



## Caracterização de um adesivo estrutural reforçado com microfibras de vidro

GUILHERME SÁ MOREIRA TAVARES

dezembro de 2021

# CARACTERIZAÇÃO DE UM ADESIVO ESTRUTURAL REFORÇADO COM MICROFIBRAS DE VIDRO

Guilherme Sá Moreira Tavares

1151258

**2021**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica





# CARACTERIZAÇÃO DE UM ADESIVO ESTRUTURAL REFORÇADO COM MICROFIBRAS DE VIDRO

Guilherme Sá Moreira Tavares

1151258

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 Professor Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho.

**2021**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de 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

Professor Adjunto, ISEP

Doutor Isidro de Jesus Sánchez-Arce

Investigador, INEGI

## **Arguente**

Doutor Filipe Gonçalo Andrade da Silva

Investigador, INEGI



## AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar o meu agradecimento ao Professor Raúl Campilho por todo o apoio e paciência demonstrada durante a realização desta dissertação. Ao Professor Paulo Nóvoa pela ajuda em toda a parte experimental e teórica. Ao Professor Isidro Sánchez-Arce por toda a ajuda prestada. Queria deixar o meu agradecimento ao Eng. Paulo Silva da empresa Sika® Portugal pela oferta da amostra do adesivo estudado. Aos meus colegas João e Miguel.

E um agradecimento aos meus pais por me terem proporcionado a conclusão desta etapa, com todas as dificuldades que ela trouxe.

E o maior agradecimento à Bárbara por todo o apoio, paciência e incentivo durante este percurso.



---

## RESUMO

A tecnologia de adesivos estruturais para ligações tem sido amplamente usada nas últimas décadas como alternativa às ligações mecânicas tradicionais como rebiteagem, soldadura ou ligações aparafusadas. Com a evolução nas mais diversas indústrias tais como indústria aeronáutica, naval, automóvel, entre outras, foi possível um maior conhecimento e crescente uso de materiais compósitos. Este tipo de materiais tem como forma de ligação indicada as ligações adesivas, onde se enaltece a elevada resistência à fadiga e a ausência de dano nos materiais a ligar. Existem diversos fatores que tornam as ligações adesivas alternativas viáveis às ligações tradicionais como o menor custo de fabrico, menor peso estrutural ou uma capacidade de união de uma ampla gama de diferentes materiais.

Existindo no mercado uma enorme quantidade de adesivos estruturais devidamente documentados, os fabricantes começaram a procurar alternativas para continuarem com uma evolução contínua e melhoria das propriedades das ligações. Por este motivo surgiu a utilização de aditivos nos adesivos, de modo a melhorar as propriedades das ligações. Entre eles podem ser destacadas as fibras de vidro, cortiça, zinco, mica, entre outras.

Este trabalho pretende estudar as propriedades mecânicas e de fratura de um adesivo estrutural após adição de microfibras de vidro, num contexto gradual de percentagem de aditivo. Para isso foram realizados 5 ensaios com diferentes concentrações de microfibras de vidro no adesivo. Estes ensaios são: ensaios de tração de provetes maciços, ensaios de corte *Block Shear*, ensaios *Double-Cantilever Beam* (DCB), ensaios *End-Notched Flexure* (ENF) e ensaios de junta de sobreposição simples. Com os dados obtidos destes ensaios, serão determinadas as propriedades mecânicas e à fratura do adesivo sem aditivação e, posteriormente, com diferentes graus de aditivação de microfibras, de modo a estudar a sua influência no adesivo em causa e posteriormente na ligação adesiva.

Os resultados obtidos foram coerentes com o previsto, tendo sido possível determinar que a aditivação é positiva no adesivo em causa, quando a aplicação assim o requerer.

**PALAVRAS-CHAVE**

Adesivo estrutural, Microfibras de vidro, Ensaio de adesivo maciço, Ensaio de *block-shear*, Ensaio *Double-Cantilever Beam*, Ensaio *End-Notched Flexure*, Junta de sobreposição simples.

---

## ABSTRACT

Structural bonding adhesive technology has been widely used in recent decades as an alternative to traditional mechanical bonding such as riveting, welding or bolting. With the evolution in the most diverse industries such as aeronautics, naval, automobile, among others, it was possible a greater knowledge and growing use of composite materials. This type of materials has adhesive connections as the indicated form of bonding, which emphasizes the high resistance to fatigue and the absence of damage to the materials to be bonded. There are several factors that make adhesive bonds viable alternatives to traditional bonds such as lower manufacturing cost, lower structural weight, or an ability to bond a wide range of different materials.

On the market there are a huge amount of properly documented structural adhesives so, manufacturers began to look for alternatives to continue with a constant evolution and improvement of bonding properties. For this reason, the use of additives in adhesives emerged to improve the properties of the bonds. Among them, we can highlight the fibers of glass, cork, zinc, mica, among others.

This work aims to study the mechanical and fracture properties of a structural adhesive after the addition of glass microfibers, in a gradual context of percentage of additive. For this, five tests were carried out with different concentrations of glass microfibers in the adhesive. These tests are: adhesive Bulk tests, Block Shear tests, Double-Cantilever Beam (DCB) tests, End-Notched Flexure (ENF) tests and single lap joint tests. With the data obtained from these tests, the mechanical and fracture properties of the adhesive without additives will be determined and afterwards, with different degrees of microfiber additives, in order to study its influence on the adhesive in question and later on the adhesive bond.

The results obtained were consistent with what was expected, and it was possible to determine that the additive is positive for the adhesive in question, when the application so requires.



**KEYWORDS**

*Structural adhesive, Glass microfibers, Bulk adhesive test, Block-shear test, Double-cantilever beam test, End-notched flexure test, Single lap joint.*

---

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

### Lista de Abreviaturas

---

**ASTM**      *American Society for Testing and Materials*

---

**DCB**      *Double-Cantilever Beam*

---

**ELS**      *End Loaded Split*

---

**EN**      *European Normalization*

---

**ENF**      *End-Notched Flexure*

---

**GF**      *Glass fiber*

---

**ISO**      *International Standard Organization*

---

**JSD**      Junta Sobreposição dupla

---

**JSS**      Junta de Sobreposição simples

---

**phr**      *per hundred resin*

---

**TAST**      *Thick Adherend Shear Test*

---

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

---

---

### Lista de Unidades

---

mm	Milímetros
----	------------

---

MPa	Mega Pascal
-----	-------------

---

N	Newton
---	--------

---

kN	Kilonewton
----	------------

---

### Lista de Símbolos

---

$G_{Ic}$	Módulo de corte modo I
----------	------------------------

---

$G_{IIc}$	Módulo de corte modo II
-----------	-------------------------

---

$\sigma_r$	Tensão de rotura à tração
------------	---------------------------

---

$\sigma_y$	Tensão limite de elasticidade
------------	-------------------------------

---

$\tau_r$	Tensão de rotura ao corte
----------	---------------------------

---

$\tau_r$	Tensão de rotura ao corte
----------	---------------------------

---

$\Delta\varepsilon$	Gradiente deformações
---------------------	-----------------------

---

$\Delta\sigma$	Gradiente tensões
----------------	-------------------

---

---

---

$E$  Módulo de Young

---

$F$  Força

---

$P$  Carga

---

$\alpha$  Propagação da fenda

---

$\gamma$  Deformação de corte

---

$\delta$  Deslocamento

---

$\varepsilon$  Deformação

---



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Aplicações ramo automóvel [8] .....	7
Figura 2 - Aplicações ramo automóvel, LOTUS [8] .....	8
Figura 3 - Aplicações indústria aeronáutica [9] .....	8
Figura 4 - Esforços de tração [3] .....	11
Figura 5 - Esforços de corte [3] .....	12
Figura 6 – Esforço de arrancamento [13] .....	13
Figura 7 – Esforço de clivagem [13] .....	13
Figura 8 - Rotura adesiva [3] .....	14
Figura 9 - Rotura coesiva [3] .....	14
Figura 10 - Rotura mista [3] .....	14
Figura 11 - Rotura no aderente [3] .....	14
Figura 12 - Configurações possíveis de junta [3] .....	15
Figura 13 - Juntas tipo <i>butt joint</i> [7]. .....	18
Figura 14 - Provete <i>bulk</i> [7] .....	18
Figura 15 – Defeitos no fabrico de um provete [8] .....	19
Figura 16 - Modo teórico de propagação da fenda [17] .....	19
Figura 17 - Molde para fabrico de provete <i>bulk</i> [7] .....	20
Figura 18 - Placa inferior de molde para vazamento [6] .....	21
Figura 19 - Equipamento de ensaio de tração [4] .....	22

---

Figura 20 - Extensómetros usados no ensaio de tração [7] a) Extensómetro mecânico b) Extensómetro ótico .....	23
Figura 21 - Curva Tensão - Deformação [6] .....	24
Figura 22 - Curva Tensão - Deformação de um adesivo dúctil [8] .....	24
Figura 23 - Junta adesiva de sobreposição [7] .....	26
Figura 24 - Junta adesiva TAST [6] .....	26
Figura 25 – Modos fundamentais de rotura em juntas adesivas [8] .....	27
Figura 26 -Ensaio <i>Double-Cantilever Beam</i> [8] .....	28
Figura 27 - Ensaio <i>End-Notched Flexure</i> [8] .....	28
Figura 28 - Partículas de cortiça. a) Com tratamento superficial, b) sem tratamento superficial.....	32
Figura 29-Matrizes de reforços nanotubos carbono [23].....	32
Figura 30 - Reforços Fibra de vidro [24] .....	33
Figura 31 - Efeito das fibras de vidro na tensão de rotura de adesivos epóxicos [23].....	34
Figura 32- Método de expansão <i>TEPS</i> [23].....	35
Figura 33 - Recipiente em bisnaga do adesivo SikaForce® 803 .....	40
Figura 34 – Pistola de aplicação [29] .....	41
Figura 35 - Filamentos de fibra de vidro.....	42
Figura 36 - Adição de fibras ao adesivo .....	43
Figura 37 – Dimensões dos provetes de adesivo maciço [6] .....	44
Figura 38 – Moldes para criação de provetes <i>Bulk</i> .....	44
Figura 39 – Placa intermédia do molde .....	45
Figura 40 – Limpeza com acetona do molde.....	45

---

---

Figura 41 – Forno.....	46
Figura 42 - Desmoldante Loctite Frekote® 770-NC .....	46
Figura 43 – Aplicação de desmoldante nas placas externas .....	47
Figura 44 – Aplicação de desmoldante na placa intermédia/matriz .....	47
Figura 45 - Adição do adesivo para pesagem .....	48
Figura 46 - Adição de fibra de vidro ao adesivo .....	48
Figura 47 - Aplicação do adesivo ao molde .....	49
Figura 48 - Adesivo totalmente aplicado.....	50
Figura 49 - Fecho do molde para a cura .....	50
Figura 50 - Abertura do molde com adesivo curado .....	51
Figura 51 - Amarra do equipamento de ensaios mecânicos .....	51
Figura 52 – <i>Setup</i> do ensaio com extensómetro mecânico.....	54
Figura 53 - Extensómetro mecânico.....	55
Figura 54 - Provete durante o ensaio momentos antes da rotura .....	55
Figura 55 – Curvas $P-\delta$ para concentração 0 GF phr .....	57
Figura 56 – Curvas $P-\delta$ para concentração 15 GF phr .....	57
Figura 57 – Curvas $P-\delta$ para concentração 35 GF phr .....	58
Figura 58 – Curvas $P-\delta$ para concentração 55 GF phr .....	58
Figura 59 – Curvas $\sigma-\varepsilon$ para concentração 0 GF phr.....	59
Figura 60 – Curvas $\sigma-\varepsilon$ para concentração 15 GF phr.....	59
Figura 61 – Curvas $\sigma-\varepsilon$ para concentração 35 GF phr.....	60
Figura 62 – Curvas $\sigma-\varepsilon$ para concentração 55 GF phr.....	60

---



---

Figura 63 - Gráfico curva $\sigma$ - $\epsilon$ .....	61
Figura 64 - Gráfico da variação de $E$ (MPa) .....	63
Figura 65 - Gráfico da variação do deslocamento .....	64
Figura 66 - Zona de rotura de provete <i>bulk</i> ensaiado à tração .....	64
Figura 67 - Rotura provete <i>bulk</i> .....	65
Figura 68 – Corte de tecido do rolo.....	66
Figura 69 – Aplicação de calor ao tecido .....	67
Figura 70 – Placa de carbono-epóxico com filme de desmoldante .....	68
Figura 71 – Colocação da placa na prensa.....	68
Figura 72 – Programa usado na cura da placa.....	69
Figura 73 – Serra mecânica BATISTI MECCANICA s.r.l DV25 [28].....	70
Figura 74 - Dimensões provete <i>block shear</i> .....	70
Figura 75 – Lixa .....	71
Figura 76 - Junta adesiva <i>Block Shear</i> .....	72
Figura 77 - Remoção da rebarba e adesivo em excesso.....	72
Figura 78 - Colocação do provete para ensaio <i>block shear</i> na ferramenta .....	75
Figura 79 - Curvas $P$ - $\delta$ para concentração 0 GF phr .....	77
Figura 80 - Curvas $P$ - $\delta$ para concentração 15 GF phr .....	77
Figura 81 - Curvas $P$ - $\delta$ para concentração 35 GF phr .....	78
Figura 82 - Curvas $P$ - $\delta$ para concentração 55 GF phr .....	78
Figura 83 - Curvas $\tau$ – $\gamma$ para concentração 0 GF phr.....	79
Figura 84 - Curvas $\tau$ – $\gamma$ para concentração 15 GF phr.....	79

---

---

Figura 85 - Curvas $\tau - \gamma$ para concentração 35 GF phr.....	80
Figura 86 - Curvas $\tau - \gamma$ para concentração 55%.....	80
Figura 87 - Gráfica evolução de $\gamma$ .....	82
Figura 88 - Gráfica evolução de $\tau$ .....	83
Figura 89 – Modo de rotura provetes 0 GF phr.....	83
Figura 90 – Modo de rotura provetes 15 GF phr.....	84
Figura 91 – Modo de rotura provetes 35 GF phr.....	84
Figura 92 – Modo de rotura provetes 55 GF phr.....	85
Figura 93 - Esquema do provete DCB [7].....	86
Figura 94 - Provetes DCB .....	86
Figura 95 - Aderentes após lixagem e limpeza .....	87
Figura 96 - Aplicação de desmoldante aos componentes metálicos.....	88
Figura 97 - Aderentes para provetes DCB com calços metálicos .....	89
Figura 98 - Alinhamento dos aderentes para aplicação de adesivo .....	89
Figura 99 - Aplicação de adesivo com auxílio de pistola .....	90
Figura 100 - Provetes DCB finalizados para cura .....	90
Figura 101 - Escala de controlo da propagação da fenda.....	91
Figura 102 - Provede DCB finalizado .....	91
Figura 103 – Provede DCB no equipamento .....	94
Figura 104 - <i>Setup</i> ensaio DCB.....	95
Figura 105 - Esquema eletrónico para captura automática de fotografias (Cortesia do Professor Isidro Sánchez-Arce) .....	96

---

---

Figura 106 - Lista de componentes (Cortesia do Professor Isidro Sánchez-Arce) .....	96
Figura 107 - <i>Setup</i> ensaio DCB.....	97
Figura 108 - Equipamento para captura automática de imagens .....	97
Figura 109 - Foto inicial do ensaio DCB .....	98
Figura 110 - Foto perto da rotura do ensaio DCB.....	98
Figura 111 – Curvas $P-\delta$ obtidas do ensaio DCB a 0 GF phr.....	100
Figura 112 – Curvas $P-\delta$ obtidas do ensaio DCB a 15 GF phr.....	100
Figura 113 – Curvas $P-\delta$ obtidas do ensaio DCB a 35 GF phr.....	101
Figura 114 – Curvas $P-\delta$ obtidas do ensaio DCB a 55 GF phr.....	101
Figura 115 - Curva- $R$ do provete 1 da concentração de 0 GF phr .....	102
Figura 116 - Evolução do $G_{IC}$ com a concentração de fibras.....	104
Figura 117 – Superfície de fratura provetes DCB 0 GF phr.....	105
Figura 118 – Superfície de fratura provetes DCB 15 GF phr.....	106
Figura 119 – Superfície de fratura provetes DCB 35 GF phr.....	106
Figura 120 – Superfície de fratura provetes DCB 55 GF phr.....	107
Figura 121 - Esquema provete ENF .....	107
Figura 122 - Dimensões provete ENF .....	108
Figura 123 – Fitas calibradas usadas para calços.....	109
Figura 124 - Aderentes ENF prontos para colagem.....	109
Figura 125 - Aderentes ENF posicionados para colagem .....	110
Figura 126 - Aplicação do adesivo nos aderentes .....	110
Figura 127 - Provetes finalizados para cura.....	111

---

---

Figura 128 - Provete com a escala colada .....	111
Figura 129 - <i>Setup</i> ensaio provetes ENF .....	113
Figura 130 - Pormenor folhas de Teflon® .....	114
Figura 131 - <i>Setup</i> geral ensaio ENF .....	114
Figura 132 - Início do ensaio com provete ENF .....	115
Figura 133 – Próximo do fim do ensaio com provete ENF .....	115
Figura 134 - Curva $P-\delta$ para provete 2 com 15 GF phr .....	117
Figura 135 - Curva $P-\delta$ para provete 1 com 35 GF phr .....	117
Figura 136 - Curva $P-\delta$ para provete 2 com 55 GF phr .....	118
Figura 137 - Curva $P-\delta$ para provete 3 com 55 GF phr .....	118
Figura 138 - Curva- $R$ para provete 2 com 15 GF phr .....	119
Figura 139 - Curva- $R$ para provete 1 com 35 GF phr .....	119
Figura 140 - Curva- $R$ para provete 2 com 55 GF phr .....	120
Figura 141 - Curva- $R$ para provete 3 com 55 GF phr .....	120
Figura 142 – Rotura de provetes com 15 GF phr de concentração .....	123
Figura 143 – Rotura de provetes com 35 GF phr de concentração .....	123
Figura 144 – Rotura de provetes com 55 GF phr de concentração .....	124
Figura 145 - Dimensões provete junta sobreposição simples .....	124
Figura 146 - Comprimento de sobreposição .....	125
Figura 147 - Lixa 80 gramagem usada para preparação de superfície .....	125
Figura 148 - Aderentes com superfície preparada .....	126
Figura 149 – Colagem dos provetes JSS.....	127

---

---

Figura 150 - <i>Setup</i> ensaio JSS.....	129
Figura 151 – Curva $P-\delta$ para provetes 0 GF phr.....	130
Figura 152 – Curva $P-\delta$ para provetes 15 GF phr.....	131
Figura 153 – Curva $P-\delta$ para provetes 35 GF phr.....	131
Figura 154 – Curva $P-\delta$ para provetes 55 GF phr.....	132
Figura 155 – Gráfico de tensão máxima.....	134
Figura 156 – Gráfico do deslocamento.....	135
Figura 157 – Gráfico da força máxima.....	135
Figura 158 – Provetes JSS após ensaio 0 GF phr.....	136
Figura 159 – Provetes JSS após ensaio 15 GF phr.....	136
Figura 160 – Provetes JSS após ensaio 35 GF phr.....	137
Figura 161 – Provetes JSS após ensaio 55 GF phr.....	137

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Diferentes famílias de adesivos estruturais [3].....	10
Tabela 2 - Exemplos melhoramentos <i>Fillers</i> .....	30
Tabela 3 - Resumo estado de arte.....	35
Tabela 4 - Propriedades das placas de carbono-epóxico [28].....	39
Tabela 5 - Propriedades do Adesivo SikaForce® 803 (retirado da ficha técnica do adesivo em anexo) ....	41
Tabela 6 - Valores concentração de fibras de vidro .....	49
Tabela 7 - Dimensões Provetes 0 .....	52
Tabela 8 - Dimensões Provetes 15 .....	52
Tabela 9 - Dimensões Provetes 35 .....	53
Tabela 10 - Dimensões provetes 55 .....	53
Tabela 11 - Propriedades mecânicas à tração para 0 GF phr .....	61
Tabela 12 - Propriedades mecânicas à tração para 15 GF phr .....	61
Tabela 13 - Propriedades mecânicas à tração para 35 GF phr .....	62
Tabela 14 - Propriedades mecânicas à tração para 55 GF phr .....	62
Tabela 15 – Variação de $E$ com a concentração de fibras .....	63
Tabela 16 – Variação do deslocamento com a concentração de fibras .....	63
Tabela 17 - Dimensões provetes 0 GF phr.....	73
Tabela 18 - Dimensões provetes 15 GF phr.....	73
Tabela 19 - Dimensões provetes 35 GF phr.....	74

---

Tabela 20 - Dimensões provetes 55 GF phr.....	74
Tabela 21 - Propriedades mecânicas ao corte para 0 GF phr.....	80
Tabela 22 - Propriedades mecânicas ao corte para 15 GF phr.....	81
Tabela 23 - Propriedades mecânicas ao corte para 35 GF phr.....	81
Tabela 24 - Propriedades mecânicas ao corte para 55 GF phr.....	82
Tabela 25 – Evolução da $\gamma$ com a concentração de fibras.....	82
Tabela 26 – Evolução de $\tau$ com a concentração de fibras.....	83
Tabela 28 - Espessura adesivo provetes DCB 0 GF phr.....	92
Tabela 29 - Espessura adesivo provetes DCB 15 GF phr.....	92
Tabela 30 - Espessura adesivo provetes DCB 35 GF phr.....	93
Tabela 31 - Espessura adesivo provetes DCB 55 GF phr.....	93
Tabela 36 - Valor de $G_{IC}$ para concentração de 0 GF phr.....	102
Tabela 37 - Valor de $G_{IC}$ para concentração de 15 GF phr.....	103
Tabela 38 - Valor de $G_{IC}$ para concentração de 35 GF phr.....	103
Tabela 39 - Valor de $G_{IC}$ para concentração de 55 GF phr.....	103
Tabela 41 - Espessura adesivo provetes ENF 0 GF phr.....	111
Tabela 42 - Espessura adesivo provetes ENF 15 GF phr.....	112
Tabela 43 - Espessura adesivo provetes ENF 35 GF phr.....	112
Tabela 44 - Espessura adesivo provetes ENF 55 GF phr.....	112
Tabela 49 – Valor de $G_{IIC}$ para concentração de 15 GF phr.....	121
Tabela 50 – Valor de $G_{IIC}$ para concentração de 35 GF phr.....	121
Tabela 51 – Valor de $G_{IIC}$ para concentração de 55 GF phr.....	122

---

---

Tabela 52 - Dimensões Provetes 0 GF phr .....	128
Tabela 53 - Dimensões Provetes 15 GF phr .....	128
Tabela 54 - Dimensões Provetes 35 GF phr .....	128
Tabela 55 - Dimensões Provetes 55 GF phr .....	129
Tabela 56 - Propriedades mecânicas ensaio JSS para 0 GF phr .....	132
Tabela 57 - Propriedades mecânicas ensaio JSS para 15 GF phr .....	132
Tabela 58 - Propriedades mecânicas ensaio JSS para 35 GF phr .....	133
Tabela 59 - Propriedades mecânicas ensaio JSS para 55 GF phr .....	133
Tabela 60 – Tensão máxima .....	134
Tabela 61 – Deslocamento de rotura .....	134
Tabela 62 – Força máxima .....	135





# ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Contextualização .....	1
1.2	Objetivos .....	1
1.3	Organização da dissertação .....	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	Ligações adesivas .....	5
2.1.1	Caraterização das ligações adesivas .....	5
2.1.2	Aplicações das juntas adesivas .....	7
2.1.3	Adesivos estruturais .....	9
2.1.4	Esforços e modos de rotura .....	11
2.1.5	Configurações possíveis de junta .....	14
2.2	Determinação das propriedades de adesivos .....	16
2.2.1	Caracterização propriedades mecânicas à tração .....	16
2.2.2	Propriedades mecânicas ao corte .....	25
2.2.3	Propriedades de fratura à tração e ao corte .....	27
2.3	Modificação de adesivos .....	29
2.3.1	Aditivação por partículas.....	29
2.3.1.1	Partículas minerais.....	30
2.3.1.2	Partículas orgânicas .....	31

---

2.3.2	Inclusão de microfibras .....	32
2.3.3	Outros aditivos .....	34
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>39</b>
3.1	Materiais utilizados .....	39
3.1.1	Aderentes .....	39
3.1.2	Adesivo .....	40
3.1.3	Fibras de vidro de reforço .....	42
3.1.4	Preparação do adesivo reforçado .....	42
3.2	Ensaio mecânicos à tração.....	43
3.2.1	Fabrico dos provetes .....	44
3.2.2	Ensaio dos provetes.....	51
3.2.3	Resultados .....	56
3.3	Ensaio mecânicos ao corte .....	65
3.3.1	Fabrico dos provetes .....	65
3.3.2	Ensaio dos provetes.....	73
3.3.3	Resultados .....	76
3.4	Ensaio de fratura à tração .....	85
3.4.1	Fabrico dos provetes .....	85
3.4.2	Ensaio dos provetes.....	92
3.4.3	Resultados .....	98
3.5	Ensaio de fratura ao corte .....	107
3.5.1	Fabrico dos provetes .....	107

---

---

3.5.2	Ensaio dos provetes.....	111
3.5.3	Resultados.....	116
3.6	Ensaio de modo misto em JSS .....	124
3.6.1	Fabrico de provetes JSS.....	124
3.6.2	Ensaio dos provetes.....	127
3.6.3	Resultados.....	130
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS .....	141
4.1	Conclusões .....	141
4.2	Propostas de trabalhos futuros.....	142
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	147
6	ANEXOS.....	153
6.1	ANEXO1 .....	153
6.1.1	ANEXO2 .....	153



# INTRODUÇÃO

- 1.1 Contextualização
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Organização da dissertação

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

As juntas adesivas podem ser utilizadas em alternativa às comuns ligações mecânicas devido a numerosas vantagens como a possibilidade de ligação entre materiais diferentes, maior leveza, menores custos de fabrico, prevenção da corrosão que existe na ligação entre materiais metálicos, entre outros.

