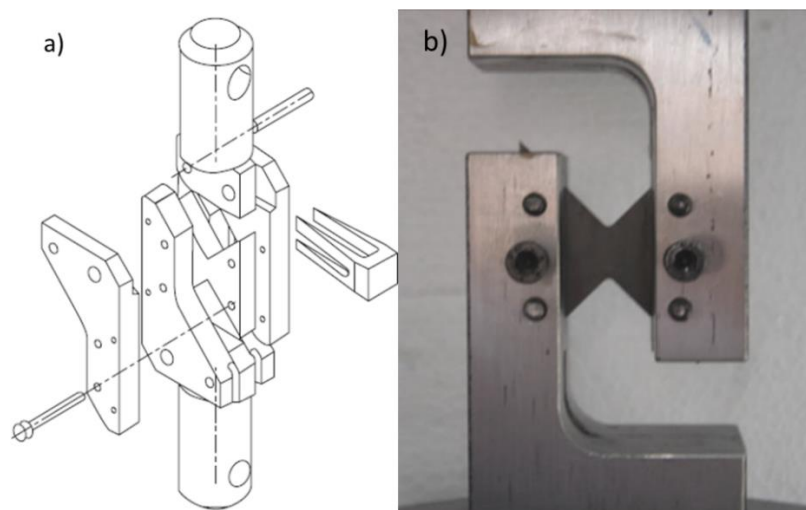


Figura 38 - Ensaio de *arcan*: a) vista explodida do dispositivo de ensaio e b) fixação [11, 18].

2.2.1.2 Juntas adesivas

Podem também ser usadas juntas adesivas para medir as propriedades de um adesivo. As juntas podem igualmente ser testadas à tração (capítulo 2.2.1.2.1) ou ao corte (capítulo 2.2.1.2.2) e devem preferencialmente ser projetadas para trabalhar ao corte, considerando que as cargas são distribuídas numa área mais extensa do que quando solicitadas ao arrancamento. Nos ensaios a juntas adesivas, é difícil de medir com precisão o deslocamento de corte porque os valores são muito pequenos. Os provetes de adesivo maciço têm um comprimento de medição mais longo, o que possibilita obter melhores resultados, mas pode argumentar-se que o tamanho e a espessura das amostras não é representativo das propriedades adesivas de uma junta [3, 19].

2.2.1.2.1 Ensaios à tração

Juntas topo a topo ou *butt-joint*

O ensaio à tração mais utilizado em juntas adesivas é o ensaio de juntas topo a topo também conhecidas como *butt-joint*. Este ensaio permite obter informações respeitantes ao módulo de elasticidade aparente, módulo de rigidez e coeficiente de Poisson. As tensões são calculadas dividindo a força aplicada pela área colada [3]. Este ensaio usa substratos circulares como os representados na Figura 39. Como limitações tem-se a dificuldade de obtenção de propriedades mecânicas à tração, devido a questões relacionadas com a precisão do fabrico dos provetes e alinhamento destes durante o ensaio. De facto, desalinhamentos, mesmo que pequenos, vão conduzir à existência de esforços espúrios de flexão, reduzindo assim as propriedades de resistência da junta. Tal resulta do efeito de Poisson, pela constrição provocada na camada de adesivo pelos substratos quando existe uma diferença sensível de rigidez entre eles ou ainda por desalinhamento [3, 18].

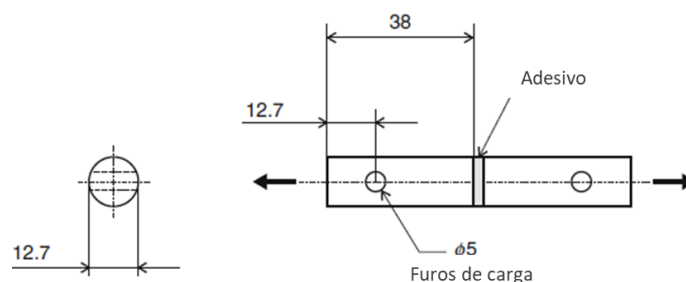


Figura 39 - Exemplo de uma junta topo a topo com substratos cilíndricos [11].

2.2.1.2.2 Ensaios ao corte

Assim como existem diferentes ensaios ao corte para verificar as propriedades de adesivos em bruto também para as juntas adesivas se podem realizar diversos tipos de ensaios. Por norma, os ensaios em provetes maciços são mais precisos que os

realizados em juntas adesivas. No entanto, se o provete de adesivo maciço for difícil de fabricar o próximo melhor teste é o ensaio de torção em juntas topo a topo. Os ensaios ao corte que se destacam são [3, 11, 18]:

- Ensaio de torção em juntas topo a topo (*Napkin-ring test*);
- Ensaio *TAST* (*Thick Adherend Shear Test*);
- Ensaio em junta de sobreposição simples (*JSS*).

Ensaio de torção em juntas topo a topo (*Napkin-ring test*)

As geometrias de provetes para o ensaio de torção em juntas topo a topo ou *Napkin ring test* estão representadas na Figura 40 a) e b), respetivamente.

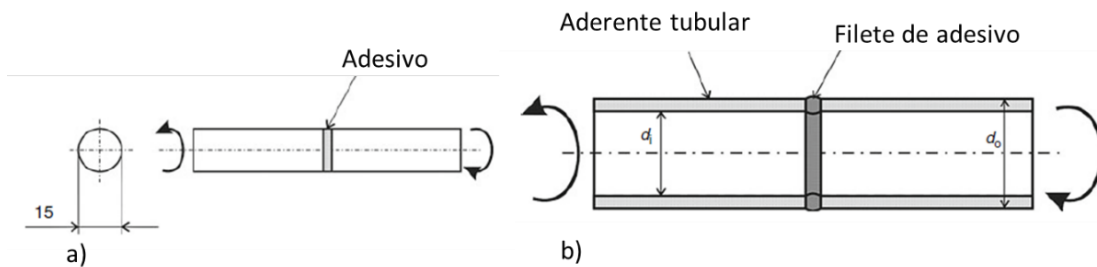


Figura 40 - Junta provete sólido (a) e junta provete tubular (*Napkin ring test*) (b) [11].

O ensaio mais comum deste género designa-se por *Napkin ring test* (Figura 40 -b). O uso de provetes com paredes finas tem o objetivo de reduzir a variação de tensões de corte ao longo do adesivo. Se os cilindros estiverem perfeitamente alinhados, promove-se um estado de tensão de corte puro [3, 11]. É também importante para garantir a qualidade dos resultados que o adesivo esteja livre de espaços vazios ou de inclusões de ar [33]. Uma grande dificuldade nos ensaios com baixa espessura de adesivo é a medição dos pequenos deslocamentos que terão de ser medidos com elevada precisão [18]. Sendo M_t o momento torsor aplicado no provete, r_1 e r_0 os raios interior e exterior do substrato, respetivamente, e t a espessura da camada adesiva, τ a uma dada distancia r do eixo em que é aplicado o momento fletor será dado por

$$\tau = \frac{2M_t r}{\pi(r_0^4 - r_1^4)} \quad (4)$$

e G por,

$$G = \frac{2t}{\pi(r_0^4 - r_1^4)} \left(\frac{M_t}{\phi} \right), \quad (5)$$

em que ϕ representa o angulo de rotação medido. Em alternativa G é dado por

$$G = \frac{\tau}{\gamma}, \quad (6)$$

em que γ é calculado pela razão

$$\gamma = \frac{v_m - v_t}{t} \quad (7)$$

e v_m é o deslocamento total medido no provete que é igual ao deslocamento no adesivo v_a , mais o deslocamento nos aderentes v_t , como representado na Figura 41 [3, 18].

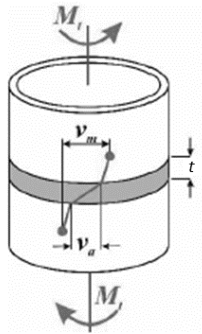


Figura 41 - Deslocamentos medido na superfície dos cilindros [3].

Ensaio TAST (*Thick Adherend Shear Test*)

O ensaio de TAST é dos mais populares para obtenção das propriedades ao corte, uma vez que tanto os dispositivos de ensaio como a realização dos provetes é relativamente fácil. São utilizadas duas normas para o ensaio de TAST, a ASTM D3983 nos EUA e a ISO 11003-2 na Europa [3, 11]. A principal diferença entre estas duas normas é o tamanho dos provetes. A geometria dos provetes de acordo com a norma europeia (ISO) está representada na Figura 42. Os substratos são de aço devido à sua elevada rigidez, contribuindo assim para um estado de tensão no adesivo praticamente de corte puro [34]. Para contribuir para esta condição também a geometria do provete é essencial, pois quanto menor for o comprimento da ligação e maior a espessura dos substratos, menor é a probabilidade de arrancamento nas extremidades da junta [1, 18].

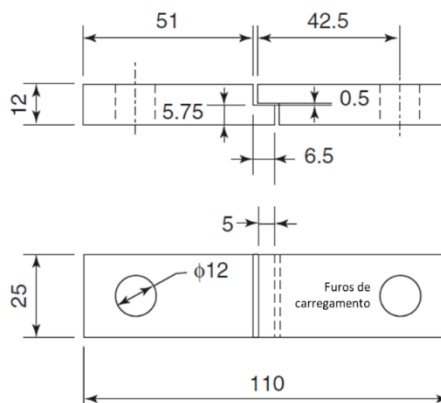


Figura 42 - Geometria dos provetes TAST de acordo com a norma ISO 11003-2 (dimensões em mm) [18].

Para a realização do ensaio prevê-se a utilização de um extensómetro baseado num *linear variable differential transformers* (LVDT) com parte móvel dentro de uma moldura rígida unida por molas, como demonstrado na Figura 43.

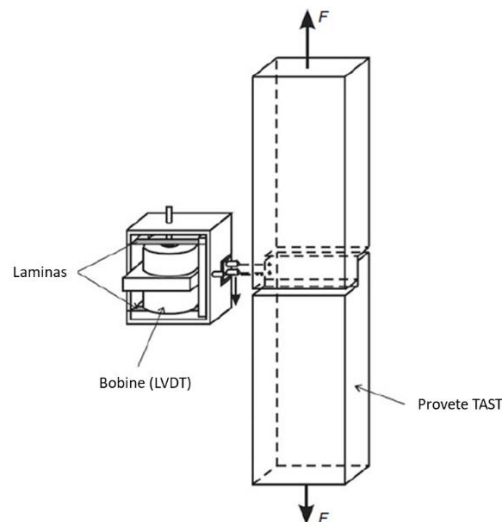


Figura 43 - Extensómetro LVDT utilizado no ensaio TAST (segundo ISO 11003-3) [11].

O movimento relativo realizado é função do deslocamento entre dois pinos numa face de um aderente e outro pino na face do outro aderente [1, 11]. Este método, para além de ser difícil de aplicar no provete, obriga a correções posteriores dos dados para a determinação das deformações. Uma forma de ultrapassar este problema consiste na utilização de métodos de medição que avaliem apenas a deformação do adesivo e que simultaneamente sejam de fácil instalação. A extensometria ótica baseada na correlação de imagens é uma solução que permite ultrapassar os problemas referidos [35]. Para facilitar o alinhamento dos provetes é utilizado um *gabarit* como o apresentado na Figura 44 .

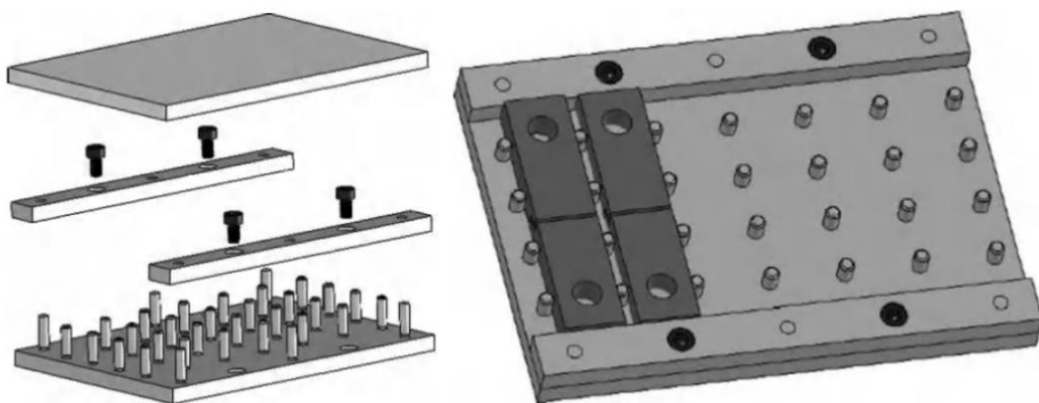


Figura 44 - Gabarit para produzir provetes TAST [18].

Para controlar a sobreposição e o filete do adesivo podem ser usadas lâminas de aço como ilustrado na Figura 45. As lâminas podem ter um chanfro a 45° que é uma boa maneira de reduzir a concentração de tensões no adesivo e evitar falhas prematuras [18].

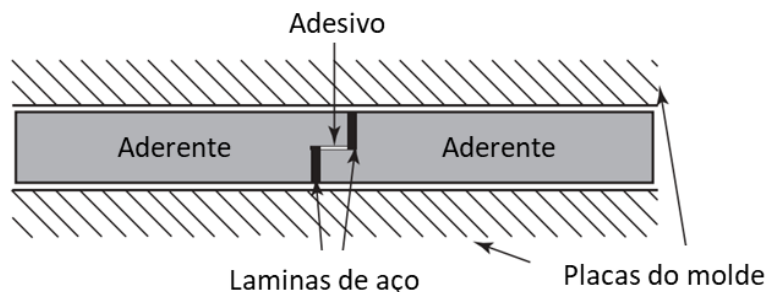


Figura 45 – Lâminas para controlar a sobreposição e o filete do adesivo [18].

Os provetes devem ser removidos do *gabarit* com cuidado para impedir que se danifiquem, assim como as lâminas de aço devem ser removidas com cuidado.

Tal como nos ensaios à tração, o ensaio *TAST* consiste em solicitar de forma contínua e crescente com força trativa uniaxial. É importante garantir que a camada de adesivo esteja sujeita a esforços de corte e não de tração. A velocidade de ensaio indicada na norma ISO 11003-2 é de 0,5 mm/min [18].

Como referido anteriormente, durante o ensaio pode ser utilizado um extensómetro LVDT. No entanto, caso exista desalinhamento dos substratos, este introduz deformações provenientes da flexão dos aderentes, o que provoca erros elevados nas medições. Desta forma, com a utilização de dois extensómetros ligados em faces opostas, será possível detetar estes desalinhamentos a partir de leituras divergentes. De acordo com a norma ISO 11003-2, a correção deve ser efetuada considerando a deformação de corte num provete compensador (*dummy*) constituído apenas pelo mesmo material do aderente. Estudos realizados demonstram que a distribuição da tensão de corte no provete não é uniforme, pelo que a correção por este processo não é totalmente fiável [11].

Considerando que os substratos apresentam apenas corte puro e tomando isso como base para efetuar a correção, usando um extensómetro resistivo que atravessa a espessura do provete e por sua vez a zona da ligação pode-se isolar o deslocamento do adesivo no ensaio de *TAST* ($d_{adesivo}$). De acordo com o ilustrado na Figura 46 pode-se verificar que

$$d_{adesivo} = d_{transdutor} - 2d_{substrato} \quad (8)$$

$$2d_{substrato} = \frac{2t_{adesivo} P}{G_{substrato} lb} \quad (9)$$

$$2t_{substrato} = 3,8 - t_{adesivo} \quad (10)$$

em que P [N] é a força aplicada, G [MPa] o módulo de corte, l [mm] o comprimento de sobreposição e b [mm] a largura do provete [3, 18].

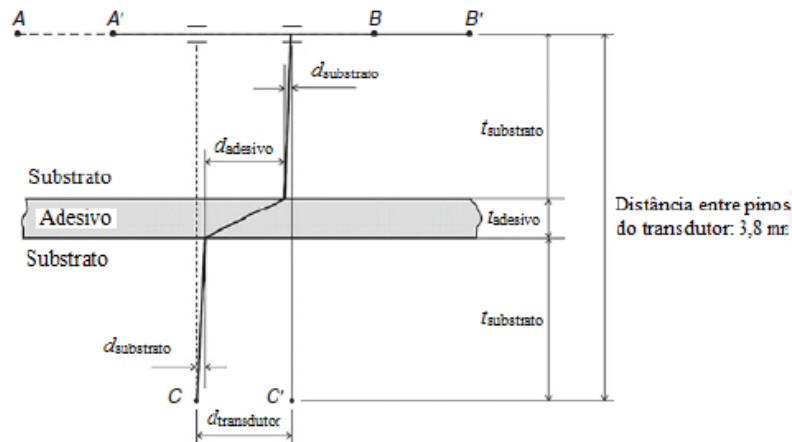


Figura 46 - Medição dos deslocamentos no ensaio TAST [3].

Resultados obtidos pelo método de elementos finitos mostraram que os substratos também estão sujeitos a esforços longitudinais, não se podendo supor que os mesmos só estão sujeitos ao corte, para se obter a correção desejada. Esta correção só poderá ser aceitável se a espessura do adesivo não for demasiado pequena, visto que quanto maiores forem as espessuras do adesivo e do substrato, mais uniforme se torna a distribuição da tensão de corte [3].

Ensaio em junta de sobreposição simples (JSS)

O ensaio numa JSS é dos métodos mais comuns para caracterização de uma junta adesiva. É um método simples, barato e pode ser utilizado em máquinas universais convencionais. Este ensaio é regulado pelas normas ASTM D1002, ISO 4587 ou outras equivalentes. Além dos esforços de corte resultante da solicitação trativa, a junta também está sujeita a esforços de arrancamento resultantes do desalinhamento das forças de tração. De modo a reduzir o aparecimento de esforços de arrancamento e igualar a espessura colocam-se calços nos locais de amarração, como ilustrado na Figura 47 [3, 36].

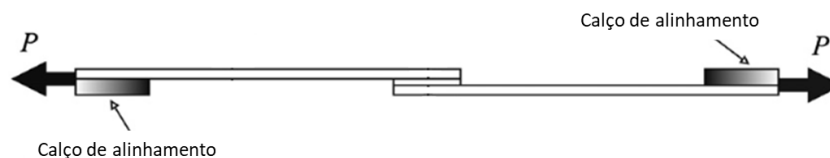


Figura 47 - Representação esquemática de uma JSS [36].

A norma ASTM D1002 refere a geometria dos provetes como representado na Figura 48. τ é determinada pela equação

$$\tau = \frac{P}{lb}, \quad (11)$$

em que P é a carga, l o comprimento de sobreposição e b a largura da junta [3].

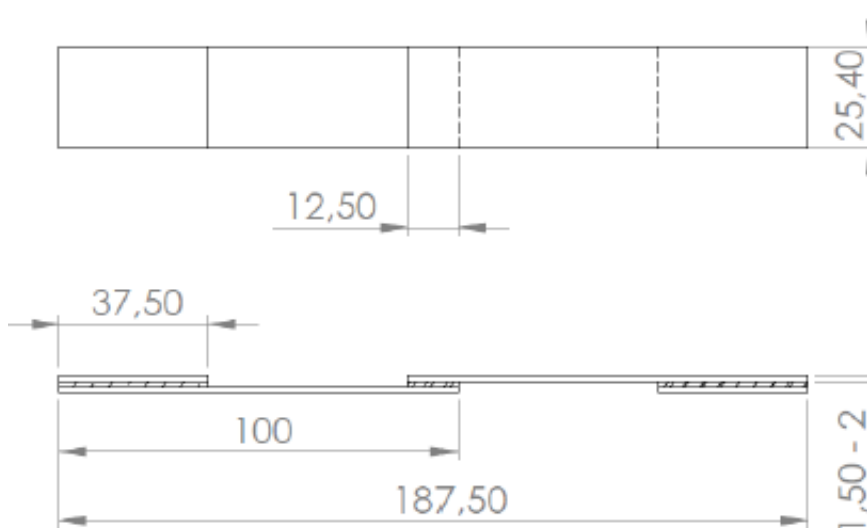


Figura 48 - Dimensões em mm de uma JSS segundo a norma ASTM D1002 [3].

2.2.2 Propriedades de fratura

A abordagem pela Mecânica da Fratura apresenta algumas vantagens relativamente ao método baseado na resistência dos materiais, na previsão da resistência mecânica de juntas com precisão [1]. Nos ensaios à fratura, a taxa de libertação de energia G_c é o parâmetro mais utilizado e as situações de carregamento mais aplicadas são as de modo I (capítulo 2.2.2.1) e modo II (capítulo 2.2.2.2) (Figura 49) e b). Contudo as juntas adesivas apresentam uma aplicação típica de modo misto I e II (capítulo 2.2.2.3) devido à presença simultânea de tensões normais e de corte. Embora existam vários tipos de ensaios, apenas serão destacados os principais ensaios utilizados para caracterização à fratura em cada uma das três situações [3].

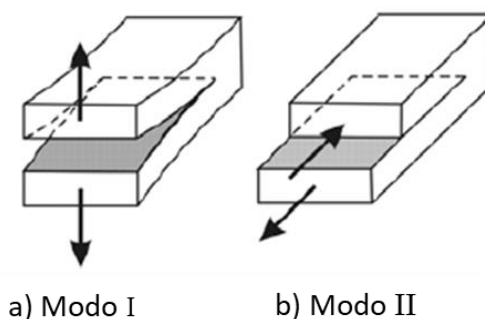


Figura 49 - Modos de rotura em juntas adesivas: a) modo I e b) modo II [37].

2.2.2.1 Fratura à tração

A fratura à tração corresponde ao modo I e o método de ensaio mais utilizado para estudar este modo é o *Double-Cantilever Beam* (DCB) [3]. Através do ensaio DCB pode-se determinar a taxa de libertação de energia em modo I (G_{Ic}) [38]. O ensaio é realizado com recurso a provetes constituídos por duas vigas de igual comprimento e espessura constante, sendo o adesivo colocado entre os mesmos para promover a sua adesão, como representado na Figura 50-a) [11].

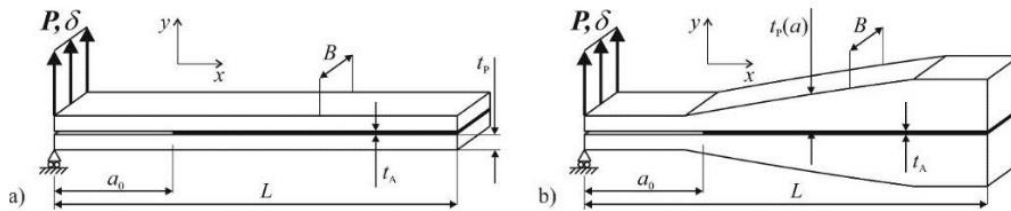


Figura 50 - Provette DCB a) e provete TDCB b) de acordo com a norma ASTM D3433-99[39].

Existem também intrínseco a este modo o ensaio *Tapered Double-Cantilever Beam* (TDCB) ou *Contoured Double-Cantilever Beam* (CDCB) (Figura 50-b). Estes provetes são mais complexos de fabricar, no entanto têm a vantagem de apresentar a variação de espessura que promove uma evolução linear da flexibilidade com o comprimento da fenda, o que possibilita a derivação de expressões para calcular a taxa crítica de libertação, (G_{Ic}) que não dependem do comprimento de fenda [3, 18].

Para ambos os testes, os métodos não requerem a mediação do comprimento da fenda (a). No teste DCB os métodos utilizados são o *Compliance Calibration Method* (CCM), o *Corrected Beam Theory* (CBT) e o *Compliance-Based Beam Method* (CBBM). Os métodos utilizados no teste TDCB são o *Simple Beam Theory* (SBT), CCM e CBT [40].

A altura do adesivo em função do a é estimada pelo fator geométrico constante m [41]

$$m = \frac{3a^2}{t_p^3} + t_p^{-1}, \quad (12)$$

em que m é constante ao longo do comprimento do provete [11, 39].

Métodos para determinar G_{Ic}

No caso do ensaio com provetes DCB, G_{Ic} é dado pela equação de *Irwin-Kyes*

$$G_{Ic} = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da}, \quad (13)$$

tendo em conta que a flexibilidade $C = \delta/P$, onde é δ dado por [3, 39]

$$\delta = \frac{dU}{dP} = \frac{8Pa^3}{EBt_p^3} + \frac{12Pa}{5GBt_p}, \quad (14)$$

originando

$$G_{lc} = \frac{6P^2}{B^2 t_p^3} \left(\frac{2a^2}{E} + \frac{t_p^2}{5G} \right). \quad (15)$$

Contudo, verifica-se que este modelo restringe demasiado o movimento das vigas não contabilizando a rotação existente na extremidade da fenda. De maneira a incluir este efeito, Kanninen [42] usou um modelo de uma viga sobre uma fundação elástica (modelo de viga corrigida -CBT). Considerando apenas o efeito da flexão da equação (14), Kanninen [42] obteve a partir da equação (13)

$$G_{lc} = \frac{3P\delta}{2B(a+|\Delta|)}, \quad (16)$$

sendo Δ um fator de correção do comprimento da fenda que inclui os efeitos de deflexão e rotação na extremidade da fenda [3, 39, 43].

No caso do ensaio com provetes TDCB, G_{lc} é dado pela equação (17). No ensaio TDCB a curvatura dos aderentes torna dC/Da idêntico durante o crescimento da fenda, uma vez que o valor m na expressão (12) também é constante. Isso resulta numa linha reta no gráfico $C=f(a)$ durante a propagação da fenda resultando na expressão simplificada

$$G_{lc} = \frac{4P^2}{E_p B^2} m \left[1 + 0.43 \left(\frac{3}{ma} \right)^{\frac{1}{3}} \right]. \quad (17)$$

E_p corresponde ao módulo de Young do aderente. O SBT é baseado na premissa de que C varia linearmente durante a propagação da fenda. Como resultado, dC/da torna-se constante, o que fornece um G_{lc} que não depende de a [39, 40].

$$G_{lc} = \frac{4P^2}{E_p B^2} \left(\frac{3a^2}{t_p^3} + \frac{1}{t_p} \right) = \frac{4P^2}{E_p B^2} m. \quad (18)$$

Procedimentos de ensaio

Para que os provetes sejam fabricados corretamente deve-se ter uma correta preparação da superfície, através de uma granalhagem das superfícies a colar, e posterior limpeza com auxílio a um solvente volátil. A rugosidade das superfícies dos substratos passará a ser uniforme, facilitando a molhagem do adesivo e permitindo obter uma junta mais resistente. De modo garantir uma espessura de adesivo constante, devesse colocar calços calibrados em dois locais distintos do provete. Um tem a finalidade de garantir a espessura do adesivo e o outro, para além disto, simula um defeito inicial, designado por pré-fenda [11, 18].

Deve colar-se uma escala na face lateral do provete para servir de auxílio na medição da propagação da fenda [1], devendo também garantir-se o correto alinhamento

durante os ensaios. A norma prevê ainda uma velocidade compreendida entre 0,5 e 3 mm/min dependendo da geometria e das características do provete [3].

2.2.2.2 Fratura ao corte

Os ensaios ao corte correspondem ao modo II e são mais complexos que os ensaios do modo I, e até ao momento não existem ensaios normalizados para este modo. Contudo existem ensaios, baseados na caracterização da fratura interlaminar em materiais compósitos, dos quais se destacam os ensaios *End-Notched Flexure* (ENF), *End-Loading Split* (ELS) e *Four-Point End-Notched Flexure* (4ENF) [3].

Ensaio ENF

O ensaio ENF é o ensaio mais simples e maioritariamente utilizado para caracterização de juntas em modo II. Os provetes consistem em dois substratos de espessura constante colados entre si e apoiados nas extremidades. É aplicada uma carga P no meio do provete, como representado na Figura 51 -a), estando o provete sujeito a uma flexão em três pontos, o que cria um modo de corte no adesivo [11, 44].

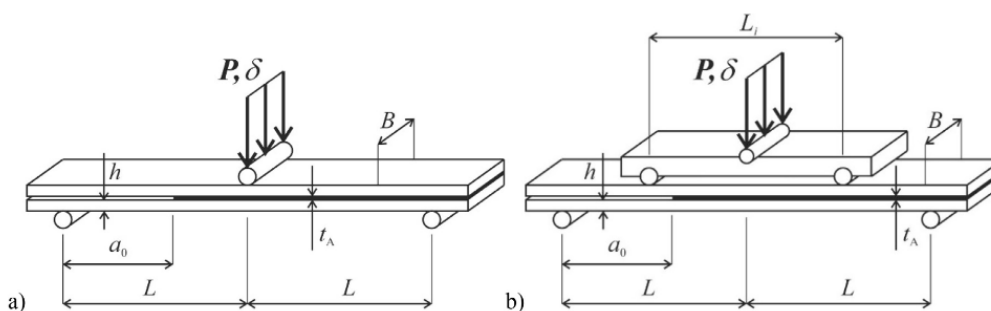


Figura 51 - Representação esquemática do ensaio ENF (a) e 4ENF (b) [44].

Ensaio 4ENF

O ensaio 4ENF é similar ao ENF, tornando-se mais sofisticado com a adição de um ponto adicional de carregamento, tornando-se num ensaio de flexão em quatro pontos. Como no ensaio ENF, o provete é constituído por dois substratos colados e dotado de uma pré-fenda. Existem alguns problemas de fricção na zona da pré-fenda relacionados com o tipo de carregamento usado. Em consonância com o ensaio ENF a carga é aplicada no meio do provete, mas ficando a distribuição equitativa de esforços a cargo de dois cilindros de carga afastados à mesma distância do ponto onde a força é aplicada, como representado na Figura 51 -b) [18, 44].

Ensaio ELS

Contrariamente aos ensaios 4ENF e ENF, o ensaio ELS consiste na aplicação de uma força mediante um cilindro de carga na extremidade do provete, estando a outra extremidade encastrada como representado na Figura 52 [11, 45]. Algumas

desvantagens do ensaio ELS consistem na existência de elevados deslocamentos e a grande sensibilidade às condições do aperto do provete induzem algumas dificuldades na obtenção de valores corretos de G_{IIc} . Neste ensaio, o provete é impedido de se deslocar na vertical, mas livre para se deslocar na horizontal [11, 18, 45].

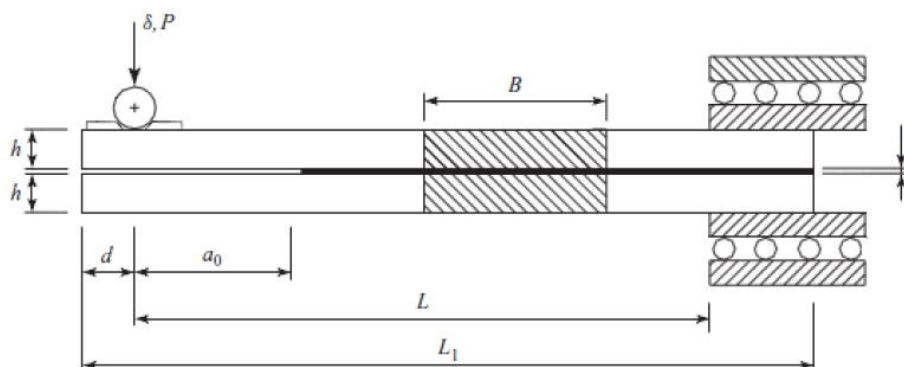


Figura 52 - Representação esquemática do ensaio ELS [18].

Métodos para determinar G_{IIc}

Tal como o método DCB utilizado para caracterizar o modo I, o ensaio ENF é utilizado para caracterizar à fratura o modo II. O ensaio ENF requer uma fenda inicial e a carga é aplicada no meio dos provetes. O ensaio é realizado em velocidade constante até a fenda atingir a zona do cilindro de carregamento, zona onde os resultados obtidos são relevantes para o cálculo de G_{IIc} . Caso ocorra uma deformação plástica dos substratos, esta pode comprometer a determinação do valor de G_{IIc} , originando valores que podem ser desfasados da realidade [11, 18, 46]. Tendo em conta que a fenda cresce sem grande abertura, existirá dificuldade na visualização clara da ponta da mesma, podendo influenciar a obtenção de resultados corretos, já que a técnica necessita da medição de a durante o ensaio [47]. Outra dificuldade inerente consiste na propagação instável da fenda. De maneira a evitar esta situação, o ensaio requer a existência da seguinte relação entre L e a_0 para materiais compósitos [48]

$$\frac{a_0}{L} > 0,7. \quad (19)$$

Tal como no ensaio DCB, a superfície dos provetes deve ser devidamente tratada para facilitar a colagem do adesivo. Devem ser colocados calços calibrados em dois locais distintos dos provetes, de modo a garantir a espessura do adesivo e induzir a pré-fenda. Deve também garantir-se a inexistência de bolhas de ar no interior do adesivo [11, 18]. Os métodos CCM, DBT e CBT são métodos que requerem a medição de a .

O CCM consiste em aplicar a expressão de Irwin-Kies (Equação (20)) aos dados do ensaio:

$$G_{IIc} = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da}. \quad (20)$$

O método DBT não inclui nenhuma correção para aplicar à deformação de corte, (ao contraio do CBT) e estima G_{IIc} pela equação

$$G_{IIc} = \frac{9P\delta a^2}{2B(2L^3 + 3a^3)}. \quad (21)$$

O método CBT desenvolvido inicialmente por Wang e Williams [49] é expresso por

$$G_{IIc} = \frac{9(a + 0.42\Delta_{II})^2 P^2}{16B^2 E_x h^3}, \quad (22)$$

onde E_x representa o módulo de Young do aderente ao longo do comprimento e Δ_{II} a correção do comprimento da fenda para contabilizar a deformação. O CBBM fornece o G_{IIc} apenas a partir do C experimental medido durante os ensaios. Este método usa o comprimento equivalente da fenda (a_{eq}) que é definido a partir dos dados de P - δ e contabiliza a zona *Fracture Process Zone* (FPZ) gerado em torno da ponta da fenda devido à plasticidade dos materiais. G_{IIc} é calculado através de

$$G_{IIc} = \frac{9P^2 a_{eq}^2}{16B^2 E_f h^3}, \quad (23)$$

onde E_f é o módulo de Young equivalente do provete derivado do C inicial da curva P - δ e do valor de a_0 [44]

2.2.2.3 Fratura em modo-misto

O modo de fratura misto contempla os efeitos da combinação dos modos de solitação I e II. Como já foi referido, as juntas adesivas estão sujeitas a efeitos combinados de tensões normais e de corte, o que exige um conhecimento de ambos os G_{Ic} e G_{IIc} . Assim, os ensaios em modo misto contemplam os dois modos de carregamento [3, 11]. Os ensaios mais usais em modo misto são os ensaios *Asymmetric double-cantilever beam* (ADCB), *mixed-mode flexure* (MMF) e *mixed-mode bending* (MMB) [46].

Ensaio ADCB

O ensaio ADCB é semelhante ao ensaio DCB. No entanto, os dois aderentes do provete podem ter espessura, material ou sequência de empilhamento diferente. O teste pode ser usado para avaliar a tenacidade à fratura interlaminar em modo misto de materiais laminados compósitos, bem como de juntas adesivas [3, 50].

Na Figura 53 está ilustrada uma representação esquemática do ensaio ADCB.

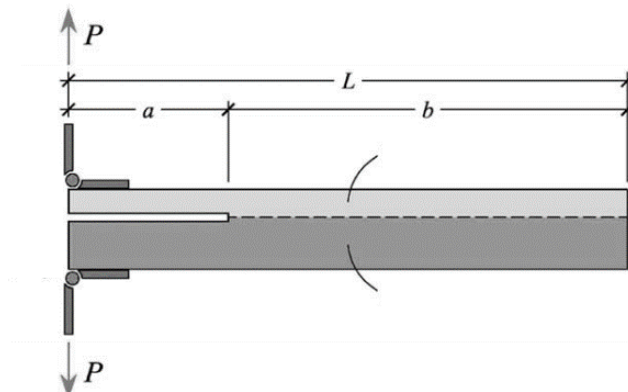


Figura 53 - Representação esquemática do ensaio ADCB [50].

Ensaio MMF

O ensaio MMF também conhecido como *single-leg bending* (SLB), é baseado no ensaio ENF. Contudo, o provete inferior tem um comprimento menor ficando sem suporte, o que resulta num modo à tração e ao corte em simultâneo (Figura 54) [18, 51]. O ensaio consiste num carregamento em flexão de três pontos, em que numa das extremidades o carregamento é apenas transmitido a um dos aderentes [11, 52].

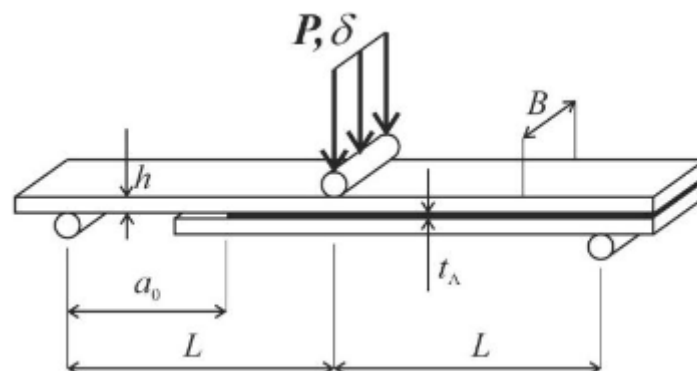


Figura 54 - Representação esquemática do ensaio MMF [51].

Ensaio MMB

O ensaio MMB (Figura 55) é o único ensaio que se encontra normalizado e disponível para o cálculo de G de compósitos referido na norma ASTM D 6671, e é uma combinação entre o ensaio DCB e o ensaio ENF. O ensaio permite alterar as proporções do modo misto, entre o modo I e o modo II [52, 53]. O acessório usado no ensaio permite que o provete seja carregado em diferentes proporções de modo misto alterando o comprimento " c ".

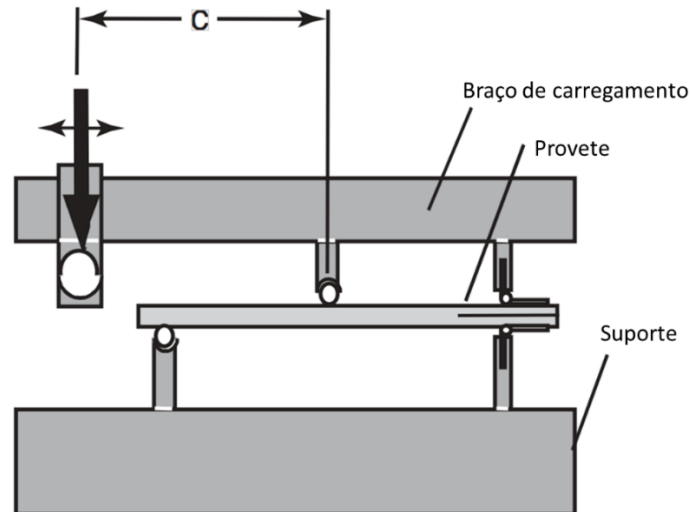


Figura 55 - Representação esquemática do ensaio MMB [18].

Determinação de G_{Ic} e G_{IIc}

Sendo o método MMB a combinação dos ensaios DCB e ENF, tipicamente usados para caracterizar G_{Ic} (Equação (15)) e G_{IIc} (Equação (23)) respectivamente, o ensaio MMB pode ser representado pela sobreposição do modo I e do modo II e G_{Ic} e G_{IIc} respectivamente [52, 54].

Usando a teoria de vigas, as expressões para G_{Ic} e G_{IIc} no ensaio em modo misto são [54]

$$G_{Ic} = \frac{12P_I^2 a_{eq}^2}{B^2 E_f h^3} \quad \text{e} \quad (24)$$

$$G_{IIc} = \frac{9P_{II}^2 a_{eq}^2}{16B^2 E_f h^3}. \quad (25)$$

As cargas para o modo I (Equação (26)) e II (Equação (27)) são dadas pelas expressões (26) e (27), respectivamente [54]

$$P_I = \left(\frac{3c - L}{4L} \right) P \quad \text{e} \quad (26)$$

$$P_{II} = \left(\frac{c - L}{4L} \right) P. \quad (27)$$

Na Figura 56 pode-se ver a análise da sobreposição das cargas no ensaio MMB.

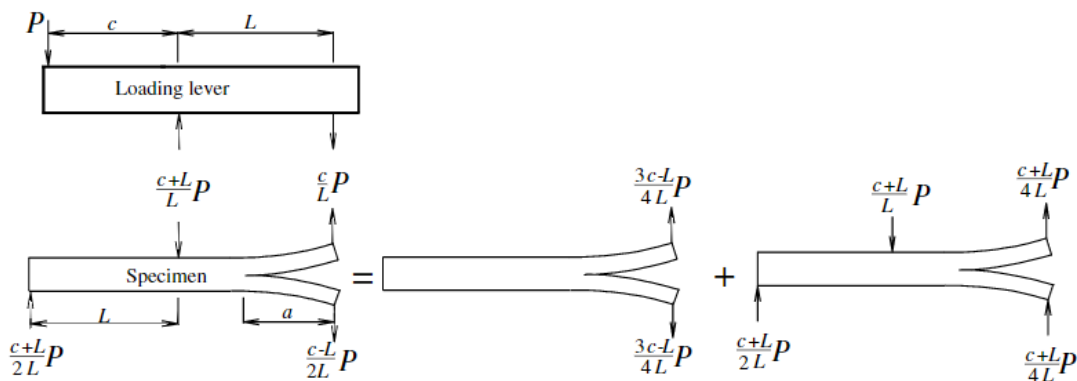


Figura 56 - Análise das cargas sobrepostas no ensaio MMB [54].

A proporção do modo misto pode ser obtida através de:

$$\frac{G_I}{G_{II}} = \frac{4}{3} \left(\frac{3c-L}{c+L} \right)^2, \quad c \geq \frac{L}{3}. \quad (28)$$

Através da equação (28) pode observar-se que a relação G_I/G_{II} é independente do comprimento da fenda e da carga P , sendo apenas função da distância c . A relação é zero quando c é menor do que $L/3$, porque abaixo desse valor o modo I não é significativo o suficiente para abrir a fenda [54].

2.3 Modificação de adesivos

O aumento da disponibilidade comercial aliado aos baixos preços dos dois tipos de reforços (fibras e partículas) promovem a incorporação destes aditivos nas ligações adesivas. Os reforços são geralmente materiais não adesivos mais duros, fortes e rígidos que o adesivo adicionados à formulação [55, 56] o que pode resultar numa alteração das propriedades mecânicas, térmicas, elétricas, funcionais ou de desempenho, entre outras [11]. Em alguns adesivos a adição de modificadores permite reduzir ou aumentar o tempo de cura ou alterar as condições a que esta ocorre [57]. Adicionalmente, através da modificação dos adesivos é possível a adição de agentes antibacterianos, prolongar o tempo de vida ao ar livre ou criar combinações de cores [55].

A adesão entre o reforço e o adesivo desempenha um papel fundamental. Como as tensões são transmitidas de reforço em reforço através da ligação do adesivo é necessário obter uma boa ligação. Caso a ligação não seja forte o suficiente as fissuras podem-se propagar, o que reduz a tenacidade e a resistência [58].

Na Tabela 1 estão representados alguns materiais usados para modificação de adesivos consequentemente associados à melhoria no adesivo.

A seleção das partículas e sua percentagem de uso são muito importantes, pois podem alterar as propriedades do adesivo dependendo do seu tamanho formato e tipo [55].

Tabela 1 -Melhoria associada às partículas/fibra adicionadas nos adesivos [23, 55].

Partícula/Fibra	Melhoria associada
Alumínio	Maquinagem, resistência ao impacto
Alumina	Resistência à abrasão, elétrica
Fibras de amianto	Reforço
Carvão negro	Cor e reforço
Fibras de vidro	Reforço
Carboneto de cálcio	Viscosidade
Grafite	Lubrificação
Aço	Resistência à abrasão
Prata	Condutividade elétrica
Zinco	Adesão, resistência a corrosão

Na Figura 57 pode ver-se uma representação esquemática de um adesivo com partículas metálicas que, neste caso, possibilitam a condutividade entre os substratos. Contudo esta depende do contacto entre as partículas no interior do adesivo [11, 23].

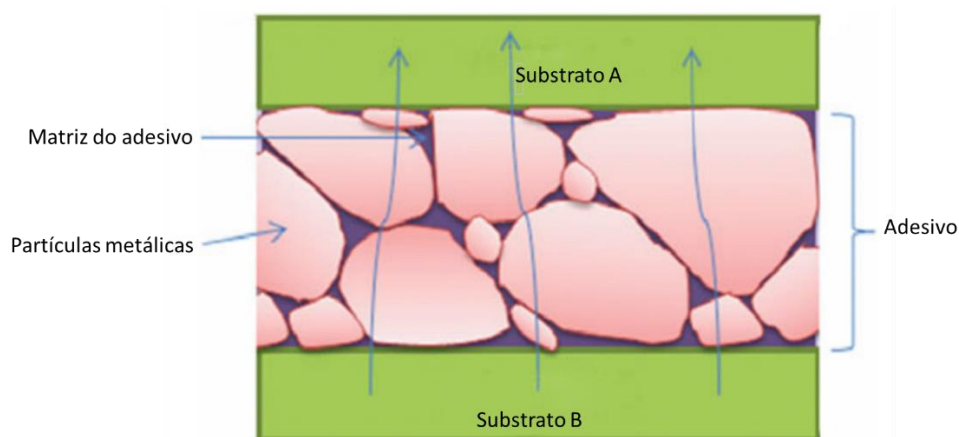


Figura 57 - Representação esquemática de um adesivo com partículas metálicas [11].

2.3.1 Aditivação por partículas

A aditivação por partículas pode ocorrer através de partículas minerais ou partículas orgânicas. Nos capítulos seguintes estão identificadas algumas destas partículas e as suas propriedades.

2.3.1.1 Partículas minerais

As partículas minerais podem ser usadas de forma a controlar a viscosidade do adesivo, reduzir a invasão da resina nos aderentes porosos, o peso do composto, a opacidade, acelerar o processo de reticulação, entre outras funções. As partículas mais usadas são os carboneto de cálcio, argila, sílica, talco e terra de diatomáceas [11, 59]

Outras partículas também usadas são os nanotubos de carbono. Estes consistem em estruturas ocas de forma cilíndrica com um diâmetro de pouco mais de 100 nm e com forma fibrosa [11].

As principais características dos nanotubos são:

- Estabilidade química;
- Alta condutividade elétrica e térmica;
- Altas propriedades mecânicas;
- Alta emissão de elétrons.

Os nanotubos de carbono são frequentemente usados no aumento da resistência e condutividade elétrica ou térmica. Por outro lado, os carbonetos de cálcio têm um diâmetro de cerca de 20 nm e apresentam uma aplicação promissora no reforço de adesivos estruturais ou elastómeros[11].

O talco pode minimizar as operações de desgorduramento das superfícies metálicas dos substratos, adiciona resistência química.

Na Figura 58 está exemplificado o comportamento de uma fissura num adesivo não reforçado (a) ou num adesivo reforçado (b). É possível ver que ao adicionar nanopartículas estas formam obstáculos levando a fissura a alterar o seu caminho de crescimento [2].

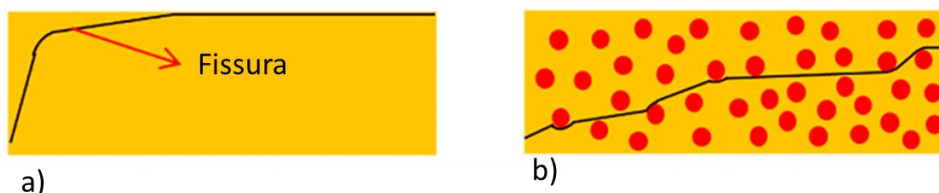


Figura 58 - Representação esquemática do crescimento de uma fenda num adesivo sem reforço (a) ou com reforço (b) [2].

2.3.1.2 Partículas orgânicas

Os reforços orgânicos têm ganho bastante destaque à luz das considerações ambientais. Em geral, as partículas orgânicas apresentam uma baixa densidade, bom comportamento de amortecimento, baixa contração, segurança para aplicações com alimentos, rigidez e baixo desgaste. Algumas das grandes desvantagens consistem na baixa resistência térmica, o que pode causar problemas durante a produção do adesivo [60], uma elevada capacidade de absorção de umidade e uma durabilidade menor que os outros tipos de reforços, embora estes aspectos se possam combater com alguns tratamentos específicos [58, 61].

O reforço orgânico mais utilizado é a madeira. Contudo, também podem ser usados reforços associados ao linho, *cannabis*, celulose, algodão, entre outros [58, 60].

De realçar que em geral os adesivos reforçados com partículas orgânicas são mais frágeis que os adesivos reforçados com partículas inorgânicas [62].

2.3.2 Aditivação por microfibras

As microfibras não metálicas mais utilizadas como reforço dos adesivos são de vidro e de carbono. Os reforços das fibras de vidro são utilizados de duas formas: fibras descontínuas (fibras curtas com uma relação de aspecto que pode variar entre 20 e 60) e fibras contínuas (fibras longas com relação de aspecto entre 200 e 500). O diâmetro das fibras pode variar entre os 10 e os 40 μm . As propriedades das fibras de vidro mantêm-se com a distribuição da carga. Estas fibras são amplamente utilizadas em diversas áreas como aeroespacial, defesa e automóvel devido às propriedades exclusivas apresentadas na Tabela 2 [56, 60, 63].

Tabela 2 – Principais propriedades da fibra de vidro e da fibra de carbono [56, 64]

Fibra de vidro	Fibra de carbono
Baixa densidade	Excelentes propriedades mecânicas, térmicas e elétricas
Baixo custo	Alta rigidez
Alta resistência	Baixo peso
Alta resistência a impactos	Alta resistência química
Baixa condutividade	Alta tolerância a temperatura
Elevada flexibilidade	Baixa expansão térmica
Bom isolante elétrico	Alta condutividade elétrica e térmica

As fibras de carbono são formadas por regiões de grafite não cristalizada e o seu diâmetro pode variar entre os 5 e os 10 μm . As principais propriedades destas fibras estão representadas na Tabela 2, sendo que é de salientar ainda o facto de a sua resistência à tração não ser afetada pela humidade ou altas temperaturas. As principais aplicações são na indústria aeroespacial, engenharia civil e militar. No entanto, entre todas as fibras e reforços é a que oferece o preço mais elevado [56, 65].

No campo das fibras metálicas podem ser usadas macrofibras de aço, alumínio, entre outras. O seu diâmetro varia de 0,2 a 1,2 mm e a sua incorporação melhora o comportamento e as propriedades mecânicas das juntas. A colocação das fibras metálicas na junta pode ocorrer na direção longitudinal e/ou na transversal [56, 66].

As macrofibras metálicas têm algumas vantagens face aos outros esforços [56]:

- Melhor desempenho no processo de cura do adesivo;
- Melhor condutividade elétrica da camada adesiva;
- Espessura adesiva uniforme.

2.3.3 Outros aditivos

Os aditivos podem também ser produtos químicos funcionais que são adicionados ao adesivo para melhorar o processo ou algumas propriedades. Muitos aditivos como antioxidantes, estabilizadores térmicos, estabilizadores de ultravioleta (UV), auxiliares de processamento de polímeros, aditivos anti-bloqueio, aditivos de deslizamento, anti-embaçamento, anti-estáticos e retardadores de chama podem ser usados [11, 23].

Os aditivos também podem ser usados como material funcional para melhorar propriedades importantes dos produtos finais [11].

Outro tipo de aditivos que se podem considerar são os plastificantes. O principal objetivo dos plastificantes é a melhoria na flexibilidade, mas também redução do módulo de elasticidade, rigidez, dureza e temperatura de transição vítrea [23, 60].

2.4 Casos de estudo

Neste capítulo serão apresentados alguns trabalhos já realizados com a aditivação de adesivos, e descritas as principais conclusões obtidas.

2.4.1 Fibras

A utilização de fibras é cada vez mais utilizada na melhoria das propriedades do adesivo. De facto, as suas propriedades mecânicas superam as propriedades de ligas metálicas, o que se traduz numa melhoria das características mecânicas e redução de peso, o que faz com que este reforço seja bastante utilizado no mercado. Na Tabela 3

são apresentados trabalhos relevantes onde foi usado um adesivo reforçado com fibras.

Tabela 3 - Casos de estudo de adesivos reforçados com fibras.

Nam et al. [67]	<p>Neste trabalho foi estudado o efeito da adição de um reforço de fibras de vidro no adesivo de poliuretano, numa junta adesiva de alumínio-aço inoxidável. De modo a avaliar o efeito do reforço na tenacidade à fratura em modo I foram usadas quatro concentrações em volume de reforço (0%, 15%, 20%, 25%). Foram realizados provetes DCB e testados à temperatura criogênica de -150 °C. Os melhores resultados de G_{Ic} foram verificados para uma concentração de 20% de fibras, aumentando 7,2 vezes em relação ao adesivo sem reforço.</p>
Alomayri [68]	<p>Neste trabalho foi estudado o efeito do aumento da concentração de microfibras de vidro nas propriedades mecânicas de um geopolímero à base de cinzas volantes. Foram estudadas quatro concentrações em massa de microfibras (0, 1, 2 e 3%). Verificou-se que os resultados ideais foram obtidos com a adição de 2% em massa de microfibras, o que permitiu ao adesivo exibir os mais altos níveis de tenacidade à fratura (95% superior), resistência à compressão (89% superior), módulo de Young (40% superior) e dureza. Verificou-se também que a adição das microfibras de vidro levou a uma melhor adesão do adesivo aos aderentes, resultante do preenchimento dos vazios na matriz, tornando a mistura mais densa.</p>
He e Evans [69]	<p>Este trabalho pretende estudar o efeito da adição do reforço de fibras de vidro na tenacidade à fratura em modo I de um adesivo de poliuretano. Foi usado um substrato de compósito de madeira de bétula laminado, e 5,5% de concentração em massa de fibras. Foram realizados e testados provetes DCB, e verificou-se um aumento de 5% do G_{Ic} quando se compara o adesivo reforçado com o adesivo puro.</p>

2.4.2 Cortiça

Retirada dos sobreiros a cada 9-12 anos. a cortiça é usada numa infinidade de produtos desde os mais tradicionais, aos mais inovadores. As suas principais aplicações consistem no fabrico de rolhas e pavimentos, embora a cortiça também possa ser utilizada para isolamento, e produtos para áreas tão diversas com a construção, a moda, o design, a saúde, a produção de energia ou a indústria aeroespacial. A possibilidade de combinar a cortiça com adesivos torna-a numa opção diferenciadora e contribui para que assumam uma importância crescente [70].

Na Tabela 4 são apresentados alguns trabalhos onde foi usado um adesivo reforçado com cortiça.

Tabela 4 - Casos de estudo de adesivos reforçados com cortiça.

Barbosa et al. [71]	Neste trabalho são utilizadas micropartículas de cortiça com o objetivo de aumentar a tenacidade de fratura à tração de um adesivo epóxico frágil. A quantidade de cortiça no adesivo variou entre os 0,25% e 1% em volume. A tenacidade foi avaliada através de testes de fratura. Com esta pesquisa, foi possível concluir que a cortiça pode melhorar a tenacidade do adesivo. Por outro lado, o tamanho, a quantidade e o uso de tratamento da superfície influenciam as propriedades mecânicas. Verificou-se que a interação mais forte é quantidade vs. tratamento de superfície, com 12,7% de contribuição.
Barbosa et al. [72]	Neste estudo foram usadas micropartículas de cortiça com o objetivo de caracterizar o efeito da cortiça no adesivo epóxico frágil. Foi investigado o efeito da quantidade de cortiça na reação de cura do adesivo, sabendo que a quantidade presente afeta as propriedades mecânicas, usando 0%, 0,5%, 1%, 2% e 5% em volume de cortiça. Concluiu-se que as amostras com 0,5% e 1% apresentam maior deformação máxima na rotura à tração que as amostras com 0%, 1%, 2% e 5%. Verificou-se também que as partículas de cortiça não alteram a resistência à tração do adesivo.

2.4.3 Nanotubos de carbono

Os nanotubos de carbono (NTCs) são considerados um dos materiais de reforço mais promissores para a próxima geração de compósitos estruturais e compósitos multifuncionais [73]. Estes nanotubos têm excelentes propriedades mecânicas,

térmicas e elétricas. Alguns NTCs apresentam uma maior resistência do que o aço, mais leves do que o alumínio e mais condutores do que o cobre [73, 74].

Na Tabela 5 são apresentados alguns trabalhos onde foram analisados adesivos reforçados com nanotubos.

Tabela 5 - Casos de estudo de adesivos reforçados com nanotubos.

Wernik e Meguid [75]	Este trabalho tem como objetivo caracterizar as propriedades físicas e mecânicas de adesivos epóxicos estruturais reforçados com nanotubos de carbono com 3 concentrações em massa de nanotubos (0%, 1% e 1,5%) O estudo conclui que, no ensaio dos provetes maciços, existe um aumento gradual da resistência à tração, que atingiu um máximo de 25% para a concentração de 1,5%. No ensaio DCB verificou-se um aumento do G_{Ic} até 1% de concentração, onde foi atingido o seu valor máximo, superior em 36% relativamente ao adesivo simples.
Khoramishad e Khakzad [76]	Neste trabalho foi estudada a energia de fratura de um adesivo epóxico reforçado com <i>Multi-walled Nanotubes</i> (MWCNTs) com diâmetro externo inferior a 8 nm em Modo I. Foram realizados ensaios DCB aos adesivos com quatro concentração em massa de nanotubos (0%, 0,1%, 0,3% e 0,5%), e verificou-se que a melhoria máxima de 58,4% na energia de fratura é obtida para uma concentração de 0,3%.

DESENVOLVIMENTO

- 3.1 Materiais utilizados
- 3.2 Ensaio mecânico à tração
- 3.3 Ensaio mecânico ao corte
- 3.4 Ensaio de fratura à tração
- 3.5 Ensaio de fratura ao corte
- 3.6 Ensaio em modo misto
- 3.7 Discussão dos resultados obtidos
- 3.8 Comparação com dados da literatura

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Materiais utilizados

Neste capítulo são descritos os materiais utilizados para a realização deste trabalho experimental, nomeadamente dos substratos, adesivo e fibras, e é realizada uma análise às suas propriedades mecânicas mais relevantes.

3.1.1 Aderentes

O aderente utilizado neste trabalho foi um material compósito de matriz polimérica de resina epóxida reforçada com fibra de carbono, na forma de pré-impregnado unidirecional (CIT® HS 160 REM), devido à sua resistência elevada, expectavelmente necessária para garantir a correta realização dos ensaios, nomeadamente os de fratura, devido à elevada ductilidade do adesivo. Por outro lado, após testes preliminares, verificou-se que o alumínio e aço apresentam pior adesão a este adesivo, pelo que não se consegue garantir a existência de roturas 100% coesivas do adesivo após rotura das juntas, o que compromete os resultados dos ensaios.

Na Tabela 6 estão apresentadas as propriedades elásticas ortotrópicas de uma camada unidirecional deste material, em que a direção 1 corresponde à direção das fibras, a direção 2 à direção transversa e a direção 3 à direção fora do plano.

Tabela 6 - Propriedades elásticas ortotrópicas do compósito reforçado com fibras de carbono, com as fibras alinhadas unidireccionalmente na direção 1 (a direção 2 corresponde à direção transversa e a direção 3 à direção fora do plano) [77].

Módulo de Young (E)	Coefficiente de Poisson (ν)	Módulo de corte (G)
$E_{11}=1.909E+0.5$ MPa	$\nu_{12}=0.342$	$G_{12}=4315$ MPa
$E_{22}=8819$ MPa	$\nu_{13}=0.342$	$G_{13}=4315$ MPa
$E_{33}=8819$ MPa	$\nu_{23}=0.380$	$G_{23}=3200$ MPa

3.1.2 Adesivo

O adesivo utilizado neste trabalho foi o SikaForce®-840 L07 (Figura 59). Este é um adesivo recente no mercado e, que ainda carece de ser caracterizado, não havendo muita informação nem trabalhos realizados do mesmo. É um adesivo estrutural de dois componentes, a resina (componente A) e o endurecedor (componente B), à base de poliuretano flexível que cura à temperatura ambiente. Este adesivo é adequado para unir materiais compósitos ou componentes de metal revestidos [78].



Figura 59 - Adesivo SikaForce®-840 L07.

O SikaForce®-840 L07 é caracterizado por ter propriedades mecânicas estáveis numa vasta gama de temperaturas. No estado não curado o adesivo tem uma boa estabilidade e é fácil de comprimir. Este adesivo é adequado para usar em ligações elásticas estruturais de matérias compósitos ou metais revestidos na construção de veículos e na indústria em geral. Na Tabela 7 estão apresentadas as principais características técnicas do adesivo, obtidas com base na *data-sheet* do fabricante [78].

Tabela 7 - Características técnicas do adesivo SikaForce®-840 L07 [78]

Propriedade		SikaForce®-840 (A)	SikaForce®-840 (B)
Base química		Poliol	Isocianato
Cor		Preto	Preto
Densidade	(antes de curar)	1,16 g/cm ³	1,27 g/cm ³
	Mistura (calculado)	1.21 g/cm ³	
Rácio de mistura	Volume	100:100	
	Peso	100:109.5	
Viscosidade	10s ⁻¹	22Pa.s ^A	60Pa.s ^A
Temperatura de aplicação		15 – 30 °C	
Tempo de utilização		7 min ^{B,C}	
Tempo de manuseamento	Tempo até que seja alcançado 1 MPa	20 min ^{B,C}	
Dureza shore (ISO 7619-1)		95 ^B	
Resistência à tração (ISO 527)		15 MPa ^{B,D}	
Alongamento na rotura (ISO 527)		100% ^{B;D}	
Módulo de Young (ISO 527)	alongamento 0.05-0.25%	350 MPa ^{B,D}	
Resistência ao corte (ISO 4587)		15 MPa ^{B, C, D}	
Temperatura de transição vítrea (ISO 6721)		-45 °C ^D	
Durabilidade		12 meses ^E	

A) Testado a 20°C

D) Curado após uma semana a 23°C

B) 23°C/50% de humidade relativa

E) Armazenado entre 15 e 25 °C

C) Camada de adesivo: 25 x 12.5x 1.5 mm

3.1.3 Fibras de vidro de reforço

A material utilizado neste trabalho como reforço do adesivo foi fibra de vidro triturada, da empresa LANXESS, com referência MF 7980 (Figura 60). Este material é adequado para aplicações de reforço necessitando de fibras de pequena dimensão, sem tratamento superficial e elevada fluidez [79].

O material é particularmente recomendado para reforço de espumas “*integral skin*” de poliuretano.



Figura 60 - Fibras de vidro MF 7980 [79].

As fibras MF 7980 consistem em filamentos individuais de diferentes comprimentos, com um comprimento nominal médio de 190 μm . Na Tabela 8 estão apresentadas as principais características das fibras de vidro MF 7980, obtidas com base na ficha técnica do fabricante [79].

Tabela 8 - Principais características da fibra de vidro MF 7980 [79].

Diâmetro da fibra (nominal)	14 μm
Comprimento da fibra (nominal)	190 μm
Teor de humidade	$\leq 0,05 \text{ wt}\%$
Densidade aparente	Aprox. 600 kg/m^3

3.1.4 Preparação do adesivo reforçado

Para a preparação do adesivo reforçado foi necessário fazer a mistura do adesivo e das fibras manualmente. Sendo o adesivo SikaForce®-840 L07 fornecido em cartucho de dois componentes (A e B) foi necessário preparar os adesivos para cada concentração mássica de fibras de vidro (15 phr, 35 phr e 55 phr) e efetuar a mistura de cada um dos três componentes.

Inicialmente começou-se por definir a quantidade de adesivo necessário para fabricar a totalidade de provetes para qualquer condição (adesivo reforçado ou não):

- 3 provetes de adesivo maciço (espessura 2 mm);
- 3 provetes DCB (c/ filme de adesivo de espessura -1mm);
- 3 provetes ENF (c/ filme de adesivo de espessura -1mm);
- 3 provetes BS (c/ filme de adesivo de espessura -1mm);
- 3 provetes JSS (c/ filme de adesivo de espessura -1mm).

Isto resultou em cerca de 40 cm³, e tendo em consideração a densidade do adesivo, a massa resultante rondava as 50 g. Nas diferentes sessões de trabalho experimental este valor foi sendo ajustado para os provetes a produzir. Foram consideradas 3 concentrações mássicas de reforço de microfibras de vidro: 15 phr, 35 phr e 55 phr (phr - *per hundred resin*). Para uma concentração genérica de C phr, para concentração em fração mássica (f_{FV}) de microfibras tem-se:

$$f_{FV} = \frac{C}{C+100}. \quad (29)$$

Logo,

15 phr = 13,0 %

35 phr = 25,9 %

55 phr = 35,5 %

Para a preparação das formulações de adesivo reforçado foi necessário considerar a razão de mistura mássica de componentes A e B do adesivo. Uma vez que a razão de mistura é de 1:1 (v/v), considerando as densidades dos dois componentes determinou-se a razão de mistura m/m.

Assim vem: $\rho_A = 1,16$ e $\rho_B = 1,27$, logo resulta a equação (30)

$$\frac{m_b}{m_a} = \frac{\rho_b}{\rho_a} = \frac{1,27}{1,16} = 1,095, \quad (30)$$

isto é, por 100,0 g de A são necessárias 109,5 g de B, para uma mistura de iguais volumes dos componentes.

Desta forma, pode-se considerar, para uma quantidade inicial de adesivo de 50 g, para a concentração C phr, são necessários (C/2) g de microfibras de vidro. Relativamente às massas dos componentes A e B, podem ser calculadas através das equações (31) e (32):

$$m_a = \frac{100}{100+109,5} \times 50. \quad (31)$$

$$m_b = 50 - m_a. \quad (32)$$

Para pesagem dos componentes foi usada uma balança digital presente no laboratório de materiais compósitos do ISEP (Figura 61).

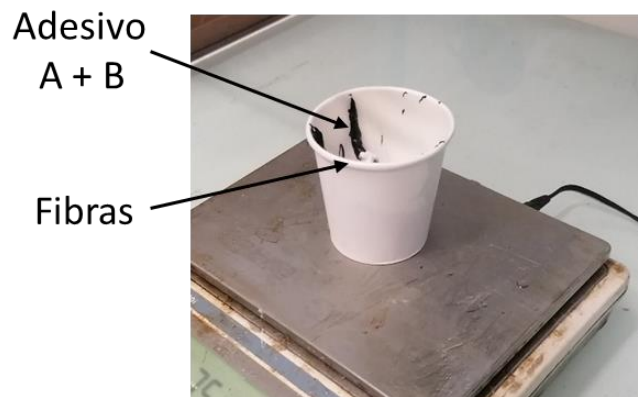


Figura 61 - Preparação adesivo reforçado.

3.2 Ensaios mecânicos à tração

Neste capítulo são descritos os métodos usados para produção dos provetes maciços de adesivo para o ensaio de tração. Serão apresentadas as dimensões e geometria utilizadas, preparação e aplicação do adesivo no molde, a posterior remoção dos provetes e a preparação para o ensaio.

3.2.1 Definição do ensaio

Para a determinação das propriedades mecânicas à tração do adesivo foram usados provetes maciços de adesivo fabricados segundo a norma francesa NF T 76-142. As dimensões dos provetes estão indicadas na Figura 62.

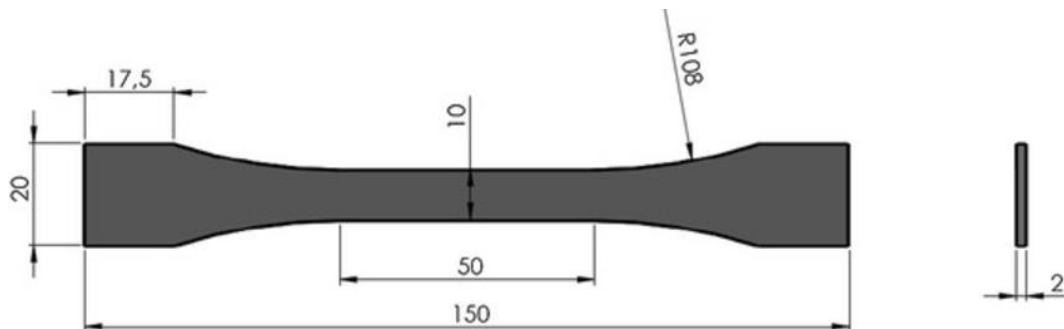


Figura 62 - Dimensões dos provetes maciços de adesivo de acordo com a norma NF T 76-142 (dimensões em mm).

3.2.2 Fabrico e ensaio dos provetes

3.2.2.1 Fabrico dos provetes

Para o fabrico dos provetes foi usado um molde existente no laboratório de ensaios mecânicos do Instituto Superior de Engenharia do Porto, apresentado na Figura 63.

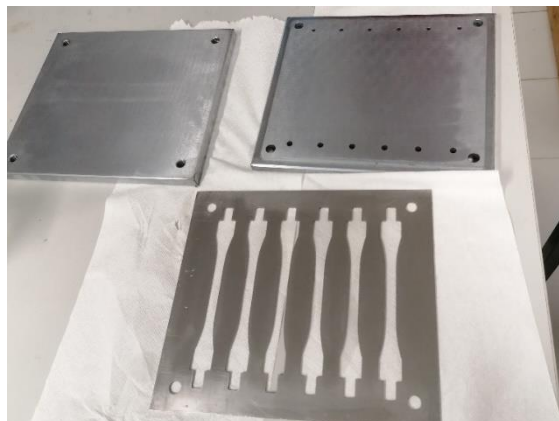


Figura 63 - Molde para fabrico dos provetes de adesivo maciço.

Trata-se de um molde constituído por três partes distintas, como referido no capítulo 2.2.1.1.1, e com capacidade para produção de 6 provetes em simultâneo.

Preparação do molde

De forma a garantir uma correta desmoldação dos provetes após cura do adesivo é necessário a preparação do molde. A qualidade dos provetes, definida por um bom acabamento superficial, e a não existência de poros no interior do provete, é também afetada de acordo com a correta preparação do molde, aumentando significativamente quando o molde é corretamente preparado.

Primeiramente, com o auxílio de papel embebido em acetona, foi necessário proceder a uma limpeza completa de todas as partes do molde de forma a remover quaisquer detritos que possam existir provenientes de provetes realizados anteriormente, como resíduos de adesivo ou gorduras devido ao manuseamento.

Após limpeza do molde é necessária aplicação do desmoldante para facilitar a remoção dos provetes. Para uma melhor adesão do desmoldante foi necessário o aquecimento do molde no forno a 80 °C durante 15 min. Para o efeito utilizou-se o desmoldante Loctite Frekote® 770-NC (Figura 64) [80].



Figura 64 - Loctite Frekote® 770-NC.

Depois de retirar o molde do forno é aplicado o desmoldante, ainda com as placas quentes, em todas as superfícies que estarão em contacto com o adesivo, tendo especial atenção na aplicação de desmoldante nos orifícios e contornos da placa intermédia (Figura 65). Esta etapa foi repetida três vezes de forma a assegurar uma camada suficientemente consistente de desmoldante em todas as zonas do molde e assim facilitar a desmoldagem dos provetes sem os danificar.

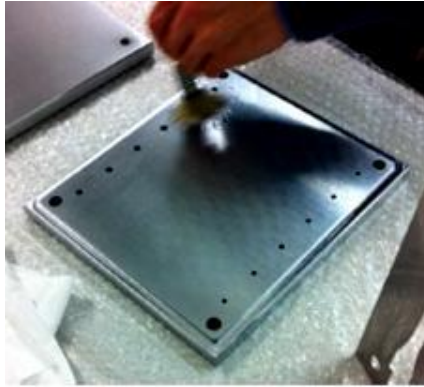


Figura 65 - Aplicação de desmoldante no molde

Finalizadas estas etapas, as placas ficam preparadas para receber o adesivo.

Preparação e aplicação do adesivo

A aplicação do adesivo no molde foi realizada de duas formas, dependendo da concentração de fibras. Para o caso do adesivo a 0 phr de concentração de fibras, e como o mesmo é fornecido em cartuchos bi-componente, este foi aplicado com auxílio de uma pistola adequada diretamente na cavidade do molde. A mistura é realizada através do bico de mistura na extremidade dos cartuchos. É importante garantir que a placa intermédia fica corretamente alinhada e evitar oscilações. Como tal foram então utilizados dois parafusos para auxiliar no alinhamento das placas e evitar o movimento relativo das mesmas (Figura 66).

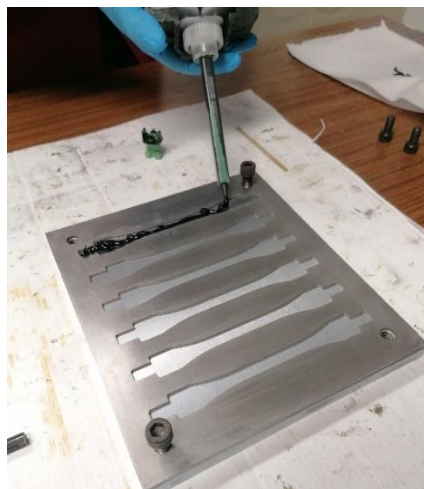


Figura 66 - Aplicação do adesivo através do bico de mistura dos cartuchos.

Nos casos em que é necessário adicionar fibras à mistura (15 phr, 35 phr, e 55 phr), foi necessário fazer a mistura dos três componentes (A, B e fibras) manualmente. Assim sendo, com auxílio de uma balança digital foram pesadas as quantidades desejadas para cada mistura (Figura 67).



Figura 67 - Pesagem da mistura do adesivo

Posteriormente, encheu-se o molde manualmente com auxílio de uma espátula (Figura 68).



Figura 68 - Aplicação do adesivo com auxílio de uma espátula

Em ambos os casos, é importante garantir que todas as cavidades estão totalmente cheias e sem bolhas de ar, de forma a garantir o completo enchimento do molde e reduzir a probabilidade de defeitos internos.

Após terminado o enchimento e compactação do adesivo no molde colocou-se a placa superior e procedeu-se ao aperto do molde de forma a compactar e expulsar as bolhas de ar que possam existir, assim como o excesso de adesivo (Figura 69).

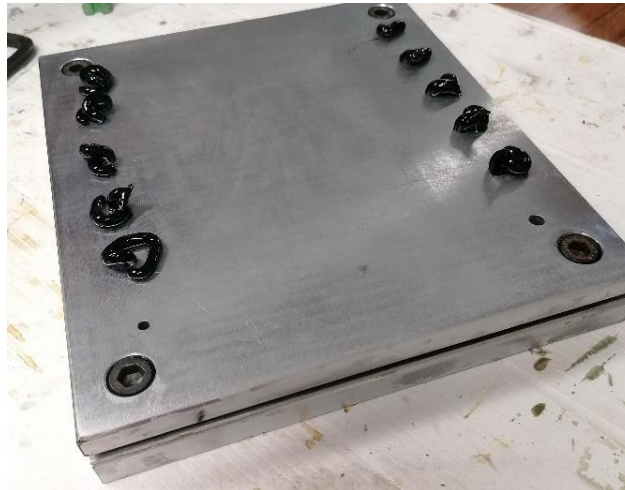


Figura 69 - Molde após aperto.

Cura e remoção dos provetes

Após a realização do procedimento anteriormente descrito, deixou-se o adesivo curar durante uma semana à temperatura ambiente e procedeu-se à abertura do molde para remoção dos provetes.

Após abertura do molde, verificou-se que os provetes apresentavam um bom acabamento superficial e tinham as cavidades completamente preenchidas (Figura 70).