A utilização deste tipo de ligações normalmente está sujeita a quatro modos elementares de carregamento como tração, corte, arrancamento e clivagem. Na prática existe uma combinação destes carregamentos, o que faça com que cada utilização tenha sempre um tipo de carregamento misto na sua função.

## 1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal o estudo e caracterização das propriedades de um adesivo quando adicionadas microfibras de vidro à sua constituição. Estas propriedades mecânicas e de fratura serão obtidas através de ensaios específicos e normalizados, como ensaios de tração, corte e fratura. Será importante determinar as seguintes propriedades:

- Módulo de Young,  $E$ ;
- Módulo de corte,  $G$ ;
- A tensão de rotura à tração  $\sigma_r$ , e ao corte  $\tau_r$ ;
- A tensão limite de elasticidade à tração  $\sigma_y$ , e ao corte  $\tau_y$ ;
- A deformação de rotura à tração,  $\varepsilon$ , e ao corte  $\gamma$ ;
- A taxa limite de libertação de energia em puro modo I,  $G_{IC}$ ;
- A taxa limite de libertação em puro modo II,  $G_{IIc}$ .

Para este tipo de caracterização, será necessário o fabrico de provetes adequados aos ensaios a realizar, neste caso *bulk*, que são provetes de adesivo maciço, provetes com geometria *Thick Adherend Shear Test* (TAST), para a determinação das propriedades mecânicas ao corte, provetes *Double-Cantilever Beam* (DCB), e *End-Notched Flexure*

---

(ENF), para determinação das propriedades de fratura em puro modo I e em puro modo II, respetivamente.

### 1.3 Organização da dissertação

A presente dissertação será organizada em 4 capítulos:

Capítulo 1 – É feita a introdução do tema relativamente à área dos adesivos, uma contextualização e descrição dos objetivos propostos, e descrição dos conteúdos de cada capítulo.

Capítulo 2- É realizada uma revisão bibliográfica e estado de arte sobre adesivos, juntas adesivas e modificações do mesmo. São abordadas vantagens e desvantagens da utilização deste tipo de ligações, caracterização das propriedades dos adesivos, tipos de ensaios realizados e modificações existentes na formulação dos adesivos.

Capítulo 3- São descritas e analisadas todas as etapas dos ensaios experimentais efetuados. Abordam-se diferentes tipologias de ensaio, fabrico dos provetes, ensaio dos provetes, bem como resultados e dados obtidos.

Capítulo 4- Referem-se as conclusões tiradas da dissertação e possíveis trabalhos futuros.



# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## 2.3 Modificação de adesivos



---

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Ligações adesivas

Existem diferentes tipos de processos de ligação entre sólidos, sendo os mais comuns as ligações aparafusadas, rebitadas, soldadas e adesivas. Cada um destes processos apresentam as suas vantagens e limitações, pelo que é importante estudar cada um deles de modo que a sua aplicação tenha o máximo desempenho [1].

Os adesivos têm sido usados nas últimas centenas de anos, mas na sua maioria eram fabricados a partir de materiais naturais como ossos, peles, ovos, plantas, etc. No último século apareceram os adesivos de base sintética, e atualmente, são usados em praticamente toda a indústria [2].

#### 2.1.1 Caracterização das ligações adesivas

Junta adesiva, junta colada ou simplesmente ligação adesiva, são os termos normalmente utilizados para se designar uma união por intermédio de um adesivo. Aos membros estruturais da junta, que são ligados através de um adesivo, dá-se o nome de substratos antes da ligação ser efetuada, e posteriormente passam a designar-se aderentes [2].

As ligações adesivas para serem uma alternativa viável, é necessário ter em atenção vários fatores e condições a que os adesivos irão estar sujeitos durante o seu funcionamento. O adesivo escolhido terá de cumprir todos os requisitos necessários a cada situação, e normalmente os aspetos mais importantes a ter em conta são [3]:

- Condições durante o funcionamento da junta:
  - Humidade;
  - Temperatura;
  - Exposição a raios UV.
- Resistência química:
  - Que fluidos irão contactar com a junta;
  - Contacto com fluidos corrosivos.
- Solicitações mecânicas:

- Impacto, vibração, cargas cíclicas, entre outros;
- Tipo de esforço e sua intensidade.

Como qualquer tipo de aplicação, as juntas adesivas apresentam vantagens e desvantagens, que depois de analisadas, permitem a tomada de decisão quanto á possibilidade e adequabilidade da sua utilização. De seguida são apresentadas algumas das vantagens e desvantagens deste tipo de ligação [4] [5] [1] [6].

#### Vantagens:

- Distribuição uniforme e uma larga área de distribuição em comparação com as ligações aparafusadas e rebitadas mais comuns;
- União de materiais de vários formatos e geometrias;
- União de substratos do mesmo material ou de materiais diferentes;
- Diminuição da corrosão galvânica entre dois materiais idênticos;
- Boa resistência à fadiga;
- Criação de um contacto continuo entre ligações;
- Tornam o projeto mais flexível permitindo o uso de novos conceitos e materiais;
- Providencia uma boa relação resistência/peso;
- Mais rápido e por vezes mais fácil aplicação que ligações aparafusadas;
- Permitem ter contornos irregulares porque evitam as furações consequentes das ligações tradicionais.

#### Desvantagens:

- A junta não permite, na maior parte dos casos, inspeção visual da mesma;
- Necessita de uma preparação da superfície cuidada e de acordo com o material e aplicação a aplicar;
- A ligação não é instantânea. Isto implica um tempo de cura do adesivo, sendo que este pode ser maior ou menor consoante o adesivo escolhido;
- Em certos casos pode ser diminuído o ciclo de cura com o uso de temperaturas de cura mais elevadas;
- A junta não permite a inspeção visual da qualidade da adesão, a não ser que os substratos sejam transparentes;
- É importante usar geometrias que evitem tensões localizadas, e que garantam uma distribuição uniforme das tensões;
- Se as tensões não forem perpendiculares podem ocorrer forças de arrancamento e clivagem;

- Normalmente necessitam de ensaios não destrutivos para controlo de qualidade e inspeção da junta;
- Uma junta adesiva não é desmontável, como acontece com as ligações aparafusadas, o que deverá ser tido em conta quando se equaciona usar adesivos como alternativa;
- Fraca resistência ao arrancamento;
- Flamabilidade e toxicidade de alguns adesivos.

### 2.1.2 Aplicações das juntas adesivas

Os adesivos estão amplamente presentes no nosso quotidiano. Com o desenvolvimento da indústria, e as suas evoluções, surgiram novas aplicações para este tipo de materiais. Ao escolher o melhor adesivo para uma aplicação específica, devem se ter em conta todos os fatores associados à aplicação e também fatores associados ao próprio adesivo [6] [7].

- Ramo automóvel, utilização de adesivos estruturais a nível de ligação entre painéis da estrutura de um automóvel Figura 1 a fixação do chassis à carroçaria através de adesivo estrutural Figura 2.



Figura 1 - Aplicações ramo automóvel [8]



Figura 2 - Aplicações ramo automóvel, LOTUS [8]

- Indústria Aeronáutica e Aeroespacial, são utilizados essencialmente na estrutura das aeronaves, onde diversas partes são unidas com adesivos Figura 3.

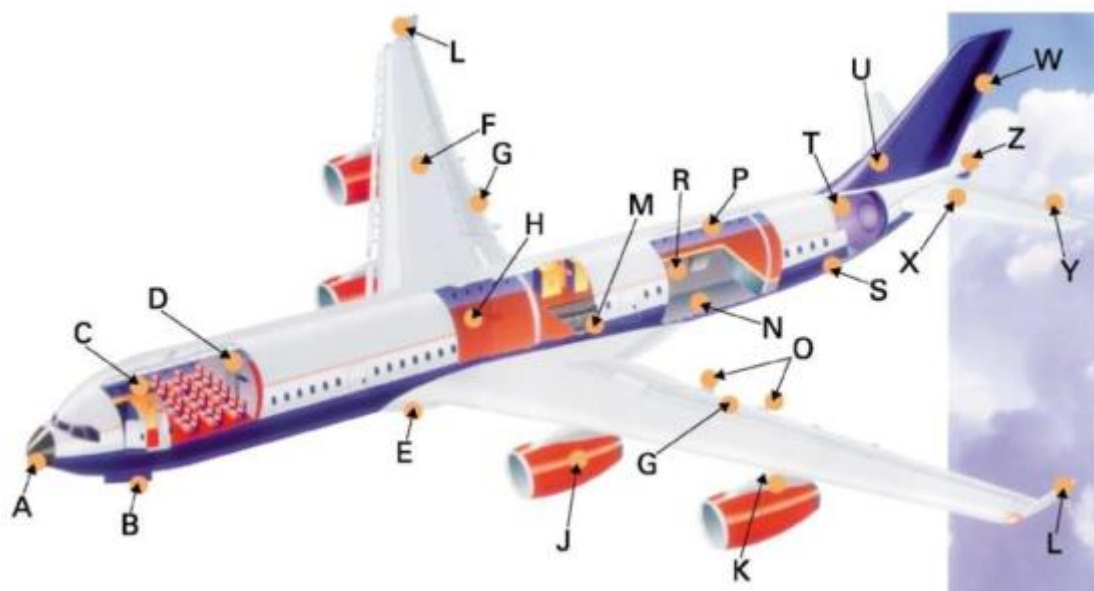


Figura 3 - Aplicações indústria aeronáutica [9]

Ainda é possível encontrar o seu uso nas mais variadas indústrias, como por exemplo [5]:

- Indústria têxtil;
- Medicina;
- Indústria Eletrónica;
- Indústria Naval;

- Construção civil;
- Energias renováveis.

### 2.1.3 Adesivos estruturais

Um adesivo é um material que, quando aplicado a duas superfícies, tem como objetivo uni-las permanentemente através de um processo adesivo. É capaz de formar ligações entre dois substratos. Quando utilizado, um adesivo apresenta um peso diminuto quando comparados com o material que estão a ligar [10].

Existem dois tipos de adesivos: estruturais e não estruturais. Um adesivo estrutural é um adesivo apropriado para aplicações em que os materiais a serem ligados, irão estar sujeitos a elevadas solicitações mecânicas no ponto de união. Os adesivos estruturais devem ser capazes de transmitir elevados esforços sem perderem integridade ou formato. Uma junta adesiva estrutural deve ter uma resistência ao corte superior a 7 MPa [11].

Para os adesivos estruturais podem-se destacar as seguintes vantagens:

- Adesivos de elevada resistência e desempenho;
- Não sofrem fluência sob cargas significativas;
- Resistem a cargas elevadas sem deformação;
- Boa resistência aos meios externos.

São normalmente classificados por famílias, consoante a Tabela 1, e descritos de seguida:

- Os adesivos fenólicos foram os primeiros a ser usados como meio de estabelecer ligações entre metais. São normalmente fornecidos em dois componentes e apresentam baixo custo. Possuem boa resistência mecânica, boa resistência a altas temperaturas e também contra os agentes ambientais. Para efetuar a sua cura, é necessário recorrer a temperaturas elevadas ao mesmo tempo que é aplicada pressão. Durante o processo de cura ocorre libertação de água e humidade. São adesivos que apresentam baixa resistência à corrosão, ao impacto e elevada fragilidade [3];

Tabela 1 – Diferentes famílias de adesivos estruturais [3]

Estruturais		Recomendado
Fenólicos	Fenólicos-vinílicos Fenólicos-nitrilo Fenólicos-policloropreno	Metais, vidro, plásticos, borracha
Acrílicos	Anaeróbicos cianoacrilatos	tecido, plásticos, pele e alguns metais
Poliuretano		Plásticos, metais, borracha
Poliimida		Metais, chapas, núcleos de compósitos
Epóxico	epóxico-poliamida epóxico-polisulfureto epóxico-fenólicos epóxico-poliuretano epóxico-nitrilo	Metais, plásticos, borracha, cerâmicos, madeira

- Os adesivos epóxicos são os que mais variantes apresentam e possibilidades de configuração. No geral apresentam excelente resistência ao corte, corrosão e esforços de tração. Estes adesivos tem a vantagem de poder ser curados à temperatura ambiente ou a temperaturas elevadas. Não se verifica a libertação de substâncias voláteis, o que se traduz em ligações duradouras. Na utilização e preparação destes adesivos, deve se ter em conta sempre o rácio correto entre a resina e o endurecedor, caso contrário não se obtém um adesivo com as propriedades esperadas. Estes têm a desvantagem de apresentar elevada fragilidade, sendo, pois, um processo comum a adição de modificadores (termoplásticos e borrachas) por forma a melhorar a ductilidade do mesmo [3];
- Os adesivos acrílicos têm uma grande aplicação na fixação de peças feitas de materiais metálicos como rolamentos, rocas, etc. Apresentam uma boa resistência mecânica e uma boa resistência ao impacto. Tem a vantagem de curar à temperatura ambiente e serem misturados antes da aplicação ou diretamente nas superfícies a unir. São também usados na colagem de plásticos com baixa energia superficial [3];
- Os adesivos poliuretanos são utilizados em aplicações que requeiram elevada resistência ao arrancamento, ao choque e a vibrações. Apresentam uma



excelente tenacidade e ductilidade, viscosidade adequada ao preenchimento de folgas e bom comportamento tanto a baixas como altas temperaturas. Estes adesivos apresentem valores de rotura ao corte na ordem dos 20 MPa, pelo que são adequados a aplicações estruturais [3].

#### 2.1.4 Esforços e modos de rotura

As juntas, quando nas suas aplicações, estão sujeitas a certo tipo de esforços e componentes de tensão, sendo importante perceber como funcionam de modo à escolha do adesivo ser a correta. O carregamento a que as juntas estão sujeitas poderá ser dos seguintes modos: tração/compressão, corte, clivagem e arrancamento. A norma ASTM D 5573 – 99 [12] classifica os modos de rotura em juntas de plástico reforçado com fibras [3] [2].

#### Tração e Compressão

Desenvolvem-se tensões de tração e compressão quando há forças a atuar perpendicularmente ao plano da junta, distribuídas uniformemente por toda a área da junta. Sob carga, desenvolvem-se concentrações de tensões fronteiras do adesivo, que se podem equiparar a esforços de clivagem e arrancamento, tal como apresentado na Figura 4.

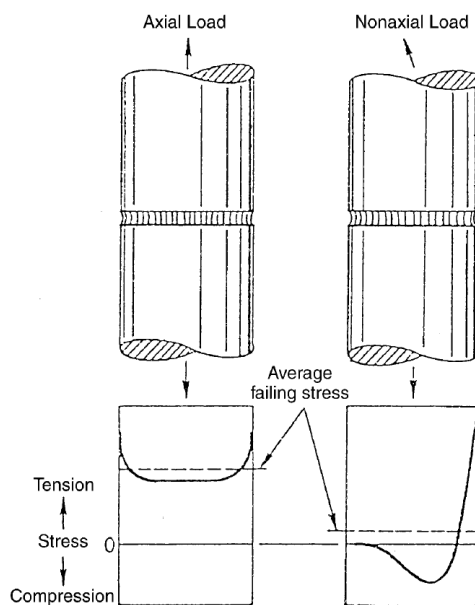


Figura 4 - Esforços de tração [3]

A primeira pequena fratura que ocorra na zona mais fraca e com maior concentração de tensões, ir-se-á propagar muito rapidamente e levará à rotura da junta. As juntas que funcionarem à tração devem ser projetadas com guias para garantir um carregamento axial contínuo. Os substratos também devem ser suficientemente rígidos para garantir que a tensão fique uniformemente distribuída.

### Corte

Desenvolvem-se tensões de corte quando existem forças a atuar no plano da interface entre os aderentes. Juntas que dependem da resistência ao corte dos adesivos, são as mais fáceis de fabricar e as que são mais usadas. Os adesivos geralmente têm resistência ao corte mais elevada, quando comparada com a resistência à tração. A junta de sobreposição simples é o tipo de junta mais utilizada neste tipo de ligações [1].

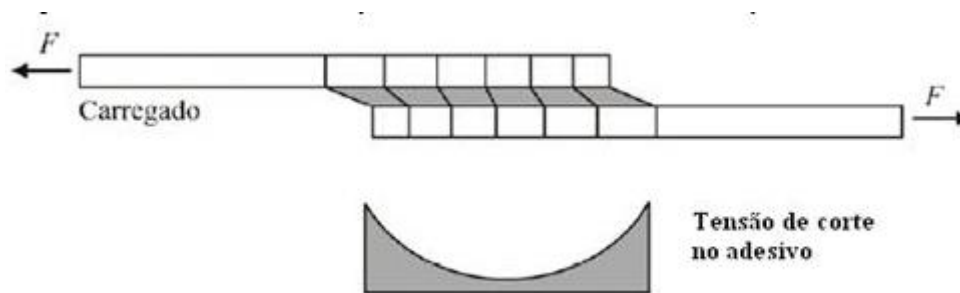


Figura 5 - Esforços de corte [3]

### Clivagem e arrancamento

As tensões de clivagem e arrancamento, são as tensões menos desejadas que ocorrem numa junta adesiva. Clivagem pode ser definida como tensão que ocorre quando as forças na extremidade de uma junta rígida atuam de modo a separar os substratos. Arrancamento é similar à clivagem com a diferença que o arrancamento acontece quando um dos substratos é flexível e na clivagem ambos os substratos têm rigidez suficiente para não sofrer flexão. Juntas carregadas com esforços de clivagem ou arrancamento oferecem uma menor resistência comparativamente com juntas carregadas com esforços de corte puro, porque nestes casos há uma elevada concentração de tensões numa pequena área da junta, que leva à rutura do adesivo pela extremidade onde as tensões são mais elevadas [7].

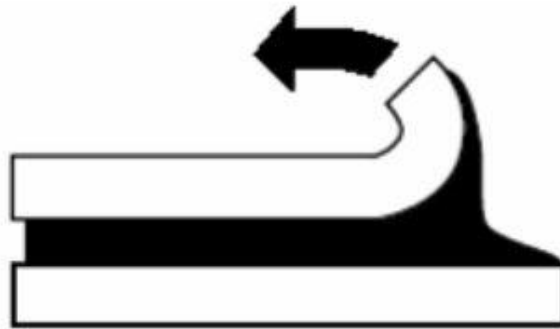


Figura 6 – Esforço de arrancamento [13]

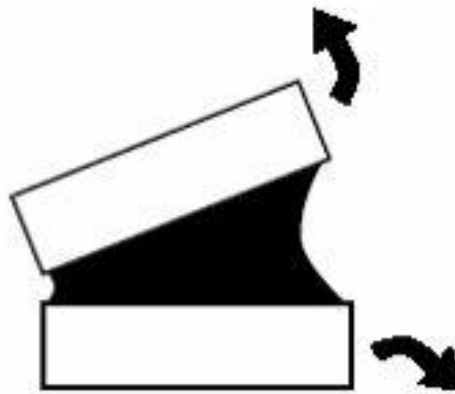


Figura 7 – Esforço de clivagem [13]

### Modos de rotura

As juntas adesivas podem romper adesivamente, coesivamente, pelo aderente ou uma rotura mista entre rotura adesiva e rotura coesiva. Uma rotura adesiva é uma rotura na interface entre o adesivo e o aderente, normalmente resultado de uma má colagem. A rotura coesiva ocorre quando a propagação ocorre pelo interior do mesmo material, neste caso pelo interior da camada de adesivo. Verifica-se que ocorre uma rotura adesiva quando há uma camada de adesivo nas duas superfícies da junta. Também há a situação em que a rotura ocorre pelo aderente, sofrendo uma rotura antes do adesivo. Uma rotura coesiva entre o adesivo e os aderentes, é a situação ideal, porque se atinge a força máxima que o adesivo suporta. Analisando uma junta adesiva que foi testada destrutivamente, o modo de rotura é determinado pela percentagem de adesivo que

ainda se mantém na superfície. O mais preferível é ter uma rotura 100% coesiva, em que permanece adesivo em toda a área das duas superfícies ligadas.

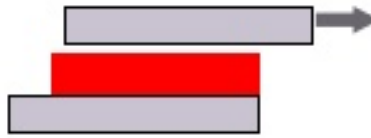


Figura 8 - Rotura adesiva [3]

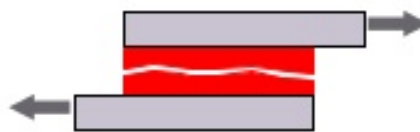


Figura 9 - Rotura coesiva [3]



Figura 10 - Rotura mista [3]

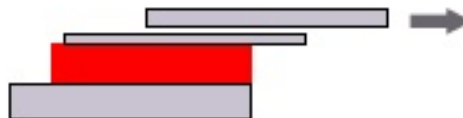


Figura 11 - Rotura no aderente [3]

Pode-se também considerar um modo misto de rutura, uma combinação entre rotura adesiva e coesiva, em que se encontram, após a rotura, partes da superfície dos aderentes com adesivo e outras áreas sem adesivo. Isto acontece porque a interface está parcialmente degradada. A resistência das juntas adesivas que sofrem rotura mista, é menor que a resistência das juntas que sofrem rotura coesiva [6].

### 2.1.5 Configurações possíveis de junta

O formato de uma junta adesiva, varia muito e tem em conta a sua aplicação e carregamentos a que será sujeita. As juntas que originam distribuições de tensões mais

uniformes, são geralmente mais duráveis e resistentes. Numa junta ideal a direção de carregamento a que está sujeito o adesivo deve ser sempre segundo a qual este tem mais resistência. Existem várias configurações possíveis para as juntas adesivas, em que as mais utilizadas são as seguintes [2]:

- Juntas de sobreposição simples (JSS);
- Juntas com chanfro;
- Juntas em degraus;
- Juntas de sobreposição dupla (JSD);
- Juntas topo a topo.

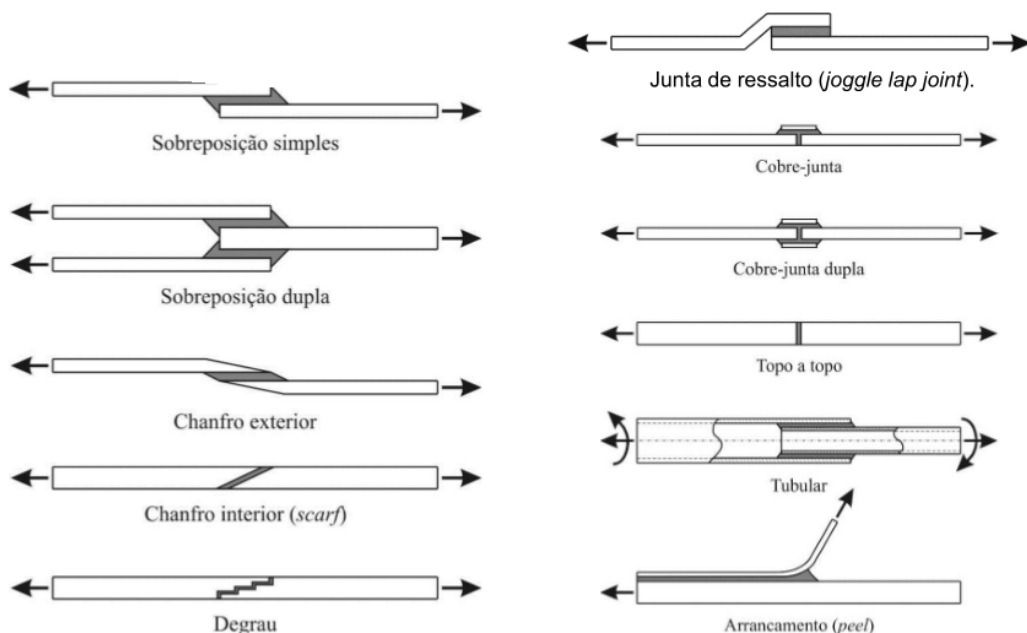


Figura 12 - Configurações possíveis de junta [3]

Destes tipos de juntas a mais estudada e utilizada em termos experimentais é a JSS, devido à facilidade de fabrico. Apesar desta esta junta apresenta dificuldade na análise de tensões, pois aquando dos ensaios são introduzidos esforços de flexão nos substratos. Por esta razão usam-se as juntas JSD, as juntas com chanfro e as juntas em degrau, pois estas diminuem o arrancamento e flexão que existem nas JSS [14].

De todos os tipos as juntas topo a topo são as mais simples de fabricar. Neste caso não são muito utilizadas a nível de aplicações reais, pois apresentam elevadas concentrações de tensões de arrancamento e de corte nas extremidades da ligação.

Em certos casos experimentais, utilizam-se juntas topo a topo, mas com provetes de secção circular. Isto permite aumentar a área de contacto e conseqüentemente, existem um aumento da resistência da junta e diminuição dos esforços de arrancamento [15].

## 2.2 Determinação das propriedades de adesivos

Atualmente existe um número grande de ensaios que nos permitem identificar características dos adesivos [2]. Vários testes foram propostos ao longo dos anos, e alguns ainda estão em uso nos nossos dias para caracterizar adesivos estruturais. Para caracterizar um adesivo é necessário determinar três parâmetros:

- Elástico;
- Plástico;
- Fratura.

Cada um destes parâmetros requer uma tipologia de teste específica para a sua determinação. Neste caso, deve-se diferir o modo de sollicitação, de modo a ser possível a determinação de cada uma das propriedades:

- Modo I (tração);
- Modo II (corte).

São utilizados testes diferentes para cada tipo de sollicitação [1].

As propriedades dos adesivos variam bastante com diferentes fatores pelo que é essencial um correto desenho e projeção de junta [6].

Neste capítulo, ir-se-á abordar as formas de caracterizar as propriedades mecânicas e de fratura dos adesivos. Todas elas têm o seu papel na caracterização dos adesivos, e permite-nos escolher os mesmos de forma mais adequada para cada aplicação.

Para caracterizar um adesivo mecanicamente realizam-se normalmente ensaios com dois tipos de carregamento (tração e corte), sendo na maioria dos casos utilizados provetes *bulk* para determinação das propriedades mecânicas à tração e provetes TAST para determinação das propriedades mecânicas ao corte [8].

### 2.2.1 Caracterização propriedades mecânicas à tração

O ensaio de tração é o ensaio destrutivo mais utilizado para obter dados de projeto sobre a resistência de um adesivo. Um ensaio destrutivo prevê que exista algo que

---

aplique dano num provete, sendo que este fica parcialmente ou totalmente destruído. Este ensaio é amplamente utilizado para determinar várias propriedades através dos dados obtidos, sendo estes os valores de força e deslocamento [4].

Neste caso, também é utilizado quando se pretende analisar um adesivo, pois através da curva tensão-deformação proveniente do ensaio, é possível determinar inúmeras propriedades como o módulo de elasticidade longitudinal (declive da curva no domínio elástico), a tensão correspondente à transição elasto-plástica a que se dá o nome de tensão de cedência, tensão de rotura e a deformação após rotura, entre outras. Estas propriedades são obtidas através da análise da curva tensão deformação, que é fornecida através do software do equipamento de teste [16].

Existem dois tipos de provetes de modo a determinar as propriedades de um adesivo à tração: provetes maciços *bulk* ou em juntas topo a topo.

Os ensaios com provetes maciços são utilizados durante a parte experimental. Devem ter uma espessura adequada, de modo a terem informação semelhante aos ensaios com juntas topo a topo. Os ensaios com juntas topo a topo são normalmente conhecidos por *butt-joint* (Figura 13). Os ensaios que utilizam este tipo de juntas terão propriedades mais próximas das encontradas na realidade, pois simulam de melhor forma as juntas encontradas nas aplicações. Este tipo de ensaios utiliza substratos de secção circular em aço ligados nos topos por uma camada de adesivo a testar. Com este tipo de provetes é possível obter informações relativamente ao módulo de elasticidade, módulo de rigidez e coeficiente de Poisson. Este tipo de provetes nem sempre são utilizados porque apresentam algum tipo de limitações relativamente aos ensaios com provetes *bulk*, estas são a dificuldade de alinhamento dos provetes na prensa de ensaio. Estes desalinhamentos por mais pequenos que sejam, levam ao aparecimento de esforços indesejados de flexão, o que vão prejudicar a veracidade do ensaio. Estes resultam do efeito de Poisson, pela constrição provocada na camada de adesivo pelos substratos quando existe uma diferença sensível de rigidez entre eles ou por desalinhamento (Figura 12) [2].

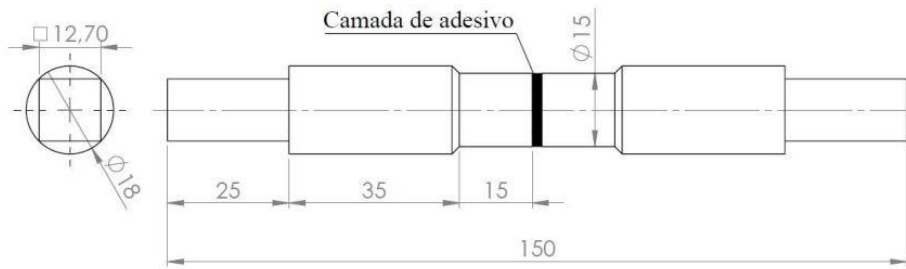


Figura 13 - Juntas tipo *butt joint* [7].

A determinação das propriedades à tração de um adesivo, podem ser executadas através do ensaio com provetes maciços (bulk) de acordo com o previsto na norma EN ISO 527-2. O maior problema neste tipo de ensaios, é conseguir a obtenção de provetes isentos de defeitos, sejam eles vazios ou porosidades. As propriedades dos adesivos são sensíveis ao modo como se apresentam, seja ele com forma maciça ou em forma de filme como falado anteriormente. Em provetes tipo bulk, a probabilidade de ocorrência de defeitos é maior, pelo que existe tendência na obtenção de propriedades mecânicas inferiores, o que pode não corresponder à realidade do adesivo. A sua forma tradicional é a de “osso de cão” (Figura 14).

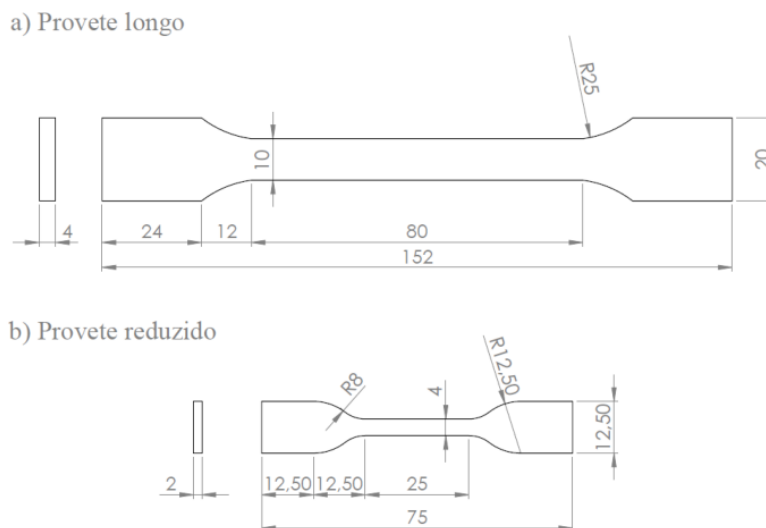


Figura 14 - Provete *bulk* [7]

Para os ensaios de tração, existem duas opções de provete: provetes longos a) e provetes curtos b). O critério de escolha neste tipo de casos prende-se com a rigidez do



adesivo em causa. Nos adesivos mais rígidos, as deformações são menores, pelo que o provete de maiores dimensões é o mais indicado [14].

Para além da utilização destes provetes para a determinação de propriedades à tração, estes também podem ser utilizados na determinação de propriedades ao corte e à compressão. O maior problema inerente a este tipo de provetes é a facilidade com que podem ocorrer defeitos como vazios ou porosidades. Estes defeitos podem acontecer aquando do fabrico dos provetes e ter a ver com a entrada de ar entre a zona do filme de adesivo e a base de molde. A progressão dos defeitos está também relacionada com o processo de cura (Figura 15).

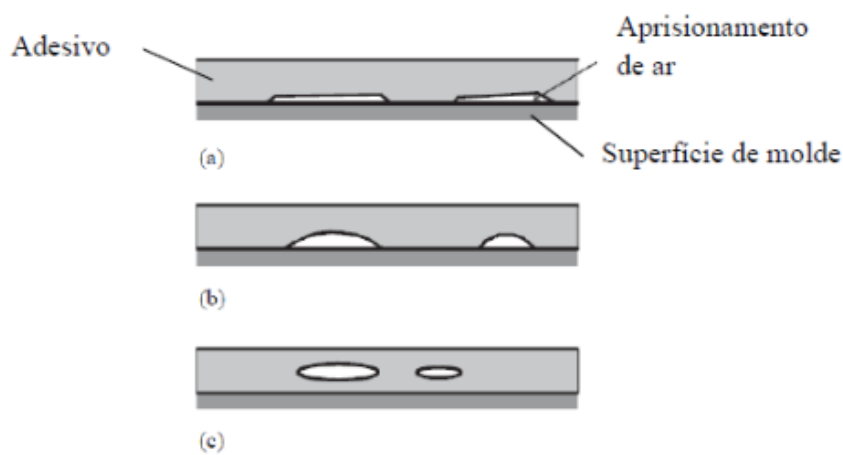


Figura 15 – Defeitos no fabrico de um provete [8]

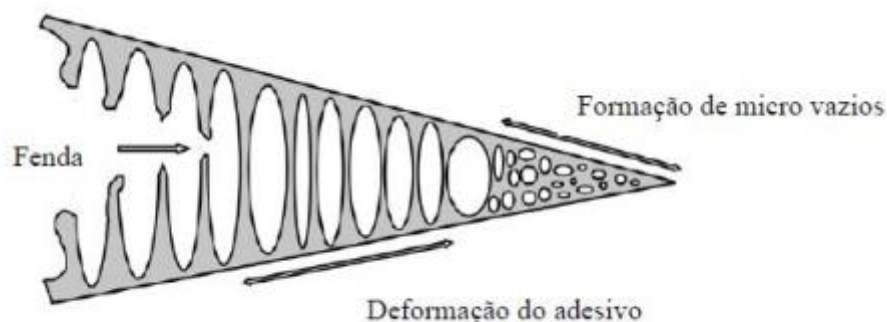


Figura 16 - Modo teórico de propagação da fenda [17]

A resistência dos provetes é então afeta pela diminuição da área, originando zonas que eventualmente podem comprometer a ocorrência da rotura. Quando sujeita à carga, a secção do provete deve comportar-se como na Figura 16.

Para este ensaio, é necessário o fabrico dos provetes *bulk*. Existem dois métodos normalmente utilizados, através da injeção do material em estado líquido num molde fechado, ou vazamento num molde aberto.

Quando se utiliza o molde, este é de material metálico, e apresenta três partes constituintes:

- Placa inferior;
- Placa intermédia;
- Placa superior.

A placa inferior serve de suporte ao conjunto do molde, a placa intermédia garante a geometria do provete segundo a norma e a placa superior permite fechar o molde. Esta última também possui orifícios que permitem que seja injetado o adesivo no estado líquido para o interior do molde (Figura 18).

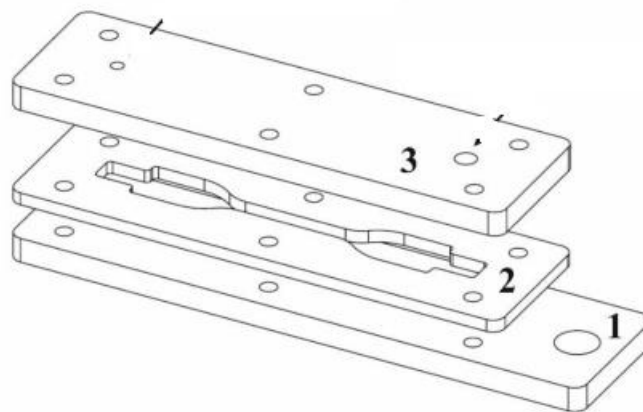


Figura 17 - Molde para fabrico de provete *bulk* [7]

No processo de moldação por vazamento, após a colocação da placa intermédia sobre a placa inferior, é vazado o adesivo de modo a preencher as cavidades da geometria de provete. Posteriormente é colocada a placa superior sobre esta de modo a conferir a forma final ao provete.



Figura 18 - Placa inferior de molde para vazamento [6]

Em relação ao fabrico de provetes, é de extrema importância a aplicação dos desmoldantes em todas as superfícies de molde, de forma a facilitar a remoção dos mesmo sem serem danificados.

Os procedimentos de um determinado ensaio devem, sempre que possível, seguir o protocolo descrito na norma aplicável. Estas enumeram as condições necessárias para a correta realização do ensaio, definindo os procedimentos, geometria de provetes, preparação de amostras, tratamento superficiais, velocidades de ensaios, entre outros.

Diversas normas são apresentadas para a caracterização de um adesivo à tração, neste caso pode-se enunciar a ASTM D987 e a EN ISO 527-2.

A temperatura e a humidade relativa têm forte influência no resultado e nas características mecânicas dos provetes. Este fator é mais importante quando o adesivo possui uma temperatura de transição vítrea próxima da temperatura de realização do ensaio. Assim os ensaios, segundo a norma, devem ser realizados a uma temperatura de 25°C e humidade relativa de 50%.

A máquina utilizada é uma prensa para ensaios mecânicos (Figura 19). Para a realização do ensaio, deve-se garantir que os provetes estão devidamente colocados, bem como o seu correto alinhamento.



Figura 19 - Equipamento de ensaio de tração [4]

Para a obtenção de medições corretas das tensões limite são necessários equipamentos de medição extremamente preciso, utiliza-se uma célula de carga que mede a força aplicada em cada instante. Esta célula de carga deve ter uma capacidade máxima superior ao valor esperado de rotura do provete.

Para avaliar as deformações longitudinais, especialmente nos adesivos flexíveis e dúcteis, é recomendado o uso de um extensómetro (Figura 20). Este é colocado no provete e é um equipamento que mede o deslocamento real do mesmo, pois não tem ligação à prensa de teste, o que elimina os eventuais erros de escorregamento que possam existir.

Concluído o ensaio e realizado o tratamento de dados, obtém-se uma curva idêntica à ilustrada na Figura 21, que é utilizada posteriormente na obtenção das propriedades mecânicas dos provetes. No ensaio de tração é possível obter o módulo de elasticidade, a tensão limite elástico, a tensão de rotura à tração e a deformação de rotura à tração [8].



Figura 20 - Extensómetros usados no ensaio de tração [7] a) Extensómetro mecânico b) Extensómetro ótico

Na obtenção do módulo de elasticidade, a norma EN ISO 527-2 recomenda que sejam selecionados dois pontos no gráfico tensão deformação (Figura 21), preferencialmente entre os 0,05% e os 0,25% de deformação, pelo facto de se tratar de um conjunto de valores coincidentes com a zona elástica dos provetes. A estes dois pontos selecionados no intervalo, correspondem dois valores de tensão de acordo com a curva do gráfico obtida. Estes serão usados no cálculo do módulo de Young ( $E$ ) expresso em MPa, através da equação (1):

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

Na equação anterior,  $\Delta\sigma$  representa a diferença de tensão aplicada entre os pontos 0,05% e 0,25% e  $\Delta\varepsilon$  a variação de deformação entre os pontos 0,05% e 0,25% [4].

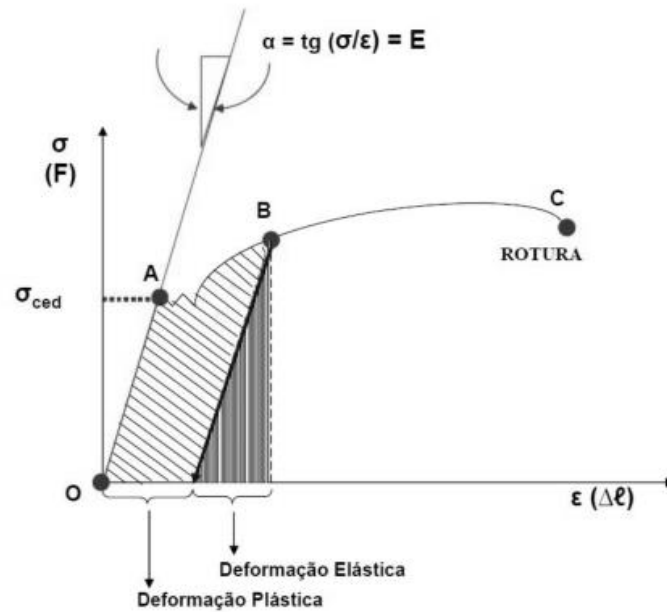


Figura 21 - Curva Tensão - Deformação [6]

É possível recorrer a outros métodos de obtenção do módulo de elasticidade, que não a equação referida, nomeadamente através da medição do declive de uma reta tangente ao segmento da reta OA iniciada na origem do gráfico e acima. Para alguns autores o cálculo da tensão limite de elasticidade não é linear, pois ao contrário dos aços, os polímeros não apresentam patamares de cedência na transição de regime elasto-plástico.

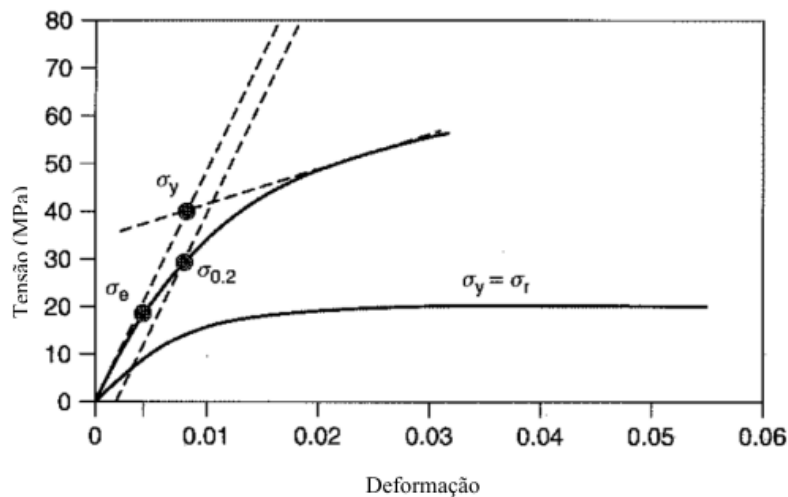


Figura 22 - Curva Tensão - Deformação de um adesivo dúctil [8]

Na presença de adesivo dúcteis, deve considerar-se a tensão limite de elasticidade como tensão de rotura. No caso de adesivo frágeis é utilizada a interseção de uma reta tangente na zona elástica do adesivo com uma tangente à zona plástica de modo a obter o valor da tensão limite de elasticidade (Figura 22).

### 2.2.2 Propriedades mecânicas ao corte

No geral as juntas adesivas são projetadas de modo que estejam solicitadas a esforços de corte, apresentando melhores características mecânicas a este tipo de esforços. Dentro da caracterização das propriedades ao corte, podem ser realizados ensaios com o adesivo em estado maciço ou ainda em camada fina como juntas adesivas. Existem ainda outro tipo de ensaios diferentes para determinar as propriedades ao corte das ligações adesivas, nomeadamente [9]:

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

De seguida ir-se-á falar mais ao pormenor dos ensaios de JSS e TAST, pois são os mais utilizados e de melhor aceitação.

#### **Ensaio em junta de sobreposição simples**

O ensaio com recurso a JSS é dos métodos mais utilizados pois é um método simples, as juntas são de fácil fabrico, apresenta baixo custo e pode ser feito com prensas de ensaios de tração. Este ensaio é regulamentado pela norma ASTM D1002, ISO 4587 ou outras. Neste ensaio efetuado num equipamento de tração, as juntas são presas ao equipamento pelos substratos, ao qual é aplicado uma força de tração (Figura 23). Este tipo de ensaio além da força de corte no adesivo, também é suscetível ao aparecimento de outro tipo de esforços como arrancamento, resultado do desalinhamento que possa ocorrer no fabrico da junta ou na colocação do provete no equipamento de teste [18].



Figura 23 - Junta adesiva de sobreposição [7]

### **Thick Adherend Shear Test (TAST)**

O ensaio TAST é dos mais populares ensaios de corte devido à facilidade com que se pode obter os provetes. Os principais parâmetros que se pode obter deste ensaio são: a tensão de corte em função da curva de tensão de corte até à rotura do adesivo,  $\tau_{m\grave{a}x}$ ,  $G$  e a deformação máxima de corte  $\gamma_{m\grave{a}x}$ . Os provetes utilizados para o ensaio TAST (Figura 24) são em aço, pois apresentam maior rigidez, o que permite que a rotura ou o esforço se dê na zona de ligação que é o adesivo. Tem também a particularidade de diminuir os esforços de arrancamento devido à sua configuração [2].