Figura 70 - Molde com os provetes após cura.

Posteriormente, procedeu-se à remoção dos provetes do molde e com auxílio de um *x-ato* foi removido o excesso de adesivo e rebarbas resultantes da moldação.

Após remoção de todo o excesso os provetes apresentavam o aspeto da Figura 71.



Figura 71 - Provetes maciços com uma concentração de fibras de 0 phr.

3.2.2.2 Ensaio dos provetes

Para a realização dos ensaios de tração dos provetes de adesivo maciço foi usada uma máquina universal de ensaios Shimadzu Autograph AG-X 100, existente no laboratório de ensaios mecânicos do ISEP, com *software* TRAPEZIUM X para controlo do ensaio instalado no computador. Esta máquina tem uma célula de carga de 100 kN, utilizada para medição da força aplicada. A mesma máquina foi utilizada para realização dos restantes ensaios efetuados.

Medição das deformações

Para medição das deformações longitudinais foi usado um extensómetro mecânico de contacto no corpo do provete com um valor do comprimento característico do extensómetro (l_e) de 50 mm, da forma mais centrada possível como demonstra a Figura 72. Sendo este um extensómetro de contacto é necessário removê-lo antes de se atingir o limite elástico do provete, de forma a não danificar o provete ou o próprio extensómetro.



Figura 72 - Aplicação do extensómetro num provete de adesivo maciço.

Condições de ensaio

Os provetes foram devidamente numerados e identificados de acordo com a concentração de fibras, de forma a facilitar a sua identificação antes e após a realização do ensaio. O ensaio dos provetes maciços foi realizado à temperatura ambiente. Começou por se calibrar a máquina de ensaios de forma a considerar um deslocamento igual a zero no início de cada ensaio. Para prender os provetes foram utilizadas amarras de cunha, de forma a evitar o escorregamento dos provetes.

Para a realização dos ensaios foi utilizada uma velocidade constante de 2 mm/min até que ocorresse a rotura do provete, e utilizado um extensómetro mecânico (Figura 73-a), que foi retirado para um alongamento de 5 mm (Figura 73-b).

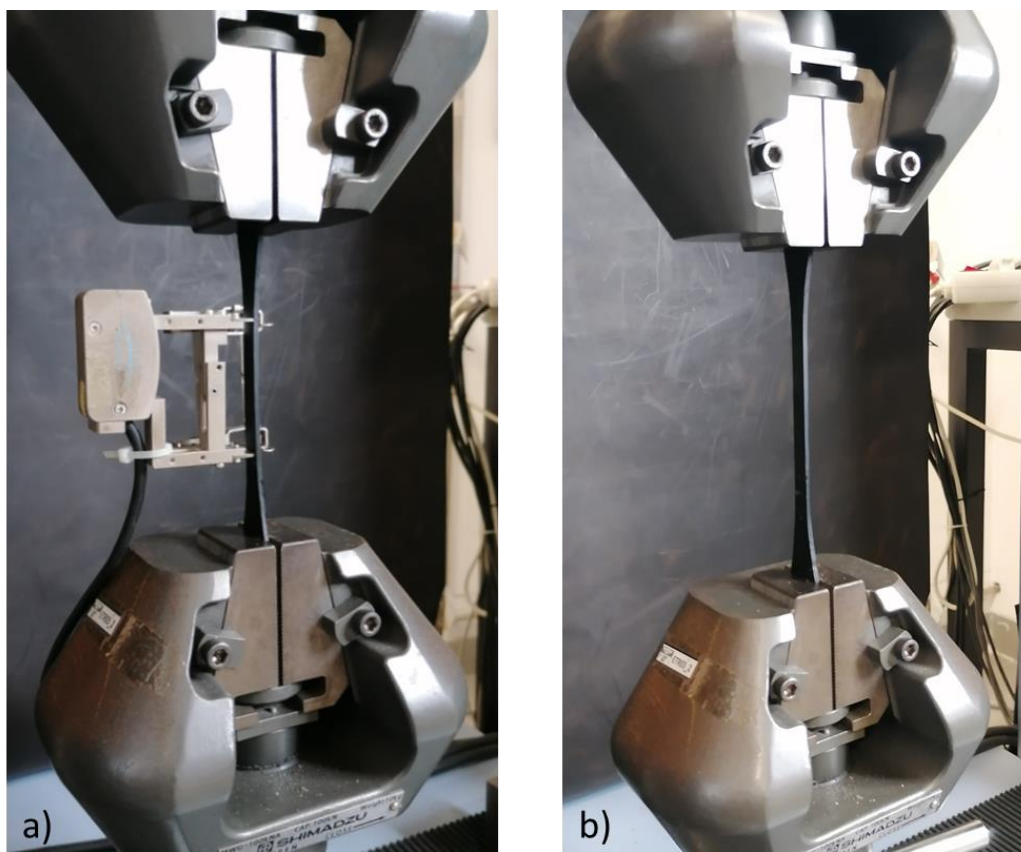


Figura 73 - Setup do ensaio de tração dos provetes de adesivo maciço: a) com extensómetro e b) após remoção do extensómetro

Após preparação dos provetes, estes foram medidos (largura e espessura) com recurso a um paquímetro digital. Pretendeu-se com isto obter a área de secção real do provete. Foram executadas três medições em cada provete de forma a obter o resultado mais próxima da realidade. Na Tabela 9, Tabela 10, Tabela 11 e Tabela 12 estão apresentadas as dimensões dos provetes maciços das concentrações de fibra de vidro de 0 phr, 15 phr, 35 phr e 55 phr, respetivamente.

Tabela 9 - Dimensões dos provetes maciços com uma concentração de fibras de 0 phr.

Provete	Largura (mm)	Largura média (mm)	Espessura (mm)	Espessura média (mm)	Área de secção útil (mm ²)
1	10,26	10,21	2,04	2,04	20,83
	10,17		2,04		
	10,20		2,04		
2	10,11	10,08	2,04	2,04	20,56
	10,08		2,04		
	10,05		2,04		
3	10,19	10,14	2,03	2,02	20,49
	10,11		2,02		
	10,13		2,01		
4	10,19	10,14	2,04	2,04	20,65
	10,15		2,03		
	10,08		2,04		
5	10,20	10,20	2,04	2,03	20,71
	10,21		2,03		
	10,19		2,02		

Tabela 10 - Dimensões dos provetes maciços com uma concentração de fibras de 15 phr.

Provete	Largura (mm)	Largura média (mm)	Espessura (mm)	Espessura média (mm)	Área de secção útil (mm ²)
1	10,73	10,65	2,26	2,22	23,61
	10,51		2,22		
	10,72		2,17		
2	10,10	10,21	2,11	2,14	21,89
	10,13		2,15		
	10,41		2,17		
3	10,14	10,38	2,13	2,18	22,60
	10,26		2,18		
	10,75		2,22		

Tabela 11 - Dimensões dos provetes maciços com uma concentração de fibras de 35 phr.

Provete	Largura (mm)	Largura média (mm)	Espessura (mm)	Espessura média (mm)	Área de secção útil (mm ²)
1	10,07	10,08	2,11	2,11	21,27
	10,06		2,11		
	10,11		2,11		
2	10,05	10,08	2,07	2,07	20,90
	10,13		2,08		
	10,06		2,07		
3	10,02	10,08	2,12	2,11	21,30
	10,05		2,11		
	10,16		2,11		

Tabela 12 - Dimensões dos provetes maciços com uma concentração de fibras de 55 phr.

Provete	Largura (mm)	Largura média (mm)	Espessura (mm)	Espessura média (mm)	Área de secção útil (mm ²)
1	10,24	10,18	2,08	2,08	21,13
	10,05		2,08		
	10,24		2,07		
2	10,09	10,05	2,09	2,09	21,00
	10,03		2,09		
	10,02		2,09		
3	10,06	10,09	2,09	2,09	21,12
	10,07		2,10		
	10,14		2,09		

Posteriormente executou-se todo o tratamento de dados através da informação retirada da máquina de ensaios, recorrendo a uma folha de calculo Excel® de forma a calcular o módulo de Young, tensão de limite elástico, tensão de rotura e alongamento máximo.

3.2.3 Resultados

Foi usada por base a norma EN ISO 527-2 para determinação das propriedades mecânicas à tração do adesivo. A equação (1) é utilizada para determinação do valor de E . O valor do módulo é calculado através dos dados da curva σ - ϵ , selecionando dois valores de σ correspondentes a ϵ de 0,05% e 0,25%. A tensão de rotura é calculada através da razão entre a força máxima e a secção transversal inicial do provete, de acordo com a equação (33)

$$\sigma_r = \frac{P_{\max}}{A}. \quad (33)$$

A tensão de limite elástico é obtida para uma deformação de 0,2%, traçando uma reta paralela à curva σ - ϵ na zona elástica. A interseção de ambas a reta resulta na obtenção de σ_y como demonstrado na Figura 33. A deformação máxima dos provetes foi obtida através do alongamento máximo.

3.2.3.1 Curvas P - δ e σ - ϵ

Através dos dados fornecidos pelo *software* TRAPEZIUM X é possível efetuar o tratamento de dados e obter as correspondentes curvas P - δ e curvas σ - ϵ . As curvas P - δ dos ensaios estão apresentadas da Figura 74 à Figura 77, de acordo com a concentração de fibras usada.

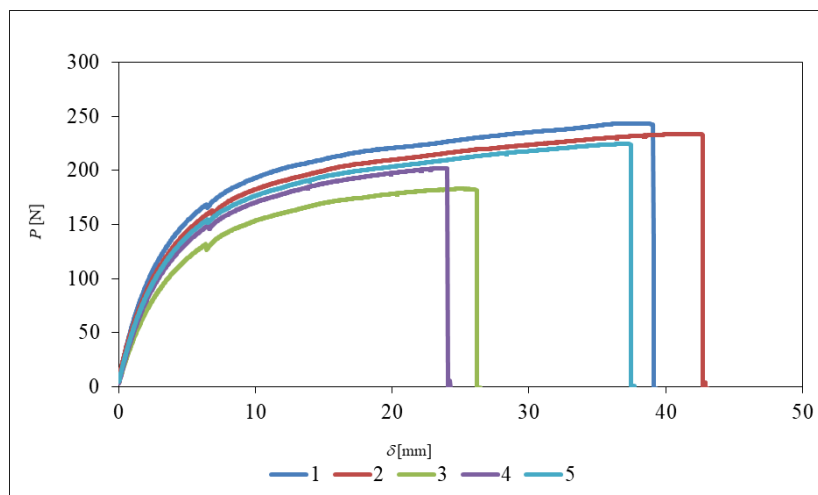
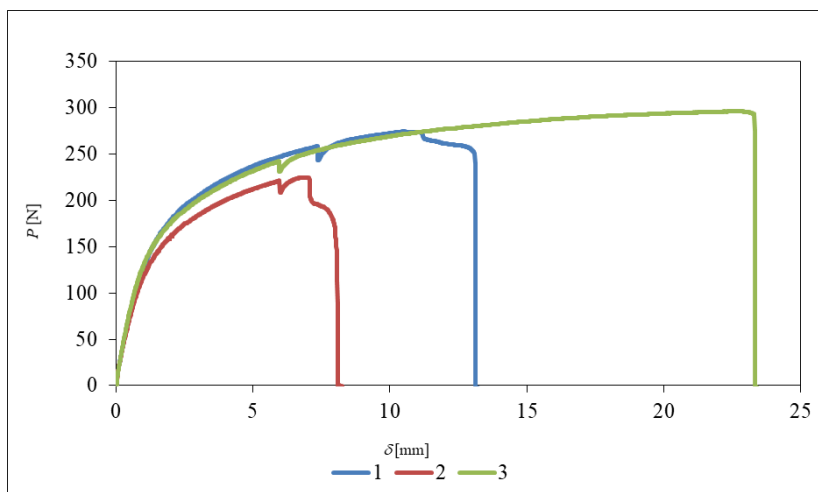
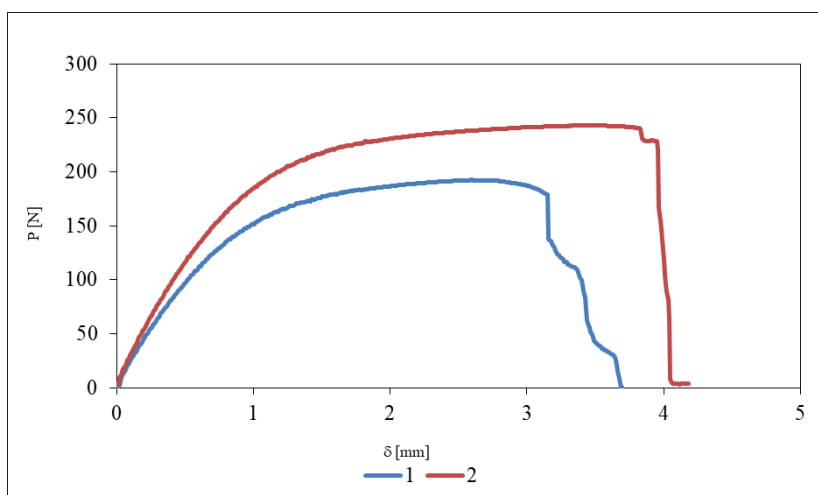
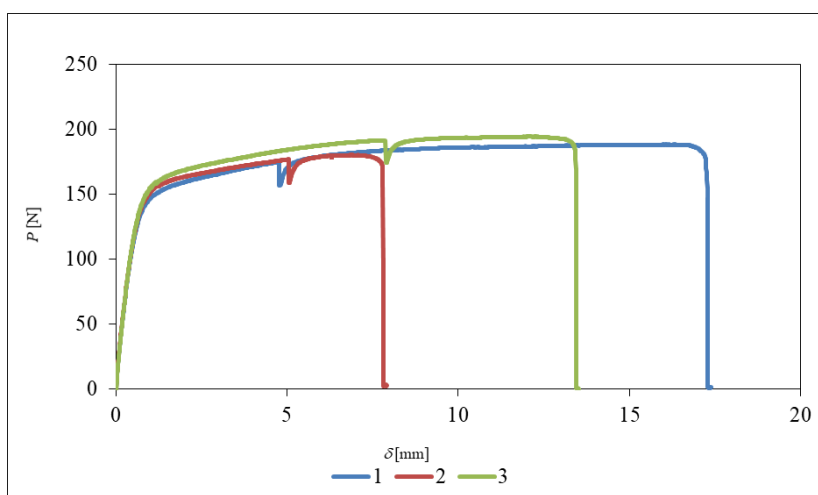


Figura 74 - Curvas P - δ dos provetes maciços com 0 phr de concentração de fibras.

Figura 75 - Curvas P - δ dos provetes maciços com 15 phr de concentração de fibras.Figura 76 - Curvas P - δ dos provetes maciços com 35 phr de concentração de fibras.Figura 77 - Curvas P - δ dos provetes maciços com 55 phr de concentração de fibras.

As curvas σ - ε dos ensaios estão apresentadas da Figura 78 à Figura 81 de acordo com a concentração de fibras usada.

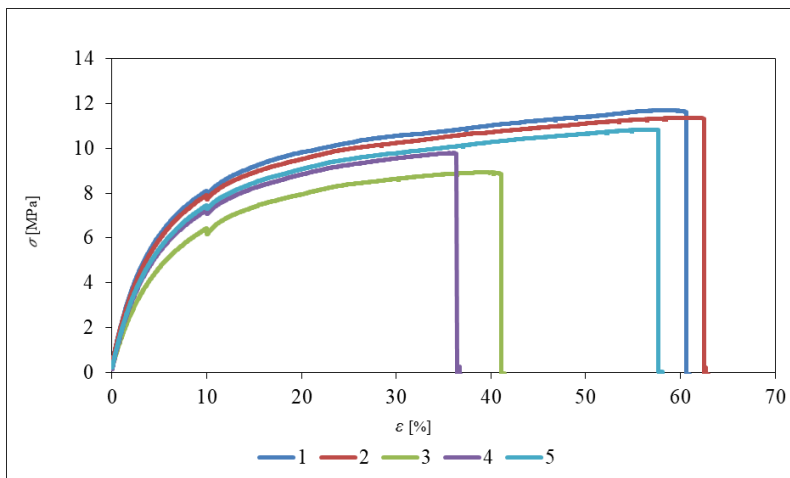


Figura 78 - Curvas σ - ε dos provetes maciços com 0 phr de concentração de fibras.

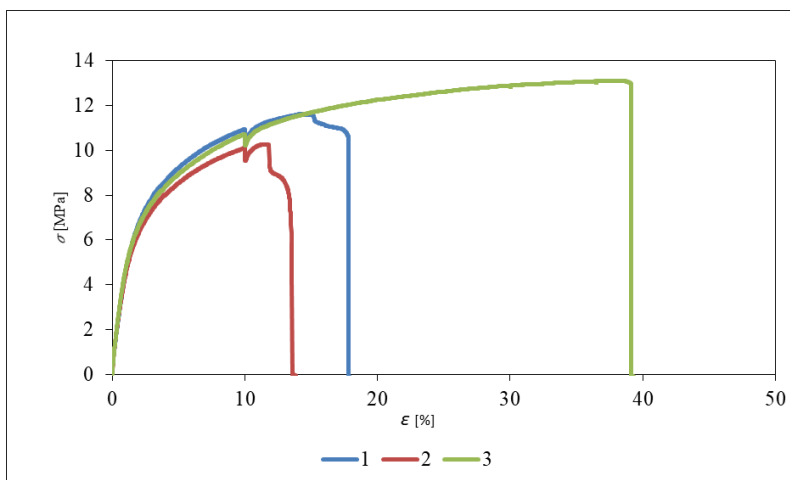


Figura 79 - Curvas σ - ε dos provetes maciços com 15 phr de concentração de fibras.

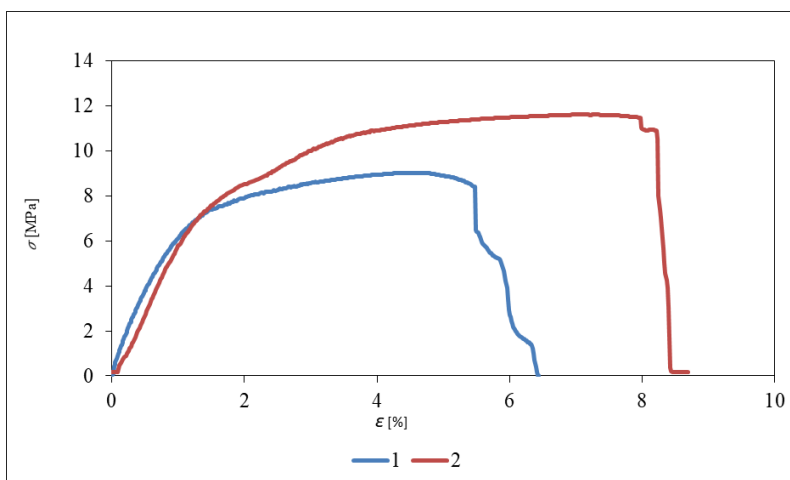


Figura 80 - Curvas σ - ε dos provetes maciços com 35 phr de concentração de fibras.

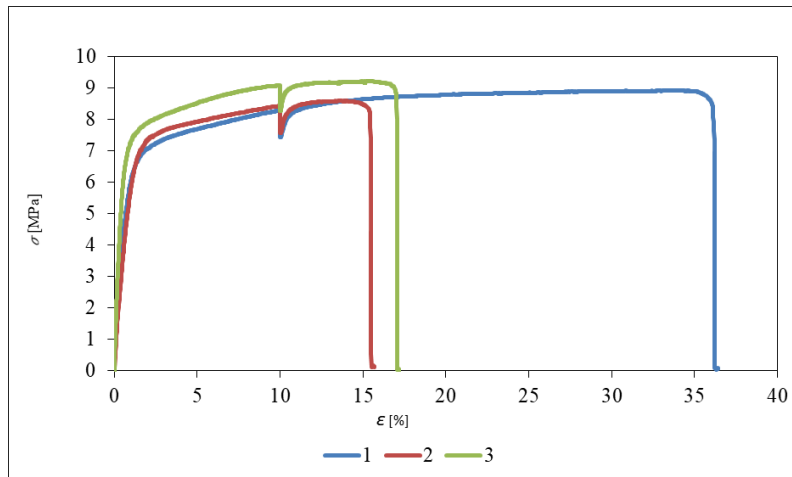


Figura 81 - Curvas σ - ε dos provetes maciços com 55 phr de concentração de fibras.

O provete 3 dos ensaios com uma concentração de fibras de 35 phr foi considerado como inválido pois apresentava valores de força e deslocamento máximo muito abaixo dos restantes. Considera-se que este provete apresenta um defeito interno que resultou numa rotura prematura, não sendo então considerado para o cálculo das médias das propriedades mecânicas.

A σ_y foi calculada através da interseção da curva σ - ε com a reta de declive paralelo para uma deformação de 0,2%, como demonstrado na Figura 82 para o provete 1, com uma concentração de fibras de 15 phr, como exemplo.

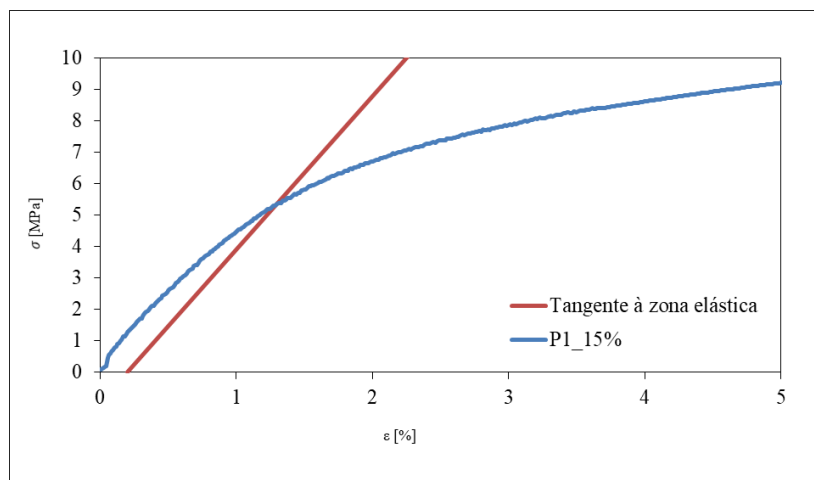


Figura 82 - Curva σ - ε do provete P1_15 phr com tangente à zona elástica.

3.2.3.2 Modos de rotura

Foram retiradas fotos aos provetes após os respetivos ensaios de forma a analisar a rotura dos mesmos. As roturas dos provetes estão demonstradas na Figura 83 e Figura 84 devidamente separados por concentração de fibras. A maioria dos provetes apresentava alguns defeitos do tipo vazio na zona da rotura, o que provoca uma

redução da área resistente, e deste modo a diminuição da resistência à tração do provete. De notar que apenas no provete 1 da concentração de 15 phr e no provete 3 de 35 phr ocorreu rotura perto do limite da zona útil, contudo os mesmos foram considerados válidos pois os valores das propriedades mecânicas estavam semelhantes aos restantes provetes. Nos restantes, provetes a rotura foi na zona intermédia do comprimento útil o que corresponde às condições desejadas de rotura e atesta na validade das propriedades medidas.

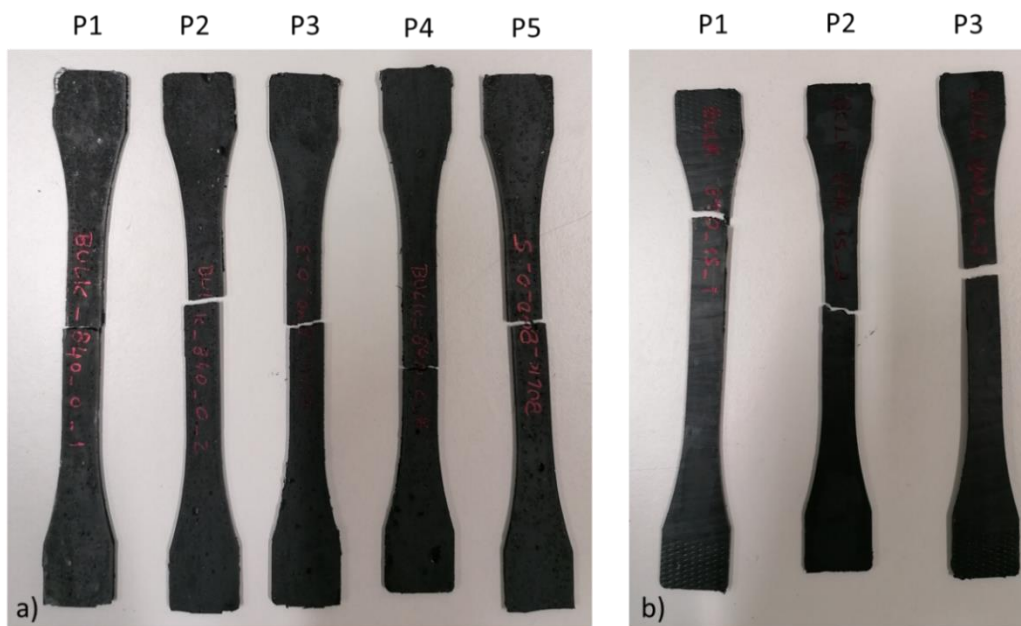


Figura 83 - Rotura dos provetes maciços: a) com 0 phr de concentração de fibras e b) com 15 phr de concentração de fibras.



Figura 84 – Rotura dos provetes maciços: a) com 35 phr de concentração de fibras e b) com 55 phr de concentração de fibras.

3.2.3.3 Propriedades mecânicas à tração

Após tratamento dos dados das curvas $P-\delta$ e $\sigma-\varepsilon$, foi possível tabular as propriedades mais relevantes para caracterizar as quatro concentrações de fibras de vidro no adesivo SikaForce®-840 L07, cujos resultados se encontram descritos da Tabela 13 à Tabela 16. Os ensaios considerados inválidos são indicados como “-”.

Tabela 13 - Propriedades mecânicas obtidas à tração de um provete maciço com 0 phr de fibras de vidro.

Provete	P_{max} [N]	δ_{max} [mm]	σ_y [MPa]	σ_r [MPa]	ε_r [%]	$\sigma_{0,05\%}$ [MPa]	$\sigma_{0,25\%}$ [MPa]	E [MPa]
1	243,52	39,34	2,48	11,69	60,98	0,37	0,84	238,48
2	233,59	43,06	2,6	11,36	62,96	0,44	0,90	232,66
3	183,01	26,45	1,35	8,93	41,45	0,19	0,63	215,66
4	202,07	24,30	1,88	9,78	36,75	0,17	0,62	225,89
5	224,32	37,74	2,08	10,83	58,09	0,26	0,71	223,00
Média	217,30	34,180	2,078	10,520	52,047	0,29	0,74	227,14
Desvio Padrão	24,55	8,30	0,50	1,14	12,06	0,11	0,13	8,80
C_oV	11,30	24,29	24,10	10,88	23,17	39,72	17,26	3,87

Tabela 14 - Propriedades mecânicas obtidas à tração de um provete maciço com 15 phr de fibras de vidro.

Provete	P_{max} [N]	δ_{max} [mm]	σ_y [MPa]	σ_r [MPa]	ε_r [%]	$\sigma_{0,05\%}$ [MPa]	$\sigma_{0,25\%}$ [MPa]	E [MPa]
1	274,48	13,22	5,39	11,62	17,96	0,47	1,44	488,32
2	224,69	8,26	5,09	10,26	13,84	0,31	1,28	484,30
3	296,15	23,44	6,05	13,10	39,35	0,49	1,35	429,34
Média	265,11	14,97	5,51	11,66	23,72	0,42	1,36	467,32
Desvio Padrão	36,64	7,74	0,49	1,42	13,69	0,10	0,08	32,95
C_oV	13,82	51,68	8,91	12,18	57,73	23,25	6,06	7,05

Tabela 15 - Propriedades mecânicas obtidas à tração de um provete maciço com 35 phr de fibras de vidro.

Provete	P_{max} [N]	δ_{max} [mm]	σ_y [MPa]	σ_r [MPa]	ϵ_r [%]	$\sigma_{0,05\%}$ [MPa]	$\sigma_{0,25\%}$ [MPa]	E [MPa]
1	192,24	3,70	5,80	9,04	6,43	0,50	2,15	822,05
2	242,85	4,18	5,68	11,62	8,69	0,16	1,63	737,72
3	-	-	-	-	-	-	-	-
Média	217,55	3,94	5,74	10,33	7,56	0,33	1,89	779,88
Desvio Padrão	35,79	0,34	0,08	1,83	1,60	0,24	0,36	59,63
C_oV	16,45	8,68	1,48	17,67	21,12	73,42	19,15	7,65

Tabela 16 - Propriedades mecânicas obtidas à tração de um provete maciço com 55 phr de fibras de vidro.

Provete	P_{max} [N]	δ_{max} [mm]	σ_y [MPa]	σ_r [MPa]	ϵ_r [%]	$\sigma_{0,05\%}$ [MPa]	$\sigma_{0,25\%}$ [MPa]	E [MPa]
1	188,51	17,39	5,09	8,92	36,44	0,40	2,40	1002,18
2	180,39	7,92	4,45	8,59	15,71	0,10	2,03	964,76
3	194,63	13,53	6,98	9,21	17,17	1,27	3,53	1127,28
Média	187,84	12,95	5,51	8,91	23,11	0,59	2,65	1031,41
Desvio Padrão	7,14	4,76	1,32	0,31	11,57	0,61	0,78	85,11
C_oV	3,80	36,78	23,89	3,50	50,07	103,50	29,43	8,25

De referir que o provete 3 com 35 phr de concentração de fibras foi considerado inválido devido aos valores do ensaio estarem bastante abaixo dos restantes provetes. Este provete registou uma força máxima de 109 N que, comparando com os outros dois provetes, é cerca de metade. Desta forma, este provete não foi considerado para os cálculos da média e desvio padrão das propriedades mecânicas à tração.

Da Figura 84 à Figura 90 está representada a evolução das propriedades mecânicas obtidas à tração, de acordo com a concentração de fibras de vidro. Verificou-se uma ligeira descida da tensão e força máxima e um aumento praticamente linear do módulo de corte. No capítulo 3.7.1 será feita uma análise mais profunda dos resultados obtidos.

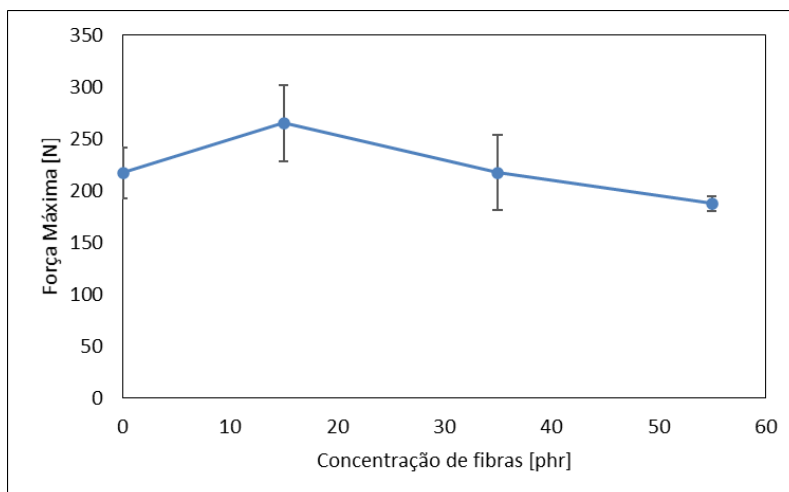


Figura 85 - Evolução da força máxima de acordo com a concentração de fibras no ensaio ao adesivo maciço.

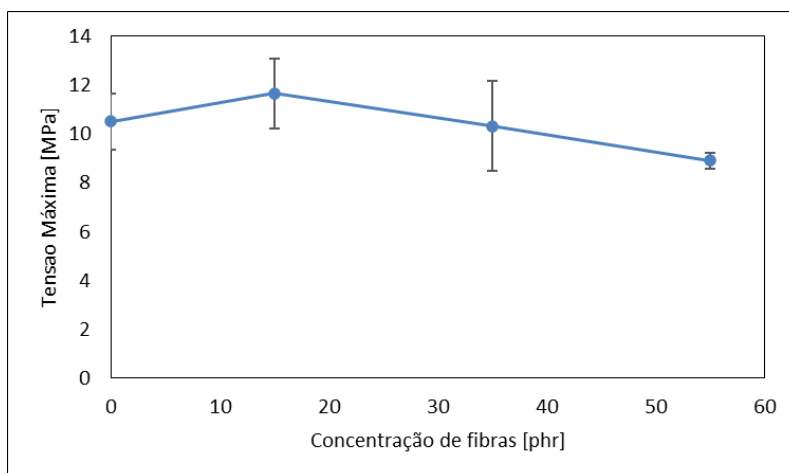


Figura 86 - Evolução da tensão máxima de acordo com a concentração de fibras no ensaio ao adesivo maciço.

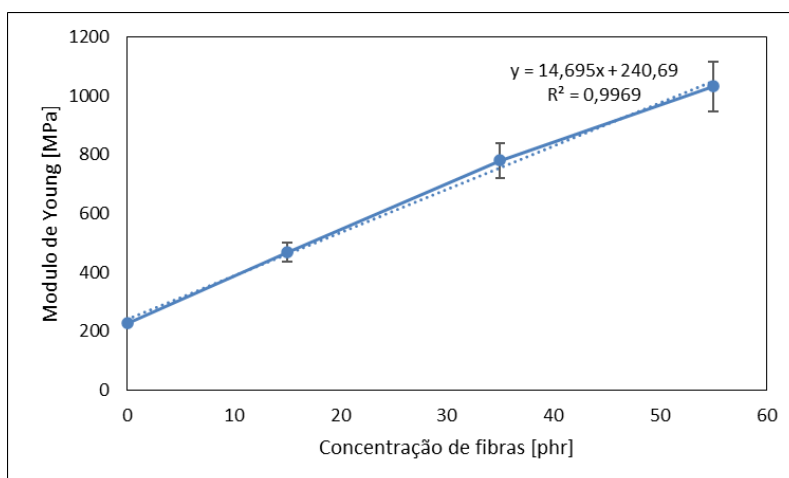


Figura 87 - Evolução do módulo de Young de acordo com a concentração de fibras no ensaio ao adesivo maciço.

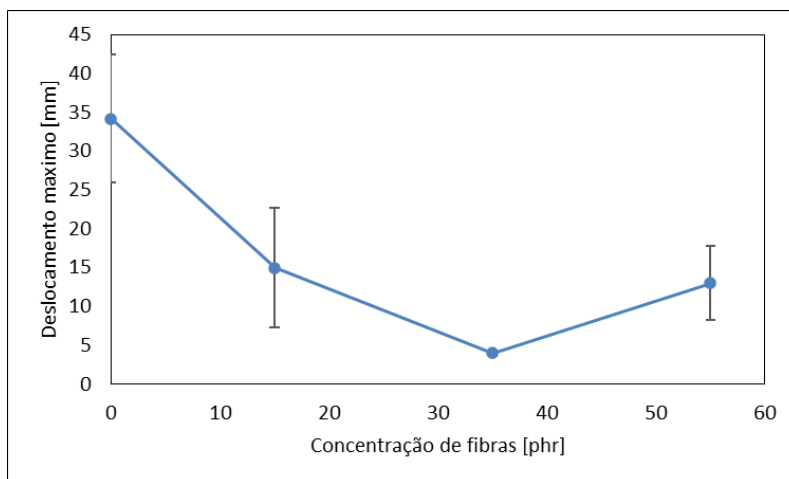


Figura 88 - Evolução do deslocamento de acordo com a concentração de fibras no ensaio ao adesivo maciço.

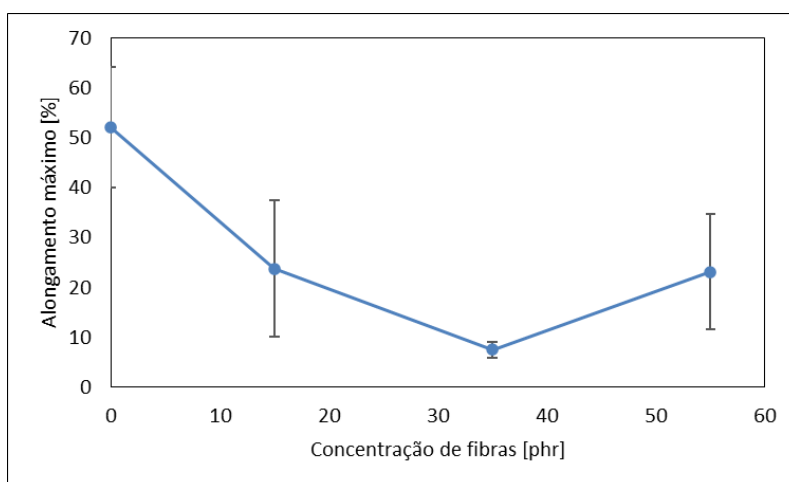


Figura 89 - Evolução do alongamento de acordo com a concentração de fibras no ensaio ao adesivo maciço.

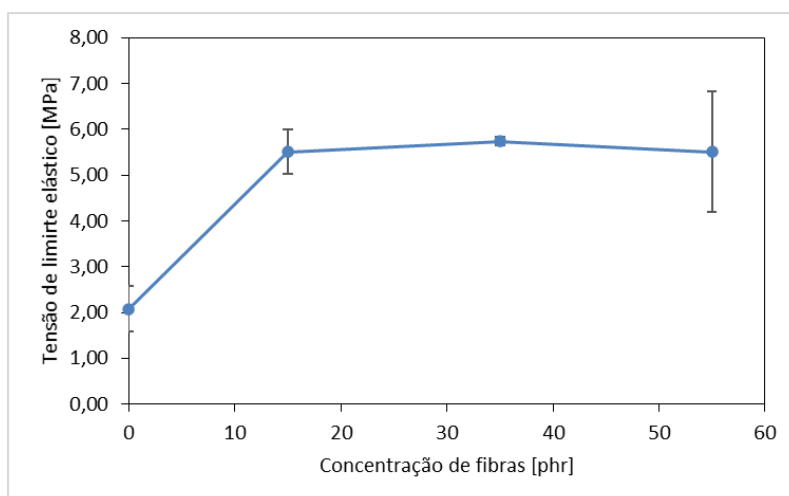


Figura 90 - Evolução da tensão de cedência de acordo com a concentração de fibras no ensaio ao adesivo maciço.