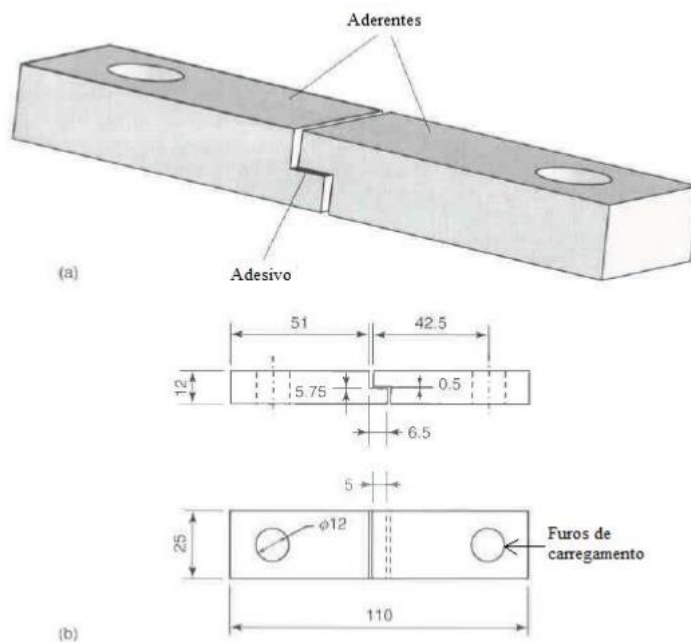


Figura 24 - Junta adesiva TAST [6]

O ensaio consiste em tracionar o provete através de furos de carregamento até a rotura. A junta adesiva é submetida a um esforço de corte devido à geometria dos aderentes. Para a realização deste ensaio utiliza-se uma máquina de ensaios universal. São



utilizados calços ou lâminas de geometria normalizada de modo a existir uma fixação ideal dos provetes [14].

Para a conceção das juntas, os substratos são sempre preparados de forma que exista uma ótima ligação entre as faces de contacto. Pelo que uma boa limpeza da superfície com acetona ou desengordurante, aplicação de granalhagem de modo a melhorar a qualidade da superfície, torna-se essencial para o fabrico destas juntas. Neste tipo de ensaio o esperado é que o modo de rotura seja sempre coesivo para a obtenção correta das propriedades [3].

### 2.2.3 Propriedades de fratura à tração e ao corte

Os critérios utilizados na determinação das energias da fratura baseiam-se no conceito de mecânica da fratura, que considera que todos os materiais possuem defeitos. Falhas, fendas, delaminação são exemplos das imperfeições que podem ser encontradas nos materiais, causados pelos próprios processos de fabrico ou por acidentes provocados durante a sua utilização [19].

A taxa limite de libertação de energia ou tenacidade à fratura  $G_c$  é um parâmetro essencial a determinar e também o mais utilizado. O modo de aplicação da solicitação desenvolve-se sob três modos distintos:

- Modo I, representa o modo de tração.
- Modo II e III, são modos de corte

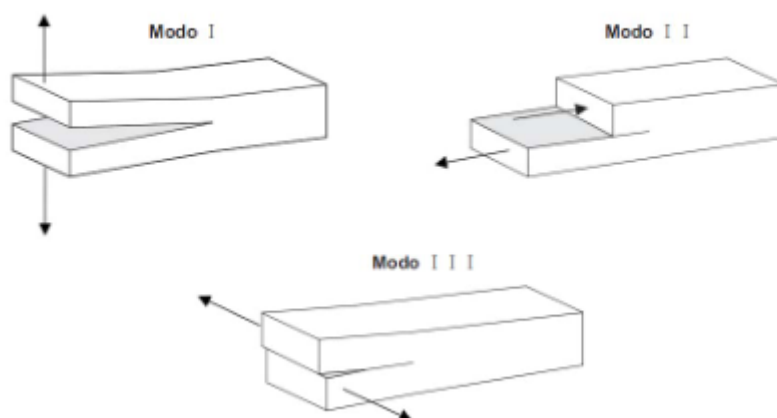


Figura 25 – Modos fundamentais de rotura em juntas adesivas [8]

Na maioria dos casos, o tipo de força ou carga aplicada à junta cria uma combinação de modos de crescimento da fenda, o que implica a utilização de critérios mistos.

A maior parte dos trabalhos realizados, utiliza o ensaio *Double-Cantilever Beam* (DCB) (Figura 26) para caracterizar a junta à fratura em modo I. Este é muito utilizado pela facilidade de produção da junta e à possibilidade de se obter com recursos à flexibilidade e cálculo analítico o comprimento de fenda utilizando a teoria das vigas. Durante este ensaio o provete é solicitado em abertura, onde é registada a carga  $P$  e o deslocamento  $\delta$  para os respetivos comprimentos de fenda  $a$ . O procedimento para o ensaio DCB está descrito na norma ASTM D3433 [6] [20].

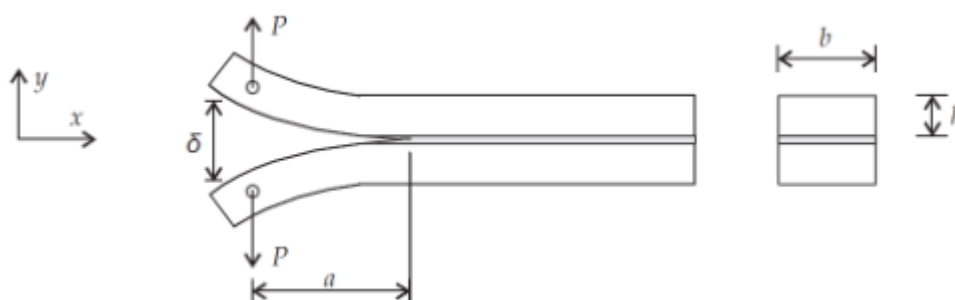


Figura 26 - Ensaio *Double-Cantilever Beam* [8]

Quando é necessário caracterizar o em adesivo em modo II, existem várias opções para o tipo de ensaio a usar. Entre elas o ensaio *End-Loaded Split* (ELS), o *Four-Point End-Notched Flexure* (4ENF) e o *End-Notched Flexure* (ENF) (Figura 27). Este último, será o utilizado pois comparativamente com os outros ensaios, apresenta uma maior simplicidade de realização. Para a sua realização o provete é constituído por duas barras de espessura uniforme coladas entre si, que contém uma fenda numa das extremidades. De seguida, o provete é apoiado nas extremidades e é aplicada uma carga a meio vão causando no adesivo um esforço de corte [2]. Este ensaio está descrito na norma ASTM 7905.

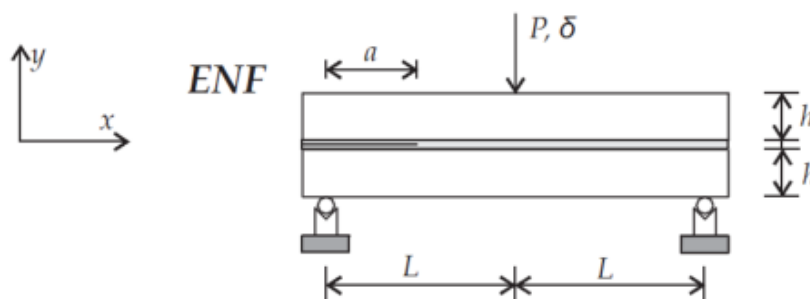


Figura 27 - Ensaio *End-Notched Flexure* [8]

## 2.3 Modificação de adesivos

Nos dias de hoje, os adesivos no geral apresentam formulas e componentes cada vez mais complexos. Estes componentes têm por função melhorar as propriedades dos adesivos para uma dada aplicação, sendo um dos grandes pontos de evolução possíveis. Muito poucos adesivos são usados sem possuírem algum tipo de aditivo na sua composição [21].

Os tipos de reforços a ser usados podem ser uma fibra ou uma partícula que, terão como objetivo, enaltecer e melhorar as propriedades mecânicas, elétricas, térmicas, entre outras, do material final. De acordo com o seu tamanho podem ser classificados:

- Nano partículas;
- Micropartículas;
- Macro partículas.

A seleção destes componentes a usar prendem-se essencialmente com os seguintes fatores:

- Propriedades finais;
- Processo de fabrico;
- Custos de produção.

### 2.3.1 Aditivação por partículas

A aditivação dos adesivos é utilizada para melhorar as características dos mesmos. O fabricante do adesivo seleciona os ingredientes dependo das características que quer que o adesivo possua no final do processo. Entre os constituintes podem-se destacar [14]:

- Aceleradores, inibidores e retardadores;
- Solventes;
- Diluentes;
- Distensores;
- Cargas (fillers);
- Suportes ou reforços;
- Plastificantes;
- Espessantes e agentes tixotrópicos;
- Antioxidantes.

Estas partículas quando adicionadas, tem por base melhorar as propriedades do adesivo para uma dada aplicação. Os distensores (*extenders*) são substâncias que possuem algumas propriedades dos adesivos e são adicionados para reduzir a concentração de outros componentes e o custo total da operação.

As cargas (*fillers*) são substâncias que, não tendo as mesmas propriedades dos adesivos, são adicionados de modo a melhorar determinadas propriedades do mesmo [22].

Estes aditivos podem ter duas classificações:

- Orgânicos;
- Inorgânicos ou minerais.

Como exemplos de cargas e suas ações podem-se destacar:

Tabela 2 - Exemplos melhoramentos *Fillers*

Filler	Melhoramento no adesivo
Óxido de alumínio	Retardador de chama
Mica	Resistência elétrica
Silicato de Alumina	Abrasão
Zinco	Resistência corrosão
Óxido de titânio	Cor
Fibra de Vidro	Agente tixotrópico

#### 2.3.1.1 Partículas minerais

As partículas minerais ou inorgânicas são aquelas que derivam diretamente da natureza, mas não são obtidas através de organismos vivos. São bastante utilizadas na aditivação de adesivos, pois têm vindo a ser provado, que a sua adição na quantidade certa traz benefícios às propriedades mecânicas do adesivo. [1]

De entre estas partículas podem-se indicar as seguintes [1]:

- Partículas à base de metais, a maior parte dos materiais da tabela periódica têm a possibilidade de serem usados como aditivos em adesivos, tendo como exemplo o óxido de zinco, óxido de titânio, etc. Tem sido também provado em estudo científicos, que as adições de pós metálicos aos adesivos melhoram a suas propriedades nomeadamente:
  - Condutividade e difusão térmica;
  - Rigidez da matriz;
  - Reduz as tensões internas nos processos de moldagem;
  - Melhoram a aparência final do produto;
  - Uniformização a espessura do adesivo.
- Partículas à base de dióxido de sílica  $SiO_2$ , é encontrado na natureza em forma cristalina e amorfa. Têm uma superfície porosa e de grande dimensão [23];
- Partículas de fibra de vidro; as partículas de fibra de vidro são usadas maioritariamente sobe duas formas, contínuas e descontínuas. Estas possuem as suas dimensões entre 1 e 40  $\mu m$ . Ao contrário das fibras de carbono, estas são isotrópicas, possuem as mesmas propriedades em todas as direções de carregamento a que são sujeitas. Tem a particularidade de terem baixa densidade, baixo custo, elevada resistência mecânica e ao impacto, elevada flexibilidade e baixa condutividade térmica.

#### 2.3.1.2 Partículas orgânicas

As partículas orgânicas, ao contrário das minerais, têm a sua origem na natureza e derivam de seres vivos. Têm também a função de melhorar as propriedades mecânicas quando adicionadas ao adesivo. Podem-se destacar as seguintes [1]:

- Celulose;
- Fibras de madeira;
- Algodão;
- Partículas de cortiça (Figura 28); este material abundante no nosso país é muitas vezes utilizadas como aditivo. As partículas têm dimensões compreendidas entre 1 e 50  $\mu m$ . A cortiça é leve, natural, versátil, inócua, flexível e consideravelmente permeável a líquidos. É muito usada nas áreas aeronáutica e automóvel como reforço de resistência à fratura.

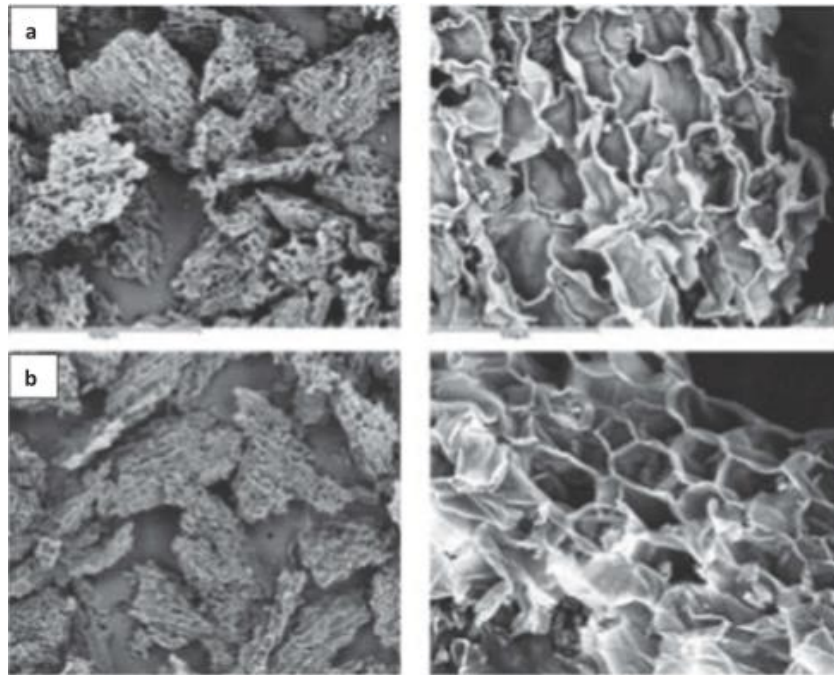


Figura 28 - Partículas de cortiça. a) Com tratamento superficial, b) sem tratamento superficial

### 2.3.2 Inclusão de microfibras

As microfibras são usadas majoritariamente no contexto de reforço estrutural da matriz do adesivo, conferem rigidez ao adesivo e à sua matriz. Relativamente a estes podem ser destacados:

- Materiais com reforço de carbono; podem ser usados como aditivo nano tubos de carbono, dentro destes são classificados quando aos seus diâmetros e disposição (podem ser aglomerados dois, 3 ou mais) (Figura 29).

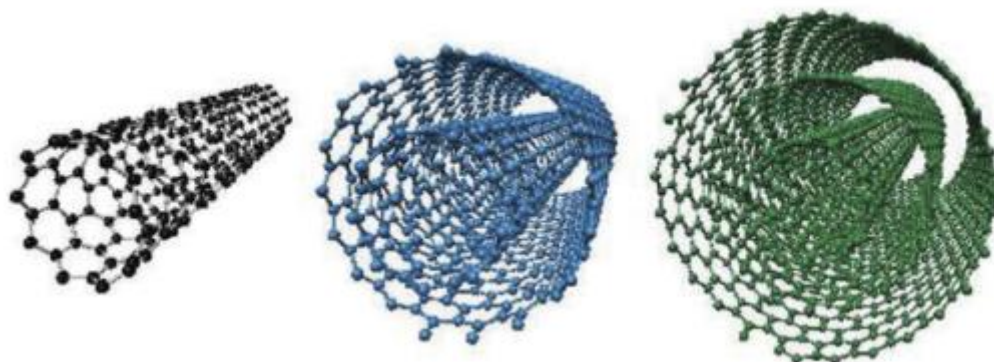


Figura 29-Matrizes de reforços nanotubos carbono [23]

- A fibra de vidro quando adicionada a um adesivo, vai melhorar as suas propriedades, mais concretamente a sua resistência à rotura coesiva do adesivo. Este fenómeno é favorável quando não existe a alteração de outras propriedades do adesivo. Pois é fundamental o melhoramento do mesmo sem prejudicar as outras propriedades relevantes para a aplicação [14] Existem vários estudos sobre as quantidades de aditivo a usar, segundo [24] a adição de fibras de vidro melhora a resistência do adesivo composto até cerca de 93,7%, consoante o peso de fibra adicionado. Neste caso na Figura 31, podem ser observadas as diferenças na tensão de resistência com diferentes percentagens de fibras adicionadas. O seu valor máximo é atingido quando a percentagem de fibras atinge os 50%, sendo que depois o valor da tensão começa gradualmente a diminuir [23].

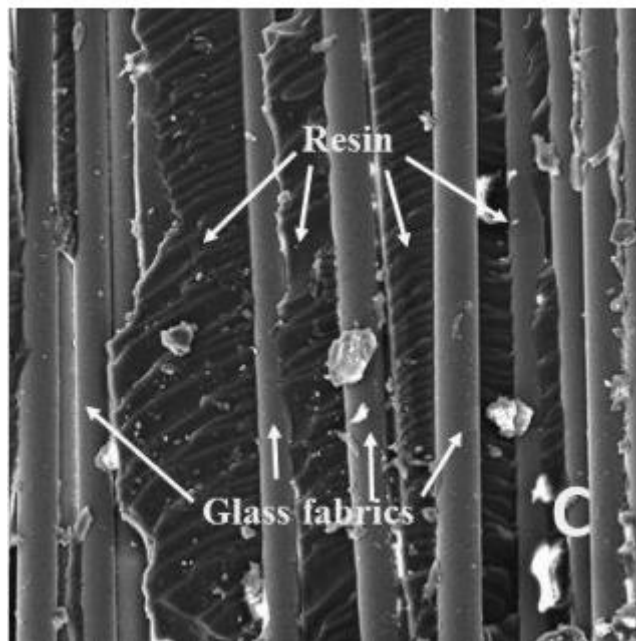


Figura 30 - Reforços Fibra de vidro [24]

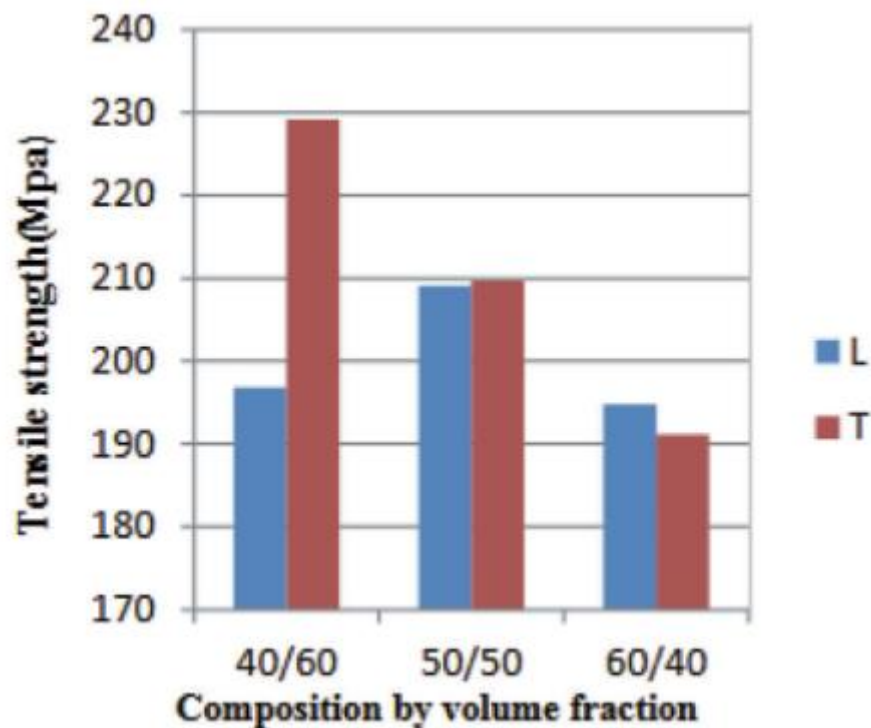


Figura 31 - Efeito das fibras de vidro na tensão de rotura de adesivos epóxicos [23]

### 2.3.3 Outros aditivos

Outro tipo de partículas que podem ser encontradas são as baseadas em polímeros.

- *TEPs, Thermally expandable particles*, são constituídas maioritariamente por microesferas que quando adicionadas ao adesivo expandem e aumentam o seu tamanho por ação do calor, sendo que tornam o adesivo mais macio, bem como aumentam a sua resistência mecânica. [23].
- Partículas de borracha, são feitas normalmente a partir de elastómeros vulcanizados. Usam-se maioritariamente, para aumentar a sua resistência sem alterar as restantes propriedades. Utilizam-se também em aplicações que requerem altas resistências ao impacto. [23]



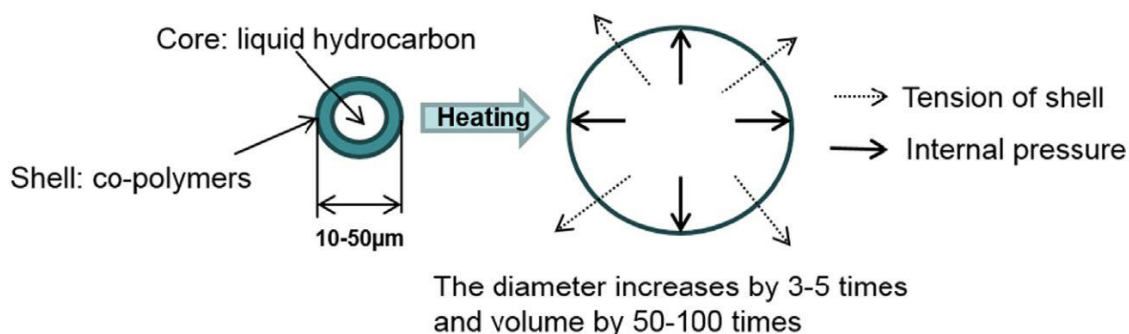


Figura 32- Método de expansão TEPS [23]

De seguida realizou-se uma pesquisa sobre o estado de arte atual em relação à aditivação de adesivos. Pode ser encontrado um pequeno resumo na Tabela 3

Tabela 3 - Resumo estado de arte

Títulos e Autores	Destaques de Artigos
<p>“Glass fiber reinforced composites of phenolic–urea–Epoxy” M.M. Raj; L.M. Raj; P.N. Dave [25]</p>	<p>O trabalho demonstrado no artigo prende-se com a tentativa de modificação de uma resina epóxida convencional através da adição de quatro tipos diferentes de oligómeros à base de matrizes de resina fenólica-ureia. Os aditivos foram criados através de técnicas de policondensação, e analisados por estudo de espectro (infravermelhos) e outro tipo de testes de modo a serem conhecidas as propriedades. Durante a pesquisa, os materiais foram testados de modo a determinar as suas propriedades mecânicas, químicas e estabilidade térmica. Concluiu-se que as adições destes componentes criaram um polímero com melhores propriedades mecânicas e melhor estabilidade térmica.</p>
<p>“Performance improvement by glass fiber of adhesively bonded metal joints” C.S. Bang, J.G. Kim, D.G. Lee [26]</p>	<p>Este estudo tem como objetivo determinar a eficácia da adição de partículas de fibra de vidro a juntas adesivas metálicas a temperaturas criogénicas. Foram feitas juntas de sobreposição simples e testadas a uma temperatura de -150°C. Além do estudo da adição de fibras de vidro, também se estudou o efeito da espessura do adesivo. Concluiu-se que a resistência da junta depende fortemente do tratamento superficial do substrato, da espessura do adesivo e do aditivo. Às temperaturas em causa, as</p>

---

adições de fibras de vidro aumentaram significativamente a resistência da junta bem como a tenacidade da mesma quando analisadas em comparação com juntas da mesma espessura de adesivo.

---

“Optimum glass fiber volume fraction in the adhesive for the Al-SUS”

C.S. Bang, C.H. Park, D.G. Lee [27]

---

Este estudo tem como objetivo o estudo da percentagem ideal de fibras de vidro adicionadas a um adesivo de modo a melhorar as suas propriedades. Foram realizados ensaios com juntas de sobreposição simples de Al-SUS à temperatura de  $-150^{\circ}\text{C}$ . As fibras de vidro foram orientadas de forma aleatória. Concluiu-se que para uma espessura de adesivo de 0.5mm e 1mm a percentagem ideal de fibras de vidro é de 15%. Observaram um aumento de 27,5% na tenacidade e resistência da junta.

---

“Influence of Preformed Adherent Angle and Reinforcing Glass Fiber on tensile strength of Hybrid Adhesive Bond”

V. Kolář, M. Müller, et al. [24]

---

Este estudo visa a determinação da influência da adição de fibras de vidro a um adesivo, bem como o ângulo da colagem entre os aderentes. Foram utilizadas juntas com ângulos entre os aderentes de  $5^{\circ}$ ,  $10^{\circ}$ ,  $15^{\circ}$ ,  $20^{\circ}$ . Em relação às fibras de vidro, têm concentrações de 80, 110 e  $116 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ . Concluiu-se que a tensão de rotura do adesivo é influenciada quer pelo ângulo, quer pela adição de fibras de vidro. O maior aumento verificou-se com uma junta com um ângulo de  $5^{\circ}$  e  $80 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  com um valor de 48,5% de aumento na tensão de rotura quando comparado com um adesivo sem modificação. Verificou-se que no geral, a adição de fibra de vidro melhorou significativamente as propriedades mecânicas do adesivo.

---

# 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 de modo misto em JSS



## 3 DESENVOLVIMENTO

### 3.1 Materiais utilizados

Neste capítulo descrevem-se os materiais a utilizar no trabalho experimental, sendo que serão descritos os materiais dos aderentes, compósito de matriz polimérica reforçada com fibra de carbono, o adesivo SikaForce® 803 L45 e as fibras de vidro de reforço usadas no estudo do adesivo.

#### 3.1.1 Aderentes

Os aderentes utilizados na execução deste trabalho experimental foram construídos através de material compósito com matriz polimérica de resina epóxida reforçada com fibra de carbono. Este material foi fornecido na forma de pré-impregnado unidirecional (SEAL® Texipreg HS 160 RM), em que as fibras já foram impregnadas em resina. Este material foi o utilizado para o fabrico dos aderentes, pois após uma primeira série de ensaios com aderentes de alumínio e aço constatou-se que o adesivo não possuía boa aderência a materiais metálicos, sendo o indicado um compósito ou polímero. Na Tabela 4 apresentam-se as propriedades elásticas ortotrópicas do compósito.

Tabela 4 - Propriedades das placas de carbono-epóxido [28]

Propriedades	Valores
$E_x$ [MPa]	1,09E+0,5
$E_y$ [MPa]	8819
$E_{xy}$ [MPa]	8819
$\nu_{xy}$	0,342
$\nu_{xz}$	0,342
$\nu_{yz}$	0,380
$G_{xy}$ [MPa]	4315
$G_{xz}$ [MPa]	4315
$G_{yz}$ [MPa]	3200

### 3.1.2 Adesivo

Este capítulo descreve o adesivo em estudo neste trabalho. O adesivo é o SikaForce® 803 L45 (Figura 33). Este é um adesivo fabricado pela SIKA, do tipo estrutural, bastante dúctil, à base de poliuretano e que apresenta dois constituintes (a resina e o endurecedor). É um adesivo que se encontra na forma de pasta tixotrópica e cura à temperatura ambiente, pelo que se torna útil para um elevado número de aplicações. Este adesivo é aconselhado para a ligação de grandes peças de compósitos e metais sujeitos a tratamentos superficiais devido à sua estabilidade de propriedades numa gama alargada de temperaturas. Este é disponibilizado sob a forma de cartuchos e aplicado manualmente através de uma pistola (Figura 34).

A nível de benefícios de produto podem-se destacar os seguintes:

- Combina propriedades estruturais e flexibilidade;
- As propriedades mecânicas mantêm-se ao longo de uma gama de temperaturas elevadas;
- Tem um tempo de cura relativamente rápido, que pode ser acelerado com temperatura;
- Apresenta excelente compressibilidade.



Figura 33 - Recipiente em bisnaga do adesivo SikaForce® 803



Figura 34 – Pistola de aplicação [29]

O adesivo em estudo é usado nas mais diversas indústrias, tais como aeronáutica, automóvel, entre outras, onde são necessárias aplicações que requeiram elevada resistência e flexibilidade. Na Tabela 5 podem-se observar algumas propriedades do adesivo.

Tabela 5 - Propriedades do Adesivo SikaForce® 803 (retirado da ficha técnica do adesivo em anexo)

Propriedades do Adesivo	
Propriedades	Valores
Módulo de elasticidade, $E$ [MPa]	19,09±0,43
Módulo de elasticidade transversal, $G$ [MPa]	3,26±0,95
Tensão de cedência à tração, $\sigma_y$ [MPa]	1,73±0,32
Tensão de rotura à tração, $\sigma_f$ [MPa]	7,95±0,24
Deformação de rotura à tração, $\epsilon_f$ [%]	173,00±8,00
Tensão de cedência ao corte, $\tau_y$ [MPa]	2,47±0,51
Tensão de rotura ao corte, $\tau_f$ [MPa]	4,84±1,04
Tenacidade à tração, $G_{IC}$ [N/mm]	0,683±0,12
Tenacidade ao corte, $G_{IIC}$ [N/mm]	16,79±0,00

### 3.1.3 Fibras de vidro de reforço

As fibras de vidro são fornecidas sob dois tipos de especificação: fibras descontínuas e fibras contínuas. No caso foram usadas fibras contínuas em forma de tubo. Estas são adequadas para uma ampla gama de aplicações, onde combinadas com um adesivo ou outro material reforçam a sua estrutura e permitem alterar as propriedades do mesmo. As fibras de vidro apresentam muito boa capacidade de fluir no material ao qual se vão ligar. No caso em concreto desta dissertação, usaram-se filamentos de fibra de vidro da marca Lanxess®, com cerca de 210  $\mu\text{m}$  de comprimento nominal e 14  $\mu\text{m}$  de diâmetro do filamento (Figura 35).



Figura 35 - Filamentos de fibra de vidro

De notar que este tipo de material é regulado pela norma DIN 1259, e deve ser guardado num local com baixa temperatura e uma humidade relativa na entre 50% e 70%.

### 3.1.4 Preparação do adesivo reforçado

Para a preparação do adesivo reforçado foram necessários seguir certos procedimentos. Para a presente dissertação foram sempre usadas quatro concentrações diferentes de adesivo, sendo uma delas sem aditivação de fibras e três delas com aditivação de fibras. As percentagens usadas em teste foram de 15 GF (*glass fiber*) phr (*per hunder resin*), 35 phr e 55 phr.

Para este efeito, foi usada uma balança de precisão para pesar as quantidades de adesivo e fibras de vidro. Para cada concentração, a quantidade feita foi sempre de 50g total entre adesivo e fibras. Para o procedimento em causa, foi usada uma balança de precisão, um copo de plástico para efetuar as misturas, uma espátula para misturar e aplicar o adesivo aditivado nos provetes ou moldes. Com este cuidado, garantiram-se sempre que o adesivo estava em perfeitas condições e misturado nas proporções



corretas. Na Figura 36 pode ser observado um exemplo da adição de fibras de vidro ao adesivo em estudo.

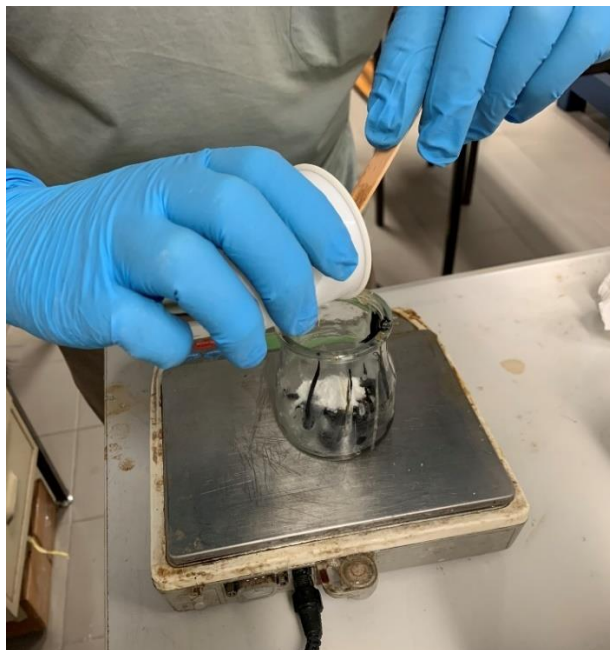


Figura 36 - Adição de fibras ao adesivo

No capítulo 4 descreve-se com maior pormenor todos os passos a seguir para a preparação do adesivo aditivado.

### 3.2 Ensaios mecânicos à tração

Neste capítulo são abordados os ensaios à tração realizados. Os ensaios de tração foram feitos em provetes de adesivo maciço, denominados ensaios *Bulk*, e também foram feitos ensaios ao adesivo através de juntas simples de sobreposição.

Os ensaios de tração foram efetuados na máquina universal de ensaios Shimadzu Autograph AG-X 100 (Figura 19), que se encontra no Laboratório de Ensaios Mecânicos do ISEP, auxiliada pelo *software* TRAZPEZIUM X que controla e regista os dados dos ensaios. Esta máquina possui uma célula de carga de 100 kN. Este equipamento possui diferentes acessórios ou amarras para solicitar os provetes. Para a realização dos ensaios de tração, neste trabalho experimental foram utilizadas as amarras em forma de cunha, as quais são fornecidas pelo fabricante do equipamento, de modo a ser possível a fixação dos provetes durante o ensaio. O perfil de fabrico destas amarras permite evitar

o escorregamento do provete durante o ensaio, o que inviabilizaria os resultados obtidos nesse teste.

### 3.2.1 Fabrico dos provetes

Para o processo de fabrico dos provetes de adesivo maciço (*Bulk*), recorreu-se a um molde desenvolvido por Pinto [8], apresentado na Figura 38. Com este molde é possível obter provetes para determinação das propriedades mecânicas à tração baseados na norma Francesa NF T 76-142. Esta norma dita as dimensões dos provetes apresentados na Figura 37.

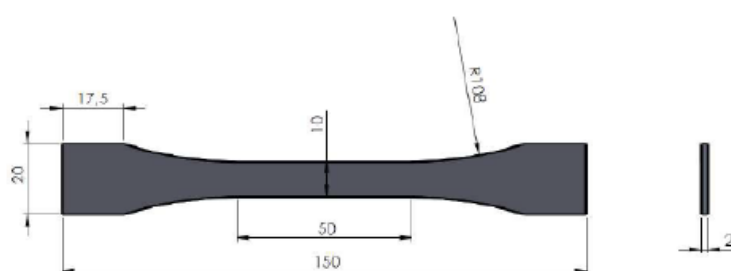


Figura 37 – Dimensões dos provetes de adesivo maciço [6]



Figura 38 – Moldes para criação de provetes *Bulk*

Para uma maior facilidade de conceção, o molde possui uma placa intermédia com a forma dos provetes a obter, como se mostra na Figura 39. Para o seu fabrico foi utilizada uma máquina de corte laser, de modo a garantir que não ficariam arestas vivas no interior e que pudessem prejudicar a geometria dos provetes. Esta placa tem como vantagem a possibilidade de se poder fabricar até seis provetes de uma vez, numa única moldação, sendo que também possível o fabrico de provetes de vários tipos de adesivos. Neste caso há a possibilidade de fabricar provetes, por exemplo, dois de um adesivo e quatro de outro, três de dois adesivos diferentes, entre outras configurações possíveis.

No caso do trabalho experimental abordado na presente dissertação existia a possibilidade do fabrico de mais do que um provete com diferentes concentrações de aditivo de fibra de vidro de uma só vez.



Figura 39 – Placa intermédia do molde

Para se proceder a uma correta desmoldagem dos provetes após a cura do adesivo, é necessária a realização de procedimentos de preparação para o molde. Estes procedimentos visam evitar danificar nos provetes aquando da sua extração, evitando a adesão do adesivo ao molde. Iniciou-se a limpeza do molde com papel e acetona. O papel é embebido na acetona e limpa-se o molde, como processo passivo químico, de modo a retirar impurezas e gorduras nas superfícies do molde em contacto com o adesivo. Este procedimento é efetuado nas duas placas do molde, na placa intermédia e em todas as ranhuras e orifícios das mesmas. Com esta limpeza inicial pretende-se facilitar posteriormente a aplicação do desmoldante às superfícies do molde (Figura 40).



Figura 40 – Limpeza com acetona do molde

Após finalizado o procedimento descrito anteriormente, o molde foi colocado num forno a 80°C durante 15 min (Figura 41). Este aquecimento permite uma melhor adesão à superfície por parte do desmoldante, conforme a especificação na ficha técnica. O desmoldante usado foi o Loctite Frekote® 770-NC (Figura 42).



Figura 41 – Forno

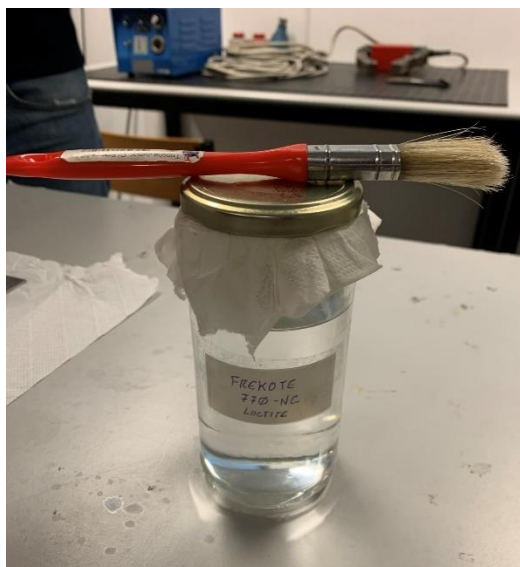


Figura 42 - Desmoldante Loctite Frekote® 770-NC

Findo o processo de aquecimento do molde, as placas foram retiradas do forno e iniciou-se a aplicação do desmoldante em todas as superfícies em contacto com o adesivo. Durante esta aplicação, teve-se especial atenção em cobrir todas as ranhuras e orifícios da placa intermédia (Figura 44) e das placas do molde (Figura 43), sendo esta etapa repetida 3 vezes de modo a garantir a aplicação de uma camada com espessura

suficiente para impedir a adesão do adesivo. Para auxílio da aplicação do desmoldante, foi utilizado um pincel.

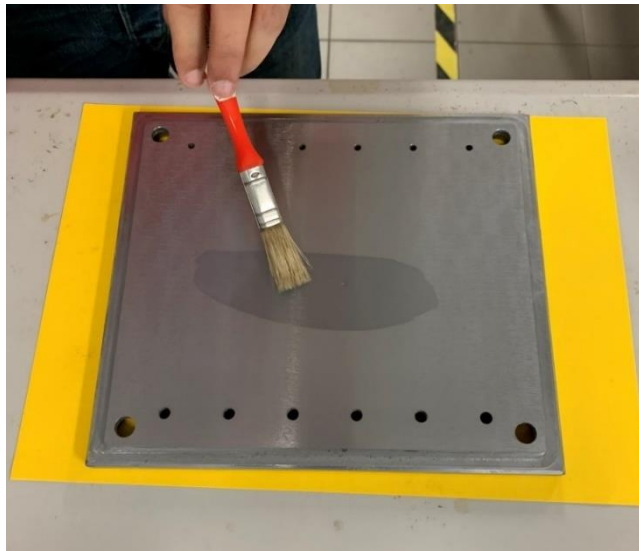


Figura 43 – Aplicação de desmoldante nas placas externas



Figura 44 – Aplicação de desmoldante na placa intermédia/matriz

Após a aplicação do desmoldante, e enquanto o molde está a arrefecer, deu-se início à preparação do adesivo para o enchimento do molde. Esta etapa consiste na mistura do componente do adesivo composto pelo polioliol (A) e o componente composto pelo isocianato (B). Para este efeito, foi calculada a proporção de 1,025, ou seja, para cada 102,5 g do componente A serão usados 100 g do componente B. Para o molde usado

previu-se que seria necessária uma quantidade de 100 g de adesivo. Com auxílio de uma balança digital pesou-se o adesivo dentro de um copo de plástico nas proporções corretas para a dosagem prevista, como apresentado na Figura 45. Misturaram-se então os dois componentes de forma a ficar uma mistura homogênea que irá garantir que as propriedades do adesivo sejam as esperadas (Figura 46).



Figura 45 - Adição do adesivo para pesagem



Figura 46 - Adição de fibra de vidro ao adesivo



Este processo foi repetido para todas as concentrações de fibra de vidro usadas e descritas na Tabela 6. Além dos provetes *Bulk*, estas concentrações e preparação de adesivo foram usadas em todos os ensaios de caracterização do adesivo abordados.

Tabela 6 - Valores concentração de fibras de vidro

Concentrações	<i>phr (per hundred resin) <math>\mu</math>-FV</i>	% Fibras de Vidro
1°	0	0
2°	15	13
3°	35	25.9
4°	55	35.5

De seguida, a placa intermédia foi fixada ao molde através de parafusos. Isto permite que não existam oscilações e mudanças de posição aquando da aplicação do adesivo no molde. O adesivo SikaForce® 803 é fornecido em bisnaga, pelo que a aplicação do mesmo terá de ser efetuada por moldação em molde aberto com recurso a uma espátula, nos casos em que exista adição de fibra de vidro (Figura 47). No caso dos provetes que não tinham qualquer quantidade de aditivo, esta poderia ser efetuada através de uma pistola de aplicação diretamente do recipiente fornecido pelo fabricante. É de extrema importância o correto preenchimento de todas as cavidades de molde, de forma a garantir um correto enchimento e a prevenção do aparecimento de defeitos internos que possam eventualmente surgir (Figura 47, Figura 48).



Figura 47 - Aplicação do adesivo ao molde



Figura 48 - Adesivo totalmente aplicado

Após o término da aplicação do adesivo e compactação do mesmo, foi colocada a placa superior e procedeu-se ao aperto do molde. Este procedimento permite que o excesso de adesivo seja expulso através dos respiros (Figura 49).



Figura 49 - Fecho do molde para a cura



Os provetes foram curados no molde à temperatura ambiente. Após concluído este processo, procedeu-se à abertura do molde (Figura 50). Verificou-se que os provetes maciços apresentavam um bom acabamento a nível superficial, não existindo defeitos visíveis a olho nu. De seguida eliminaram-se as rebarbas dos provetes com recurso a um x-acto, e preparam-se os provetes para serem testados através da marcação dos mesmos de modo a serem identificados.



Figura 50 - Abertura do molde com adesivo curado

### 3.2.2 Ensaio dos provetes

Para a fixação dos provetes ao equipamento de ensaios, foram utilizadas amarras de cunha. Este formato de amarras garante que o escorregamento dos provetes durante os ensaios seja minimizado (Figura 51).



Figura 51 - Amarra do equipamento de ensaios mecânicos

Para uma correta medição das deformações longitudinais em cada provete, foi utilizado um extensômetro mecânico. Este equipamento permite medir as deformações reais sofridas pelo provete entre 2 pontos pré-definidos. Em relação aos provetes, estes foram identificados, como referido anteriormente, com auxílio de uma caneta de tinta permanente, de forma a permitir a sua identificação no final dos ensaios. Foram também medidas as larguras ( $b$  em mm) e espessuras reais ( $t$  em mm) para posterior tratamento dos dados. Para isso efetuaram-se 3 medições de cada parâmetro descritas nas Tabela 7 até Tabela 10.

Tabela 7 - Dimensões Provetes 0

GF phr		Provetes			
		b (mm)	Média	t (mm)	Média
0	1	9,98	9,98	2,03	2,03
		10,02		2,03	
		9,95		2,03	
	2	10,01	10,03	2,03	2,03
		10,03		2,03	
		10,05		2,02	
	3	10,03	10,02	2,02	2,02
		10,01		2,03	
		10,01		2,02	

Tabela 8 - Dimensões Provetes 15

GF phr		Provetes			
		b (mm)	Média	t (mm)	Média
15	1	9,98	9,98	2,03	2,03
		10,02		2,03	
		9,95		2,03	
	2	10,01	10,03	2,03	2,03
		10,03		2,03	
		10,05		2,02	
	3	10,03	10,02	2,02	2,02
		10,01		2,03	
		10,01		2,02	

Tabela 9 - Dimensões Provetes 35

GF phr		Provetes			
		b (mm)	Média	t (mm)	Média
35	1	9,99	9,96	2,06	2,06
		9,97		2,07	
		9,94		2,06	
	2	10,06	9,99	2,12	2,12
		9,97		2,11	
		9,96		2,12	
	3	9,99	9,99	2,1	2,1
		9,98		2,1	
		9,99		2,1	

Tabela 10 - Dimensões provetes 55

GF phr		Provetes			
		b (mm)	Média	t (mm)	Média
55	1	10,12	10,12	2,22	2,22
		10,13		2,22	
		10,12		2,22	
	2	10,01	9,98	2,13	2,12
		9,97		2,12	
		9,98		2,11	
	3	10,02	10,03	2,01	2,01
		10,03		2,01	
		10,05		2,01	

Os ensaios com provetes tipo *bulk*, assim como os restantes ensaios, foram realizados à temperatura ambiente. Com este procedimento, consegue-se a uniformização das condições dos ensaios, de modo a obter os melhores dados possíveis para o cálculo das propriedades do adesivo com diferentes concentrações.

Iniciou-se o processo com a calibração do equipamento e de forma a considerar um valor igual a zero no início de cada ensaio com a medição de cerca de 115 mm de distância entre amarras, sendo este o valor zero de retorno do equipamento. De igual

forma colocou-se o extensómetro na zona útil de medição do provete (zona central) para efetuar as medições de deformação (Figura 52).



Figura 52 – Setup do ensaio com extensómetro mecânico

Na realização dos ensaios foram sempre adotadas duas velocidades de ensaio. Primeiro utilizou-se a velocidade de 2 mm/min, para a obtenção do valor  $E$ , e a segunda velocidade, após remoção do extensómetro, tem o valor de 50 mm/min. A primeira velocidade foi usada até cerca de 3 mm de extensão obtidos através do extensómetro, sendo que a segunda foi até a rotura do provete. Em todos os ensaios realizados, foi utilizada uma pré-carga de forma a garantir o alinhamento correto dos provetes.

O extensómetro (Figura 53) foi sempre retirado até ao valor de 3 mm de deformação (como referido anteriormente). Isto deve-se ao facto de ser um equipamento de elevado custo e que poderia ficar danificado com a rotura do provete, aquando da elevada extensão e da rotura abrupta do provete. O valor de referência do extensómetro utilizado foi de  $l_e=50$  mm.



Figura 53 - Extensómetro mecânico

Os provetes foram todos solicitados até a ocorrência de rotura dos mesmos. Verificou-se que foi necessário aplicar um grande deslocamento na máquina (Figura 54), devido às propriedades do adesivo, sendo que os provetes apresentam uma flexibilidade bastante pronunciada, mesmo no caso das concentrações de fibra de vidro mais elevadas. Este facto fez com que o tempo de cada ensaio fosse elevado.