3.3 Ensaios mecânicos ao corte

Neste capítulo são descritos os métodos usados para produção dos provetes para os ensaios de corte. São apresentados as dimensões e geometria utilizadas, preparação dos aderentes e preparação para o ensaio.

Para determinação das propriedades mecânicas ao corte foi realizado o ensaio *Block Shear* (BS). Devido à geometria da junta, e ao dispositivo de ensaio, o ensaio BS permite minimizar os esforços de arrancamento, ao contrário do que acontece nas JSS.

3.3.1 Definição dos ensaios

Para a determinação das propriedades mecânicas ao corte do adesivo foram usados provetes BS, definidos segundo a norma ASTM D4501. As dimensões e os esforços do provete BS encontram-se na Figura 91, onde se pode observar que os aderentes, segundo este método, não estão sujeitos a esforços de tração.

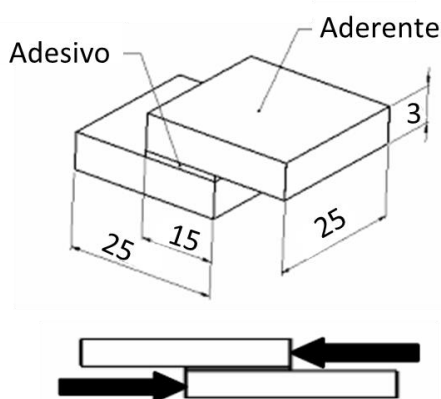


Figura 91 - Dimensões do provete BS utilizado.

De referir que o ensaio mais comum para determinação das propriedades do adesivo ao corte é o ensaio TAST [1], no entanto, devido ao adesivo estudado não apresentar uma boa aderência a materiais metálicos, e à inviabilidade de fazer substratos TAST com compósitos devido à geometria, optou-se pelo ensaio BS para estudar a propriedades do adesivo ao corte.

3.3.2 Fabrico e ensaio dos provetes

3.3.2.1 Fabrico e preparação dos substratos

A produção dos substratos iniciou-se com a produção de uma placa de compósito de carbono-epóxico com 3 mm de espessura. Foi considerada uma sequência de empilhamento de $[0]_{20}$ utilizando um pré-impregnado unidirecional (CIT® HS 160 REM) para o fabrico das placas.

Para a produção das placas foram seguidos os seguintes passos:

- Retirou-se o rolo de pré-impregnado da arca congeladora;
- Foram cortadas camadas 300x300 mm² (Figura 92);



Figura 92 - Corte de camadas de pré-impregnado.

- Realizou-se o empilhamento das camadas considerando todas as camadas a 0°. Durante o empilhamento as camadas eram aquecidas com auxílio de uma pistola de ar quente (Figura 93);
- Após o empilhamento de cada camada foi realizada uma compressão manual das camadas;



Figura 93 - Aplicação de calor nas camadas de pré-impregnado.

- Finalizado o empilhamento das 20 camadas, a placa é colocada no molde da prensa de pratos quentes (Figura 94) durante 131 min, realizando o ciclo apresentado na Tabela 17.

Tabela 17 - Ciclo aplicado à placa na prensa de pratos quentes.

Temperatura [°]	Força [ton]	Tempo [min]
55	0	5
75	0	5
95	1	5
125	5	58
65	5	58

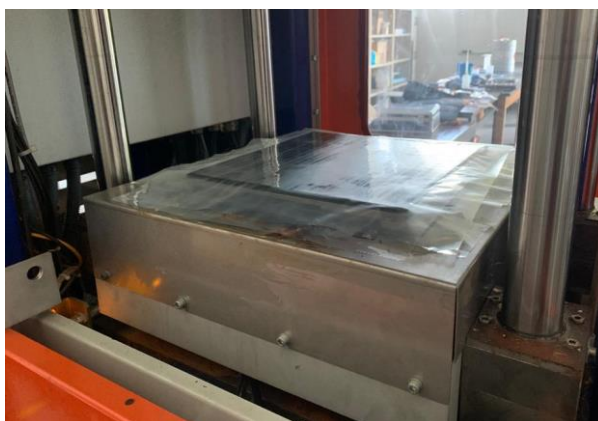


Figura 94 - Placa posicionada na prensa de pratos quentes.

Utilizou-se uma prensa de pratos quentes da marca Gislottica presente no laboratório de materiais compósitos do ISEP.

Finalizada a placa, foi necessário retirar o excesso de resina e cortar os provetes nas respetivas medidas tendo em conta o ensaio em que seriam utilizados. Para o efeito, foi usada uma máquina de corte também presente no Laboratório de Materiais compósitos do ISEP (Figura 95).

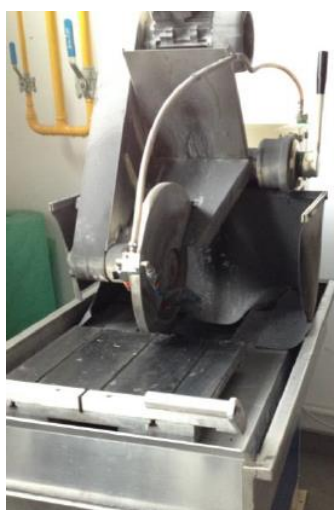


Figura 95 - Máquina de corte.

Depois de se cortarem todos os provetes foi necessário fazer a preparação da superfície antes de se aplicar o adesivo. Esta é uma das etapas mais importantes, pois uma incorreta preparação da superfície reduz a adesão do adesivo, o que iria provocar ensaios inválidos e roturas adesivas.

Para se preparar a superfície dos aderentes foi necessário proceder a lixagem manual da superfície (Figura 96), e de seguida a sua limpeza com acetona, de forma a remover todos os resíduos e gorduras da superfície. Finalizada a limpeza é importante evitar o contacto entre as mãos e a superfície de forma a evitar a contaminação das superfícies limpas.



Figura 96 – Lixa para preparação dos provetes.

Este procedimento foi realizado para todos aderentes utilizados durante o trabalho experimental.

3.3.2.2 *Fabrico e ensaio dos provetes BS*

Finalizada a preparação dos substratos de acordo com procedimento descrito anteriormente, foi possível dar início ao fabrico dos provetes. Para fabrico dos provetes BS, os substratos foram marcados com o comprimento de sobreposição de 15 mm e alinhados em cima de uma mesa de forma a facilitar o processo de colagem. Após se colocar o adesivo no substrato inferior, o substrato superior foi posicionado com todo o cuidado de forma a garantir o comprimento de sobreposição assinalado, e foi colocado um grampo de forma a aplicar pressão entre os substratos e facilitar o fecho da junta. De forma a garantir a espessura de adesivo desejada foi colocado um calço calibrado de 1 mm. O substrato superior foi assente num substrato *dummy* e um calço de 1 mm para garantir o $t_A=1$ mm, onde foi aplicada pressão com auxílio de um grampo (Figura 97).

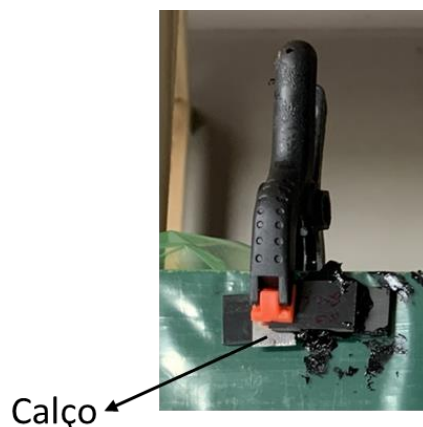


Figura 97 - Junta pressionada por ação de uma mola.

Os provetes ficaram a curar durante uma semana à temperatura ambiente. Terminada a cura, o excesso de adesivo foi removido com auxílio de um alicate e através da abrasão rotativa de uma furadora vertical equipada com uma mó a 1200 rpm (Figura 98).



Figura 98 - Remoção do excesso de adesivo de um provete.

Condições do ensaio

Os provetes foram numerados e identificados de acordo com a concentração de fibras de forma a facilitar a sua identificação antes e após o ensaio. Para a realização dos ensaios foi uma vez mais utilizada a máquina universal de ensaios referida anteriormente. Os ensaios foram realizados a uma velocidade constante de 0,5mm/min. Para a realização dos ensaios foi necessário usar uma ferramenta existente no laboratório de ensaios mecânicos do ISEP, apresentada na Figura 99. A ferramenta funciona como uma “guilhotina” e garante o alinhamento dos provetes durante o ensaio, de forma que estes sejam solicitados de acordo com o apresentado na Figura 91. A ferramenta apresenta um componente móvel, que fica agarrado à amarra superior da máquina, e durante o ensaio solicita o provete ao corte.

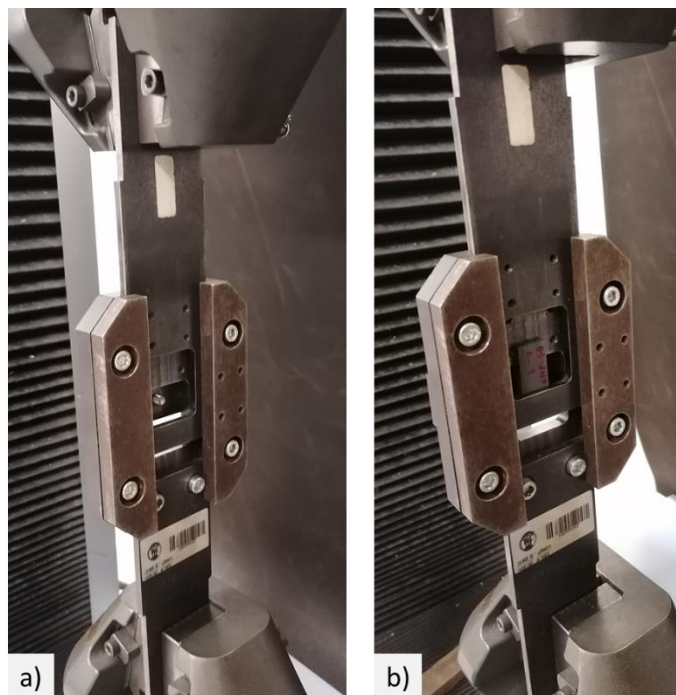


Figura 99 - Ferramenta utilizada para o ensaio BS: a) sem provete, b) com provete.

Após preparação dos provetes, estes foram medidos (espessura, largura e comprimento de sobreposição) com recurso a um paquímetro digital. Pretendeu-se com isto obter a área de secção real do provete. Foram executadas duas medições em cada provete de forma a obter o resultado mais próxima da realidade. Da Tabela 18 à Tabela 21 estão apresentadas as dimensões dos provetes BS de acordo com as concentrações de fibras usadas.

Tabela 18 - Dimensões dos provetes BS com uma concentração de fibras de 0 phr.

Provete	Larg. (mm)	Larg. Méd (mm)	Esp. Substratos (mm)	Esp. Total (mm)	Esp. Adesivo (mm)	Comp. de sobr. (mm)	Comp. de sobr. méd. (mm)	Área secção útil (mm ²)
1	15,40	15,34	2,56	6,55	1,00	15,00	15,00	230,03
	15,27		2,99			15,00		
2	15,15	15,21	2,98	6,57	0,52	14,22	14,44	219,48
	15,26		3,07			14,65		
3	15,17	15,16	3,13	6,75	0,67	15,88	16,01	242,63
	15,14		2,95			16,14		

Tabela 19 - Dimensões dos provetes BS com uma concentração de fibras de 15 phr.

Provete	Larg. (mm)	Larg. Méd (mm)	Esp. Substratos (mm)	Esp. Total (mm)	Esp. Adesivo (mm)	Comp. de sobr. (mm)	Comp. de sobr. méd. (mm)	Área secção útil (mm ²)
1	15,52	15,65	2,97	6,28	0,64	15,04	15,01	234,83
	15,78		2,67			14,97		
2	15,29	15,40	2,85	6,71	1,05	15,21	15,40	237,08
	15,51		2,81			15,58		
3	15,75	15,72	2,69	6,76	1,02	14,95	14,92	234,47
	15,68		3,05			14,89		

Tabela 20 - Dimensões dos provetes BS com uma concentração de fibras de 35 phr.

Provete	Larg. (mm)	Larg. Méd (mm)	Esp. Substratos (mm)	Esp. Total (mm)	Esp. Adesivo (mm)	Comp. de sobr. (mm)	Comp. de sobr. méd. (mm)	Área secção útil (mm ²)
1	15,6	15,72	2,97	6,46	0,73	14,08	14,06	221,02
	15,84		2,76			14,04		
2	15,12	15,11	3,08	6,56	0,64	15,08	15,11	228,24
	15,1		2,84			15,13		
3	15,21	15,15	3,05	6,55	0,45	15,59	15,47	234,37
	15,09		3,05			15,35		

Tabela 21 - Dimensões dos provetes BS com uma concentração de fibras de 55 phr.

Provete	Larg. (mm)	Larg. Méd (mm)	Esp. Substratos (mm)	Esp. Total (mm)	Esp. Adesivo (mm)	Comp. de sobr. (mm)	Comp. de sobr. méd. (mm)	Área secção útil (mm ²)
1	15,61	15,58	3,09	6,81	0,85	15,53	15,35	239,08
	15,55		2,87			15,16		
2	15,44	15,46	2,93	6,85	1,03	13,67	13,73	212,12
	15,47		2,89			13,78		
3	15,75	15,75	2,82	6,50	0,89	15,06	15,15	238,53
	15,75		2,79			15,23		

Posteriormente, à realização dos ensaios, executou-se todo o tratamento de dados através da informação retirada da máquina de ensaios, recorrendo a uma folha de calculo Excel® de forma a calcular o módulo de corte, deformação de corte e tensão de corte máxima.

3.3.3 Resultados

Foi usada por base a norma ASTM D4501 para determinação das propriedades mecânicas ao corte do adesivo. A tensão de corte foi calculada através da razão entre a força máxima e a área de secção útil, de acordo com a equação (34)

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

Verificou-se que as curvas obtidas diretamente da máquina de ensaios, apresentavam na zona inicial uma flexibilidade superior devido ao ajuste da máquina e ferramenta utilizada no ensaio. Este comportamento foi corrigido pela substituição dessa zona inicial da curva por uma zona linear com a mesma rigidez da zona linear posterior que já não é afetada por estes efeitos. De forma a garantir a rigidez linear constante foi efetuada uma translação de todos os pontos da curva para a esquerda.

Posto isto, o cálculo da deformação de corte (γ) é dado pela equação (35)

$$\gamma = \frac{\delta}{t}, \quad (35)$$

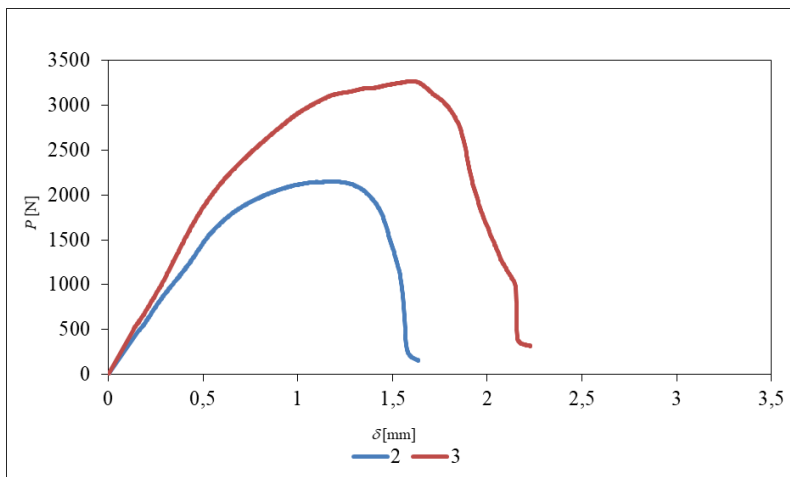
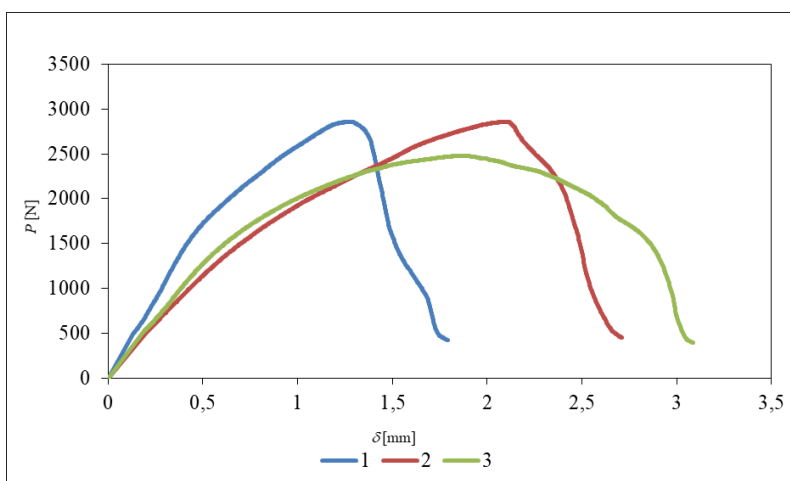
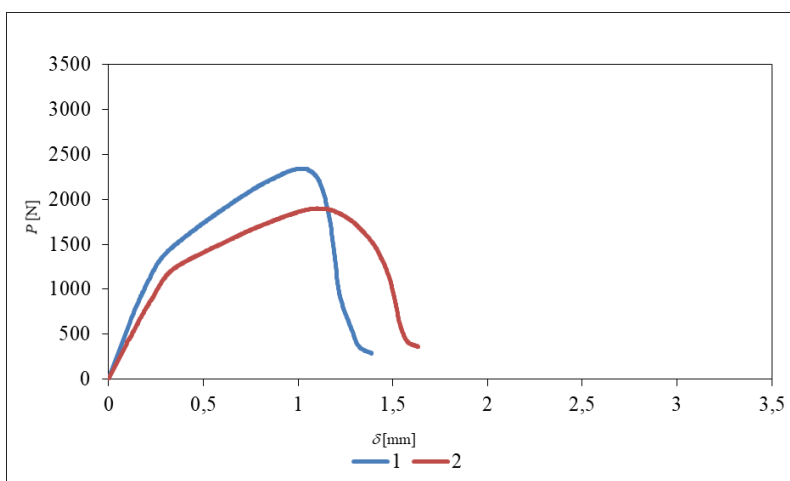
Onde δ corresponde ao deslocamento calculado e t à espessura de adesivo. O valor do módulo de corte (G) foi calculado na zona elástica de declive constante através da equação (36)

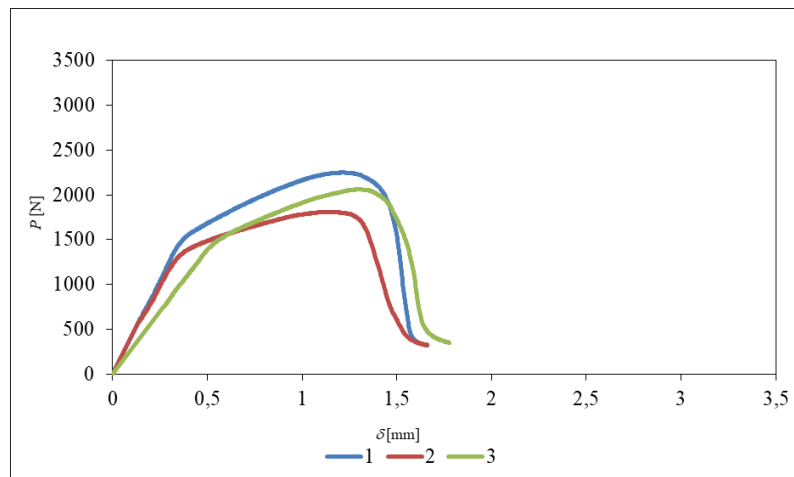
$$G = \frac{\tau}{\gamma}. \quad (36)$$

A tensão limite elástico ao corte, tal como aconteceu nos provetes de adesivo maciço, foi calculada pela interseção da reta de declive paralelo à curva τ - γ para uma deformação de 0,2%.

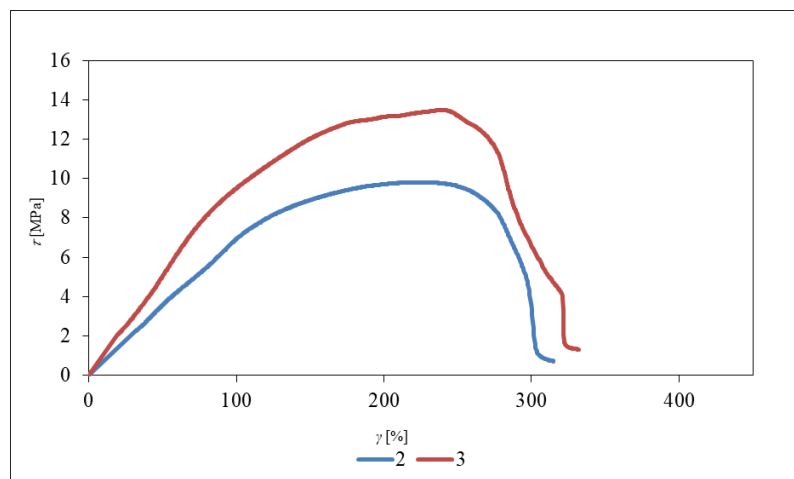
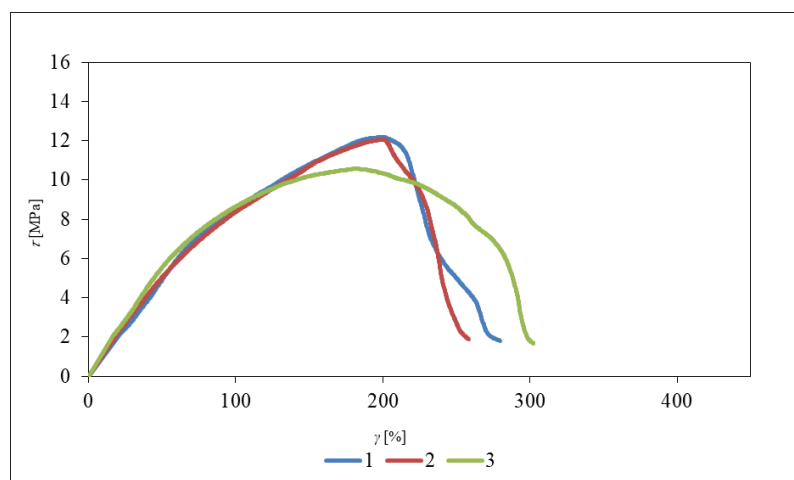
3.3.3.1 Curvas P - δ e τ - γ

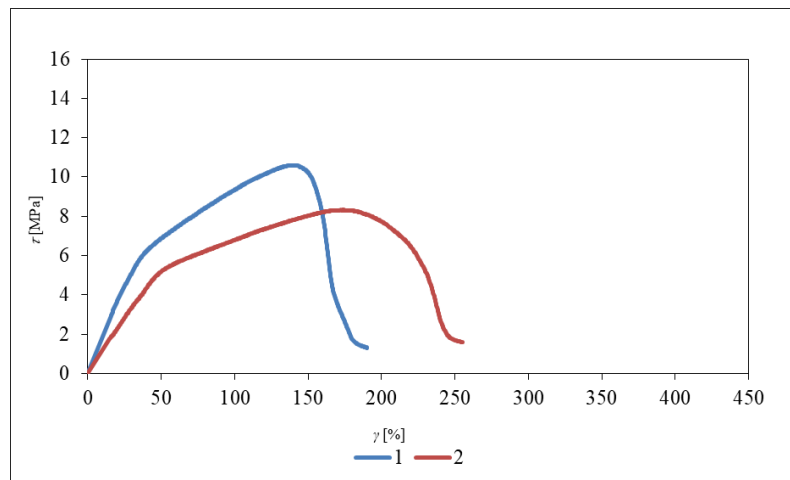
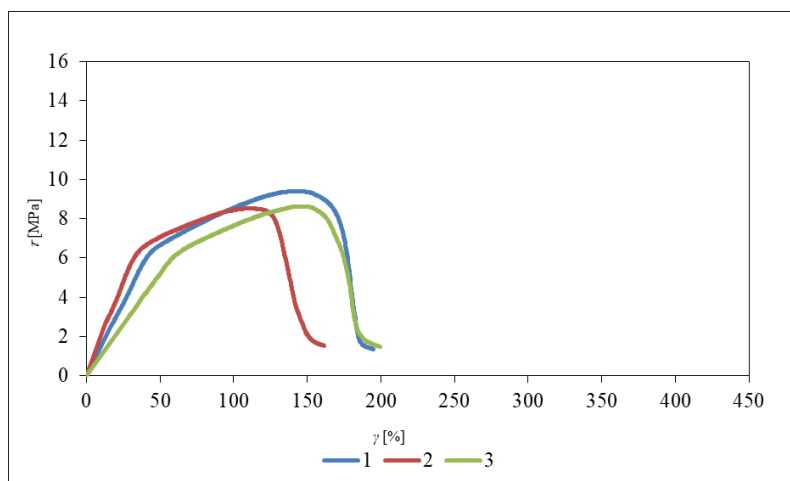
Através dos dados fornecidos pelo *software* da máquina de ensaio foi possível efetuar o tratamento de dados e obter as correspondentes curvas P - δ e τ - γ . As curvas P - δ dos ensaios estão apresentadas da Figura 100 à Figura 103 de acordo com a concentração de fibras de vidro usadas.

Figura 100 - Curvas P - δ do ensaio BS com 0 phr de concentração de fibras.Figura 101 - Curvas P - δ do ensaio BS com 15 phr de concentração de fibras.Figura 102 - Curvas P - δ do ensaio BS com 35 phr de concentração de fibras.

Figura 103 - Curvas P - δ do ensaio BS com 55 phr de concentração de fibras.

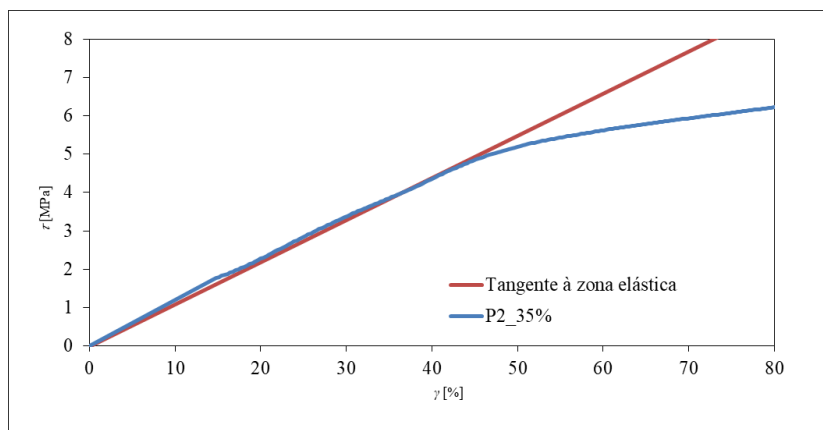
As curvas τ - γ dos ensaios estão representadas da Figura 104 à Figura 107 de acordo com a concentração de fibras usadas.

Figura 104 - Curvas τ - γ do ensaio BS com 0 phr de concentração de fibras.Figura 105 - Curvas τ - γ do ensaio BS com 15 phr de concentração de fibras.

Figura 106 - Curvas τ - γ do ensaio BS com 35 phr de concentração de fibras.Figura 107 - Curvas τ - γ do ensaio BS com 55 phr de concentração de fibras.

Devido a um problema com o *software* TRAPEZIUM X não foi possível extrair os dados e a curva P - δ do ensaio ao provete 1 com 0 phr de concentração de fibras. Contudo, foi possível registrar o valor da força máxima e desta forma calcular o valor da tensão de corte máxima.

A τ_y foi calculada através da interseção da curva τ - γ com a reta de declive paralelo para uma deformação de 0,2%, como demonstrado na Figura 108 para o provete 2, com uma concentração de fibras de 35 phr, como exemplo.

Figura 108 -Curva τ - γ do provete P2_35 phr com tangente à zona elástica

3.3.3.2 Modos de rotura

Foram retiradas fotografias aos provetes após os respetivos ensaios, de forma a analisar os modos de rotura dos mesmos. A rotura dos provetes está demonstrada da Figura 109 à Figura 112 devidamente separados por concentração de fibras de vidro.



Figura 109 - Rotura dos provetes BS com 0 phr de concentração de fibras.

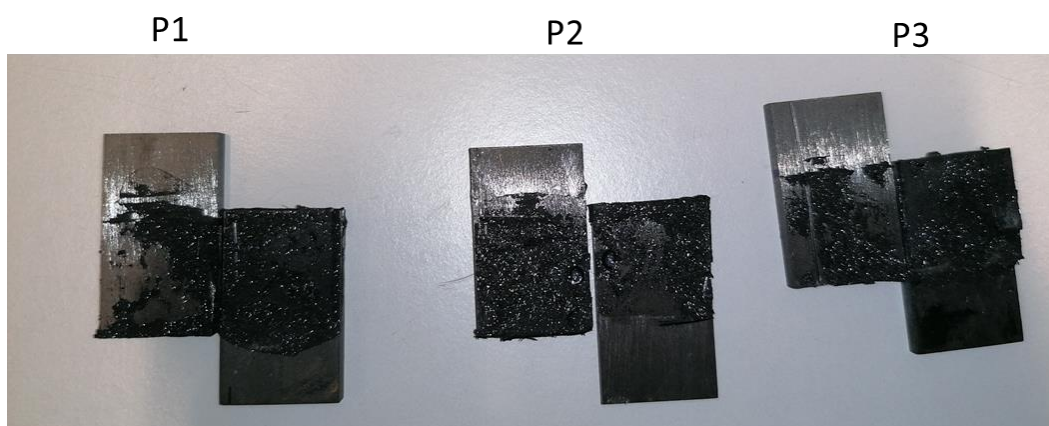


Figura 110 - Rotura dos provetes BS com 15 phr de concentração de fibras.

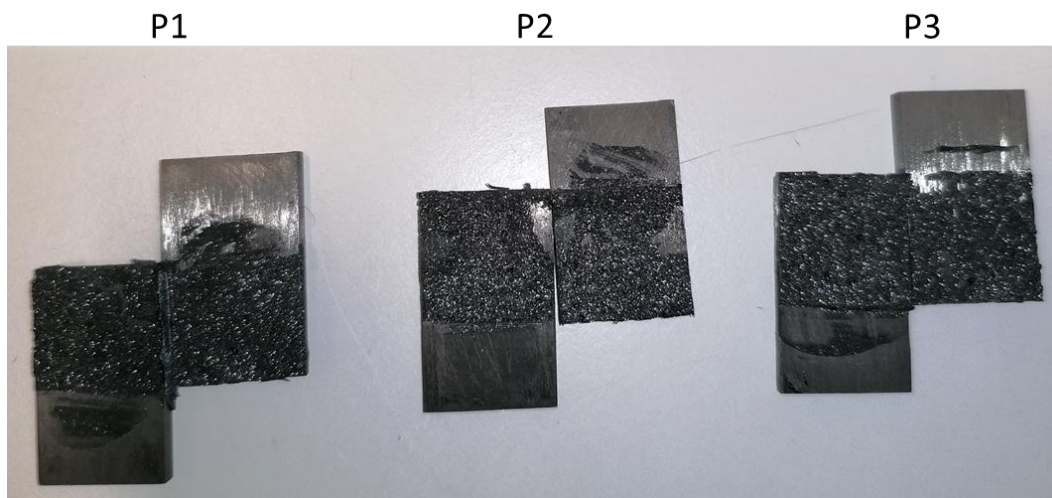


Figura 111 - Rotura dos provetes BS com 35 phr de concentração de fibras.

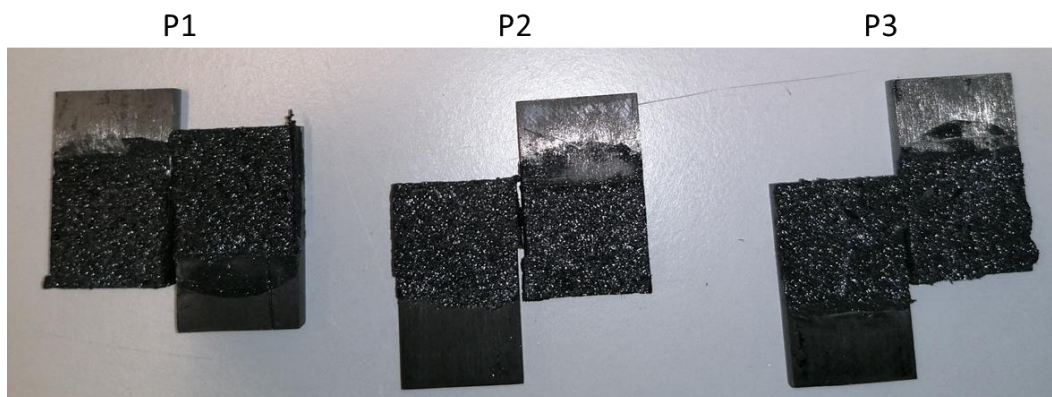


Figura 112 - Rotura dos provetes BS com 55 phr de concentração de fibras.

3.3.3.3 Propriedades mecânicas ao corte

Após tratamento de dados das curvas $P-\delta$ e $\tau-\gamma$, foi possível tabular as propriedades mecânicas ao corte mais relevantes para caracterizar as quatro concentrações de fibras de vidro no adesivo SikaForce®-840 L07, cujos resultados se encontram descritos da Tabela 22 à Tabela 25. Os ensaios considerados inválidos são indicados como “-”.

Tabela 22 - Propriedades mecânicas obtidas ao corte para os provetes BS com 0 phr de fibras de vidro.

Provete	Força máxima [N]	Tensão limite elástico a 0,2% [MPa]	τ_{max} [MPa]	G [MPa]	γ [%]	Tipo de rotura
1	3104,00	-	13,49	-	-	Mista
2	2148,49	7,85	9,79	8,75	314,69	Mista
3	3269,13	10,03	13,47	6,00	290,94	Mista
Média	2840,54	8,94	12,25	7,38	302,81	
Desvio Padrão	605,00	1,54	2,13	1,94	16,79	
C₀V	21,30	17,24	17,41	26,31	5,54	

Tabela 23 - Propriedades mecânicas obtidas ao corte para os provetes BS com 15 phr de fibras de vidro.

Provete	Força máxima [N]	Tensão limite elástico a 0,2% [MPa]	τ_{max} [MPa]	G [MPa]	γ [%]	Tipo de rotura
1	2857,78	7,92	12,17	12,21	279,97	Mista
2	2823,62	7,34	11,91	11,79	258,11	Mista
3	2478,58	5,90	10,57	13,21	255,04	Mista
Média	2720,00	7,05	11,55	12,40	264,37	
Desvio Padrão	209,77	1,04	0,86	0,73	13,59	
C₀V	7,71	14,75	7,43	5,88	5,14	

Tabela 24 - Propriedades mecânicas obtidas ao corte para os provetes BS com 35 phr de fibras de vidro.

Provete	Força máxima [N]	Tensão limite elástico a 0,2% [MPa]	τ_{max} [MPa]	G [MPa]	γ [%]	Tipo de rotura
1	2339,38	5,86	10,58	17,19	189,97	Coesiva
2	1898,03	4,93	8,32	12,13	255,16	Mista
3	-	-	-	-	-	Coesiva
Média	2118,71	5,40	9,45	14,66	222,57	
Desvio Padrão	312,08	0,66	1,60	3,57	46,10	
C₀V	14,73	12,19	16,97	24,39	20,71	

Tabela 25 - Propriedades mecânicas obtidas ao corte para os provetes BS com 55 phr de fibras de vidro.

Provete	Força máxima [N]	Tensão limite			γ [%]	Tipo de rotura
		elástico a 0,2% [MPa]	τ_{\max} [MPa]	G [MPa]		
1	2247,16	5,99	9,40	18,07	195,06	Coesiva
2	1805,69	5,91	8,51	17,60	161,18	Coesiva
3	2058,09	5,79	8,63	12,99	199,69	Coesiva
Média	2036,98	5,90	8,85	16,22	185,31	
Desvio Padrão	221,49	0,10	0,48	2,80	21,03	
C_oV	10,87	1,71	5,45	17,29	11,35	

De referir que o provete 3 com 35 phr de concentração de fibras não foi considerado válido, pois apresentava valores de módulo e deformação máxima de corte muito distintos dos restantes provetes. Desta forma estes dados não foram considerados para os cálculos da média e desvio padrão das propriedades mecânicas ao corte.

Analisando os tipos de rotura, verifica-se que os provetes com menos percentagem de fibras (0 phr e 15 phr) apresentam roturas mistas, enquanto os provetes com 35 phr e 55 phr apresentam roturas na sua grande maioria coesivas.

Da Figura 113 à Figura 117 está representada a evolução das propriedades ao corte obtidas através do ensaio BS, de acordo com a concentração de fibras de vidro. Verificou-se que a tensão e a força máxima apresentam dois patamares, uma descida sensivelmente linear da deformação máxima, um aumento do módulo de corte, e uma diminuição da tensão de limite elástico. No capítulo 3.7.2 será feita uma análise mais profunda dos resultados obtidos.

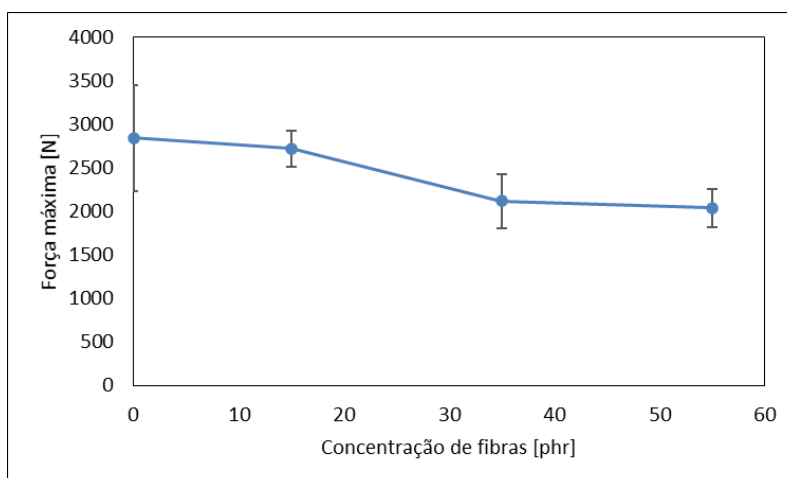


Figura 113 - Evolução da força máxima de acordo com a concentração de fibras no ensaio BS.

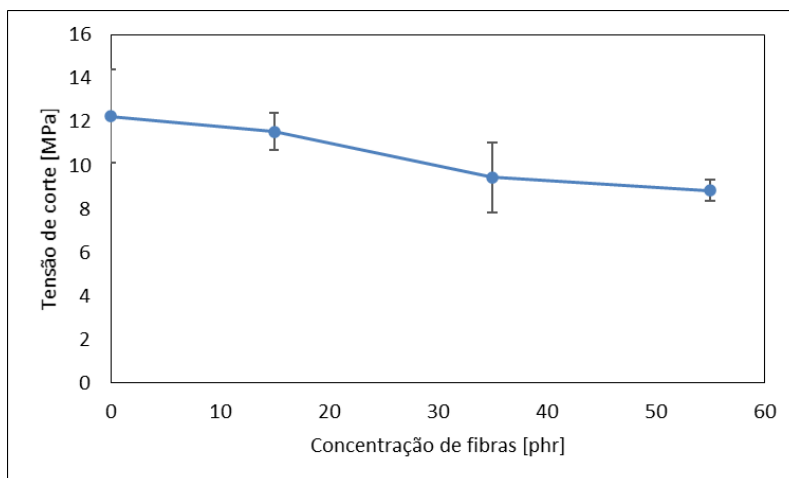


Figura 114 - Evolução da tensão máxima de corte de acordo com a concentração de fibras no ensaio BS.

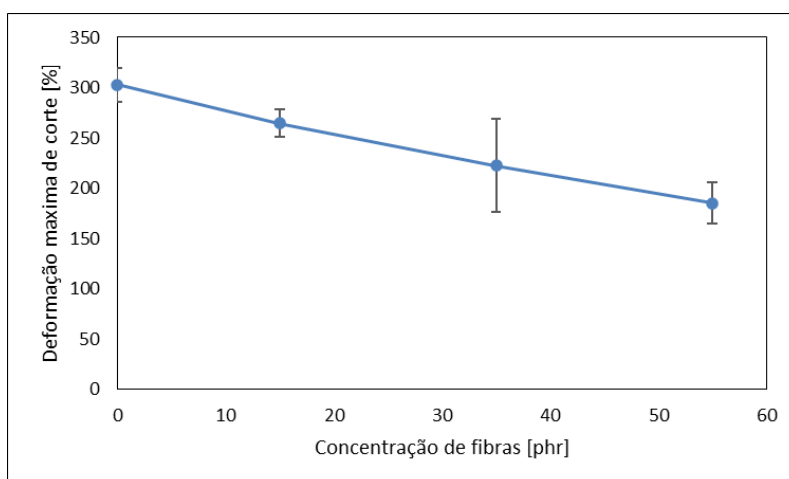


Figura 115 - Evolução da deformação máxima de corte de acordo com a concentração de fibras no ensaio BS.

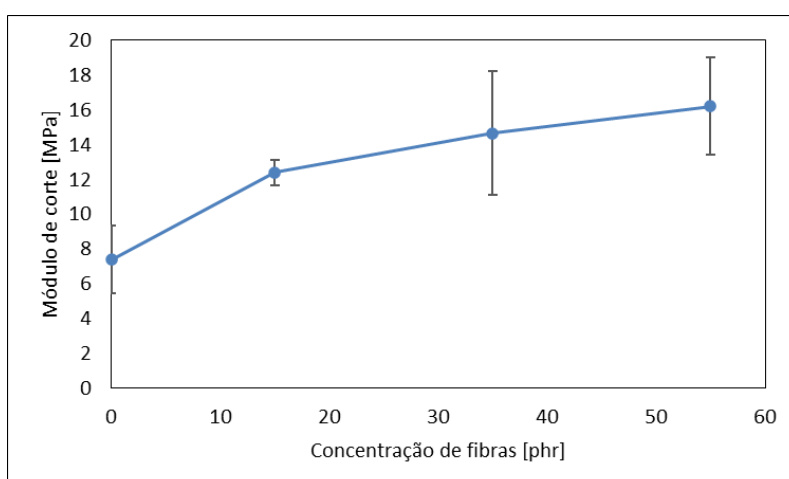


Figura 116 - Evolução do módulo de corte de acordo com a concentração de fibras no ensaio BS.

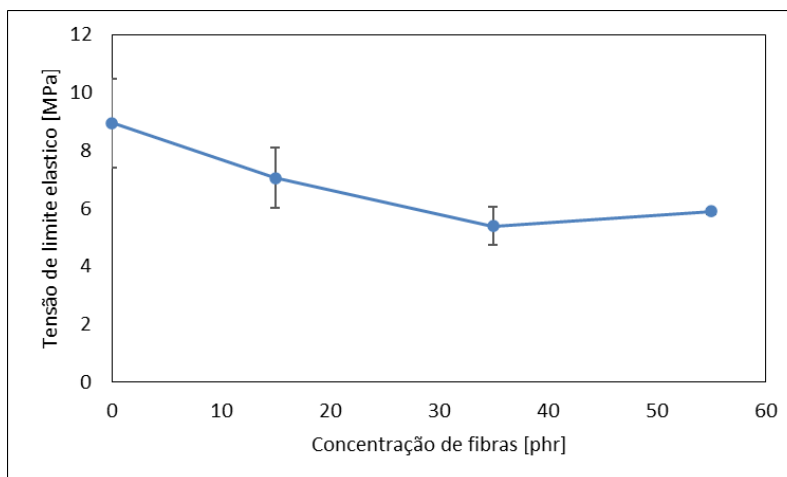


Figura 117 - Evolução da tensão de limite elástico de acordo com a concentração de fibras no ensaio BS.

3.4 Ensaios de fratura à tração

Neste capítulo são descritos os métodos usados para produção dos provetes para o ensaio de fratura à tração. Serão apresentados as dimensões e geometrias utilizadas, preparação dos aderentes e preparação para o ensaio e os resultados.

3.4.1 Definição do ensaio

Para determinação das propriedades de fratura à tração foram usados provetes DCB, como ilustrado na Figura 50 (a), e com as dimensões da Tabela 26.

Tabela 26 - Dimensões teóricas dos provetes DCB em mm

Comprimento do provete, L	140
Espessura do substrato, t_p	3
Espessura do adesivo, t_A	1
Comprimento da pré-fenda, a_0	50
Largura do provete, B	15

3.4.2 Fabrico e ensaio dos provetes

Inicialmente os substratos foram preparados de acordo com o procedimento descrito no capítulo 3.3.2.1. De forma a garantir uma espessura de adesivo constante, assim como a existência da pré-fenda, foram usados calços calibrados em dois locais do provete. Os calços foram realizados a partir de uma fita de aço calibrada. Dependendo

do local onde foi aplicado o calço, este tem funções distintas. Numa das extremidades oposta à pré-fenda foi colocado o calço de forma a garantir a espessura de adesivo desejada. O calço na zona da pré-fenda é constituído por uma lâmina de barbear colada entre duas fitas de aço calibrado, tendo uma dupla função: garantir a espessura de adesivo e simular o defeito inicial (pré-fenda), como representado na Figura 118.

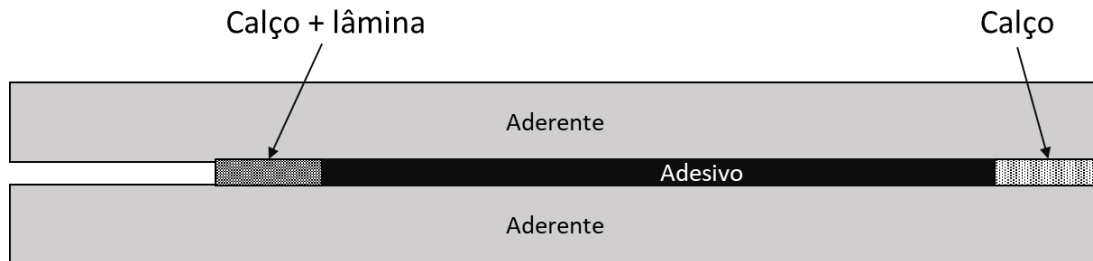


Figura 118 - Esquema do provete DCB.

Preparação dos provetes

Começou por se preparar os calços e as lâminas que se iriam aplicar no provete. Estes foram inicialmente limpos e desengordurados, recorrendo a uma lixa e a papel embebido em acetona. Para se produzir a pré-fenda, foram usados dois calços de 0,45 mm, colados com um adesivo cianoacrilato (Loctite SuperCola 3[®]), a uma lâmina com espessura de 0,1 mm (Figura 119), de forma a garantir uma espessura total de 1 mm. Na outra extremidade foi usado um único calço com uma espessura de 1 mm.

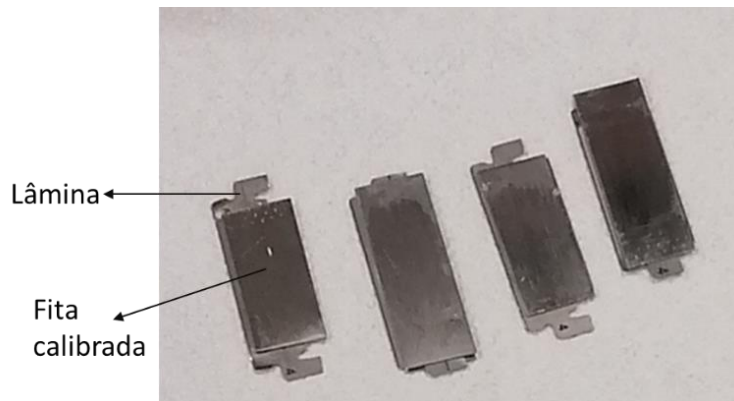


Figura 119 - Calços para criar pré-fenda inicial.

Após o fabrico dos calços foi necessário desengordurar novamente as superfícies. Posteriormente foi necessário aplicar o desmoldante Loctite Frekote[®] 770-NC em ambas as faces dos calços de forma a facilitar a remoção dos mesmos (Figura 120). Foram aplicadas três camadas de desmoldante em ambas as faces dos calços, que tinham sido pré-aquecidos a 80 °C.

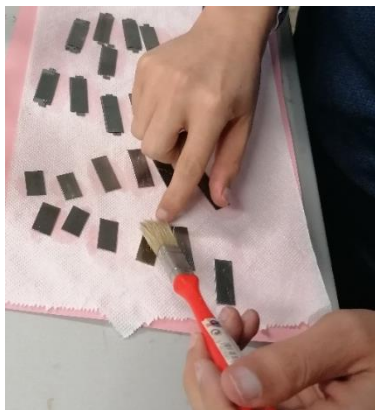


Figura 120 - Aplicação de desmoldante nos calços.

Os substratos para os provetes DCB foram preparados de forma idêntica aos usados para os provetes BS, e as superfícies onde se irá aplicar o adesivo foram lixadas e desengorduradas. A área de colagem nos provetes DCB é significativamente superior à utilizada nos provetes BS.

Finalizada a preparação dos substratos, foram colados os calços em apenas um dos aderentes que irão formar o provete. De forma a facilitar o posicionamento do calço com lâmina que irá criar a pré-fenda inicial, foi realizada uma marcação com 45 mm no substrato. Os provetes foram posicionados sobre uma régua de madeira, e os calços foram colados no substrato inferior (Figura 121).



Figura 121 - Substratos DCB com calços.

Assim que todos os calços estivessem colados foi possível inicial a aplicação do adesivo nos provetes. Para os provetes com 0 phr de concentração de fibras, o adesivo foi aplicado diretamente através do tubo de mistura do adesivo (Figura 122). Nas restantes concentrações, o adesivo foi aplicado com recurso a uma espátula, após mistura com as fibras de vidro.

De forma a evitar que os provetes ficassem colados na régua, devido ao excesso de adesivo, foram usadas folhas de Teflon® entre o substrato e a régua.



Figura 122 - Aplicação do adesivo com bico de mistura no provete.

Foi colocada quantidade suficiente de adesivo nos provetes para que este fosse expedido pelas faces laterais aquando da colocação do substrato superior, garantindo assim que toda a área de colagem era preenchida, assegurando um $T_A=1$ mm (como já predefinido). Após ser colocado o substrato superior, exerceu-se pressão na zona dos calços de maneira a expelir o excesso de adesivo e garantir a espessura desejada. É extremamente importante garantir o alinhamento do substrato superior com o substrato inferior, que o adesivo não se sobreponha aos calços e que o adesivo esteja presente acima e abaixo da lâmina. O incumprimento dos pontos referidos pode comprometer os resultados dos ensaios DCB.

Garantindo o alinhamento dos substratos, foram colocadas molas sobre os calços e os provetes deixados a curar durante uma semana à temperatura ambiente (Figura 123).

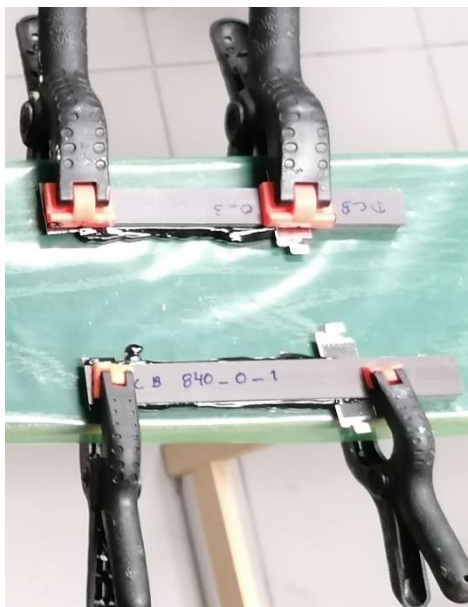


Figura 123 - Provetes DCB com molas para aplicar pressão durante a cura.

Preparação dos provetes para ensaio

Passada uma semana do fabrico dos provetes, o processo de cura estava concluído, e os provetes estavam prontos para se prepararem para os ensaios. Foram retirados os calços com auxílio de um alicate e, usando o mesmo alicate e uma furadora equipada com uma mó, foi removido o excesso de adesivo nas laterais do provete (Figura 98), o que permitiu obter uma superfície onde o adesivo fica à face dos substratos.

Foram coladas duas dobradiças de piano na extremidade do adesivo com pré-fenda (uma em cada substrato), com um comprimento de sobreposição ligeiramente superior à largura do provete. Deixou-se curar o adesivo usado para colar as dobradiças, durante uma semana. Após as dobradiças estarem coladas, pintou-se uma das laterais de cada provete com tinta corretora de forma a melhorar a visibilidade de propagação da fenda ao longo do comprimento da junta durante o ensaio. A fenda foi propagada manualmente com auxílio de uma ferramenta para evitar por completo algum efeito de arredondamento da fenda, que pode persistir mesmo com a utilização da lâmina. Após pintura e propagação da fenda, foi colada na lateral pintada do provete uma escala milimétrica em cada substrato, como ilustrado na Figura 124. A escala colada na lateral do provete auxilia na medição do comprimento da fenda durante o ensaio, auxiliada pelo registo fotográfico de imagens, como descrito posteriormente.



Figura 124 - Provetes DCB com escala milimétrica colada na lateral.

Condições do ensaio

Os provetes foram numerados e identificados de acordo com a concentração de fibras de forma a facilitar a sua identificação antes e após o ensaio. Para a realização do ensaio foi uma vez mais utilizada a máquina universal de ensaios referida anteriormente. O ensaio foi realizado a uma velocidade constante de 4 mm/min.

Antes de realizarem os ensaios foi necessário proceder à medição dos provetes previamente preparados. Foram medidas com auxílio de um paquímetro digital as espessuras dos substratos, a largura do provete e o comprimento de pré-fenda. As dimensões dos provetes estão apresentadas da Tabela 27 à Tabela 30.

Tabela 27 - Dimensões dos provetes DCB com uma concentração de fibras de 0 phr.

Provete	Espessura (mm)	Espessura média (mm)	Largura (mm)	Largura média (mm)	Pré-fenda (mm)
1	2,85	2,87	15,35	15,3	46,54
	2,89		15,27		
1	2,82	2,81	15,28		
	2,79				
2	2,83	2,83	15,15	15,32	46,65
	2,83		15,4		
2	2,81	2,76	15,42		
	2,70				
3	2,84	2,85	14,95	15,00	46,98
	2,86		14,99		
3	2,81	2,8	15,05		
	2,79				

Tabela 28 - Dimensões dos provetes DCB com uma concentração de fibras de 15 phr.

Provete	Espessura (mm)	Espessura média (mm)	Largura (mm)	Largura média (mm)	Pré-fenda (mm)
1	2,84	2,91	15,12	15,09	46,20
	2,97		15,09		
1	2,93	2,90	15,07		
	2,87				
2	3,00	2,93	15,02	15,17	55,65
	2,85		15,11		
2	2,74	2,81	15,38		
	2,87				
3	2,90	2,94	15,27	15,46	51,31
	2,97		15,50		
3	2,89	2,94	15,60		
	2,98				

Tabela 29 - Dimensões dos provetes DCB com uma concentração de fibras de 35 phr.

Provete	Espessura (mm)	Espessura média (mm)	Largura (mm)	Largura média (mm)	Pré-fenda (mm)
1	3,10	3,08	15,35	15,41	47,39
	3,06		15,53		
1	2,83	2,84	15,35		
	2,85				
2	2,88	2,88	15,14	15,16	47,95
	2,87		15,08		
2	2,86	2,90	15,26		
	2,94				
3	2,84	2,86	15,39	15,50	43,70
	2,88		15,52		
3	2,98	3,02	15,59		
	3,06				

Tabela 30 - Dimensões dos provetes DCB com uma concentração de fibras de 55 phr.

Provete	Espessura (mm)	Espessura média (mm)	Largura (mm)	Largura média (mm)	Pré-fenda (mm)
1	2,86	2,86	15,32	15,24	48,52
	2,86		15,18		
1	2,90	2,90	15,21		
	2,89				
2	2,86	2,84	15,22	15,22	48,43
	2,81		15,18		
2	3,02	3,01	15,26		
	2,99				
3	2,95	2,90	15,16	15,18	47,69
	2,84		15,23		
3	2,87	2,87	15,15		
	2,87				

Para a realização dos ensaios começou por se fixar os provetes pelas dobradiças, usando as amarras da máquina de ensaios. Utilizou-se um método de correlação de imagem para auxiliar na medição do G_{Ic} . Foi usada uma máquina da marca Canon®,

modelo EOS 550D, posicionada de forma a abranger a face lateral dos provetes (Figura 125).



Figura 125 – Amarração do provete DCB na máquina de ensaios.

Durante o ensaio é necessário tirar fotografias a cada 5 segundos até à rotura do provete, a fim de relacionar o comprimento de fenda com a carga e deslocamento registado pela máquina de ensaios (Figura 126). O processo usado para fotografar o ensaio foi parcialmente automatizado com um *Arduíno* programado para desempenhar a função de um intervalómetro. O tempo (ou período) entre cada fotografia é de 5 s (5000 ms) mas é necessário manter o sinal de controlo por um tempo suficiente para que a máquina fotográfica o registe, sendo este de 0,5 s (500 ms). O tempo necessário para o sinal de controlo foi então subtraído do período entre fotografias a fim de o manter fixo em 5 s.

De modo a isolar o *Arduíno* da máquina fotográfica foi utilizado um optoisolador como dispositivo de controlo, reduzindo assim o risco de danificar qualquer componente. O método de controlo é específico para a máquina usada e pode não funcionar para outras máquinas que precisam valores de resistência específica, ou precisam do sinal de "*autofocus*" para que a câmara tire a fotografia. A fim de ligar e desligar o circuito, foram colocados dois botões.

O outro extremo do optoisolador foi conectado à máquina fotográfica usando um *jack* de áudio de 2.5 mm de diâmetro, que envia o sinal através da entrada de 2.5 mm. Na Figura 127 pode ver-se uma representação do circuito usado. Os componentes utilizados foram um *Arduíno* Mega 2560, um optoisolador Vishay MOC 8101, uma resistência de 220 Ω , um botão normalmente aberto, *jumper wires*, um *pack* de baterias (9 V) para alimentar o *Arduíno*, uma placa de ensaio (*bread board* ou

proto-board), um *jack* macho para áudio de 2.5 mm milímetros. No futuro será possível incluir sinais da máquina de ensaio de modo a iniciar a terminar o registo fotográfico de forma automática. Na Figura 128 está ilustrado o *setup* usando o *Arduíno* para fotografar o ensaio.



Figura 126 - Registo fotográfico durante o ensaio DCB momentos antes da rotura.

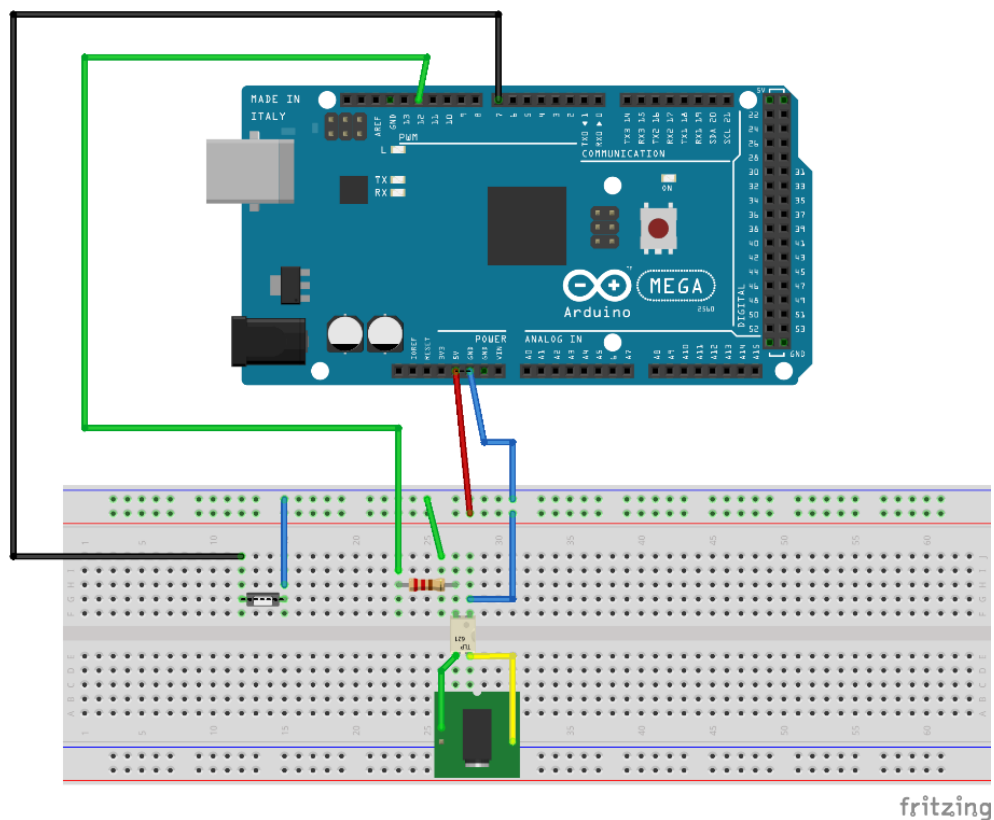


Figura 127 - Esquema simplificado do circuito do *Arduíno*.

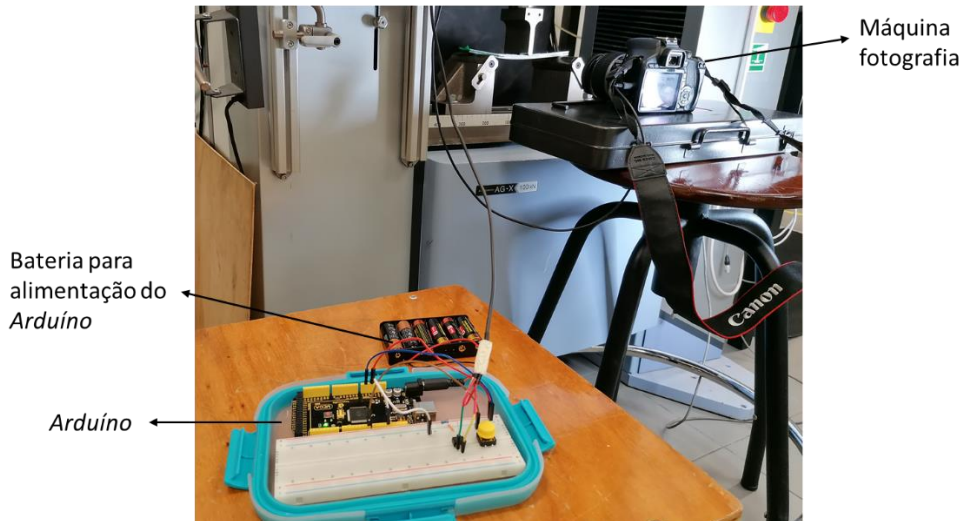


Figura 128 - Setup usando o Arduino.

3.4.3 Resultados

Para determinação das propriedades de fratura à tração foram utilizados métodos que requerem a medição do comprimento de fenda, tais como CCM e CBT, e um método baseado no comprimento de fenda equivalente, o CBBM. As equações utilizadas para cálculo do G_{Ic} já foram apresentadas no capítulo 2.2.2.1.

3.4.3.1 Curvas $P-\delta$ e R

Através dos dados fornecidos pelo *software* da máquina de ensaios foi possível efetuar o tratamento de dados e obter as correspondentes curvas $P-\delta$ e R . as curvas $P-\delta$ estão apresentadas da Figura 129 à Figura 132 de acordo com a percentagem de fibras.

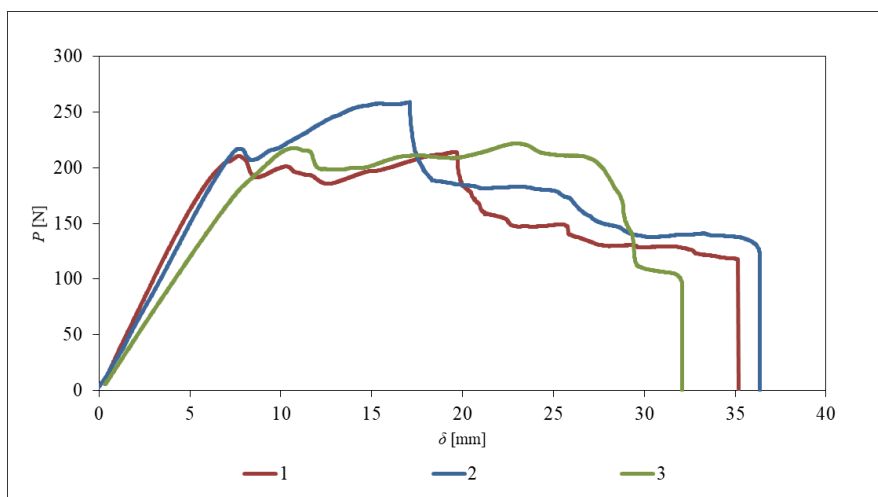
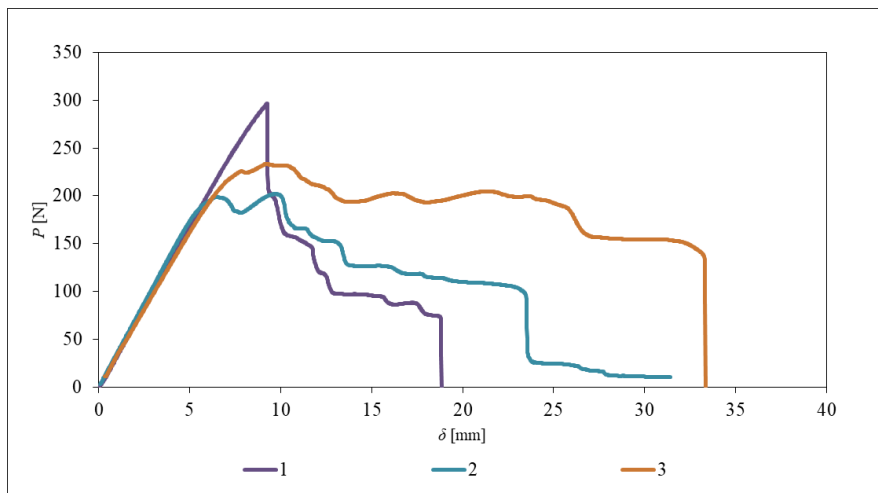
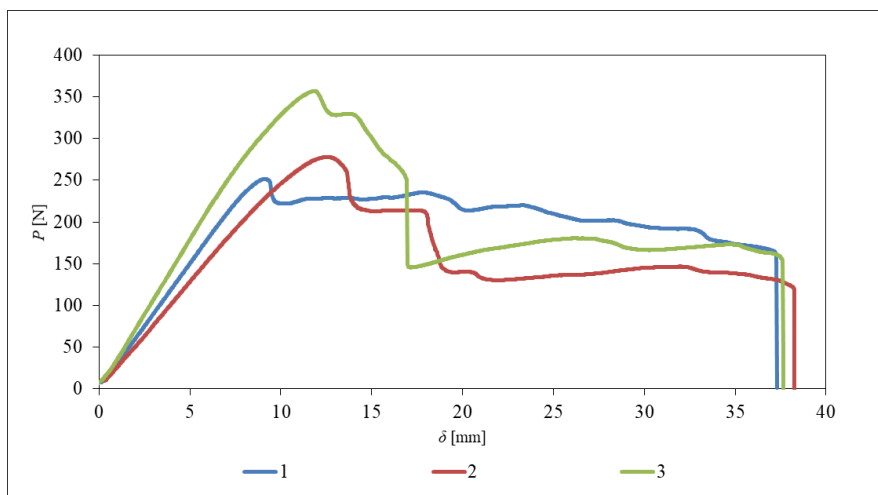
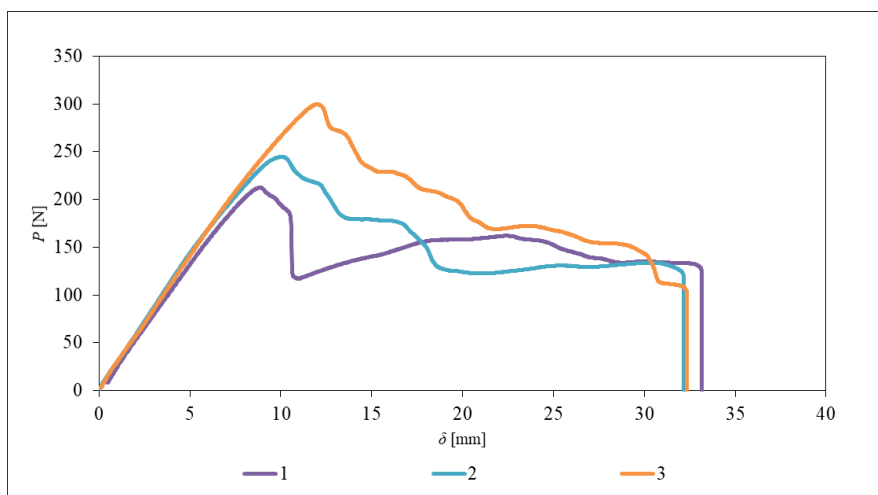


Figura 129 - Curvas $P-\delta$ do ensaio DCB com 0 phr de concentração de fibras.

Figura 130 - Curvas P - δ do ensaio DCB com 15 phr de concentração de fibras.Figura 131 - Curvas P - δ do ensaio DCB com 35 phr de concentração de fibras.Figura 132 - Curvas P - δ do ensaio DCB com 55 phr de concentração de fibras.

Da Figura 133 à Figura 136 estão apresentadas as curvas R obtidas para um provete de cada concentração de fibras de vidro, considerado representativo da globalidade dos provetes testados. Pela análise dos métodos CCM, CBT e CBBM, estas curvas relacionam a evolução de G_{Ic} com a ou a_{eq} para o provete testado.

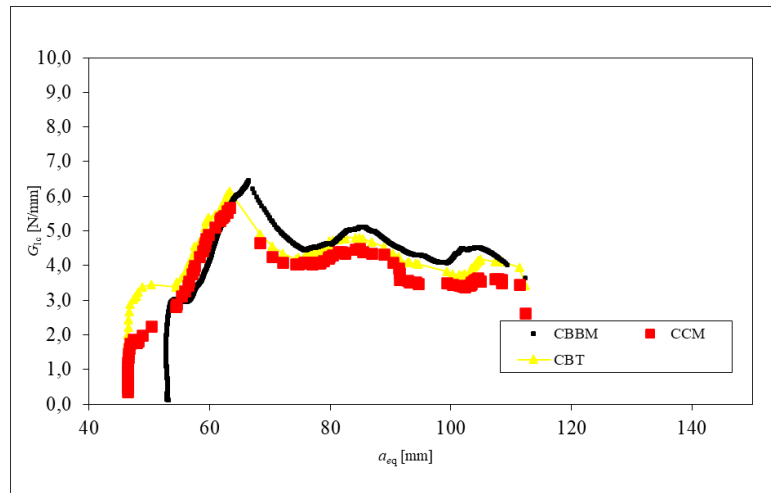


Figura 133 - Curvas R obtidas pelo ensaio DCB para o provete P2 com 0 phr de concentração de fibras de vidro, através dos métodos CCM, CBT e CBBM.

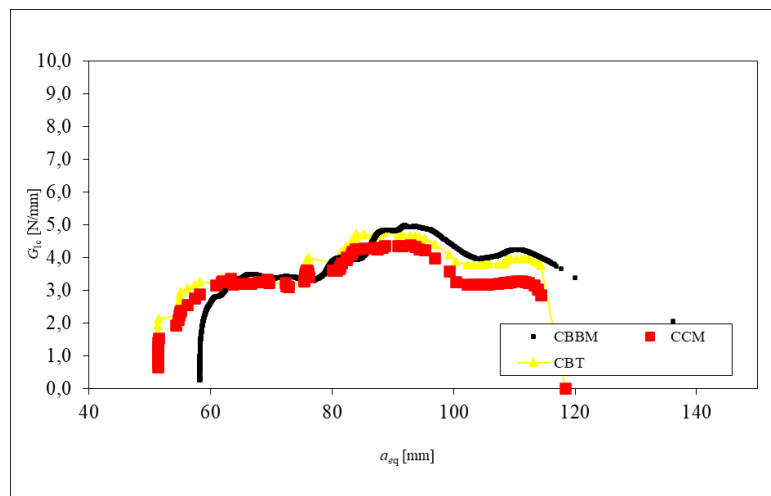


Figura 134 - Curvas R obtidas pelo ensaio DCB para o provete P3 com 15 phr de concentração de fibras de vidro, através dos métodos CCM, CBT e CBBM.

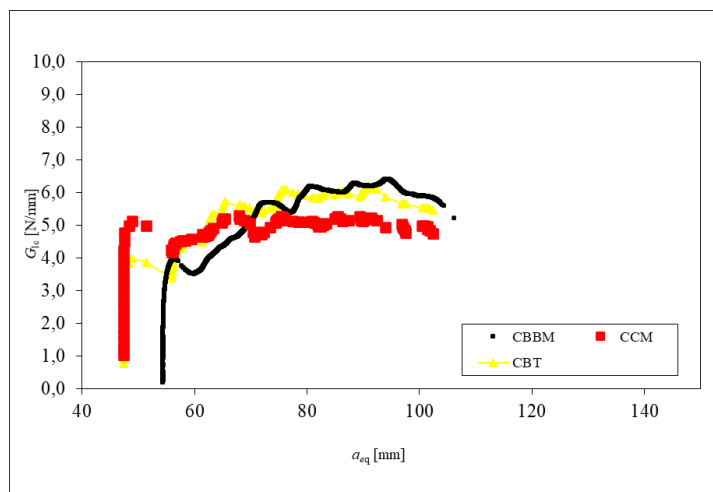


Figura 135 - Curvas R obtidas pelo ensaio DCB para o provete P1 com 35 phr de concentração de fibras de vidro, através dos métodos CCM, CBT e CBBM.

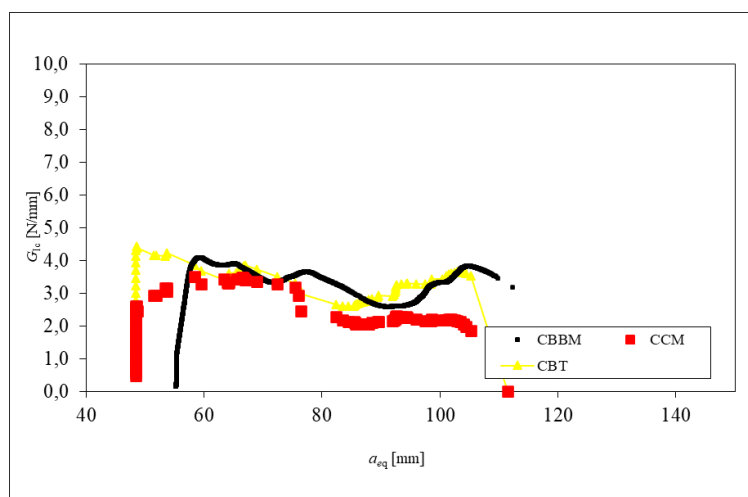


Figura 136 - Curvas R obtidas pelo ensaio DCB para o provete P2 com 55 phr de concentração de fibras de vidro, através dos métodos CCM, CBT e CBBM.