Figura 54 - Provette durante o ensaio momentos antes da rotura

Finalizados todos os ensaios, procedeu-se ao tratamento dos dados recolhidos através de uma folha de cálculo em Excel®. Esta folha permite calcular as diferentes propriedades mecânicas obtidas através dos dados dos ensaios, de forma a ser possível a caracterização da influência das fibras de vidro no adesivo.

### 3.2.3 Resultados

Para a determinação das propriedades mecânicas à tração, utilizou-se como base a norma EN ISO 527-2. O valor de  $E$  é obtido através da seleção no gráfico de dois valores de tensão referentes à deformação de 0,05% e 0,25%. A equação (1) foi utilizada para a determinação do módulo de Young.

A tensão limite elástico obtém-se através de uma reta paralela à curva de proporcionalidade para uma deformação de 0,2%. A interseção da reta com a curva de tensão-deformação da origem ao valor da tensão limite elástico.

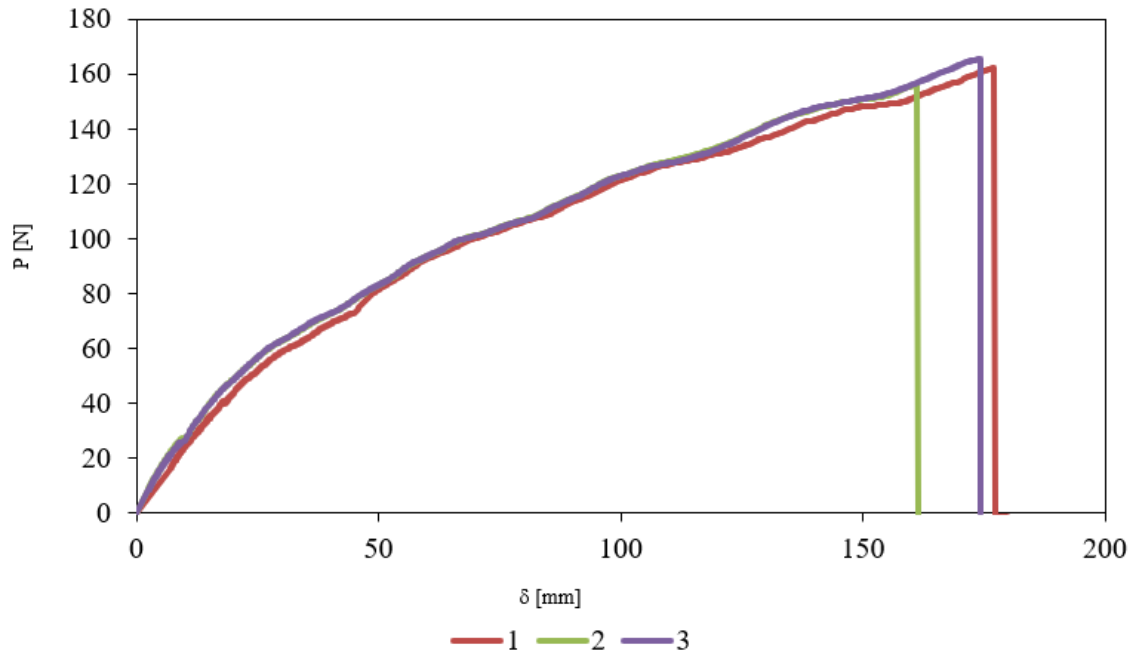
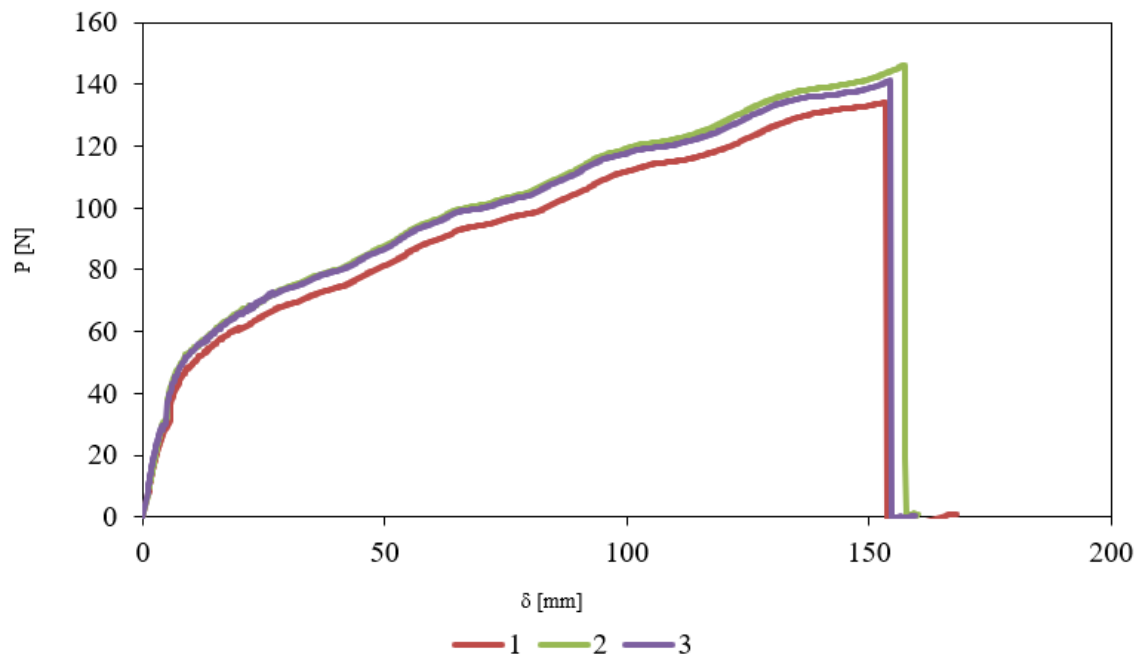
A tensão de rotura é calculada pelo quociente entre a força máxima e a secção transversal do provete, através da equação (2):

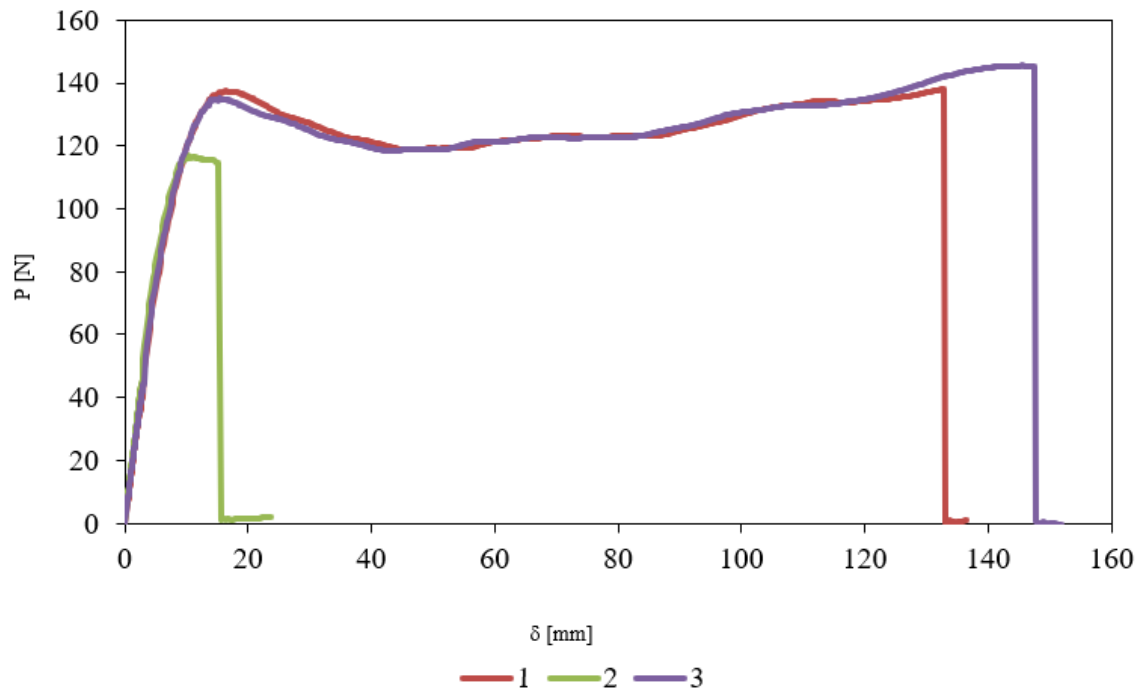
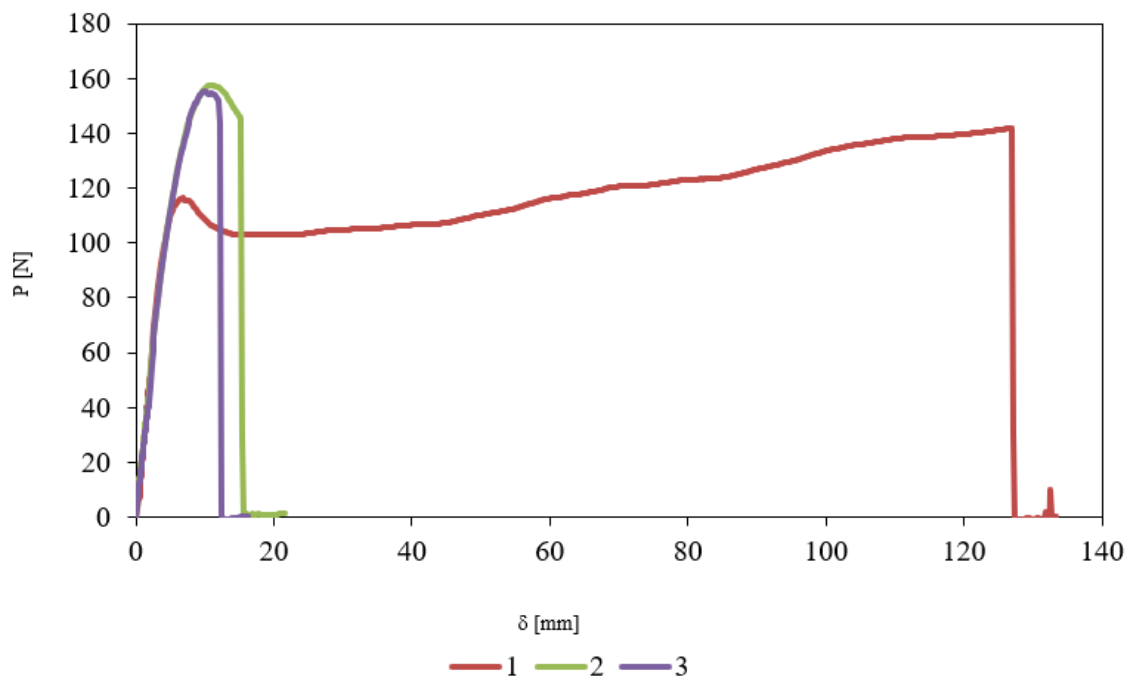
$$\sigma = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A}, \quad (2)$$

onde o valor de  $P_{m\acute{a}x}$  [N] corresponde ao valor máximo da força aplicada e  $A$  [mm<sup>2</sup>] ao valor da área da secção inicial do provete.

Com os dados fornecidos pelo *software* TRAPEZIUM X, foi possível efetuar a análise dos mesmo e conseqüentemente a obtenção das curvas  $P$ - $\delta$  e das curvas  $\sigma$ - $\epsilon$ . Aquando da remoção do extensómetro verifica-se um pequeno decréscimo no valor da força em cada ensaio, efeito que é normal acontecer e que foi tido em conta na construção das curvas.

Das Figura 55 à Figura 58, podem ser observadas as curvas  $P$ - $\delta$  dos provetes ensaiados. Estas curvas estão agrupadas por concentração de fibras de vidro. No eixo das abcissas são representados os valores de  $\delta$  e no eixo das ordenadas os valores de  $P$ . Os números da legenda correspondem ao número de identificação de cada provete ensaiado.

Figura 55 – Curvas  $P$ - $\delta$  para concentração 0 GF phrFigura 56 – Curvas  $P$ - $\delta$  para concentração 15 GF phr

Figura 57 – Curvas  $P-\delta$  para concentração 35 GF phrFigura 58 – Curvas  $P-\delta$  para concentração 55 GF phr



Pela análise das curvas  $P-\delta$ , pode-se observar que para a concentração de 0 GF phr e 15 GF phr todos os provetes tiveram comportamentos idênticos. Isto permite concluir que não existiram defeitos de fabricação ou erros de ensaio que alterassem os dados significativamente. Em relação às curvas  $P-\delta$  para a concentração de 35 GF phr, obteve-se no provete 2 um valor de deslocamento e força bastante inferior, sendo que o ensaio terminou mais cedo. Isto deveu-se a um escorregamento no aperto da amarra o que fez com que o provete se soltasse. Em relação às curvas  $P-\delta$  com uma concentração de 55 GF phr, é possível verificar que dois dos provetes tiveram ruptura prematuras. Devido a alta concentração de fibras e possível dificuldade de mistura e cura os provetes apresentavam defeitos interiores como vazios, resultando numa ruptura quase imediata.

Posteriormente foram calculadas as curvas  $\sigma-\epsilon$  para cada concentração. Com estas foi possível obter as propriedades do adesivo (Figura 59 até Figura 62).

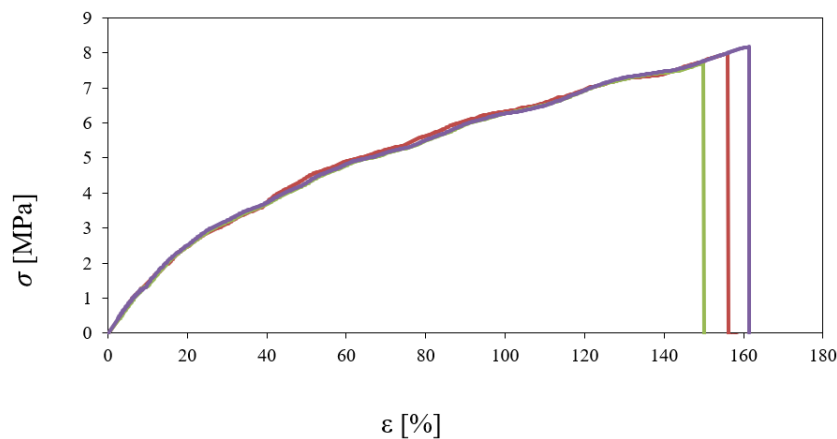


Figura 59 – Curvas  $\sigma-\epsilon$  para concentração 0 GF phr

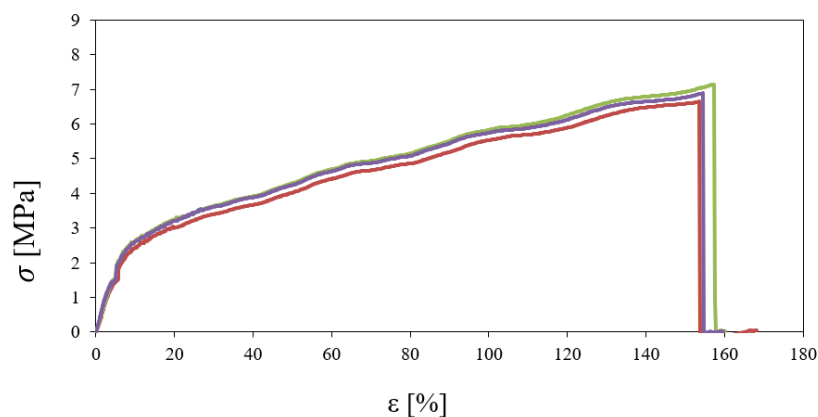
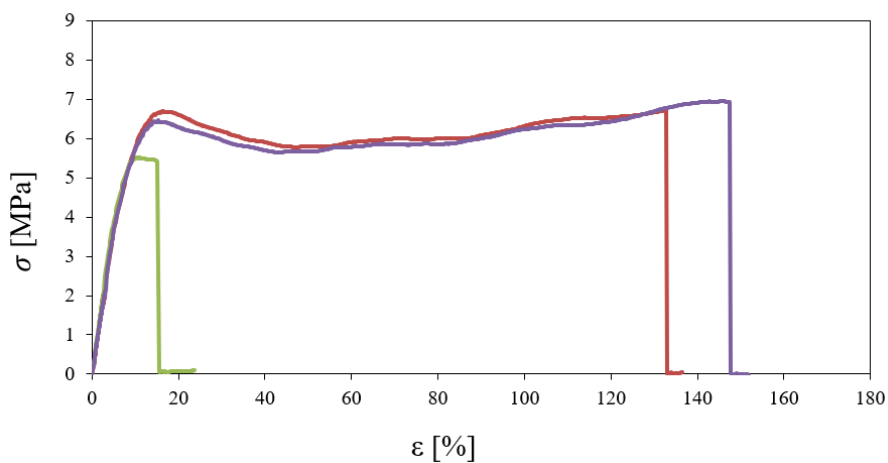
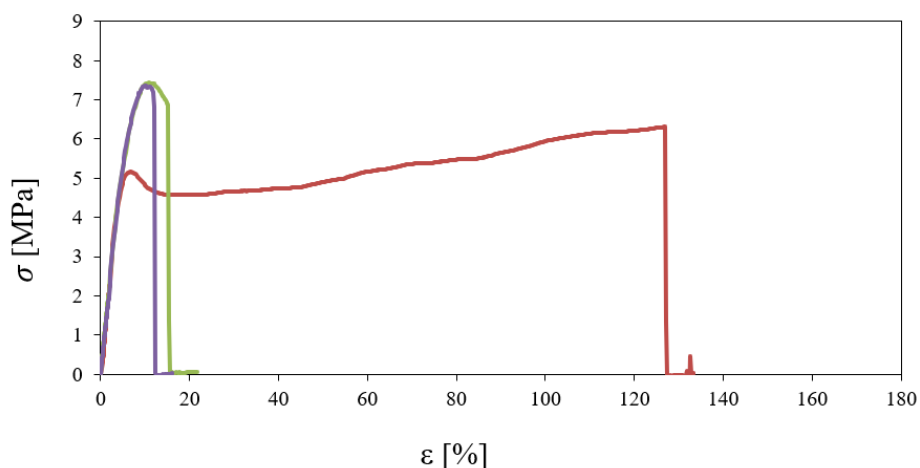
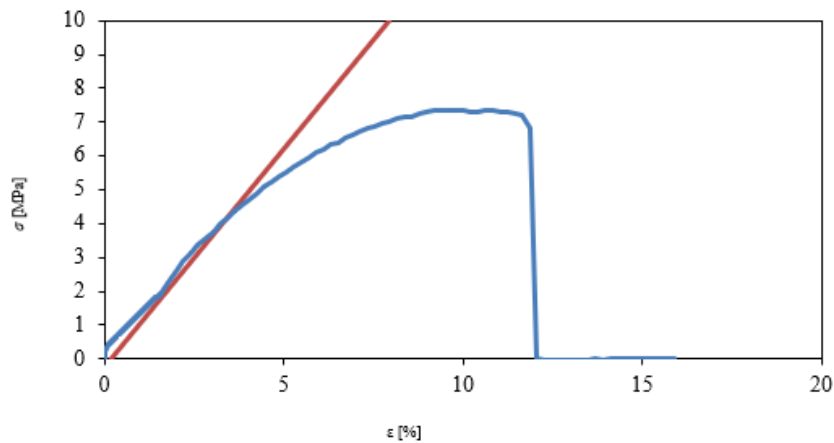


Figura 60 – Curvas  $\sigma-\epsilon$  para concentração 15 GF phr

Figura 61 – Curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  para concentração 35 GF phrFigura 62 – Curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  para concentração 55 GF phr

Para o cálculo de  $E$ , recorreu-se às curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  obtidas a partir dos restantes dados do ensaio. Na Figura 63 exemplificou-se como se efetuou o cálculo recorrendo às curvas, traçando uma linha tangente à curva do gráfico. Para o cálculo da tensão limite elástico a 0,2%, foi traçada uma paralela a esta curva que passasse no ponto 0,2% de deformação.

Figura 63 - Gráfico curva  $\sigma$ - $\epsilon$ 

Este procedimento foi depois aplicado a todas as curvas de todos os provetes de cada concentração. Após o tratamento dos dados, das curvas  $P$ - $\delta$  e  $\sigma$ - $\epsilon$ , as propriedades obtidas foram organizadas em forma de tabelas. Seguidamente, são apresentadas na Tabela 11 até à Tabela 14 as propriedades mais relevantes do adesivo SikaForce<sup>®</sup> 803.

Tabela 11 - Propriedades mecânicas à tração para 0 GF phr

Provete 0 GF phr	Força máxima [N]	Desloc. máximo [mm]	Tensão limite elástico a 0,2% [MPa]	Tensão máxima [MPa]	Along. Máximo [%]	Tensão a 0,05%	Tensão a 0,25%	Módulo de Young [MPa]
1	162,12	181,602	2,100	7,989	159,998	0,793	0,833	19,580
2	156,05	165,509	1,550	7,700	153,872	0,427	0,465	18,823
3	165,41	174,196	1,550	8,175	161,510	0,419	0,456	18,853
<b>Média</b>	161,20	173,769	1,730	7,955	158,460	0,547	0,580	19,086
<b>Desvio Padrão</b>	4,75	8,055	0,318	0,240	4,045	0,214	0,215	0,429
CoV (%)	2,95	4,635	18,320	3,009	2,552	39,131	36,722	2,247

Tabela 12 - Propriedades mecânicas à tração para 15 GF phr

Provete 15 GF phr	Força máxima [N]	Desloc. máximo [mm]	Tensão limite elástico a 0,2% [MPa]	Tensão máxima [MPa]	Along. Máximo [%]	Tensão a 0,05%	Tensão a 0,25%	Módulo de Young [MPa]
1	134,28	169,663	1,400	6,646	168,234	0,395	0,499	51,919
2	146,09	168,230	1,500	7,149	160,039	0,367	0,453	43,169
3	141,10	167,813	1,500	6,889	159,597	0,427	0,525	49,280
<b>Média</b>	140,49	168,568	1,470	6,895	162,620	0,396	0,490	48,123
<b>Desvio Padrão</b>	5,93	0,970	0,058	0,252	4,864	0,030	0,036	4,488
CoV (%)	4,22	0,576	3,936	3,651	2,991	7,539	7,382	9,326

Tabela 13 - Propriedades mecânicas à tração para 35 GF phr

Provete 35 GF phr	Força máxima [N]	Desloc. máximo [mm]	Tensão limite elástico a 0,2% [MPa]	Tensão máxima [MPa]	Along. Máximo [%]	Tensão a 0,05%	Tensão a 0,25%	Módulo de Young [MPa]
1	138,04	131,461	3,500	6,713	136,534	0,332	0,504	86,180
2	116,83	24,733	4,250	5,521	23,679	0,468	0,637	84,507
3	145,59	149,621	2,000	6,942	151,997	0,367	0,553	93,600
<b>Média</b>	133,49	101,938	3,250	6,392	104,070	0,389	0,560	88,096
<b>Desvio Padrão</b>	14,92	67,476	1,146	0,763	70,049	0,071	0,068	4,840
CoV (%)	11,18	66,192	35,251	11,936	67,309	18,254	11,911	5,494

Tabela 14 - Propriedades mecânicas à tração para 55 GF phr

Provete 55 GF phr	Força máxima [N]	Desloc. máximo [mm]	Tensão limite elástico a 0,2% [MPa]	Tensão máxima [MPa]	Along. Máximo [%]	Tensão a 0,05%	Tensão a 0,25%	Módulo de Young [MPa]
1	141,88	129,445	3,500	6,313	133,302	0,336	0,662	163,021
2	157,61	20,692	4,000	7,444	21,655	0,460	0,729	134,383
3	155,23	16,338	4,100	7,367	16,159	0,319	0,578	128,997
<b>Média</b>	151,57	55,492	3,870	7,041	57,04	0,372	0,660	142,134
<b>Desvio Padrão</b>	8,48	64,083	0,322	0,632	66,103	0,077	0,077	18,289
CoV (%)	5,60	115,482	8,313	8,978	115,891	20,731	11,603	12,867

Através da análise dos dados, foi possível verificar que houve uma subida gradual no módulo de Young e, conseqüentemente da tensão limite elástica a 0,2%, com o aumento da concentração de fibras no adesivo (Tabela 15, Figura 64). Já nas propriedades associadas ao alongamento e deformação, foi possível verificar que baixou o valor das mesmas, isto pode ser explicado com o aumento de rigidez no adesivo por parte da maior concentração de fibras (Tabela 16, Figura 65). As restantes propriedades mantiveram-se estáveis.

Tabela 15 – Variação de  $E$  com a concentração de fibras

<b>Módulo de Young (MPa)</b>				
<b>Quantidade GF phr</b>	0	15	35	55
<b><math>E_{méd}</math> (MPa)</b>	19,09	48,123	88,10	142,134
<b>Desvio Padrão</b>	0,4288	4,488	4,84	18,288
<b>CoV (%)</b>	2,247	9,326	5,49	12,867

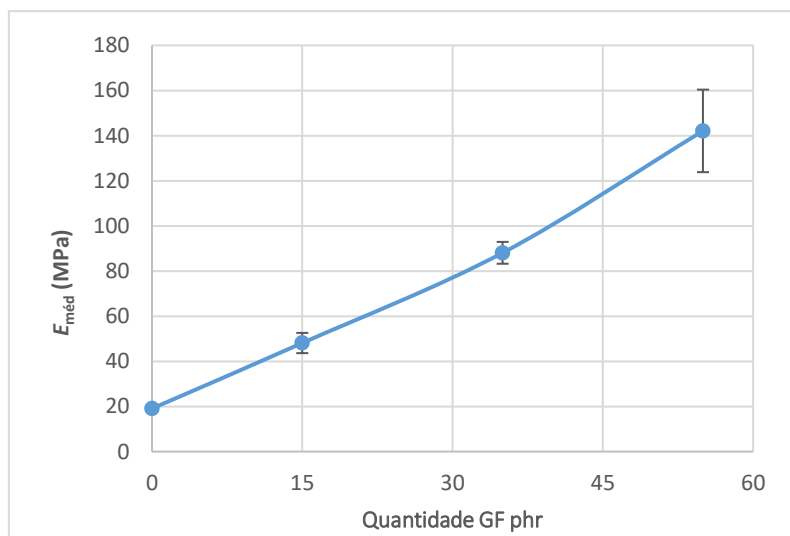


Figura 64 - Gráfico da variação de  $E$  (MPa)

Tabela 16 – Variação do deslocamento com a concentração de fibras

Deslocamento Máximo (mm)				
Quantidade GF phr	0	15	35	55
$\delta_{méd}$ (mm)	173,77	168,568	144,27	18,907
Desvio Padrão	8,05	0,970	10,93	3,88
CoV (%)	4,64	0,576	7,58	20,54

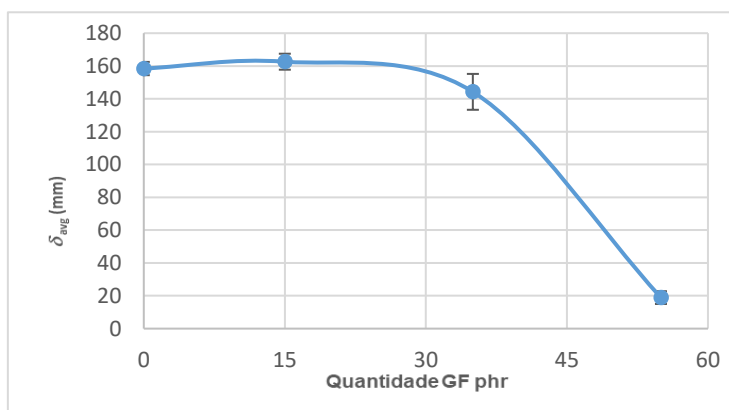


Figura 65 - Gráfico da variação do deslocamento

De seguida é apresentado um exemplo de rotura do provete que mostra um vazio e levou a uma rotura prematura do mesmo (Figura 66).

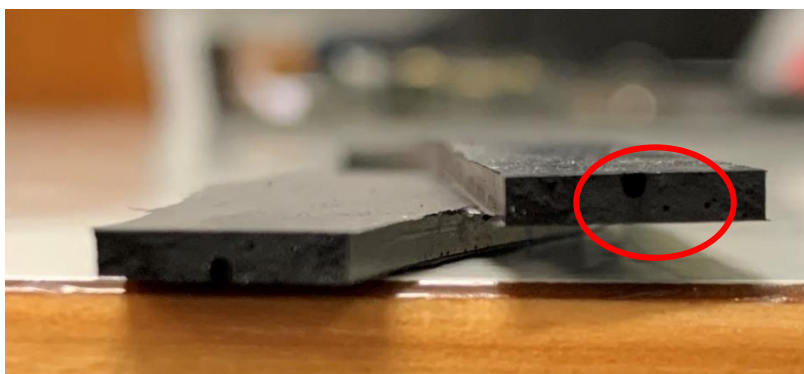


Figura 66 - Zona de rotura de provete *bulk* ensaiado à tração

Pode-se ver claramente o vazio no meio do provete como assinalado. Posteriormente, na maioria dos provetes que sofreram rotura, esta aconteceu como na Figura 67.



Figura 67 - Rotura provete *bulk*

### 3.3 Ensaios mecânicos ao corte

Foram utilizados ensaios *Block-Shear* para caracterização do adesivo ao corte. Estes foram os escolhidos pois o adesivo apresenta fraca adesão a materiais metálicos, sendo este o material dos provetes para os ensaios TAST. Neste capítulo é abordado todo o processo de construção, ensaio e análise de resultados.

#### 3.3.1 Fabrico dos provetes

Para o processo de fabrico dos provetes foi necessária a utilização de fibra de carbono pré-impregnada. Neste capítulo descreveu-se o processo de obtenção dos provetes. O processo iniciou-se com a produção de várias placas de material compósito de carbono epóxico com 3,0 mm de espessura para posteriormente serem cortadas no formato dos provetes desejados. Foi utilizado o material SEAL® Texipreg HS 160 RM, anteriormente

descrito, para o fabrico das placas com uma sequência de empilhamento de  $[0]_{20}$ . Este empilhamento foi o escolhido de modo a ser possível a obtenção da espessura desejada após cura do material. Para o fabrico das placas seguiram-se os passos seguintes:

- Retirou-se do rolo de compósito da arca congeladora, deixando-o à temperatura ambiente de modo a ser mais fácil o corte nas medidas corretas;
- Com um auxílio de uma régua foram apontadas medidas no material do rolo de modo a poderem ser obtidas placas com  $300 \times 300 \text{ mm}^2$ ;
- Como o rolo tinha cerca de 600 mm de largura, primeiro cortaram-se folhas com a medida de  $300 \times 600 \text{ mm}^2$ , sendo depois cortadas ao meio de modo a obter a medida final pretendida para fabrico da placa;
- Estes procedimentos foram realizados com auxílio de um x-acto e de uma régua (Figura 68);
- Como seria necessário realizar sete placas cada uma com 20 folhas com  $300 \times 300 \text{ mm}^2$  (empilhamento considerado), inicialmente foram cortadas 70 folhas de  $300 \times 600 \text{ mm}^2$ , e posteriormente 140 folhas de  $300 \times 300 \text{ mm}^2$ .



Figura 68 – Corte de tecido do rolo

- De seguida começou a fazer-se o empilhamento das folhas. Todas as placas iriam ter orientação  $0^\circ$ . Iniciou-se com o empilhamento de duas folhas sobre a mesa de trabalho. Para efetuar esta operação é necessário retirar a película protetora de um dos lados e sobrepô-la sobre a superfície sem película da outra folha.
- Posteriormente, é efetuada uma compressão manual sobre as folhas de modo a ficarem já parcialmente ligadas.



- Seguiu-se a aplicação de calor na folha de carbono-epóxico através de uma pistola de ar quente. Isto permite que a resina presente na folha permita fazer a ligação ao empilhamento já efetuado (Figura 69).



Figura 69 – Aplicação de calor ao tecido

- Usou-se um x-acto para tirar o revestimento de proteção da folha seguinte para ser ligada ao empilhamento.
- Repetiu-se este processo descrito anteriormente, até perfazer o empilhamento de 20 camadas de carbono-epóxico, totalizando uma espessura de aproximadamente 3,30 mm (espessura das folhas de carbono-epóxico + espessura das folhas de papel inferior e superior de proteção).
- Após a conclusão do empilhamento, foi necessário preparar o molde. Este consiste em duas placas metálicas, as quais permitem colocar a placa na prensa de pratos quentes e proceder à cura do composto.
- De seguida aplicou-se uma folha de Teflon® às placas. Este consiste num filme de polímero que permite que a resina não agarre ao molde e facilita a fácil remoção da placa (Figura 70).

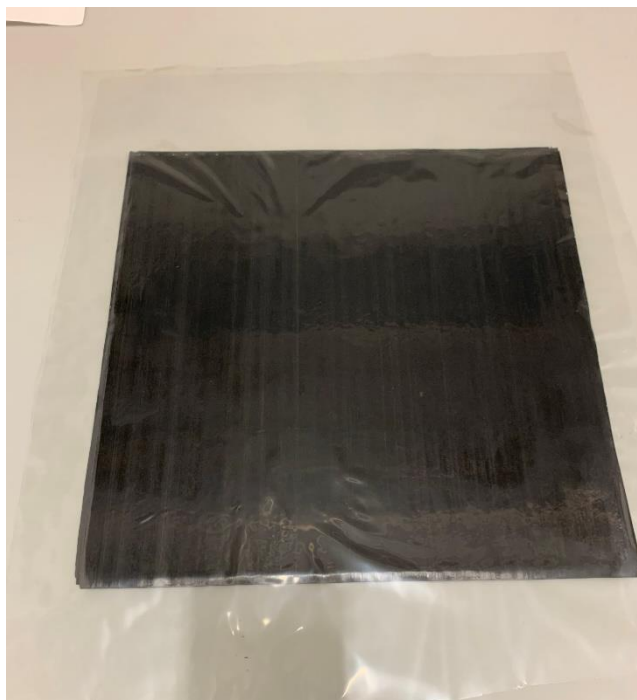


Figura 70 – Placa de carbono-epóxico com filme de desmoldante

- De seguida colocaram-se as placas na prensa de pratos quentes que está localizada no laboratório de materiais compósitos do ISEP. Este procedimento permite aplicar pressão e temperatura de modo a ser possível a cura das placas de compósito (Figura 71).



Figura 71 – Colocação da placa na prensa

- Este equipamento pode ser programado consoante o ciclo térmico e de pressão pretendido para a cura do compósito em causa. Neste caso foi usado o programa

indicado na Figura 72. O ciclo inicia com 5 minutos a 55°C e nenhuma força aplicada ao molde. Seguem-se dois estágios no qual há um aumento gradual de temperatura e se aplica uma força de 1 tonelada aos pratos, sendo que têm a duração cada um de 5 minutos. De seguida dá-se a real aplicação de força e temperatura com um estágio de 58 minutos a 125°C e 5 toneladas de pressão. Por fim existe um estágio final de 58 minutos a 65°C e 5 toneladas de pressão. Este processo permite criar a placa de carbono-epóxico com os 3 mm previstos dando o processo de cura como concluído.



Figura 72 – Programa usado na cura da placa

Após o término do fabrico da placa de carbono-epóxico, procedeu-se à marcação e corte dos provetes nas placas de compósito. Foram cortados no total 98 aderentes para os ensaios de tração e corte. Além dos aderentes, foram também cortados calços para os aderentes com as sobras das placas. Recorreu-se à máquina de corte existente no Laboratório de Materiais Compósitos do ISEP (Figura 73).



Figura 73 – Serra mecânica BATISTI MECCANICA s.r.l DV25 [28]

De modo a ser possível a construção dos provetes para o ensaio *block shear*, foi necessário o corte dos aderentes provenientes das placas de carbono-epóxico. No total foram recortados seis aderentes. Os aderentes têm dimensões de 15 mm de largura e 25 mm de comprimento, como descrito na Figura 74.

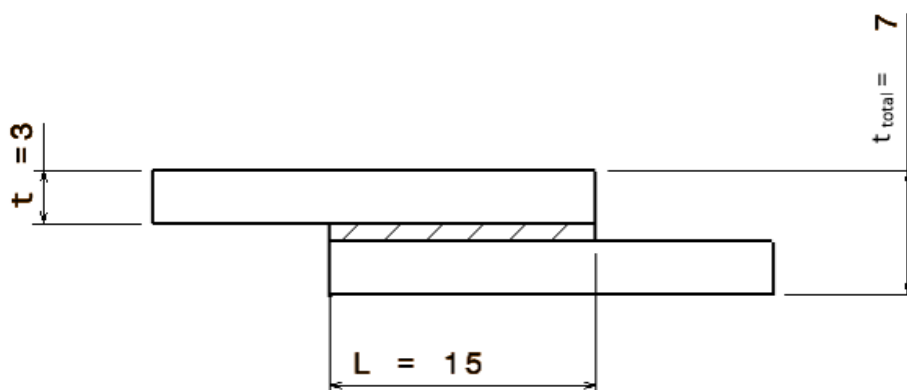


Figura 74 - Dimensões provete *block shear*

De seguida, procedeu-se ao processo de preparação da superfície para adesão. Este iniciou-se com a abrasão, um processo passivo mecânico, que permite aumentar a rugosidade da superfície, o que incrementa a área de contacto com o adesivo para uma melhor adesão. Para este processo, foi utilizada a lixagem manual, que consiste no uso de uma lixa (Figura 75) sobre a superfície de contacto. Posteriormente, os aderentes foram limpos com acetona, para garantir a remoção de material solto proveniente da lixagem e o desengorduramento da superfície.

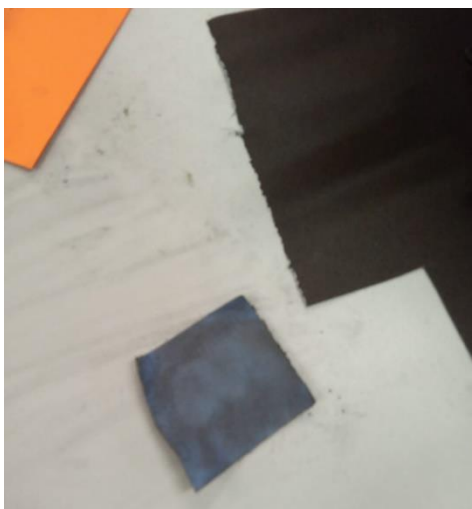


Figura 75 – Lixa

Para o início da construção da junta adesiva, foi definido um comprimento de sobreposição de 15 mm. Esta dimensão torna difícil uma correta colagem dos aderentes, visto que é igual à largura e comprimento dos aderentes. Colocaram-se os aderentes sobre a mesa, e iniciou-se o processo de marcação dos mesmos com auxílio de uma caneta de tinta permanente. A marcação usada segue a nomenclatura “BS\_803\_0\_1”, sendo, respetivamente, o tipo de junta, o adesivo em estudo, a concentração de fibras e o número do provete. Após concluir este processo, os aderentes foram colocados sobre tiras de madeira assentes nuns cavaletes. Estas estavam cobertas com folhas de Teflon®, para garantir que qualquer adesivo em excesso que saísse do provete não ficaria colado às mesmas. Para garantir a espessura do filme de adesivo, foi usada uma fita calibrada com 1 mm. Por forma a conseguir uma correta colagem da junta foram usados calços auxiliares, como ilustrado na Figura 76.

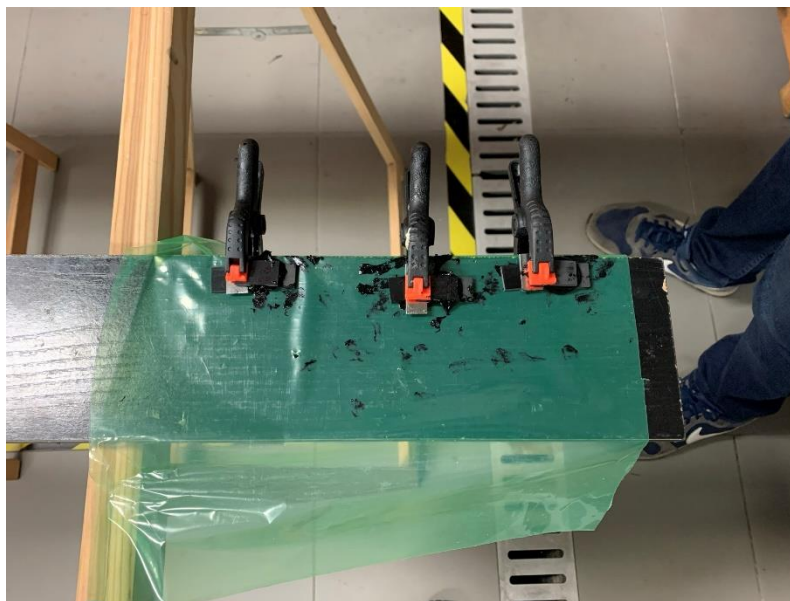


Figura 76 - Junta adesiva *Block Shear*

Para os ensaios *block shear* foram usadas quatro concentrações de aditivação de fibra de vidro, como referido anteriormente, e idênticas ao utilizado para os ensaios de provetes maciços. O processo de mistura e aplicação do adesivo foi descrito no capítulo 3.2.1. Neste caso, após a mistura do adesivo, este foi aplicado através de uma espátula sobre os aderentes previamente colocados nas tiras de madeira. Colocaram-se os aderentes sobre aqueles que já possuíam adesivo, e fez-se pressão manual na zona de colagem. Antes da colocação dos grampos foi necessária uma verificação do posicionamento relativo dos aderentes, de forma a garantir um correto alinhamento da junta para os resultados serem válidos. Após a cura do adesivo, foi necessário o tratamento dos provetes de forma a eliminar o adesivo em excesso. Com auxílio de x-acto, alicate e uma fresa mecânica, retiraram-se as rebarbas e o adesivo em excesso. Na Figura 77 é possível visualizar o processo de remoção do excesso de adesivo.



Figura 77 - Remoção da rebarba e adesivo em excesso

### 3.3.2 Ensaio dos provetes

Para a determinação das propriedades ao corte do adesivo e aferição da influência das concentrações de fibra de vidro, foram feitos ensaios em três provetes por cada concentração de adesivo estudado nesta dissertação, num total de 12 provetes. Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente a uma velocidade de 0,5 mm/min.

Efetuar-se medições individuais dos valores de  $b$  (largura de provete),  $L$  (comprimento de sobreposição) e  $t$  (espessura de cada aderente) necessários para o tratamento de dados. Para cada parâmetro de dimensão foram efetuadas 2 medições com auxílio de um paquímetro digital. Para a determinação de  $t_{ade}$  (valor da espessura dos adesivos para cada provete), foi necessário efetuar medições adicionais. Esta espessura foi adquirida através do cálculo da espessura total do provete a subtrair pela soma das espessuras dos aderentes. As variáveis usadas são  $t_{total}$  (espessura total dos provetes),  $t$  (soma das espessuras dos aderentes). É um valor extremamente importante usado no tratamento de dados para o cálculo das deformações. Os valores obtidos são apresentados da Tabela 17 até à Tabela 20.

Tabela 17 - Dimensões provetes 0 GF phr

GF phr		Provetes								
		b (mm)	Média	L (mm)	Média	t (mm)	Total	$t_{total}$ (mm)	t (mm)	$t_{ade}$ (mm)
0	1	15,41	15,39	16,18	16,41	3,08	5,92	7,04	5,92	1,12
		15,36		16,64		2,84				
	2	15,35	15,35	14,55	14,64	3,03	5,96	6,93	5,96	0,97
		15,36		14,72		2,93				
	3	15,49	15,49	17,36	17,38	3,05	5,62	6,18	5,62	0,56
		15,48		17,39		2,57				

Tabela 18 - Dimensões provetes 15 GF phr

GF phr		Provetes								
		b (mm)	Média	L (mm)	Média	t (mm)	Total	$t_{total}$ (mm)	t (mm)	$t_{ade}$ (mm)
0	1	15,45	15,37	15,64	15,64	3,14	6,24	6,83	6,24	0,59
		15,29		15,64		3,1				
	2	15,83	15,78	15,88	15,82	2,88	5,92	6,87	5,92	0,95
		15,73		15,75		3,04				
	3	15,45	15,4	16,5	16,65	3,04	5,97	7,02	5,97	1,05
		15,35		16,79		2,93				

Tabela 19 - Dimensões provetes 35 GF phr

GF phr		Provetes								
		b (mm)	Média	L (mm)	Média	t (mm)	Total	$t_{total}$ (mm)	t (mm)	$t_{ade}$ (mm)
0	1	15,62	15,63	14,65	14,65	2,85	5,91	6,83	5,91	0,92
		15,63		14,65		3,06				
	2	15,08	15,12	16,19	16,18	3,12	6,16	7,04	6,16	0,88
		15,16		16,17		3,04				
	3	15,59	15,66	16,31	16,38	2,85	5,75	6,86	5,75	1,11
		15,73		16,45		2,9				

Tabela 20 - Dimensões provetes 55 GF phr

GF phr		Provetes								
		b (mm)	Média	L (mm)	Média	t (mm)	Total	$t_{total}$ (mm)	t (mm)	$t_{ade}$ (mm)
0	1	16,21	16,16	16,98	17,06	3,2	6,38	6,89	6,38	0,51
		16,1		17,13		3,18				
	2	15,74	15,68	17,36	17,45	2,98	5,86	6,88	5,86	1,02
		15,62		17,54		2,88				
	3	15,61	15,49	18,12	18,13	2,99	5,92	6,81	5,92	0,89
		15,38		18,14		2,93				

Para a realização dos ensaios, usou-se a ferramenta adequada que permite aplicar a solicitação na orientação desejada. A ferramenta é fixa às amarras existentes no equipamento e, posteriormente, são colocados os provetes na zona destinada, como se apresenta na Figura 78.





Figura 78 - Colocação do provete para ensaio *block shear* na ferramenta

Através da zona assinalada, podem-se ver que os topos do provete vão entrar em contacto com as zonas metálicas no topo da ferramenta, o que irá originar uma força na direção longitudinal do provete durante o ensaio. Teoricamente este procedimento permite simular o efeito de corte puro sobre o adesivo, de modo a ser possível o estudo e determinação das propriedades que daí advêm.

### 3.3.3 Resultados

Para determinar as propriedades mecânicas ao corte, usou-se a norma ASTM D4501. Para o cálculo da tensão de corte foi usada a equação (3).

$$\tau = \frac{P_{máx}}{A} , \quad (3)$$

sendo a  $P_{máx}$  [N] a carga aplicada e  $A$  [mm] a área de colagem.

Posto isto, foi necessário o cálculo da deformação de corte ( $\gamma$ ) que é dada pela equação (4).

$$\gamma = \frac{\delta}{t} , \quad (4)$$

onde  $\delta$  [mm] corresponde ao deslocamento calculado e  $t$  [mm] à espessura da camada de adesivo. Para o cálculo do módulo de corte ( $G$ ), foi utilizada a equação (5)

$$G = \frac{\tau}{\gamma} , \quad (5)$$

Os valores de  $\tau$  e  $\gamma$  correspondem aos calculados pelas outras expressões. De seguida, são apresentadas na Figura 79 até Figura 82 as curvas  $P$ - $\delta$  para cada concentração de fibras de vidro. No eixo das abcissas são representados os valores de  $\delta$  e no eixo das ordenadas os valores de  $P$ . Os números da legenda correspondem ao número de identificação de cada provete ensaiado.