As curvas obtidas pelos diferentes métodos não apresentam grande discrepância. Como seria expectável, existe um valor inicial de a_{eq} diferente entre os métodos que utilizam o comprimento real da fenda, e o método que utilizada o comprimento de fenda equivalente.

3.4.3.2 Modos de rotura

Foram retiradas fotografias aos provetes após os respetivos ensaios, de forma a registar os modos de rotura dos mesmos. A rotura dos provetes está demonstrada da Figura 137 à Figura 140, devidamente separados por concentração de fibras de vidro.

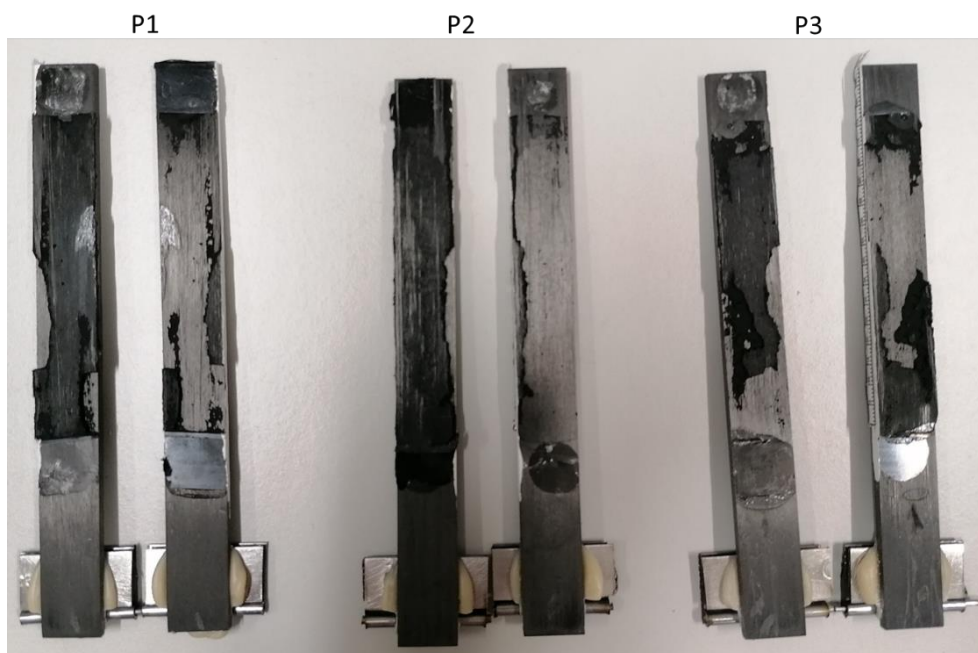


Figura 137 - Ruptura dos provetes DCB com 0 phr de concentração de fibras.

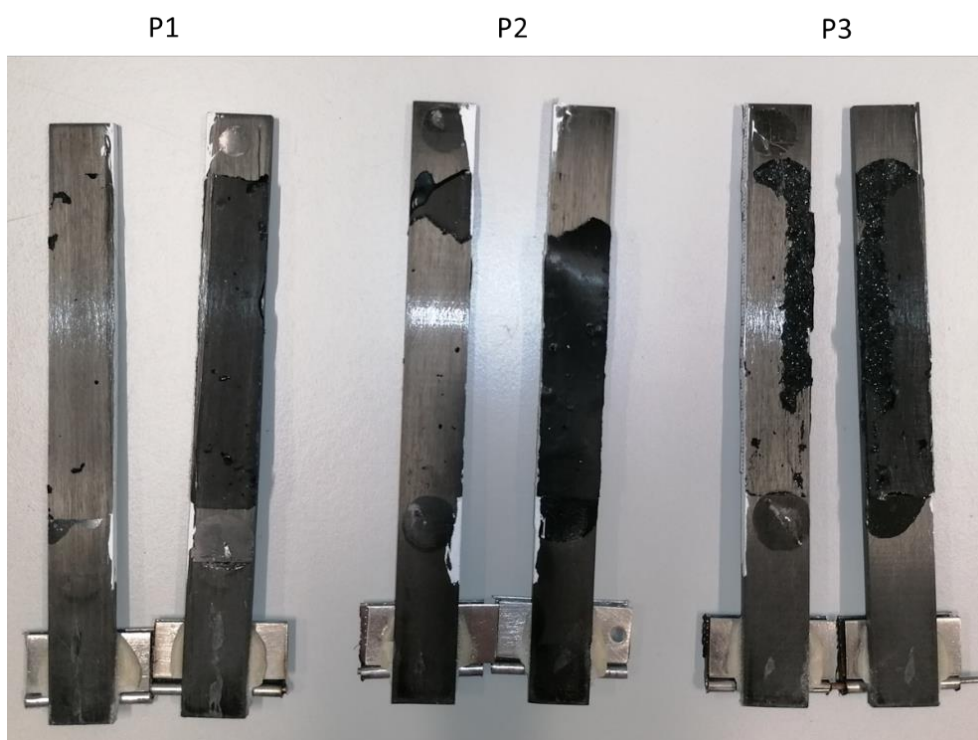


Figura 138 - Ruptura dos provetes DCB com 15 phr de concentração de fibras.

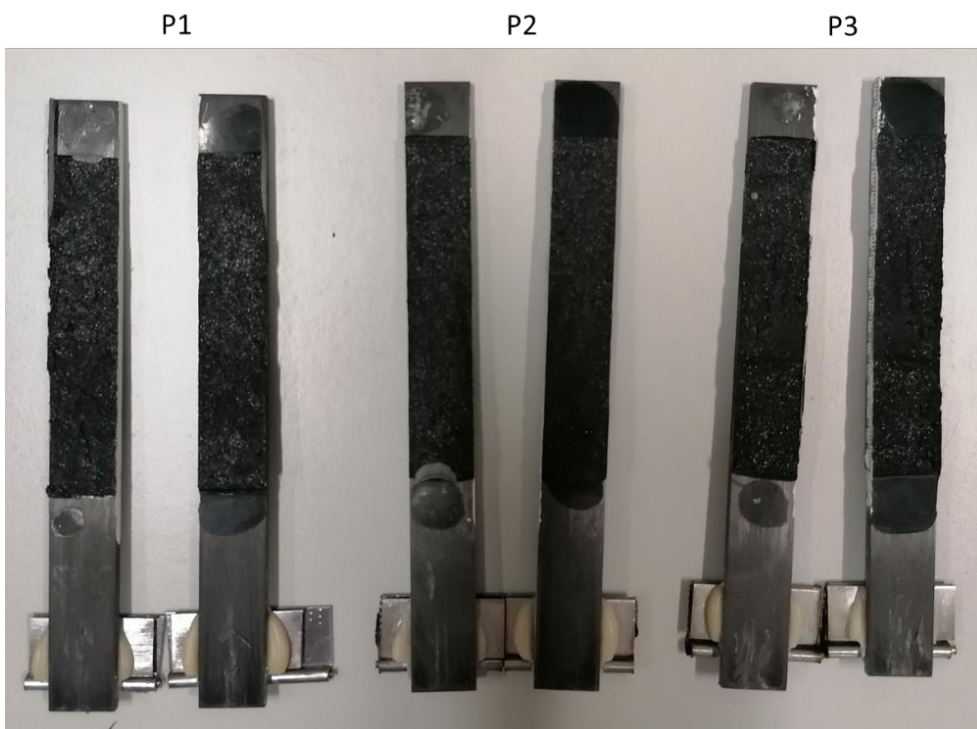


Figura 139 - Rotura dos provetes DCB com 35 phr de concentração de fibras.

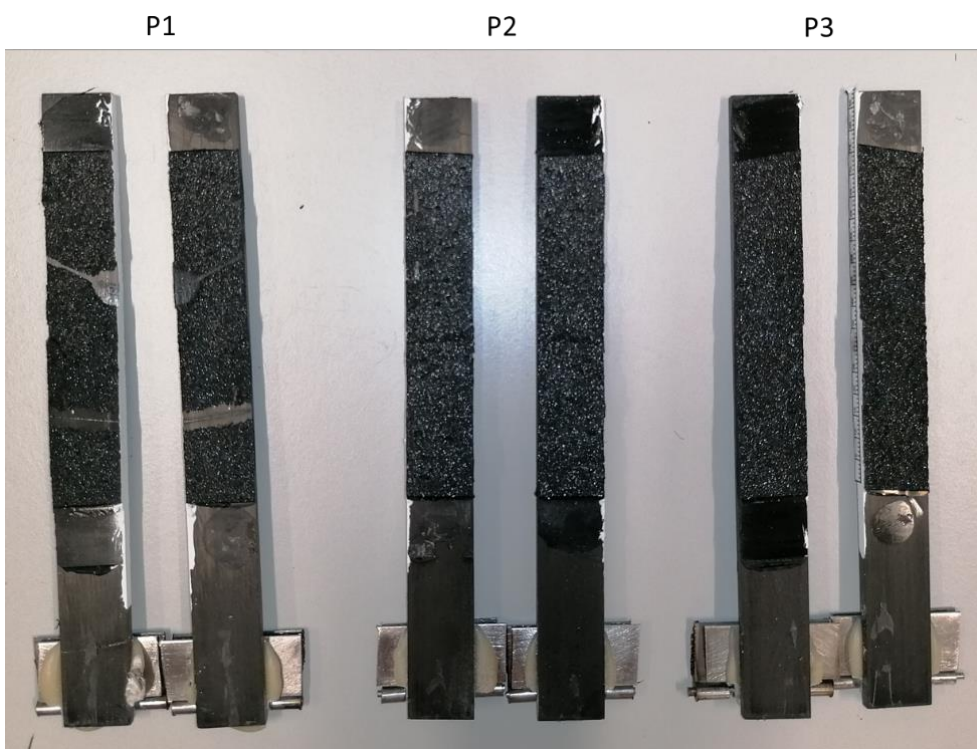


Figura 140 - Rotura dos provetes DCB com 55 phr de concentração de fibras.

3.4.3.3 Propriedades de fratura à tração

Após tratamento de dados, foi possível tabelar os valores obtidos de G_{Ic} pelos diferentes métodos, de forma a caracterizar as quatro concentrações de fibras de vidro no adesivo SikaForce® 840 L07, cujos resultados se encontram descritos na Tabela 31. Os ensaios considerados inválidos são indicados como “-”.

Tabela 31 - Valores de G_{Ic} obtidos pelos métodos CCM, CBT e CBBM.

Concentração de fibras de vidro	Provete	CCM	CBT	CBBM	Modo de rotura
0 phr	1	3,71	3,59	3,54	Mista
	2	3,54	3,82	4,09	Adesiva
	3	3,62	3,84	3,73	Mista
15 phr	1	3,49	3,81	4,11	Adesiva
	2	-	-	-	Adesiva
	3	4,22	4,21	4,26	Mista
35 phr	1	5,19	5,97	6,11	Coesiva
	2	4,61	4,53	4,54	Coesiva
	3	4,57	5,07	5,47	Coesiva
55 phr	1	3,67	3,78	4,05	Coesiva
	2	3,33	4,13	4,01	Coesiva
	3	4,44	4,72	4,53	Coesiva

Verifica-se que, com o aumento da percentagem de fibra de vidro, a rotura dos provetes tende a ser coesiva.

Calculados os valores de G_{Ic} para cada provete foi possível fazer o cálculo da média tendo em consideração o método e a concentração de fibras usada.

Tabela 32 - Valores médios de G_{Ic} obtidos pelos métodos CCM, CBT e CBBM

		0 phr	15 phr	35 phr	55 phr
CCM	Media	3,62	3,86	4,79	3,81
	Desvio-Padrão	0,08	0,52	0,35	0,57
	C_oV	2,31	13,48	7,21	14,94
CBT	Media	3,75	4,01	5,19	4,21
	Desvio-Padrão	0,14	0,29	0,73	0,48
	C_oV	3,69	7,16	14,00	11,37
CBBM	Media	3,79	4,19	5,38	4,51
	Desvio-Padrão	0,28	0,11	0,79	0,29
	C_oV	7,42	2,65	14,68	6,44

De referir que o provete 2 com 15 phr de concentração de fibras não foi considerado válido pois este apresentava valores de G_{Ic} muito abaixo comparativamente com os restantes provetes. Este provete apresentou uma rotura adesiva, o que pode indicar que houve uma incorreta preparação dos substratos, o que tornou o provete inválido. Desta forma, estes dados não foram considerados para o cálculo da média e do desvio padrão.

Verifica-se uma elevada repetibilidade nos valores obtidos, sendo que o método baseado no comprimento de fenda equivalente (CBBM) apresenta valores superiores aos registados pelos restantes métodos, que requerem a medição do comprimento de fenda. Este é o método mais expedito e que induz menos erros na determinação de G_{Ic} , uma vez que contabiliza a já referida FPZ e não é afetado por eventuais erros de medição de a . Contudo, a análise da Figura 141 mostra que comparando os dados dos três métodos de acordo com a percentagem de fibras, verifica-se que todos apresentam grande proximidade, estando o CBBM sempre ligeiramente acima.

Analisando o gráfico pode também ver-se que o valor de G_{Ic} aumenta até aos 35 phr de concentração de fibras de vidro, reduzindo depois para os 55 phr.

No capítulo 3.7.3 será feita uma análise mais profunda dos resultados obtidos.

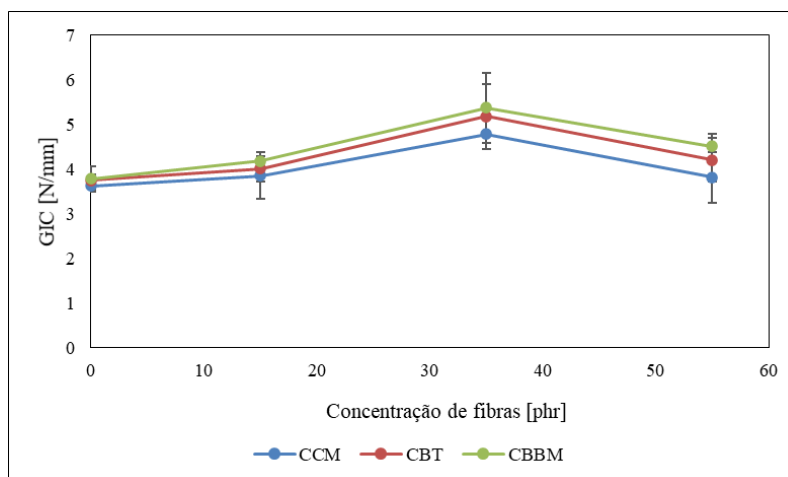


Figura 141 - Gráfico comparativo dos métodos CCM, CBT e CBBM no ensaio DCB.

3.5 Ensaio de fratura ao corte

Neste capítulo são descritos os métodos usados para produção dos provetes para o ensaio de fratura ao corte. Serão apresentados as dimensões e geometrias utilizadas, preparação dos aderentes, preparação para o ensaio e resultados.

3.5.1 Definição do ensaio

Para determinação das propriedades de fratura ao corte foram usados provetes ENF como ilustrado na Figura 51 (a), e com as dimensões apresentadas na Tabela 33.

Tabela 33 - Dimensões teóricas dos provetes ENF em mm

Comprimento do provete, $2L$	230
Espessura do substrato, h	3
Espessura do adesivo, t_A	1
Comprimento da pré-fenda, a_0	70
Largura do provete, B	15

3.5.2 Fabrico e ensaio dos provetes

Para a preparação dos provetes, foram utilizadas as mesmas técnicas dos provetes DCB. Os substratos foram preparados de acordo com o procedimento descrito no capítulo 3.3.2.1 e, tal como aconteceu nos provetes DCB, também nos provetes ENF foram usados calços de forma a garantir uma espessura uniforme e simular o defeito inicial (pré-fenda). A única diferença entre os provetes DCB e ENF consiste no comprimento total do provete e na posição da pré-fenda que, no caso do provete ENF, corresponde a 70 mm da extremidade do provete.

Preparação dos provetes

Após colagem dos calços no substrato inferior, os provetes foram colocados sobre uma régua de madeira, e preparou-se quantidade necessária de adesivo de forma a iniciar a aplicação no mesmo nos provetes. Após aplicação do adesivo e do substrato superior foi aplicada pressão sobre os calços de forma a garantir a espessura desejada de adesivo, e a expulsar o excesso. Posteriormente foram colocados grampos na zona dos calços e os provetes alinhados no comprimento e largura, deixando o adesivo curar durante uma semana à temperatura ambiente (Figura 142).



Figura 142 - Provete ENF com grampos para aplicação de pressão durante a cura.

Preparação dos provetes para ensaio

Passada uma semana do fabrico dos provetes, o processo de cura estava terminado, e os provetes estavam prontos para começar a preparação para os ensaios. Com auxílio de um alicate foram retirados os calços do provete e o excesso de adesivo foi removido utilizando um alicate e uma mó de forma a garantir uma superfície lateral completamente lisa.

Tal como aconteceu nos provetes DCB, foi pintada com tinta corretora uma das faces laterais e foram coladas escalas de forma a registar o comprimento da fenda durante o ensaio. A fenda foi propagada manualmente com auxílio de uma ferramenta de forma a evitar algum efeito de arredondamento da fenda.

De forma a facilitar o posicionamento dos provetes para o ensaio ENF, estes foram marcados nas extremidades a uma distância de 15 mm, garantindo o correto alinhamento com os punções de suporte.



Figura 143 - Marcação de um dos pontos no provete ENF.

Condições de ensaio

Os provetes foram numerados e identificados de acordo com a percentagem de fibras, de forma a facilitar a sua identificação antes e após o ensaio. Para realização do ensaio foi mais uma vez utilizada a máquina universal de ensaio com uma ferramenta

específica para o ensaio ENF, que será descrita mais adiante. O ensaio foi realizado a uma velocidade constante de 2 mm/min.

Antes de se realizarem os ensaios foi necessário proceder à medição dos provetes previamente preparados. Com auxílio de um paquímetro digital, foram medidas as espessuras dos substratos, a largura do provete e o comprimento de pré-fenda. As dimensões dos provetes estão apresentadas da Tabela 34 à Tabela 37.

Tabela 34 - Dimensões dos provetes ENF com uma concentração de fibras de 0 phr.

Provete	Espessura (mm)	Espessura média (mm)	Largura (mm)	Largura média (mm)	Pré-fenda (mm)
1	2,43	2,48	15,06	15,21	79,58
	2,53				
1	2,83	2,78	15,22	15,21	79,58
	2,73				
2	2,52	2,55	15,94	15,52	68,14
	2,58				
2	2,83	2,73	15,23	15,52	68,14
	2,63				
3	2,59	2,70	15,34	15,30	68,04
	2,81				
3	2,87	2,96	15,23	15,30	68,04
	3,10				

Tabela 35 - Dimensões dos provetes ENF com uma concentração de fibras de 15 phr.

Provete	Espessura (mm)	Espessura média (mm)	Largura (mm)	Largura média (mm)	Pré-fenda (mm)
1	3,05	2,96	15,15	15,20	73,82
	2,87				
1	3,08	3,07	15,24	15,20	73,82
	3,06				
2	2,73	2,93	15,26	15,26	69,42
	3,12				
2	2,87	2,85	15,29	15,26	69,42
	2,82				
3	3,09	2,99	15,96	16,33	68,68
	2,89				
3	2,94	2,95	16,58	16,33	68,68
	2,95				

Tabela 36 - Dimensões dos provetes ENF com uma concentração de fibras de 35 phr.

Provete	Espessura (mm)	Espessura média (mm)	Largura (mm)	Largura média (mm)	Pré-fenda (mm)
1	3,09	3,00	15,33	15,42	66,50
	2,91		15,49		
1	2,92	2,99	15,44		
	3,06				
2	3,10	3,01	15,21	15,13	70,76
	2,91		15,05		
2	2,96	2,96	15,14		
	2,96				
3	3,04	2,95	15,19	15,20	68,91
	2,85		15,24		
3	2,92	2,95	15,18		
	2,98				

Tabela 37 - Dimensões dos provetes ENF com uma concentração de fibras de 55 phr.

Provete	Espessura (mm)	Espessura média (mm)	Largura (mm)	Largura média (mm)	Pré-fenda (mm)
1	3,06	2,78	15,27	15,36	70,30
	2,50		15,37		
1	2,94	2,94	15,45		
	2,94				
2	2,85	2,88	15,19	15,33	69,66
	2,91		15,31		
2	2,91	2,94	15,49		
	2,97				
3	2,89	2,98	15,15	15,20	70,42
	3,07		15,20		
3	2,93	3,01	15,24		
	3,09				

Para realização do ensaio ENF é necessário aplicar uma ferramenta na máquina de ensaios. Para tal utilizou-se uma ferramenta de flexão constituída por dois rolos que definem a distância entre apoios, que neste caso é de 200 mm. A carga é aplicada no centro por um dispositivo com uma extremidade semi-esférica (Figura 144).

Foi usado o mesmo *setup* fotográfico utilizado nos ensaios DCB (máquina fotográfica mais *arduíno*), como auxílio para determinar o valor de G_{IIc} , pelos métodos que requerem a medição do comprimento da fenda. Foram tiradas fotos de 5 em 5 segundos até a fenda ultrapassar o ponto central.

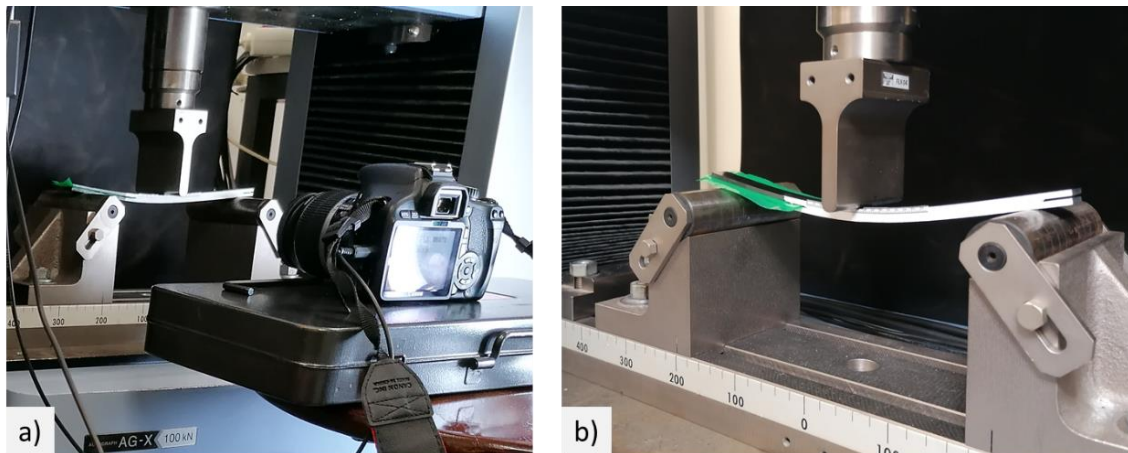


Figura 144 – Ensaio ENF: a) *Setup* de ensaio e b) ferramenta utilizada.

Durante a realização do ensaio garantiu-se que o posicionamento da máquina fotográfica conseguia cobrir todo o comprimento de fenda (Figura 145).

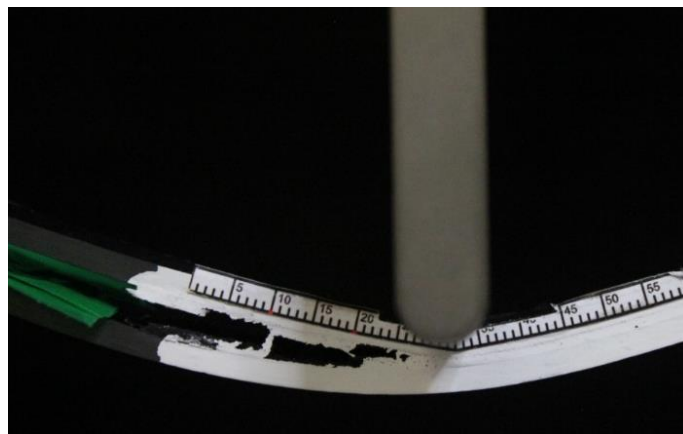


Figura 145 - Registo fotográfico durante o ensaio ENF.

Na pré-fenda dos provetes foram inseridas duas folhas de Teflon® (Figura 146) de forma a que o escorregamento entre os dois substratos ocorresse sem atrito, o que permite reproduzir as condições teóricas do ensaio e estimar G_{IIc} com precisão.

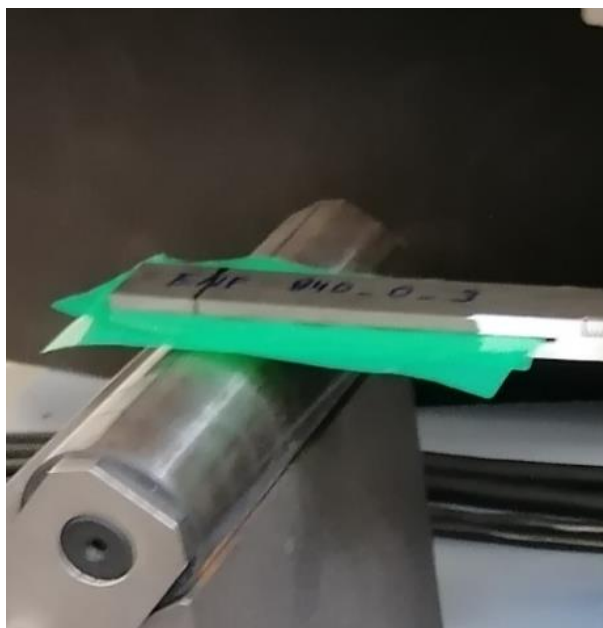


Figura 146 - Folhas de Teflon® entre os substratos ENF.

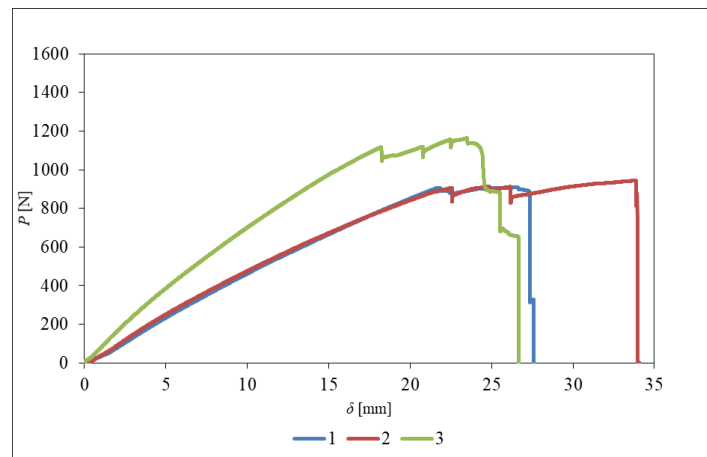
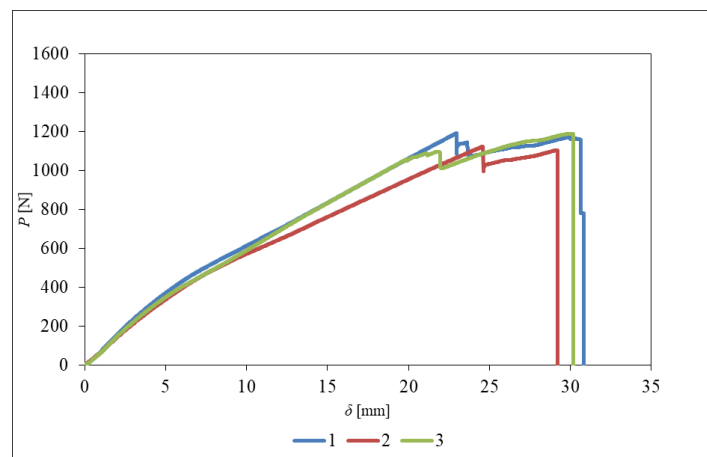
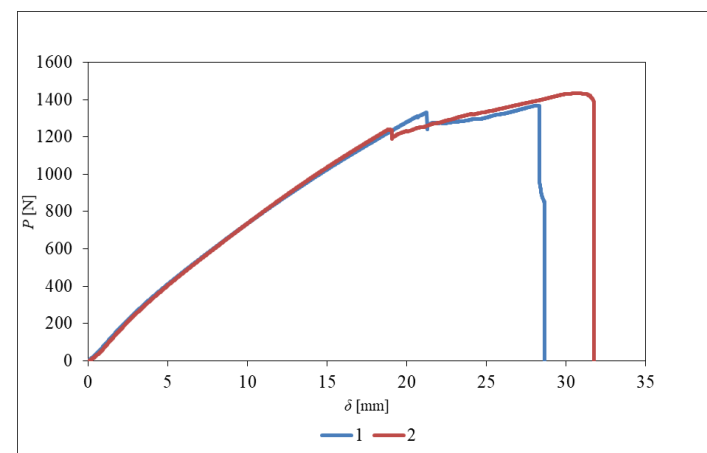
Este tipo de ensaio não prevê a separação dos substratos, pelo que apenas é relevante a análise do ensaio até que a fenda atinja o local de aplicação da carga localizada a meio vão do provete, tal como ilustrado na Figura 145. Na zona onde é aplicada a carga, a fenda tende a progredir mais lentamente devido às forças de compressão que são geradas nesse ponto, que dificultam a progressão da fenda e aumentam artificialmente o valor medido de G_{IIc} .

3.5.3 Resultados

Para determinação das propriedades de fratura ao corte foram utilizados métodos que requerem a medição do comprimento da fenda, tais como DBT, CBT e CCM, e um método baseado no comprimento de fenda equivalente, o CBBM. As equações utilizadas para o cálculo do G_{IIc} já foram descritas no capítulo 2.2.2.2.

3.5.3.1 Curvas $P-\delta$ e R

Através dos dados fornecidos pelo *software* da máquina de ensaios foi possível efetuar o tratamento de dados e obter as curvas $P-\delta$ e R . As curvas $P-\delta$ estão representadas da Figura 147 à Figura 150, de acordo com a concentração de fibras.

Figura 147 - Curvas P - δ do ensaio ENF com 0 phr de concentração de fibras.Figura 148 - Curvas P - δ do ensaio ENF com 15 phr de concentração de fibras.Figura 149 - Curvas P - δ do ensaio ENF com 35 phr de concentração de fibras.

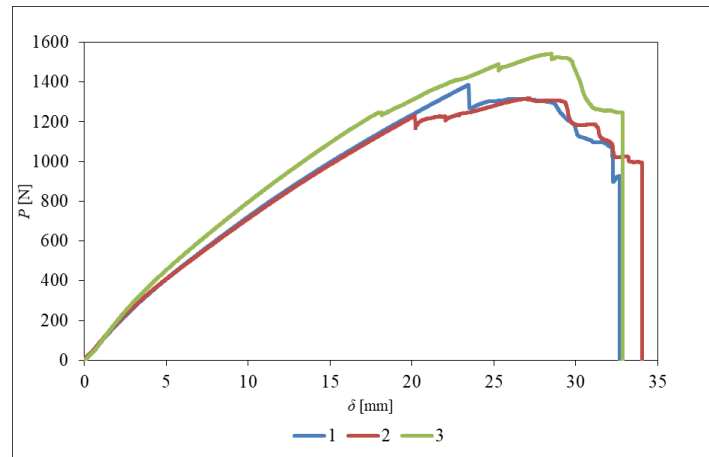


Figura 150 - Curvas P - δ do ensaio ENF com 55 phr de concentração de fibras.

Da Figura 151 à Figura 154 estão apresentadas as curvas R obtidas para um provete de cada concentração de fibras, considerado representativo da globalidade dos provetes testados. A curva R relaciona a evolução de G_{IIc} com a ou a_{eq} para o provete testado.

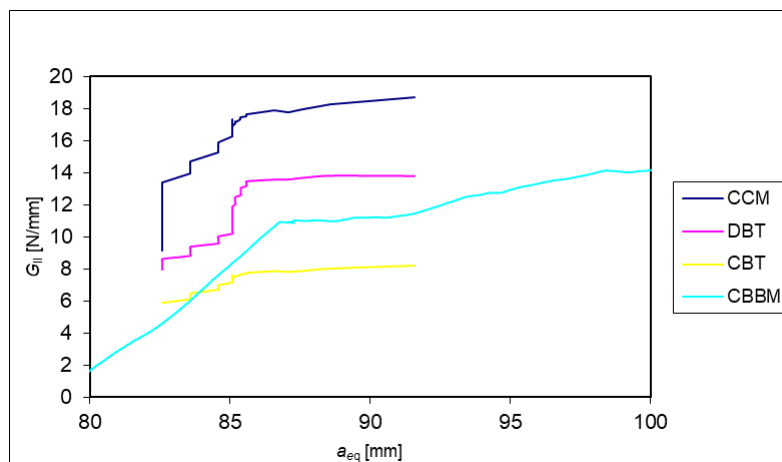


Figura 151 - Curvas R obtidas pelo ensaio ENF para o provete P1 com 0 phr de concentração de fibras de vidro, através dos métodos CCM, DBT, CBT e CBBM.

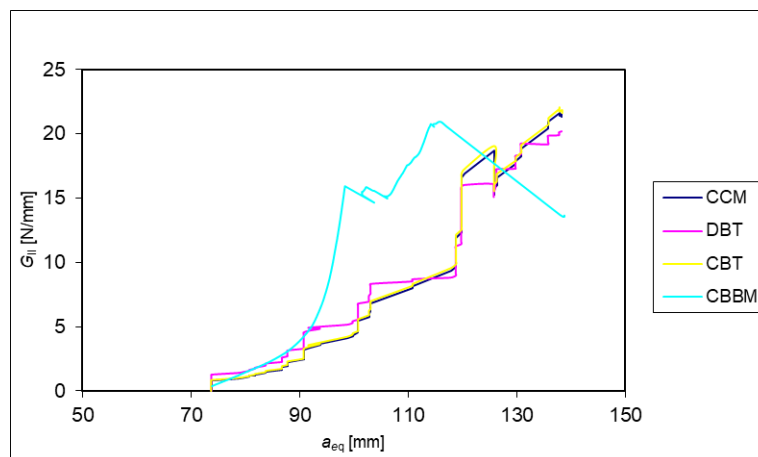


Figura 152 - Curvas R obtidas pelo ensaio ENF para o provete P1 com 15 phr de concentração de fibras de vidro, através dos métodos CCM, DBT, CBT e CBBM.

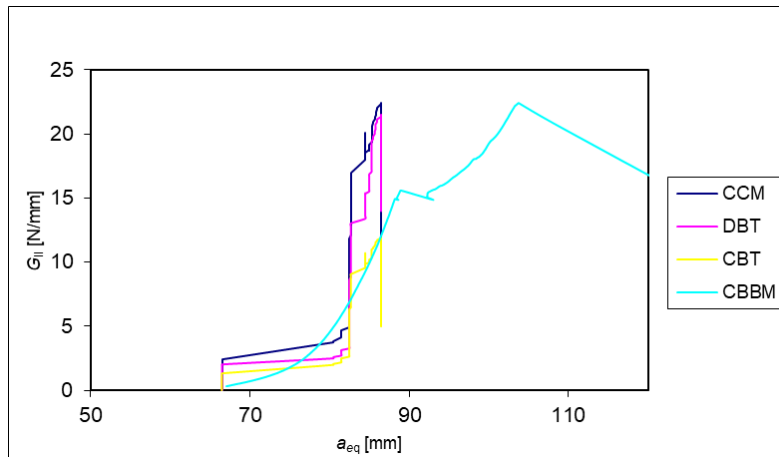


Figura 153 - Curvas R obtidas pelo ensaio ENF para o provete P1 com 35 phr de concentração de fibras de vidro, através dos métodos CCM, DBT, CBT e CBBM.

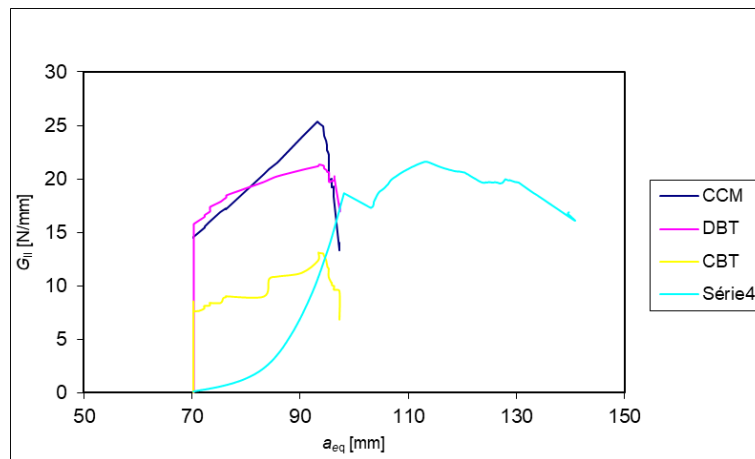


Figura 154 - Curvas R obtidas pelo ensaio ENF para o provete P1 com 55 phr de concentração de fibras de vidro, através dos métodos CCM, DBT, CBT e CBBM.

As curvas obtidas não demonstram a existência de um patamar perfeitamente definido para nenhum dos métodos, o que se considera estar relacionado com a existência de uma zona plástica de dimensões consideráveis. Como era espectável, verifica-se que o G_{IIc} calculado através do método CCM é ligeiramente superior ao DBT e CBBM, e que o método CBT está sempre mais baixo que os restantes. Este fenómeno será explicado no capítulo 3.7.4.

O provete 3 com uma concentração de fibras de 35 phr não apresentou propagação da fenda e, como tal, não foi considerado.

3.5.3.2 Modos de rotura

Foram retiradas fotografias aos provetes após os respetivos ensaios de forma a registar a rotura dos mesmos. Os provetes após ensaios estão representados na Figura 155 e Figura 156.

De referir que a propagação da fenda na zona útil do ensaio ocorreu antes da rotura dos substratos.

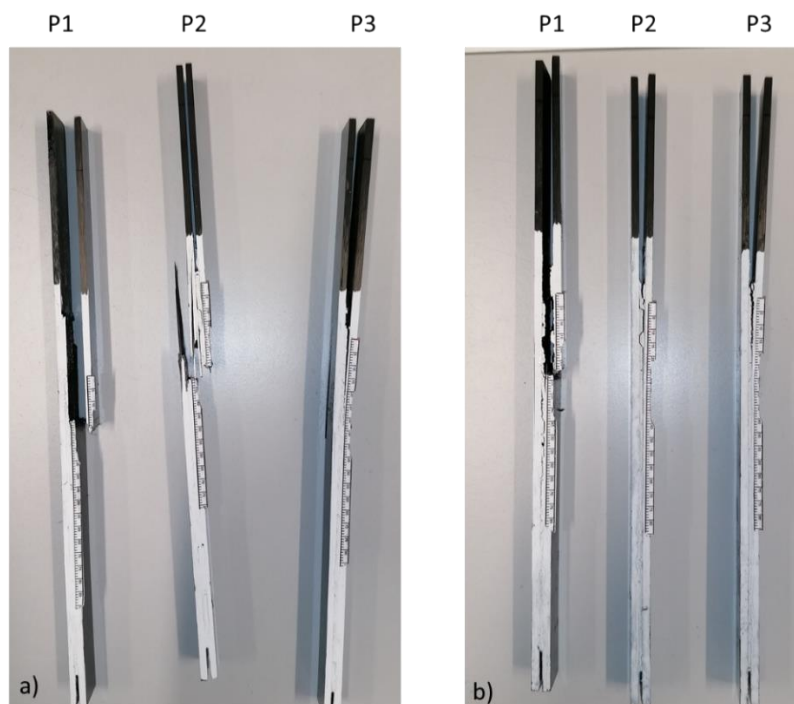


Figura 155 - Rotura dos provetes ENF com: a) 0 phr de concentração de fibras e b) 15 phr de concentração de fibras.

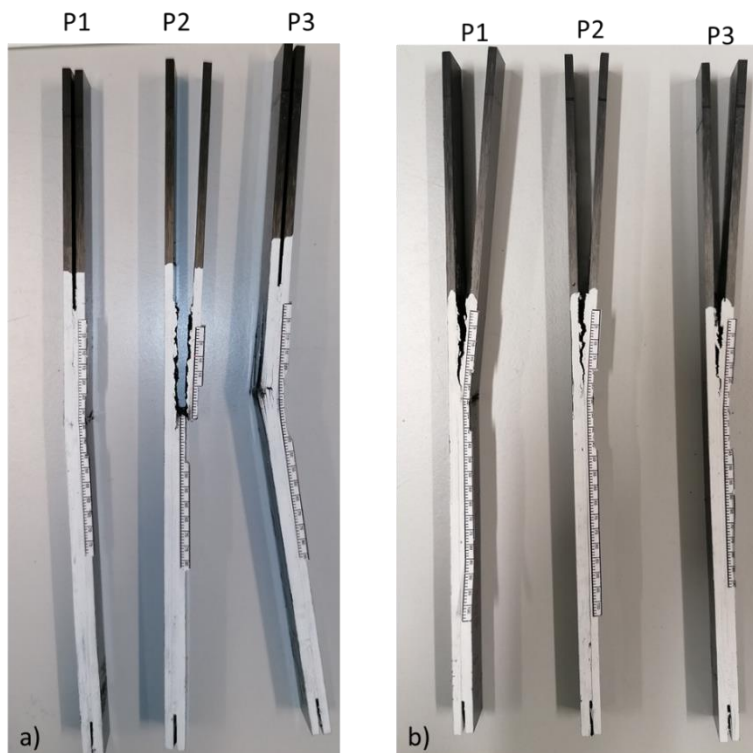


Figura 156 - Rotura dos provetes ENF com: a) 35 phr de concentração de fibras e b) 55 phr de concentração de fibras.

3.5.3.3 Propriedades de fratura ao corte

Após tratamento dos dados, foi possível tabelar os valores obtidos de G_{IIC} pelos diferentes métodos, de forma a caracterizar as quatro concentrações de fibras de vidro no adesivo SikaForce®-840 L07, cujos resultados se encontram descritos da Tabela 38 à Tabela 41.

Tabela 38 - Propriedades de fratura ao corte para os provetes ENF com 0 phr concentração de fibras de vidro.

	CCM	DBT	CBT	CBBM
1	17,52	13,41	7,93	14,15
2	17,96	17,21	8,61	15,94
3	19,21	15,08	10,47	15,65
Média	18,23	15,23	9,01	15,25
Desvio Padrão	0,88	1,90	1,31	0,96
CoV	4,80	12,48	14,58	6,33

Tabela 39 - Propriedades de fratura ao corte para os provetes ENF com 15 phr concentração de fibras de vidro.

	CCM	DBT	CBT	CBBM
1	19,77	19,38	15,64	20,27
2	15,82	17,65	14,62	18,55
3	18,60	18,39	14,14	19,37
Média	18,06	18,47	14,80	19,40
Desvio Padrão	2,03	0,87	0,77	0,86
CoV	11,24	4,70	5,18	4,43

Tabela 40 - Propriedades de fratura ao corte para os provetes ENF com 35 phr concentração de fibras de vidro.

	CCM	DBT	CBT	CBBM
1	21,79	21,12	11,68	21,12
2	21,17	22,01	11,44	22,26
3	Sem propagação de fenda			
Média	21,48	21,57	11,56	21,69
Desvio Padrão	0,44	0,63	0,17	0,80
CoV	2,05	2,94	1,45	3,70

Tabela 41 - Propriedades de fratura ao corte para os provetes ENF com 55 phr concentração de fibras de vidro.

	CCM	DBT	CBT	CBBM
1	23,68	20,03	12,76	21,20
2	28,20	20,88	12,01	21,68
3	23,18	23,55	13,16	25,33
Média	25,02	21,49	12,65	22,74
Desvio Padrão	2,76	1,84	0,58	2,26
CoV	11,05	8,55	4,62	9,94

De referir que o provete 3 com 35 phr de concentração de fibras não foi considerado válido pois não apresentou propagação da fenda antes da rotura dos aderentes.

Através da Tabela 42 e da Figura 157 pode-se comprovar que o método CCM é mais inconstante do que os métodos DBT e CBBM, devido às dificuldades de ajuste polinomial que é característico deste método. Verifica-se também que o método CBT apresenta sempre valores de G_{IIC} inferiores aos restantes métodos usados.

No capítulo 3.7.4 será feita uma análise mais profunda dos resultados obtidos.

Tabela 42 - Valores médios de G_{IIC} , obtidos pelos métodos CCM, DBT, CBT e CBBM.

		0 phr	15 phr	35 phr	55 phr
CCM	Media	18,23	18,06	21,48	25,02
	Desvio-Padrão	0,88	2,03	0,44	2,76
	CoV	4,80	11,24	2,05	11,05
DBT	Media	15,23	18,47	21,57	21,49
	Desvio-Padrão	1,90	0,87	0,63	1,84
	CoV	12,48	4,70	2,94	8,55
CBT	Media	9,01	14,80	11,56	12,65
	Desvio-Padrão	1,31	0,77	0,17	0,58
	CoV	14,58	5,18	1,45	4,62
CBBM	Media	15,25	19,40	21,69	22,74
	Desvio-Padrão	0,96	0,86	0,80	2,26
	CoV	6,33	4,43	3,70	9,94

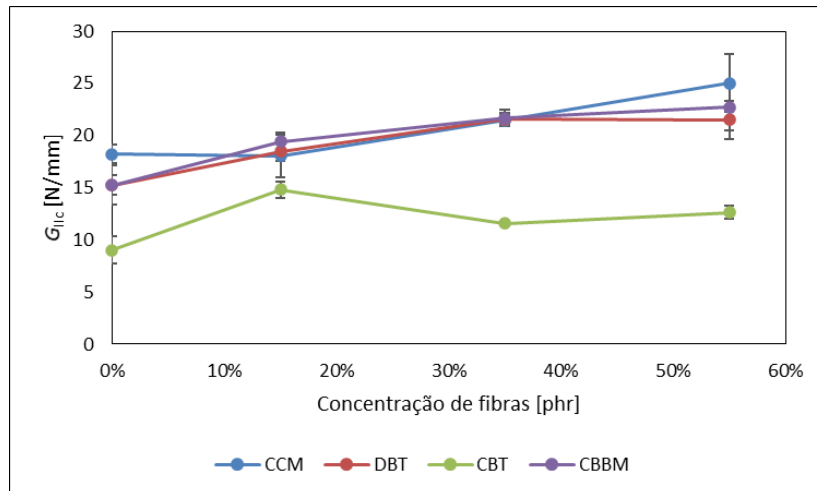


Figura 157 - Gráfico comparativo dos métodos CCM, DBT, CBT e CBBM no ensaio ENF.

3.6 Ensaios em modo misto

Neste capítulo são descritos os métodos usados para produção dos provetes para o ensaio em modo misto. São apresentadas as dimensões e geometria utilizada, preparação dos aderentes, preparação para o ensaio e resultados. As propriedades em modo misto foram calculadas através do ensaio de provetes JSS.

3.6.1 Definição do ensaio

Para a determinação do comportamento em modo misto do adesivo foram usados provetes JSS, fabricados e testados segundo a norma ASTM D1002. As dimensões e os esforços do provete JSS encontram-se representados na Figura 158.

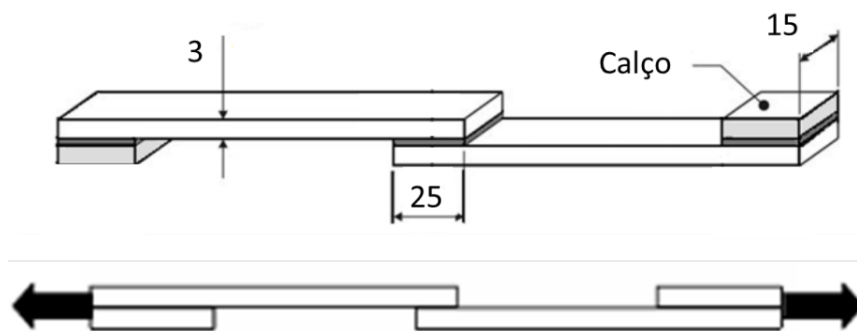


Figura 158 - Dimensões do provete JSS utilizadas.

3.6.2 Fabrico e ensaio dos provetes

Tal como aconteceu nos restantes provetes, os provetes para as JSS foram produzidos após preparação dos substratos de acordo com o procedimento no capítulo 3.3.2.1.

Os substratos foram marcados com o comprimento de sobreposição de 25 mm e alinhados em cima de uma mesa de forma a facilitar no processo de colagem. Colocado o adesivo, o substrato superior foi colocado sobre o substrato inferior, com todo o cuidado, de forma a garantir o comprimento de sobreposição assinalado. De forma a garantir a espessura de adesivo de 1 mm, foi usado um calço calibrado sobre um aderente de suporte, como representado na Figura 159 onde foi aplicada pressão com auxílio de um grampo.

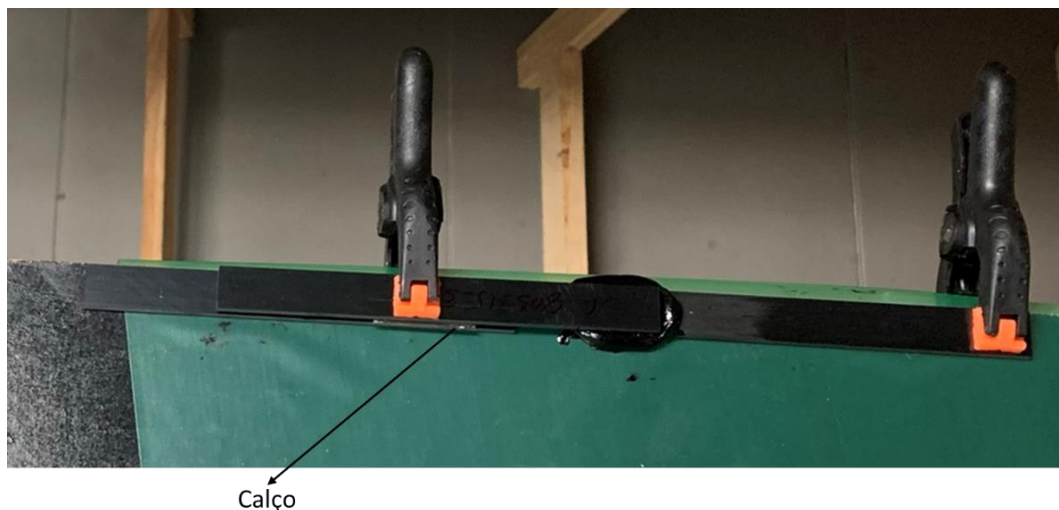


Figura 159 - Junta de sobreposição simples pressionada por ação de um grampo.

Os provetes ficaram a curar durante uma semana à temperatura ambiente. Terminada a cura, o excesso de adesivo foi removido com auxílio de um alicate e através de uma mó numa furadora vertical. Após remoção do excesso de adesivo, foram colados os calços nos extremos dos provetes de forma a que estes estejam alinhados na altura do ensaio.

Condições de ensaio

Os provetes foram numerados e identificados de acordo com a concentração de fibras de forma a facilitar a sua identificação antes e após o ensaio. Para realização dos ensaios foi uma vez mais utilizada a máquina universal de ensaios. Os ensaios foram realizados a uma velocidade constante de 1 mm/min. Os provetes foram colocados diretamente na máquina de ensaios e fixados através das amarras em cunha da máquina (Figura 160).



Figura 160 - Setup de ensaio JSS.

Após a preparação dos provetes, foram medidas as larguras e comprimento de sobreposição de cada provete, com auxílio de um paquímetro digital. Pretendeu-se com isto obter a área de secção útil do provete. As medições estão apresentadas da Tabela 43 à Tabela 46 de acordo com a concentração de fibras de vidro.

Tabela 43 -Dimensões dos provetes JSS com uma concentração de fibras de 0 phr.

Provete	Largura (mm)	Largura média (mm)	Comprimento sobreposição (mm)	Comprimento sobreposição médio (mm)	Área de sobreposição (mm ²)
1	15,16	15,21	28,26	28,26	429,83
	15,26		28,26		
2	15,42	15,46	27,34	27,32	422,29
	15,5		27,29		
3	16,09	15,91	29,74	29,73	472,86
	15,72		29,72		

Tabela 44 - Dimensões dos provetes JSS com uma concentração de fibras de 15 phr.

Provete	Largura (mm)	Largura média (mm)	Comprimento sobreposição (mm)	Comprimento sobreposição médio (mm)	Área de sobreposição (mm ²)
1	15,48	15,52	27,78	27,92	433,10
	15,55		28,05		
2	15,70	16,18	26,96	27,29	441,42
	16,65		27,62		
3	15,65	15,59	26,33	26,35	410,80
	15,53		26,37		

Tabela 45 - Dimensões dos provetes JSS com uma concentração de fibras de 35 phr.

Provete	Largura (mm)	Largura média (mm)	Comprimento sobreposição (mm)	Comprimento sobreposição médio (mm)	Área de sobreposição (mm ²)
1	15,49	15,46	26,72	26,80	414,33
	15,43		26,88		
2	15,33	15,34	26,09	26,08	399,94
	15,34		26,07		
3	15,62	15,59	26,23	26,28	409,63
	15,56		26,32		

Tabela 46 - Dimensões dos provetes JSS com uma concentração de fibras de 55 phr.

Provete	Largura (mm)	Largura média (mm)	Comprimento sobreposição (mm)	Comprimento sobreposição médio (mm)	Área de sobreposição (mm ²)
1	15,19	15,22	26,74	26,89	409,19
	15,25		27,03		
2	15,19	15,16	25,82	25,88	392,21
	15,12		25,94		
3	15,16	15,11	26,8	26,74	404,04
	15,06		26,68		

Posteriormente à realização dos ensaios, executou-se o tratamento de dados através da informação retirada da máquina de ensaios, recorrendo a uma folha de cálculo Excel® de forma a calcular a tensão máxima de corte em modo misto e obter o deslocamento máximo, força máxima e deslocamento na força máxima.

3.6.3 Resultados

Foi usada por base a norma ASTM D1002 para determinação das propriedades mecânicas em modo misto do adesivo. A tensão de corte foi calculada através da razão entre a força máxima e a área de secção útil, de acordo com a equação (37)

$$\tau = \frac{P_{\max}}{A}. \quad (37)$$

3.6.3.1 Curvas $P-\delta$

Através dos dados fornecidos pelo *software* da máquina de ensaio foi possível efetuar o tratamento de dados e obter as correspondentes curvas $P-\delta$, representadas da Figura 161 à Figura 164.

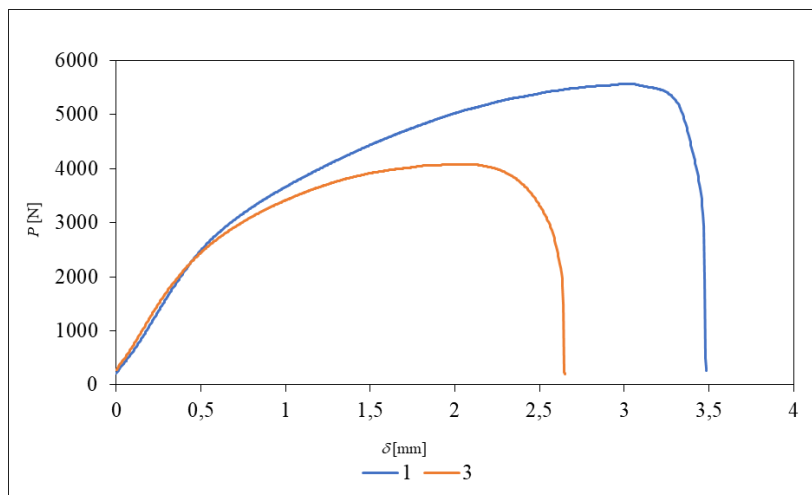


Figura 161 - Curvas $P-\delta$ do ensaio JSS com 0 phr de concentração de fibras.

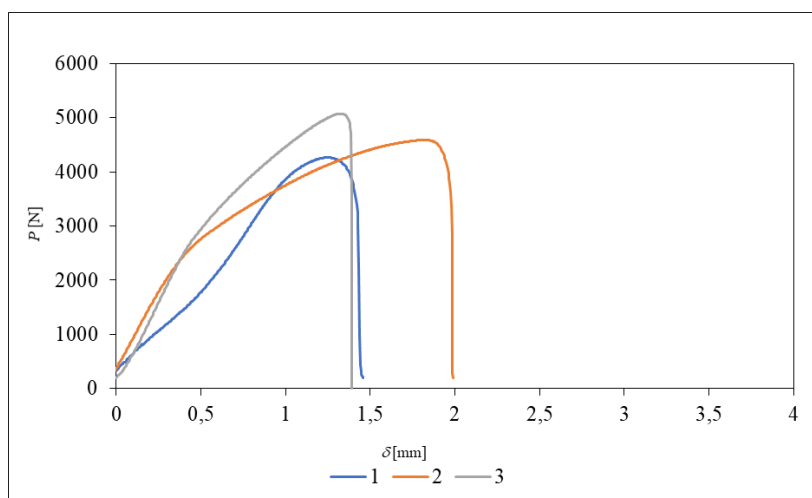
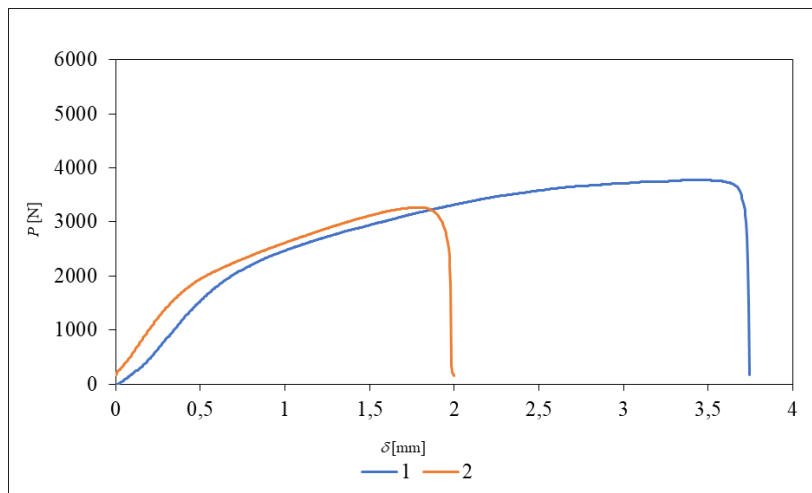
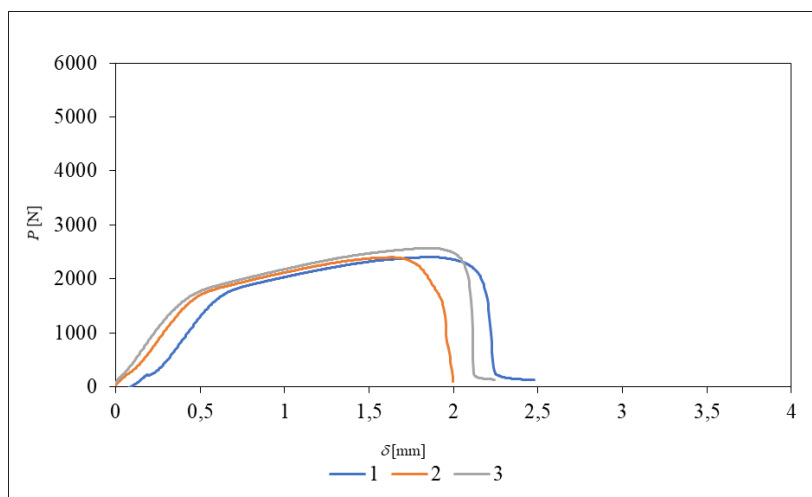


Figura 162 - Curvas $P-\delta$ do ensaio JSS com 15 phr de concentração de fibras.

Figura 163 - Curvas P - δ do ensaio JSS com 35 phr de concentração de fibras.Figura 164 - Curvas P - δ do ensaio JSS com 55 phr de concentração de fibras.

3.6.3.2 Modos de rotura

Foram retiradas fotografias aos provetes após os respetivos ensaios, de forma a analisar os modos de rotura dos mesmos. A rotura dos provetes, devidamente separados por concentração de fibras de vidro, está demonstrada na Figura 165 e Figura 166

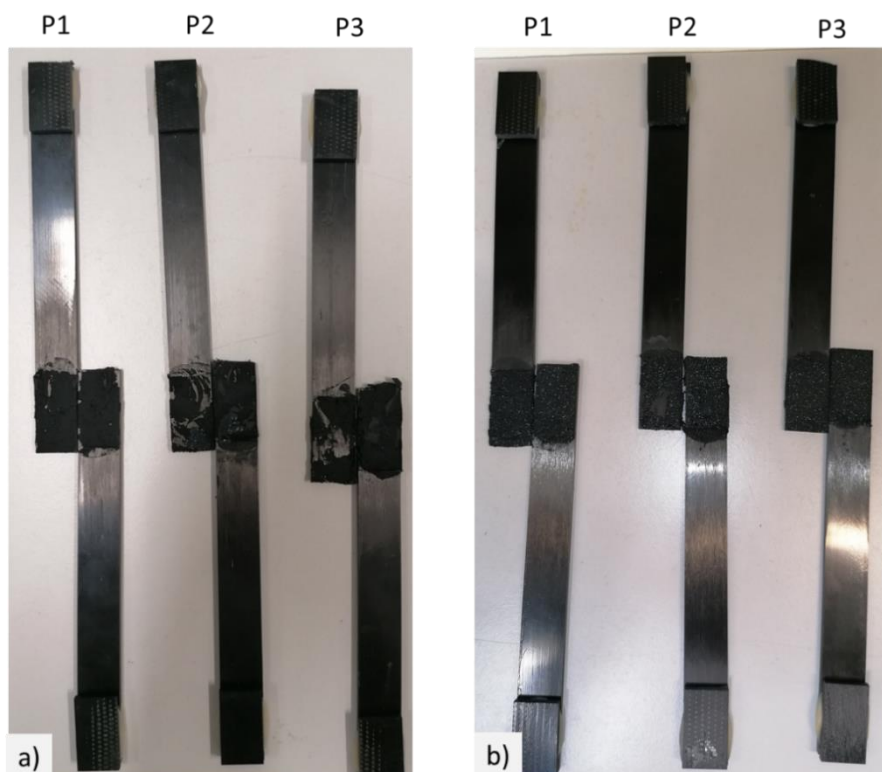


Figura 165 - Rotura dos provetes JSS: a) com 0 phr de concentração de fibras e b) com 15 phr de concentração de fibras.

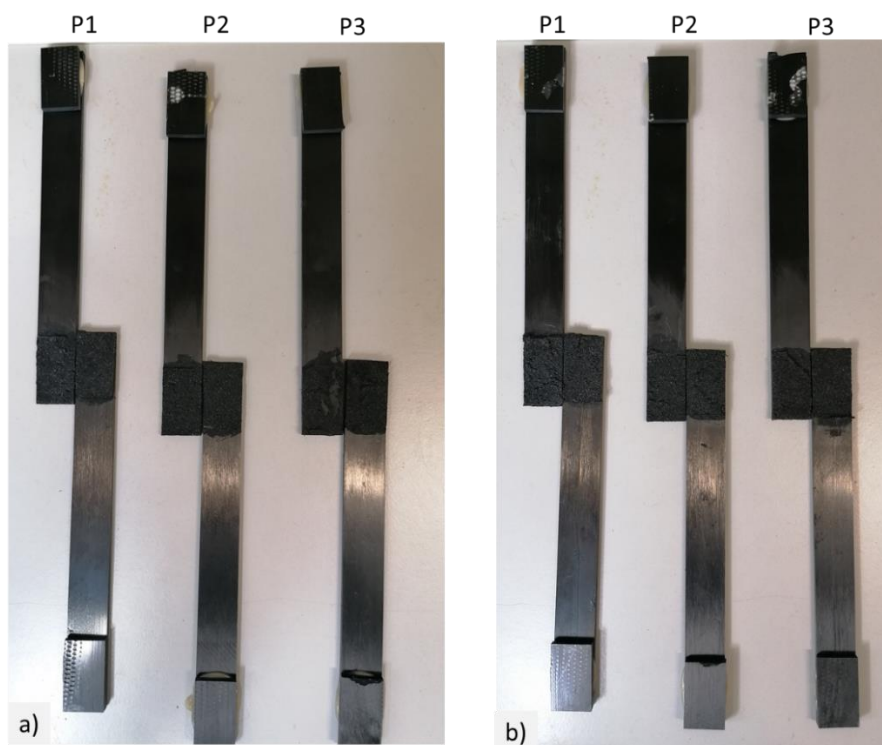


Figura 166 - Rotura dos provetes JSS: a) com 35 phr de concentração de fibras e b) com 55 phr de concentração de fibras.

3.6.3.3 Propriedades em modo misto

Após tratamento dos dados das curvas $P-\delta$, foi possível tabular as propriedades mecânicas em modo misto mais relevantes para caracterizar as quatro concentrações de fibras de vidro no adesivo, cujos resultados estão descritos da Tabela 47 à Tabela 50. Os ensaios considerados inválidos são indicados como “-”.

Tabela 47 - Propriedades mecânicas obtidas em modo misto para os provetes JSS com 0 phr concentração fibras.

	Força máxima [N]	Deslocamento carga máxima [mm]	Deslocamento máximo [mm]	Tensão máxima [MPa]	Modo de rotura
1	5566,84	3,04	3,49	12,95	Coesiva
2	-	-	-	-	Mista
3	4082,92	2,00	2,65	8,63	Mista
Média	4824,88	2,52	3,07	10,79	-
Desvio Padrão	1049,29	0,73	0,59	3,05	-
C_oV	21,75	29,13	19,20	28,28	

Tabela 48 - Propriedades mecânicas obtidas em modo misto para os provetes JSS com 15 phr concentração fibras.

	Força máxima [N]	Deslocamento carga máxima [mm]	Deslocamento máximo [mm]	Tensão máxima [MPa]	Modo de rotura
1	4265,04	1,25	1,46	9,85	Coesiva
2	4588,62	1,82	1,99	10,40	Mista
3	5075,22	1,33	1,39	12,35	Coesiva
Média	4642,96	1,46	1,61	10,87	-
Desvio Padrão	407,81	0,31	0,33	1,32	-
C_oV	8,78	21,21	20,26	12,13	

Tabela 49 - Propriedades mecânicas obtidas em modo misto para os provetes JSS com 35 phr concentração fibras.

	Força máxima [N]	Deslocamento carga máxima [mm]	Deslocamento máximo [mm]	Tensão máxima [MPa]	Modo de rotura
1	3781,11	3,45	3,74	9,13	Coesiva
2	3270,29	1,79	2,00	8,18	Coesiva
3	-	-	-	-	Mista
Média	3525,70	2,62	2,87	8,65	-
Desvio Padrão	361,20	1,17	1,23	0,67	-
C_oV	10,24	44,82	42,96	7,76	

Tabela 50 - Propriedades mecânicas obtidas em modo misto para os provetes JSS com 55 phr concentração fibras.

	Força máxima [N]	Deslocamento carga máxima [mm]	Deslocamento máximo [mm]	Tensão máxima [MPa]	Modo de rotura
1	2399,29	1,85	2,48	5,86	Coesiva
2	2395,22	1,62	2,00	6,11	Coesiva
3	2564,81	1,85	2,24	6,35	Coesiva
Média	2453,11	1,77	2,24	6,11	-
Desvio Padrão	96,76	0,13	0,24	0,24	-
C_oV	3,94	7,46	10,65	3,97	

De referir que o provete 2 com 0 phr de concentração de fibras e o provete 3 com 35 phr de concentração não foram considerados válidos, pois os valores de força máxima eram muito inferiores aos restantes provetes, o que indica que poderiam conter algum defeito interno. Desta forma, estes provetes não foram considerados para o cálculo da média e desvio padrão das propriedades.

Verifica-se que, com o aumento da concentração de fibras, a rotura tende a ser maioritariamente coesiva, o que também se verificou nos restantes ensaios. Da Figura 167 à Figura 170 está representada a evolução das propriedades em modo misto, de acordo com a concentração de fibras de vidro, para o ensaio JSS.

No capítulo 3.7.5 será feita uma análise mais profunda dos resultados obtidos.

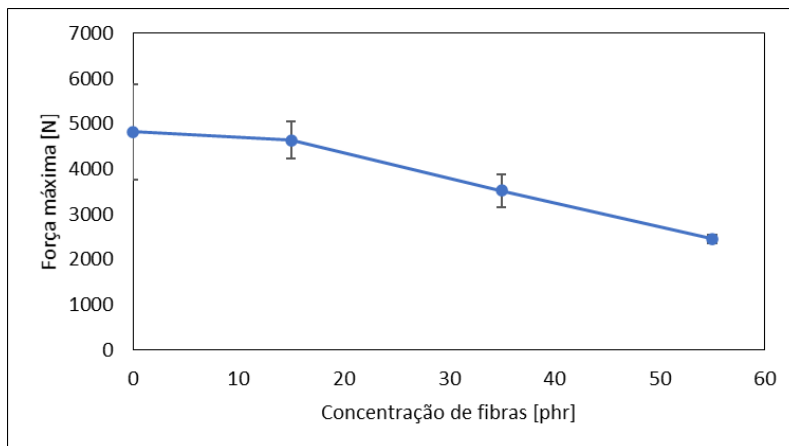


Figura 167 - Evolução da força máxima de acordo com a concentração de fibras no ensaio JSS.

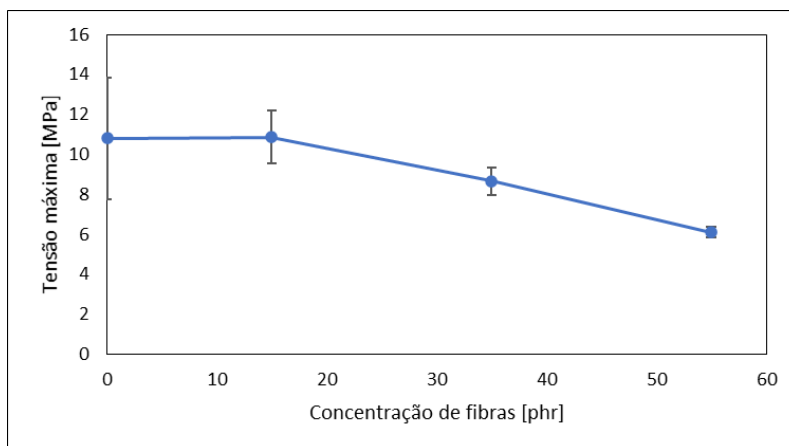


Figura 168 - Evolução da tensão máxima de acordo com a concentração de fibras no ensaio JSS.

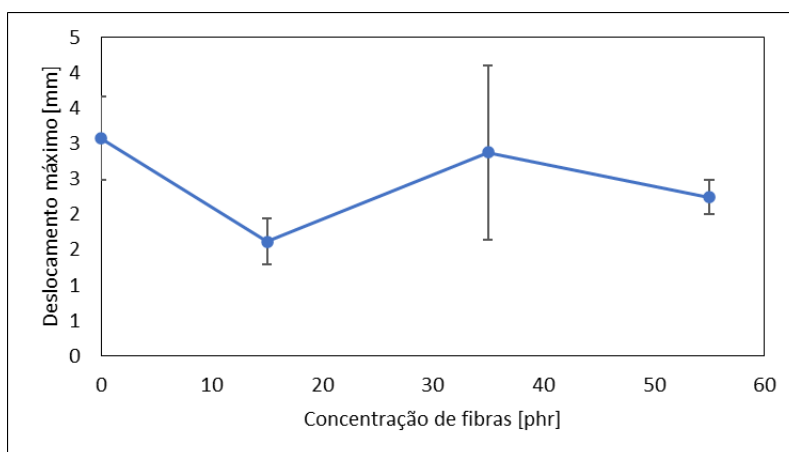


Figura 169 - Evolução do deslocamento máximo de acordo com a concentração de fibras no ensaio JSS.

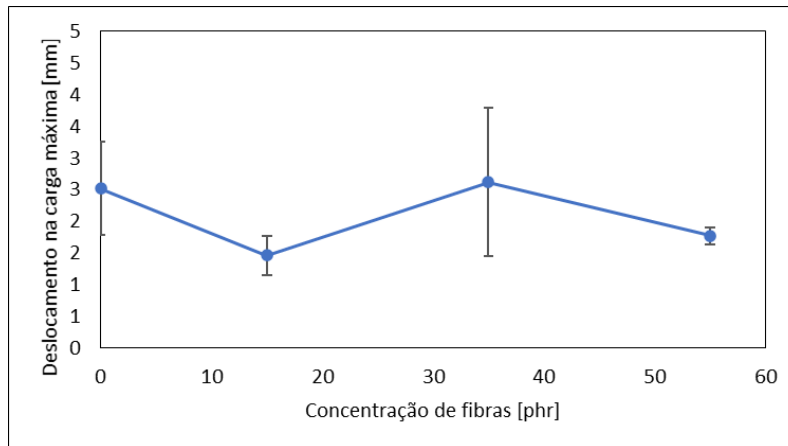


Figura 170 - Evolução do deslocamento na carga máxima de acordo com a concentração de fibras no ensaio JSS.

3.7 Discussão dos resultados obtidos

Neste capítulo serão abordados os resultados obtidos nos ensaios realizados, efetuando uma análise crítica e aprofundada dos mesmos e das diferentes propriedades. Serão realizadas comparações com os dados fornecidos pelo fabricante sempre que o mesmo for possível. Sendo o adesivo ainda recente no mercado, ainda não há dados disponíveis relativamente às suas propriedades, pelo que se fará apenas comparação com os dados disponibilizados na ficha técnica do fabricante. Os parâmetros a serem comparados são a σ_r , τ e E .

Serão também comparadas as propriedades obtidas para as quatro concentrações de fibras de vidro utilizadas, de forma a perceber o efeito do seu aumento nas respetivas propriedades.

3.7.1 Ensaio à tração

Realizados os ensaios, é possível realizar uma comparação das propriedades obtidas nas diferentes concentrações de fibras de vidro utilizadas, e a comparação do E do fabricante com o calculado.

Foi calculado um E para o adesivo com uma concentração de fibras de 0 phr de 227,14 MPa, e um coeficiente de variação de 3,87%. O valor do módulo retirado da ficha técnica do fabricante é de 350 MPa, verificando-se então que o E calculado está aproximadamente 35% abaixo do valor do fabricante. Esta diferença pode ser resultado de não ter sido possível reproduzir as condições ideais nomeadamente devido a alguns poros existentes no interior dos provetes, resultando numa curva $P-\delta$ com um declive inferior no regime elástico.

A σ_r dos provetes com 0 phr de concentração de fibras de vidro é de 10,52 MPa, também inferior ao valor referido pelo fabricante que se situa na ordem dos 15 MPa. O coeficiente de variação também não é elevado (10,88%), o que demonstra uma

elevada repetibilidade dos ensaios com provetes de adesivo maciço. A diferença de 30 % poderá estar também relacionada com os defeitos geométricos e concentração de tensões que refletem numa rotura prematura.

Analisando a evolução das propriedades mecânicas à tração de acordo com a concentração de fibras, verifica-se que a σ_r obtida para os ensaios apresenta uma pequena subida dos 0 phr para os 15 phr, mas desce logo de seguida para as concentrações de 35 phr e 55 phr (Figura 86). Esta variação indica que o aumento da concentração de fibras no adesivo não melhora a tensão máxima quando o adesivo em bruto é sujeito a esforços de tração. Contudo, no caso do E verifica-se que o mesmo cresce linearmente com o aumento da concentração das fibras de vidro, podendo até aproximar a sua evolução a uma reta, como apresentado na Figura 87. Pode-se então afirmar que o aumento da concentração de fibras de vidro no adesivo melhora o regime elástico, contudo diminui a carga máxima suportada e, por consequência, a tensão máxima.

Determinou-se a zona de transição elasto-plástica, através das propriedades mecânicas designada por σ_y , verifica-se que a mesma apresenta um grande aumento dos 0 phr para os 15 phr, mas de seguida estabiliza, o que indica que, relativamente à σ_y , o adesivo ficou saturado de fibras de vidro a partir dos 15 phr (Figura 90).

Para a evolução do alongamento máximo verifica-se que este tende a descer até à concentração de 35 phr, apresentado depois uma ligeira subida para os 55 phr de concentrações de fibras de vidro (Figura 89). Verifica-se que o provete 1 com 55 phr de concentração de fibras de vidro apresenta um alongamento bastante superior aos restantes, provocando uma grande subida do alongamento de 35 phr para 55 phr. Removendo o alongamento deste provete verifica-se que, para a concentração de 55 phr, o alongamento baixa para uma média de 16,44%, podendo dizer-se que após os 35 phr o alongamento tende a ser aproximadamente constante.

3.7.2 Ensaios ao corte

Finalizados os ensaios ao corte do adesivo através dos provetes BS, foi possível analisar as respetivas propriedades com a variação da concentração de fibras de vidro.

O valor obtido para a tensão de rotura ao corte para o adesivo com 0 phr de concentração de fibras foi de 12,25 MPa com um coeficiente de variação de 17,41%. O valor do fabricante é de 15 MPa, estando ligeiramente acima do valor calculado.

Verificou-se que, com o aumento da concentração de fibras de vidro, a τ_{max} apresenta dois patamares, um patamar para a concentração de 0 phr e 15 phr, que ronda os 12 MPa e outro patamar para os 35 phr e 55 phr, que ronda os 9 MPa. Verifica-se então que a τ_{max} tende a descer (Figura 114) com o aumento da percentagem de fibras, o que

também se aplica à força máxima (Figura 113), uma vez que estas duas variáveis se encontram diretamente relacionadas.

A γ_{max} tende também a descer linearmente com o aumento da concentração de fibras de vidro, como representado na Figura 115.

O G apresenta um valor de 7,38 MPa para uma concentração de fibras de 0 phr. Verifica-se que o módulo de corte calculado através do ensaio BS é bastante baixo quando relacionado com o valor do E .

Sabe-se que E e G para materiais isotrópicos se relacionam através da equação (38), sendo ν o coeficiente de Poisson,

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}. \quad (38)$$

O ν de grande parte dos adesivos encontra-se entre os 0,3 e os 0,5. Considerando os valores do coeficiente de Poisson referidos e o E calculado anteriormente de 227,14 MPa, o valor de G devia estar compreendido entre os 75,71 MPa e os 87,36 MPa, o que não se verifica. A elevada diferença no valor do G pode ser resultado do ensaio realizado (BS) não ser o mais adequado para definição do G do adesivo. A ferramenta utilizada não garante o correto alinhamento dos provetes, podendo originar grandes erros no cálculo do módulo de corte, o que se verificou.

Relativamente à zona de transição elasto-plástica ao corte, obteve-se o valor de 8,94 MPa para os provetes com uma concentração de fibras a 0 phr. Verifica-se que a tensão de cedência (τ_e) tende a descer até aos 35 phr de concentração de fibras, tornando-se até aos 55 phr aproximadamente constante (Figura 117). Como já verificado, o G está bastante abaixo do que seria esperado, pelo que se pode afirmar que a tensão de cedência está também inferior ao valor real esperado.

Analisando as roturas verificou-se que, com o aumento da concentração de fibras, a adesão ao corte melhorou, pois a rotura nos provetes com maior concentração de fibras (35 phr e 55 phr) passa a ser coesiva em quase todos os provetes testados.

3.7.3 Ensaio DCB

De uma forma geral verifica-se que as curvas $P-\delta$ apresentam o mesmo comportamento, confirmando uma elevada repetibilidade dos ensaios DCB. Apenas o provete 2, com 15 phr de concentração de fibras, não foi considerado para a análise, pois não atingiu o mesmo patamar de G_{Ic} comparando com os restantes provetes com a mesma percentagem de fibras. O baixo valor de G_{Ic} poderá ter sido causado por uma preparação não adequada da superfície do provete, o que resultou numa rotura adesiva. As curvas $P-\delta$ apresentam três fases distintas. Numa primeira fase verifica-se

que a relação força/deslocamento é linear, pertencendo ao domínio elástico, onde as deformações ainda não são permanentes. Numa segunda fase verifica-se uma redução da linearidade um pouco antes da força máxima, iniciando a formação da FPZ. Nesta fase já não é possível o adesivo recuperar a sua forma e propriedades iniciais. A terceira fase corresponde ao início de propagação da fenda. A partir deste momento verifica-se uma diminuição da carga com o aumento do deslocamento até a quebra abrupta de P , representativa da rotura do provete.

Pela análise das curvas R dos diferentes provetes, representadas da Figura 133 à Figura 136, constata-se que não houve grandes discrepâncias dos diferentes métodos de determinação de G_{Ic} . Era de esperar um aumento abrupto de G_{Ic} na fase inicial pelos métodos CCM e CBT, antes do método CBBM, o que se verificou em todos os provetes. A partir dos valores de G_{Ic} obtidos para as diferentes concentrações de fibras de vidro foi traçado o gráfico representado na Figura 141 de forma a auxiliar na análise da variação dos resultados de acordo com percentagem de fibras utilizadas. Analisando a Tabela 31 verifica-se uma tendência e uma estabilidade dos dados obtidos, refletida num coeficiente de variação abaixo dos 15%.

Verifica-se que os três métodos apresentam um valor de G_{Ic} muito semelhante entre eles, sendo o CBBM aquele que regista o valor mais elevado. Este é o método mais expedito e que induz menos erros na determinação de G_{Ic} , uma vez que contabiliza a FPZ e não é afetado por eventuais erros na medição de a . Tanto o método CCM como o CBT são resultado da medição do comprimento da fenda, o que torna a análise menos expedita. Esta análise pode ainda induzir mais erros no método CCM, visto serem utilizados polinómios cúbicos, utilizando uma regressão linear como ajuste das curvas da flexibilidade $C=f(a)$ [43]. Contudo, estando os valores médios de G_{Ic} obtidos pelos métodos CCM, CBT e CBBM muito idênticos, considera-se que foi possível garantir o correto ajuste dos polinómios.

O gráfico da Figura 141 demonstra também um aumento do G_{Ic} até aos 35 phr de concentração de fibras de vidro, baixando depois dos 35 phr para os 55 phr. Esta variação após os 35 phr indica que o adesivo ficou saturado de fibras de vidro nos 35 phr.

Verifica-se também que com 35 phr e 55 phr de concentração de fibras de vidro a adesão do adesivo melhorou, havendo apenas nestas concentrações roturas coesivas.

3.7.4 Ensaio ENF

Relativamente aos ensaios ENF, à exceção do provete 3 com 0 phr de concentração de fibra, verifica-se que as curvas $P-\delta$ apresentadas da Figura 147 à Figura 150 apresentam um comportamento muito semelhante, o que mostra a elevada repetibilidade do ensaio ENF. Na sua grande maioria os provetes, para cada concentração de fibras, atingem forças máximas bastante próximas, assim como

deslocamento máximo do cilindro de carregamento muito próximos, no instante em que o ensaio é finalizado. Como já referido no capítulo 3.7.3 as curvas P - δ apresentam três fases distintas.

Pela análise das curvas R dos diferentes provetes, representadas da Figura 151 à Figura 154, verifica-se que não existe um patamar perfeitamente definido para nenhum dos métodos, o que se considera estar relacionado com a existência de uma zona plástica de dimensões consideráveis.

Como realizado para os dados dos ensaios DCB, também os valores de G_{IIC} calculados para as diferentes concentrações de fibras de vidro foram resumidos num gráfico, representado na Figura 157, de forma a auxiliar na análise da variação dos resultados de acordo com percentagem de fibras utilizadas. Analisando a Tabela 42 verifica-se uma tendência do valor de G_{IIC} e uma estabilidade dos dados obtidos, refletido num coeficiente de variação baixo, estando sempre abaixo dos 15%.

Verifica-se que os métodos CCM, DBT e CBBM apresentam valores de G_{IIC} muito semelhantes entre eles. Como referido no capítulo 3.7.3, o método CBBM é o mais expedito por não requerer a medição de a , e incluir o efeito da FPZ nos resultados obtidos. Os métodos CCM, DBT e CBT são resultado da medição do a , o que torna a análise menos expedita. Esta análise pode ainda induzir erros no método CCM derivado serem utilizados polinómios cúbicos para aproximar a variação de C com a ($C=f(a)$).

Analisando o gráfico da Figura 157 verifica-se uma elevada coerência entre os valores obtidos pelos métodos DBT e CBBM. Os dados obtidos pelo método CCM, apesar de estarem próximos DBT e CBBM, não apresentam uma tendência tão acentuada como os outros dois métodos. O G_{IIC} calculado através do método CBT está sempre abaixo dos restantes, resultado da energia dissipada na FPZ que não é considerada na Teorias das Vigas. A melhor aproximação do método DBT, que também é baseada na Teoria das Vigas, é justificada pela inclusão de P e δ na respetiva expressão de cálculo, ao contrário do observado para o CBT, que só inclui o valor de P [81]. Verifica-se que o valor de G_{IIC} tende a aumentar com o aumento da percentagem de fibras de vidro, e começa a criar um patamar de saturação nos 35 phr, o que indica que o adesivo saturou de fibras aos 35 phr, não melhorando o valor de G_{IIC} para os 55 phr de fibras de vidro.

Apesar de, na grande maioria dos provetes, não ocorrer rotura total dos provetes verificou-se que na sua grande maioria a rotura foi coesiva no adesivo.

3.7.5 Ensaio em modo misto

Realizados os ensaios em modo misto é possível realizar uma comparação das propriedades obtidas nas diferentes concentrações de fibras de vidro utilizadas.

Analisando a evolução das propriedades em modo misto de acordo com a concentração e fibras verifica-se que a tensão média de corte na carga máxima (τ_{med}) obtida para os ensaios se mantém praticamente constante nos 0 phr e 15 phr de concentração de fibras de vidro e depois diminui até aos 55 phr de concentração de fibras (Figura 168).

Relativamente ao deslocamento máximo (δ_{max}) ou ao deslocamento na carga máxima (δ_{Pmax}) verifica-se um comportamento bastante irregular (Figura 169 e Figura 170). Apesar de haver grandes desvios padrão em algumas concentrações (0 phr e 35 phr) verifica-se que, para os resultados de δ_{max} e o δ_{Pmax} , não é possível detetar uma tendência em função da concentração de microfibras de vidro.

Estes resultados indicam que com a adição de fibras de vidro no adesivo as propriedades em modo misto não melhoram. Verificou-se apenas que com o aumento da percentagem de fibras as roturas dos provetes tendem a ser coesivas.

3.8 Comparação com dados da literatura

Neste capítulo será feita uma comparação dos dados obtidos durante o trabalho com os dados retirados de trabalhos semelhantes já realizados e que foram apresentados no capítulo 2.4.

No trabalho realizado por Nam et al. [67] verificou-se um aumento da tenacidade à fratura em modo I em condições criogénicas de -150° C, com o aumento da concentração de fibras de vidro. Neste trabalho também foi possível verificar um aumento da tenacidade à fratura em modo I com o aumento das fibras de vidro, apresentado o maior valor para uma concentração de 35 phr, de 1,4 vezes em relação ao adesivo puro. Comparando com o trabalho de Nam et al. [67] que apresentava um aumento superior (7,2 vezes), o que pode resultar do facto de se estar a estudar um adesivo de uma família diferente e em condições diferentes.

No trabalho realizado por Alomayri [68] verificou-se um aumento da adesão do adesivo com o aumento da concentração de microfibras de vidro. Este efeito foi resultado do preenchimento dos vazios existentes na matriz. Neste trabalho também se verificou uma melhoria substancial da adesão do adesivo com o aumento da concentração de microfibras. Verificou-se que com uma concentração de 0 phr a maioria das roturas eram adesivas ou mistas, enquanto com a adição das microfibras as roturas passam a ser coesivas. Alomayri [68] apurou também que, com o aumento das microfibras de vidro, a tenacidade à fratura, através do ensaio DCB e E melhoravam. Como já referido, neste trabalho os resultados obtidos também demonstram uma melhoria de tenacidade à fratura de 40% (apresentado o seu maior valor com uma concentração de 35 phr), e uma melhoria do E de 450% (tendo um aumento linear, apresentando o seu maior valor com uma concentração de 55 phr).

Comparando os dados obtidos com os investigados por Alomayri [68], Nam et al. [67] e He e Evans [69], verifica-se que em todos os trabalhos existe um aumento da tenacidade à fratura com o aumento da concentração das fibras de vidro, podendo existir uma saturação da quantidade de fibras a usar. Não é possível realizar uma comparação direta das percentagens de aumento devido aos adesivos estudados pertencerem a famílias distintas, ou os trabalhos serem realizados em ambientes diferentes. Contudo pode afirmar-se que as fibras de vidro permitem uma melhoria da tenacidade à fratura em modo I.

Não foi possível fazer a comparação dos dados obtidos neste trabalho em modo II com dados da literatura devido à inexistência de informação disponível sobre este ensaio para adesivos reforçados com microfibras de vidro.

**CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE
TRABALHOS FUTUROS**

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve como objetivo principal caracterizar as propriedades mecânicas e de fratura de um adesivo reforçado com diferentes percentagens de fibra de vidro. O adesivo selecionado foi o SikaForce® 840 L07 reforçado com fibras de vidro LANXESS MF 7980. O adesivo selecionado é um adesivo recentemente lançado no mercado que ainda carece de caracterização, tendo sido testado com quatro concentrações de fibra de vidro (0 phr, 15 phr, 35 phr e 55 phr). Foram fabricados provetes de adesivo maciço e em junta, sendo posteriormente realizados ensaios de forma a analisar o efeito da adição de fibras. Os ensaios foram realizados numa máquina de ensaios universal, com provetes de adesivo maciço para determinar as propriedades mecânicas à tração, provetes BS para determinar as propriedades mecânicas ao corte, provetes DCB para determinar as propriedades de fratura à tração, provetes ENF para determinar as propriedades de fratura ao corte, e provetes JSS para determinar as propriedades em modo misto.

Através do ensaio à tração dos provetes de adesivo maciço determinou-se o E , a σ_y , a σ_r , e δ_{max} . Os valores obtidos para estas propriedades à tração com uma concentração de fibras de 0 phr foi, respetivamente, 227,14±8,80 MPa; 2,08±0,5 MPa; 10,52±1,14MPa; 34,18±8,30 mm; e 52,05±12,06%. Os parâmetros possíveis de comparar com a ficha do fabricante são o E (350 MPa), e a σ_r (15 MPa). Verifica-se uma diferença aproximada de 30 % para as duas propriedades, que poderá estar também relacionada com os defeitos geométricos e concentração de tensões que refletem numa rotura prematura. Para as referidas propriedades obteve-se um coeficiente de variação de 3,87% e 10,88%, respetivamente. Com a adição de microfibras de vidro verifica-se que a σ_r e o δ_{max} , tendem a diminuir, o E aumenta linearmente com o aumento da concentração de microfibras (aumento de 4,5 vezes de 0 phr para 55 phr), e σ_y ficou saturada com uma concentração de 15 phr.

Com o ensaio ao corte dos provetes BS foi possível determinar o G , τ_y , τ_{max} e γ_{max} . Os valores obtidos para as propriedades mecânicas ao corte com uma concentração de 0 phr foram, respetivamente 7,38±1,94 MPa; 8,94±1,54 MPa; 12,25±2,13 MPa; e 302,81±16,79%. O único valor possível de comparar com a ficha do fabricante é a τ_{max} (15 MPa), verificando-se uma diferença de 20% para o valor calculado. O coeficiente de variação obtido para a τ_{max} foi de 17,41%. Com o aumento da concentração de microfibras de vidro verificou-se uma descida das propriedades estudadas, em exceção ao G que apresentou uma ligeira subida.

Recorrendo à equação (38), válida para materiais isotrópicos, foi possível correlacionar os valores obtidos de G com E de forma a determinar ν . O valor de ν para grande parte dos adesivos está compreendido entre 0,3 e 0,5. Considerando os valores de ν referidos e o E calculado anteriormente de 227,14 MPa, o valor de G devia estar compreendido entre os 75,71 MPa e os 87,36 MPa, o que não se verifica. A elevada diferença no valor do G pode ser resultado do ensaio realizado (BS) não ser o mais adequado para definição do G do adesivo. A ferramenta utilizada não garante o correto alinhamento dos provetes, podendo originar grandes erros no cálculo do módulo de corte, o que se verificou.

Para a análise de fratura à tração realizaram-se ensaios DCB de forma a determinar G_{Ic} através de métodos que requerem a medição do comprimento da fenda (CCM e CBT), e de métodos baseados no comprimento de fenda equivalente (CBBM). Os valores de G_{Ic} obtidos com uma concentração de 0 phr foram: CCM – 3,62±0,08 N/mm; CBT – 3,75±0,14 N/mm; e CBBM – 3,79±0,28 N/mm, correspondentes a um coeficiente de variação de 2,31%, 3,69% e 7,42% respetivamente. Verificou-se uma proximidade assinalável nos valores obtidos de G_{Ic} pelos diferentes métodos. Com a adição de microfibras de vidro verificou-se que existe um aumento do valor de G_{Ic} até à concentração de microfibras de 35 phr e de seguida uma redução, o que demonstra que o adesivo ficou saturado de microfibras com esta concentração.

Para a análise de fratura ao corte realizaram-se ensaios ENF de forma a determinar G_{IIc} através de métodos que requerem a medição do comprimento da fenda (CCM, CBT e DBT) e métodos baseados no comprimento de fenda equivalente (CBBM). Os valores de G_{IIc} obtidos com uma concentração de 0 phr foram: CCM – 18,23±0,088 N/mm; CBT – 9,01±1,31 N/mm; DBT – 15,23±1,90 N/mm; e CBBM – 15,25±0,96 N/mm, valores correspondentes a um coeficiente de variação de 4,80%, 14,58%, 12,48% e 6,33% respetivamente. Com a adição das microfibras de vidro verificou-se um aumento do valor de G_{IIc} até à concentração de 35 phr, começando a formar-se um patamar constante para os 55 phr, o que demonstra uma saturação de microfibras nos 35 phr.

Para análise em modo misto realizaram-se ensaios a JSS e que permitiram determinar τ_{med} , δ_{max} e δ_{Pmax} . Os valores obtidos para as propriedades em modo misto com uma concentração de 0 phr foram, respetivamente, 10,79±3,05MPa; 3,07±0,59 mm; e 2,52±0,73 mm, valores correspondentes a um coeficiente de variação de 28,28%, 19,20% e 29,13%, respetivamente. Com a adição das microfibras de vidro verificou-se que a τ_{med} diminuiu e que, relativamente aos deslocamentos (δ_{max} e δ_{Pmax}) verifica-se um comportamento bastante irregular, não sendo possível prever o efeito das microfibras no deslocamento.

De uma forma geral verifica-se que o aumento da concentração de microfibras de vidro no adesivo SikaForce® 840 L07 revelou um aumento das propriedades de fratura (à tração e ao corte), e um aumento de E e G . Nas propriedades de fratura o adesivo

fica saturado com uma concentração de 35 phr, verificando-se um aumento médio para o método CBBM (usado como exemplo por se considerar o método mais robusto) de 41% no G_{Ic} e de 42% no G_{IIc} . O E e o G sobem linearmente até aos 55 phr, verificando-se um aumento de 450% e 220%, respetivamente. Uma característica a realçar com o aumento da concentração de microfibras é a melhoria notória na adesão, do adesivo que converge para roturas coesivas das juntas ensaiadas.

Comparando os dados obtidos com os dados analisados na literatura foi possível verificar uma repetibilidade das propriedades e características alteradas. Verificou-se uma melhoria das propriedades à fratura do adesivo, um aumento da rigidez, uma redução da resistência mecânica, e uma melhoria na adesão do adesivo.

Como trabalhos futuros sugere-se:

- Estudo comparativo com outro tipo de adesivos, e com a mesma concentração de microfibras de vidro;
- Refinar o presente estudo com valores de phr em torno de 35 phr para otimizar a concentração;
- Realização de outros ensaios para determinação das mesmas propriedades, como por exemplo tração em juntas topo a topo, ensaios Arcan, TDCB e ELS;
- Estudo do adesivo à fadiga em aplicações reais;
- Realização de uma análise numérica de ensaios recorrendo ao *software* ABAQUS® para verificação da capacidade de previsão de juntas com geometrias arbitrarias.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1. Pinto, A.M.G., *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*. Dissertação de Doutoramento Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2007.
2. Zamani, P., A. Jaamialahmadi, e L.F.M. da Silva, *The influence of GNP and nano-silica additives on fatigue life and crack initiation phase of Al-GFRP bonded lap joints subjected to four-point bending*. *Composites Part B: Engineering*, 2021. **207**: p. 108589.
3. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhaes, e M.F.S. de Moura, *Juntas adesivas estruturais*. 2007: Porto, Portugal: Publindústria.
4. de Moura, M.F.d.S., A.M.B. de Moraes, e A.G. de Magalhães, *Materiais compósitos: materiais, fabrico e comportamento mecânico*. 2005: Porto, Portugal: Publindústria.
5. Paluch;, T.H.A. *Performance of Hybrid Adhesives vs. Traditional Structural Adhesives*. 2018 [2020 Acedido em: 13/12/2020]; Disponível em: <https://plasticsdecorating.com/articles/2018/performance-of-hybrid-adhesives-vs-traditional-structural-adhesives/>.
6. Rodriguez Saldaña, M.E., *Lineamientos NDT por ultrasonido aplicado a estructura tipo sándwich de una pala de rotor principal del helicóptero uh-60 para evidenciar delaminacion*. Dissertação de Doutoramento Universidade Militar Nova de Granada, Espanha, 2018.
7. Dean, G. e B. Duncan, *Preparation and testing of bulk specimens of adhesives*. 1998: Teddington; Reino Unido; National Physical Laboratory.
8. Broughton, W. e M. Gower, *Preparation and testing of adhesive joints*. 2001, Teddington; Reino Unido,: National Physical Laboratory.
9. Cognard, P., *Handbook of adhesives and sealants: basic concepts and high tech bonding*. 2005: Amesterdão; Holanda; Elsevier.
10. Dillard, D.A. e A.V. Pocius, *Adhesion Science and Engineering: The Mechanics of Adhesion*. 2002: Amesterdão; Holanda: Elsevier.
11. Da Silva, L.F., A. Öchsner, e R.D. Adams, *Handbook of adhesion technology*. 2011: Berlin; Alemanha: Springer Science & Business Media.
12. Alves, D.L., R.D.S.G. Campilho, R.D.F. Moreira, F.J.G. Silva, e L.F.M. da Silva, *Experimental and numerical analysis of hybrid adhesively-bonded scarf joints*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2018. **83**: p. 87-95.
13. Paranjpe, N., M. Alamir, A. Alonayni, E. Asmatulu, M.M. Rahman, e R. Asmatulu. *Strength and failure analysis of composite-to-composite adhesive bonds with different surface treatments*. in *Behavior and Mechanics of Multifunctional Materials and Composites XII*. 2018. Denver; EUA: International Society for Optics and Photonics.

14. Heshmati, M., R. Haghani, e M. Al-Emrani, *Environmental durability of adhesively bonded FRP/steel joints in civil engineering applications: State of the art*. Composites Part B: Engineering, 2015. **81**: p. 259-275.
15. Nazir, M.S., *The Application of Adhesive Bonding for Different Types of Material for Car Body Parts*. 2013, Dissertação de Mestrado, Universidade da Malásia, Malásia.
16. Nezhad, H. e D. Stratakis, *Performance of Aerospace Composites in the Presence of Process-Induced Defects* 2017, Tese de Mestrado, Universidade de Londres, Inglaterra.
17. Soto-Montero, J., G. Nima, C.T.S. Dias, R.B.T. Price, e M. Giannini, *Influence of beam homogenization on bond strength of adhesives to dentin*. Dental Materials, 2021. **37**: p. 47-58.
18. Da Silva, L.F., D.A. Dillard, B. Blackman, e R.D. Adams, *Testing adhesive joints: best practices*. 2012: Alemanha: Wiley VCH.
19. Cardoso, M.G., J.E.C. Pinto, R.D.S.G. Campilho, P.J.R.O. Nóvoa, F.J.G. Silva, e L.D.C. Ramalho, *A new structural two-component epoxy adhesive: Strength and fracture characterization*. Procedia Manufacturing, 2020. **51**: p. 771-778.
20. da Silva, L.F.M., R.D. Adams, e M. Gibbs, *Manufacture of adhesive joints and bulk specimens with high-temperature adhesives*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2004. **24**(1): p. 69-83.
21. Azevedo, J.C.S., R.D.S.G. Campilho, F.J.G. da Silva, T.M.S. Faneco, e R.M. Lopes, *Cohesive law estimation of adhesive joints in mode II condition*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2015. **80**: p. 143-154.
22. Shimadzu. AGX-V. 2020 [Acedido em: 10/01/2021]; Disponível em: <https://www.shimadzu.com.br/analitica/produtos/test/estaticas/servo-eletricas/agx-v.shtml>.
23. Petrie, E.M., *Handbook of adhesives and sealants*. 2007: San Diego;EUA: McGraw-Hill Education.
24. Epsilon. *Axial Extensometer – Model 3542*. 2021 [Acedido em: 10/01/2021]; Disponível em: <https://www.epsilontech.com/products/axial-extensometer-model-3542/>.
25. Epsilon. *Precision Optical Extensometers – Epsilon ONE®*. 2021 [Acedido em: 10/01/2021]; Disponível em: <https://www.epsilontech.com/products/optical-extensometer/>.
26. Dean, G., *The guide to the preparation and testing of bulk specimens*. Materials Measurement and Technology. 1999: Teddington: Reino Unido: National Physical Laboratory.
27. Saldanha, D.F.S., C. Canto, L.F.M. da Silva, R.J.C. Carbas, F.J.P. Chaves, K. Nomura, e T. Ueda, *Mechanical characterization of a high elongation and high toughness epoxy adhesive*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013. **47**: p. 91-98.
28. Da Silva, L.F., T. Rodrigues, M. Figueiredo, M. De Moura, e J. Chousal, *Effect of adhesive type and thickness on the lap shear strength*. The journal of adhesion, 2006. **82**(11): p. 1091-1115.
29. 527-2, D.E.I., *Plastics–Determination of Tensile Properties–Part 2: Test Conditions for Moulding and Extrusion Plastics (ISO 527-2: 2012)*. 2012, Beuth Berlin, Germany.

30. Soares, J.C., D.P. Dias, E.A. de Carvalho, e J.S. de Azevedo, *Determination of shear strength by losipescu (V-notch) method of metakaolin-based geopolymeric resins activated by different silicate and hydroxide combinations*. Construction and Building Materials, 2021. **275**: p. 122120.
31. Liu, G., L. Zhang, L. Guo, Q. Wang, e F. Liao, *A modified V-notched beam test method for interlaminar shear behavior of 3D woven composites*. Composite Structures, 2017. **181**: p. 46-57.
32. Gning, P.B., D. Delsart, J.M. Mortier, e D. Coutellier, *Through-thickness strength measurements using Arcan's method*. Composites Part B: Engineering, 2010. **41**(4): p. 308-316.
33. Kosmann, J., O. Klapp, D. Holzhüter, M.J. Schollerer, A. Fiedler, C. Nagel, e C. Hühne, *Measurement of epoxy film adhesive properties in torsion and tension using tubular butt joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2018. **83**: p. 50-58.
34. Barbosa, N.G.C., R.D.S.G. Campilho, F.J.G.d. Silva, e R.D.F. Moreira, *Comparison of different adhesively-bonded joint configurations for mechanical structures*. Procedia Manufacturing, 2018. **17**: p. 721-728.
35. Chaves, F.J.P., *Application of adhesive bonding in PVC windows*. Dissertação de Mestre, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2005.
36. Pinto, A.M.G., R.D.S.G. Campilho, I.R. Mendes, S.M. Aires, e A.P.M. Baptista, *Effect of hole drilling at the overlap on the strength of single-lap joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011. **31**(5): p. 380-387.
37. Campilho, R.D.S.G., *Repair of composite and wood structures*. Dissertação de Doutorado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2009.
38. Machado, J.J.M., A. Hayashi, Y. Sekigushi, R.D.S.G. Campilho, E.A.S. Marques, C. Sato, e L.F.M. da Silva, *Dynamic behaviour in mode I fracture toughness of CFRP as a function of temperature*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2019. **103**: p. 102257.
39. Teixeira, J.M.D., R.D.S.G. Campilho, F.J.G. Silva, F.J.P. Moreira, e D.F.O. Silva, *Comparative evaluation of different fracture tests for the tensile fracture toughness of a ductile adhesive*. Procedia Manufacturing, 2019. **38**: p. 1268-1275.
40. Lopes, R.M., R.D.S.G. Campilho, F.J.G. da Silva, e T.M.S. Faneco, *Comparative evaluation of the Double-Cantilever Beam and Tapered Double-Cantilever Beam tests for estimation of the tensile fracture toughness of adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2016. **67**: p. 103-111.
41. Standard, A., *D3433-99: Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints*, ASTM International, West Conshohocken, PA. 2012.
42. Kanninen, M., *An augmented double cantilever beam model for studying crack propagation and arrest*. International Journal of fracture, 1973. **9**(1): p. 83-92.
43. de Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, e J.P.M. Gonçalves, *Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading*. Composites Science and Technology, 2008. **68**(10): p. 2224-2230.

44. Leal, A.J.S. e R.D.S.G. Campilho, *Numerical evaluation of the ENF and 4ENF tests for the shear toughness estimation of adhesive joints*. Composite Structures, 2018. **202**: p. 333-343.
45. May, M., H. Channammagari, e P. Hahn, *High-rate mode II fracture toughness testing of polymer matrix composites – A review*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2020. **137**: p. 106019.
46. Leal, A.J.S., R.D.S.G. Campilho, F.J.G. Silva, D.F.O. Silva, e F.J.P. Moreira, *Comparison of different test configurations for the shear fracture toughness evaluation of a ductile adhesive*. Procedia Manufacturing, 2019. **38**: p. 940-947.
47. Blackman, B.R.K., A.J. Brunner, e J.G. Williams, *Mode II fracture testing of composites: a new look at an old problem*. Engineering Fracture Mechanics, 2006. **73**(16): p. 2443-2455.
48. Carlsson, L., J. Gillespie Jr, e R. Pipes, *On the analysis and design of the end notched flexure (ENF) specimen for mode II testing*. Journal of composite materials, 1986. **20**(6): p. 594-604.
49. Wang, Y. e J.G. Williams, *Corrections for mode II fracture toughness specimens of composites materials*. Composites Science and Technology, 1992. **43**(3): p. 251-256.
50. Bennati, S., M. Colleluori, D. Corigliano, e P.S. Valvo, *An enhanced beam-theory model of the asymmetric double cantilever beam (ADCDB) test for composite laminates*. Composites Science and Technology, 2009. **69**(11): p. 1735-1745.
51. Loureiro, F.J.C.F.B., R.D.S.G. Campilho, e R.J.B. Rocha, *Mixed-mode fracture toughness of a structural adhesive by the single-leg bending test*. Procedia Structural Integrity, 2020. **25**: p. 63-70.
52. Ribeiro, J.P.S.M.B., R.D.S.G. Campilho, e R.J.B. Rocha, *Mixed-mode evaluation of ductile adhesive joints by the single-leg bending test*. Procedia Structural Integrity, 2020. **28**: p. 1106-1115.
53. Nunes, F.A.A. e R.D.S.G. Campilho, *Mixed-mode fracture analysis of adhesively-bonded joints using the ATDCB test specimen*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2018. **85**: p. 58-68.
54. Oliveira, J.M.Q., M.F.S.F. de Moura, M.A.L. Silva, e J.J.L. Morais, *Numerical analysis of the MMB test for mixed-mode I/II wood fracture*. Composites Science and Technology, 2007. **67**(9): p. 1764-1771.
55. Petrie, E.M., *Handbook of adhesives and sealants*. 2000, San Diego; EUA: McGraw-Hill.
56. Nemati Giv, A., M.R. Ayatollahi, S.H. Ghaffari, e L.F. da Silva, *Effect of reinforcements at different scales on mechanical properties of epoxy adhesives and adhesive joints: a review*. The Journal of Adhesion, 2018. **94**(13): p. 1082-1121.
57. Bhagavathi, L.R., A.P. Deshpande, G.D. Janaki Ram, e S.K. Panigrahi, *Hygrothermal aging, fatigue and dynamic mechanical behavior of cellulosic particles reinforced one-component moisture curable polyurethane adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2021. **105**: p. 102771.
58. Silva, L.F.d., *Materials Design and Applications*. Advanced Structured Materials. 2017: Porto; Portugal; Springer, Cham.
59. Joannès, S., *A micromechanical damage characterization and the modeling of a mineral filled epoxy adhesive*. Mechanics of Materials, 2014. **75**: p. 111-124.

60. Baur, E., T.A. Osswald, e N. Rudolph, *Additives, Fillers, and Fibers*, in *Plastics Handbook*, E. Baur, T.A. Osswald, e N. Rudolph, Editors. 2019, EUA: HANSER Publications. p. 579-624.
61. La Mantia, F. e M. Morreale, *Green composites: A brief review*. *Composites Part A: Applied Science Manufacturing*, 2011. **42**(6): p. 579-588.
62. Ebewele, R.O., B.H. River, e J.A. Koutsky, *Relationship between phenolic adhesive chemistry and adhesive joint performance: Effect of filler type on fraction energy*. *Journal of applied polymer science*, 1986. **31**(7): p. 2275-2302.
63. Mahmood, H., M. Tripathi, N. Pugno, e A. Pegoretti, *Enhancement of interfacial adhesion in glass fiber/epoxy composites by electrophoretic deposition of graphene oxide on glass fibers*. *Composites Science Technology*, 2016. **126**: p. 149-157.
64. Ghalia, M.A. e A. Abdelrasoul, *7 - Compressive and fracture toughness of natural and synthetic fiber-reinforced polymer*, in *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, M. Jawaid, M. Thariq, e N. Saba, Editors. 2019, United Kingdom: Woodhead Publishing. p. 123-140.
65. Prashanth, S., K. Subbaya, K. Nithin, e Sachhidananda, *Fiber reinforced composites-a review*. *Journal of Material Sciences & Engineering*, 2017. **6**(03): p. 2-6.
66. Khoramishad, H. e S.M.J. Razavi, *Metallic fiber-reinforced adhesively bonded joints*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2014. **55**: p. 114-122.
67. Nam, S., Y.H. Yu, I. Choi, C.S. Bang, e D.G. Lee, *Fracture toughness improvement of polyurethane adhesive joints with chopped glass fibers at cryogenic temperatures*. *Composite Structures*, 2014. **107**: p. 522-527.
68. Alomayri, T., *The microstructural and mechanical properties of geopolymer composites containing glass microfibres*. *Ceramics International*, 2017. **43**(5): p. 4576-4582.
69. He, W. e P.D. Evans, *Adhesive Through-Reinforcement Improves the Fracture Toughness of a Laminated Birch Wood Composite*. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017. **2017**: p. 5637248.
70. Silva, S., M. Sabino, E. Fernandes, V. Correlo, L. Boesel, e R. Reis, *Cork: properties, capabilities and applications*. *International Materials Reviews*, 2005. **50**(6): p. 345-365.
71. Barbosa, A.Q., L.F.M. da Silva, J. Abenojar, M. Figueiredo, e A. Öchsner, *Toughness of a brittle epoxy resin reinforced with micro cork particles: Effect of size, amount and surface treatment*. *Composites Part B: Engineering*, 2017. **114**: p. 299-310.
72. Barbosa, A.Q., L.F.M. da Silva, J. Abenojar, J.C. del Real, R.M.M. Paiva, e A. Öchsner, *Kinetic analysis and characterization of an epoxy/cork adhesive*. *Thermochimica Acta*, 2015. **604**: p. 52-60.
73. Endo, M., T. Hayashi, Y. Ahm Kim, M. Terrones, e M.S. Dresselhaus, *Applications of carbon nanotubes in the twenty-first century*. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical Engineering Sciences*, 2004. **362**(1823): p. 2223-2238.
74. Moniruzzaman, M. e K.I. Winey, *Polymer nanocomposites containing carbon nanotubes*. *Macromolecules*, 2006. **39**(16): p. 5194-5205.

75. Wernik, J.M. e S.A. Meguid, *On the mechanical characterization of carbon nanotube reinforced epoxy adhesives*. *Materials & Design*, 2014. **59**: p. 19-32.
76. Khoramishad, H. e M. Khakzad, *Toughening epoxy adhesives with multi-walled carbon nanotubes*. *The Journal of Adhesion*, 2018. **94**(1): p. 15-29.
77. Campilho, R.D.S.G., 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*, 2005. **65**(13): p. 1948-1958.
78. Sika, *Ficha técnica do adesivo SikaForce 840 L07*. 2020, Sika: Zurique, Suíça.
79. LANXESS, *Ficha técnica fibras de vidro LANXESS MF 7980*. 2020, LANXESS: Colónia, Alemanha.
80. Loctite, *Ficha técnica do desmoldante Loctite Frekote® 770-NC*. 2014, Loctite: Connecticut, EUA.
81. de Moura, M.F.S.F., *Numerical simulation of the ENF test for the mode-II fracture characterization of bonded joints*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2006. **20**(1): p. 37-52.