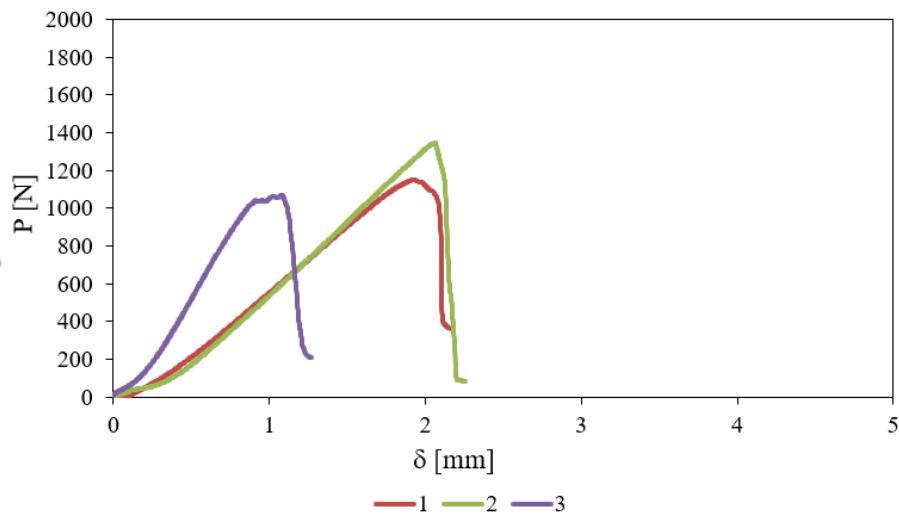


Figura 79 - Curvas  $P-\delta$  para concentração 0 GF phr

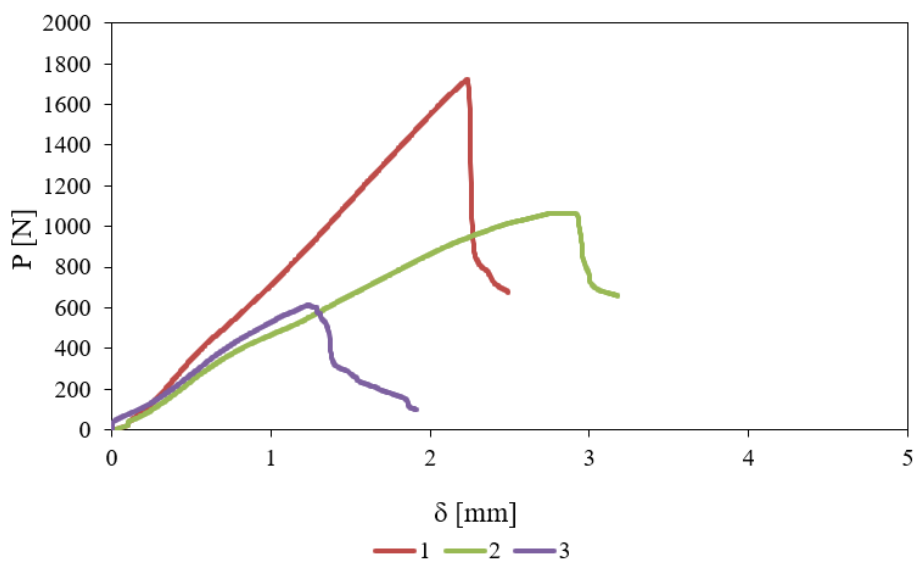
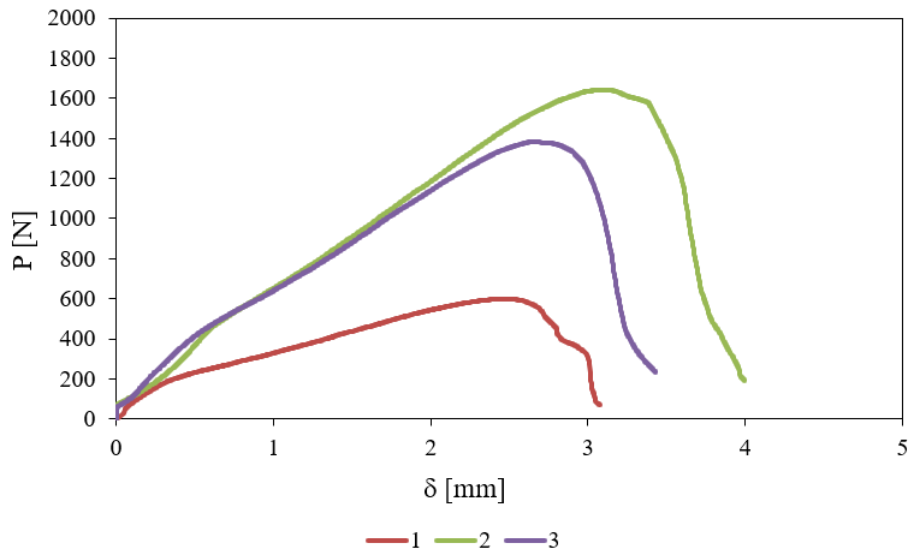
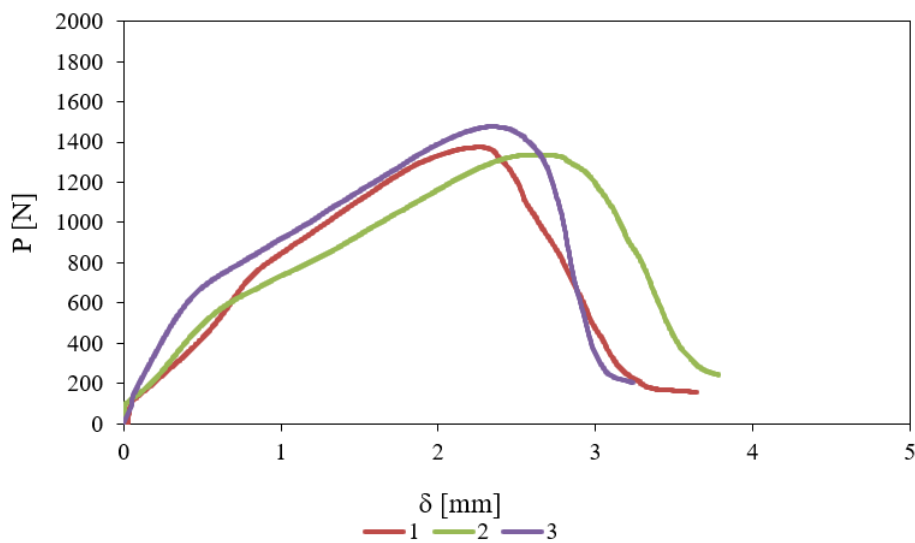


Figura 80 - Curvas  $P-\delta$  para concentração 15 GF phr

Figura 81 - Curvas  $P$ - $\delta$  para concentração 35 GF phrFigura 82 - Curvas  $P$ - $\delta$  para concentração 55 GF phr

Da análise dos gráficos, concluiu-se que os provetes apresentaram valores idênticos na concentração de 55 GF phr. Nas outras concentrações ocorreram algumas discrepâncias entre provetes. A simulação do corte puro através do ensaio *block shear* é de extrema dificuldade pois devido ao tamanho dos provetes e forma da ferramenta é bastante difícil garantir o alinhamento durante o ensaio e prevenir que não existam escorregamentos dos mesmos. Neste caso, existiram provetes que foram descartados

devido a estes problemas e ao fim de ensaios de modo prematuro. Com a observação dos gráficos, pode-se observar que as  $P_{máx}$  e  $\delta$  são idênticas para todas as concentrações. De seguida, na Figura 83 até à Figura 86, são apresentadas as curvas  $\tau - \gamma$ .

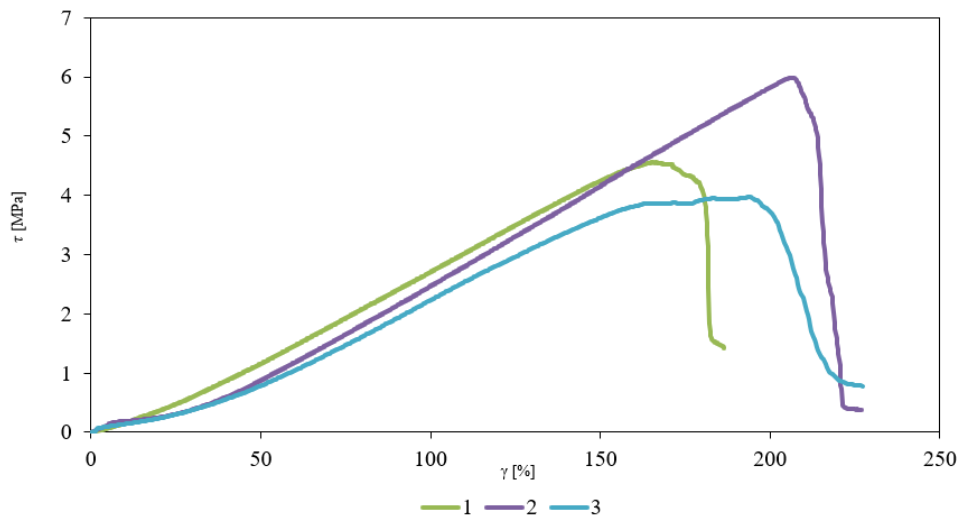


Figura 83 - Curvas  $\tau - \gamma$  para concentração 0 GF phr

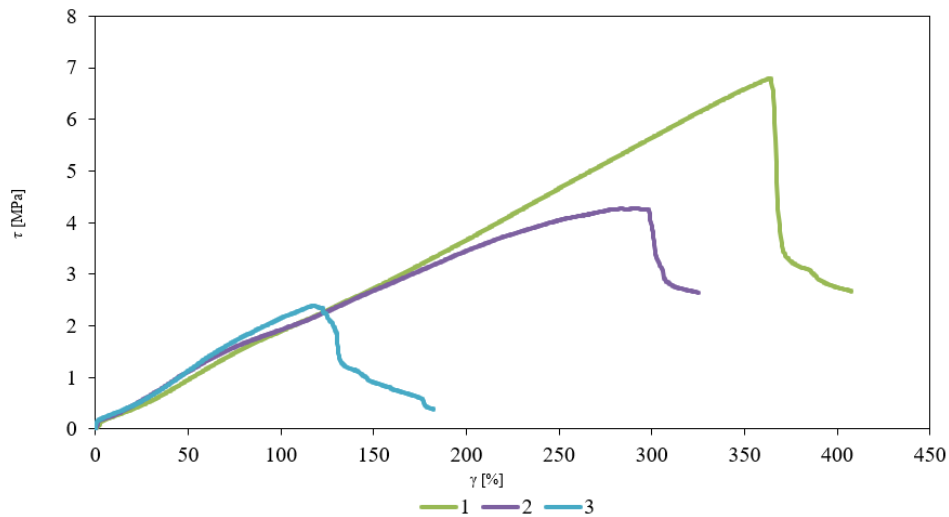
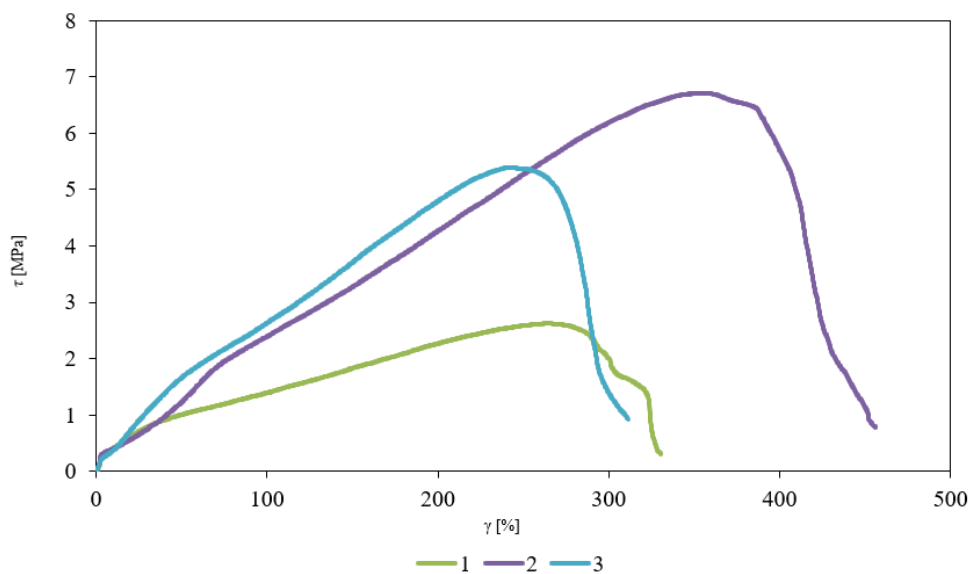
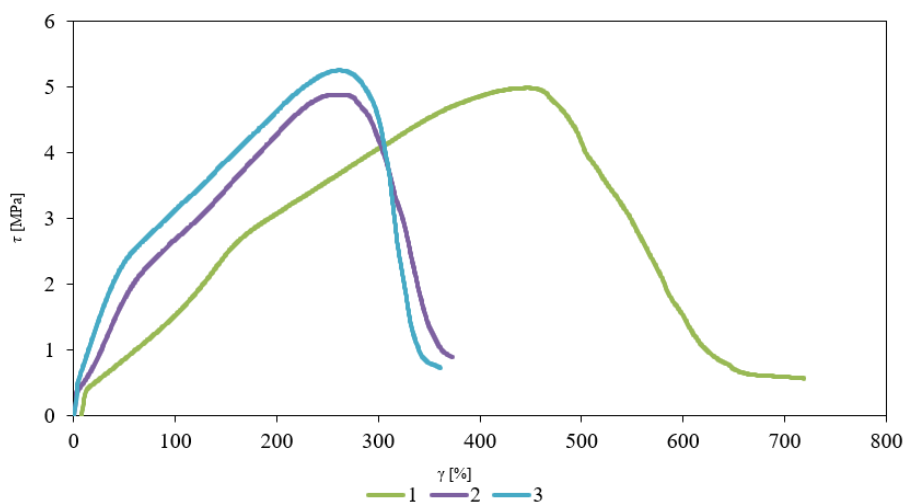


Figura 84 - Curvas  $\tau - \gamma$  para concentração 15 GF phr

Figura 85 - Curvas  $\tau - \gamma$  para concentração 35 GF phrFigura 86 - Curvas  $\tau - \gamma$  para concentração 55 GF phr

Como é possível observar, as curvas apresentam um comportamento idêntico às curvas  $P-\delta$ , pelo que pode-se concluir que as razões para os eventuais desvios nos ensaios são as mesmas descritas anteriormente. Após o tratamento dos dados, das curvas  $P-\delta$  e  $\tau - \gamma$ , as propriedades obtidas foram organizadas em forma de tabelas. Seguidamente, são apresentadas na Tabela 21 até à Tabela 24 os resultados obtidos para o adesivo SikaForce® 803.

Tabela 21 - Propriedades mecânicas ao corte para 0 GF phr

Provete 0 GF phr	Força máxima [N]	Tensão limite elástico a 0,2% [MPa]	Tensão de corte máxima [MPa]	G	G [MPa]	Y [%]
1	1150,82	2,900	4,558	2,800	4,028	186,529
2	1346,05	2,600	5,999	2,500	3,557	227,049
3	1067,99	1,900	3,969	2,100	2,192	227,135
<b>Média</b>	1188,28	2,470	4,839	2,467	3,259	213,570
<b>Desvio Padrão</b>	142,76	0,513	1,039	0,351	0,954	23,419
<b>CoV (%)</b>	12,015	20,804	21,473	14,237	29,268	10,966

Tabela 22 - Propriedades mecânicas ao corte para 15 GF phr

Provete 15 GF phr	Força máxima [N]	Tensão limite elástico a 0,2% [MPa]	Tensão de corte máxima [MPa]	G	G [MPa]	Y [%]
1	1723,04	1,100	6,794	2,000	2,343	407,247
2	1065,11	1,600	4,268	2,000	3,021	325,224
3	<b>ANULADO</b>					
<b>Média</b>	1394,07	1,350	5,531	2,000	2,682	366,24
<b>Desvio Padrão</b>	465,22	0,354	1,786	0,000	0,479	57,999
<b>CoV (%)</b>	33,37	26,189	32,296	0,000	17,865	15,837

Tabela 23 - Propriedades mecânicas ao corte para 35 GF phr

Provete 35 GF phr	Força máxima [N]	Tensão limite elástico a 0,2% [MPa]	Tensão de corte máxima [MPa]	G	G [MPa]	Y [%]
1	<b>ANULADO</b>					
2	1641,94	2,700	6,712	2,500	1,500	455,944
3	1383,38	2,500	5,393	2,600	2,500	311,579
<b>Média</b>	1512,66	2,600	6,052	2,550	2,000	383,760
<b>Desvio Padrão</b>	182,83	0,141	0,932	0,071	0,707	102,088
<b>CoV (%)</b>	12,09	5,439	15,405	2,773	35,355	26,602

Tabela 24 - Propriedades mecânicas ao corte para 55 GF phr

Provede 55 GF phr	Força máxima [N]	Tensão limite elástico a 0,2% [MPa]	Tensão de corte máxima [MPa]	G	G [MPa]	$\gamma$ [%]
1	1374,18	1,000	4,988	1,900	1,500	718,384
2	1335,45	2,400	4,881	3,000	2,787	373,173
3	1476,51	2,100	5,256	4,500	2,500	361,347
<b>Média</b>	1395,38	1,830	5,041	3,133	2,262	484,300
<b>Desvio Padrão</b>	72,88	0,737	0,193	1,305	0,676	202,808
<b>CoV (%)</b>	5,22	40,206	3,834	41,653	29,868	41,876

Pela análise das tabelas foi possível concluir que houve um ligeiro aumento na deformação ao corte  $\gamma$ . No módulo  $G$  os valores mantiveram-se estáveis ao longo dos quatro tipos de concentração. Estes resultados demonstram a dificuldade na realização dos ensaios *block shear*. De seguida são apresentados os gráficos comparativos entre concentrações do  $G$  e da  $\gamma$  (Tabela 25, Figura 87, Figura 88 e Tabela 26).

Tabela 25 – Evolução da  $\gamma$  com a concentração de fibras

$\gamma$ [%]				
Quantidade GF phr	0	15	35	55
$\gamma_{\text{méd}}$ [%]	213,57	366,235	383,76	484,301
<b>Desvio Padrão</b>	23,42	57,999	102,09	202,808
<b>CoV (%)</b>	10,97	15,837	26,60	41,876

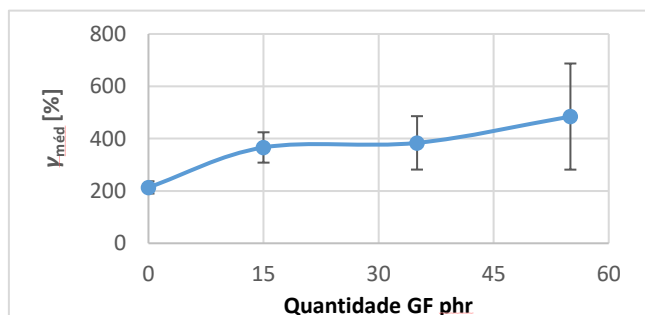
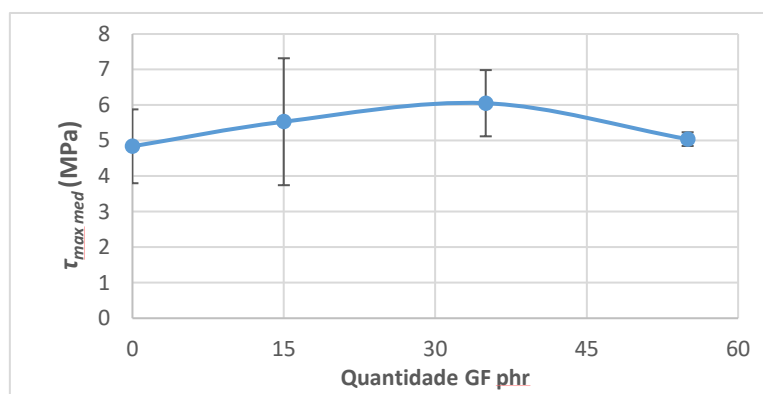
Figura 87 - Gráfica evolução de  $\gamma$



Tabela 26 – Evolução de  $\tau$  com a concentração de fibras

Tensão Máxima				
Quantidade GF phr	0	15	35	55
$\tau_{max\ med}$ [MPa]	4,84	5,53	6,05	5,04
GP	1,04	1,78	0,93	0,19
CoV (%)	21,47	32,29	15,40	3,83

Figura 88 - Gráfica evolução de  $\tau$ 

De seguida são apresentadas as superfícies de rotura dos provetes *block shear*. Estes variaram entre roturas adesivas, coesivas e mistas. Em relação aos provetes 0 GF phr (Figura 89), pode-se verificar que na sua maioria a rotura foi adesiva, isto pode ser explicado por uma má preparação da superfície e fraca adesão do adesivo ao substrato.



Figura 89 – Modo de rotura provetes 0 GF phr

O mesmo se passa na Figura 90 com os provetes de concentração 15 GF phr. Neste caso existe o número 2 que apresenta uma rotura mista, mas maioritariamente a rotura é adesiva. Provetes 3 foi anulado pois, como pode-se ver na imagem foi colado de maneira errada, ou seja, não houve uma preparação de superfície para receber o adesivo.

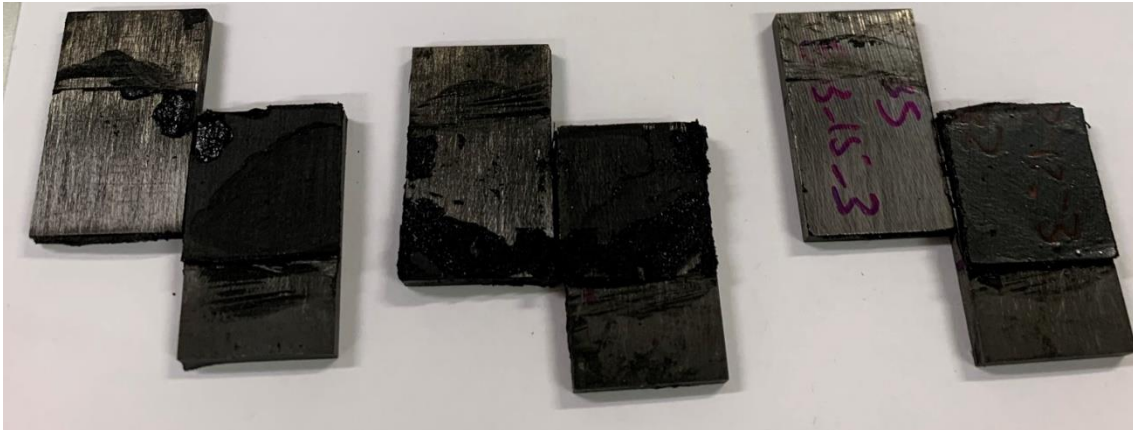


Figura 90 – Modo de rotura provetes 15 GF phr

Em relação aos provetes com concentração de 35 GF phr, já é possível verificar que o provete 2 e 3 apresentam rotura coesiva, isto permite que os valores obtidos sejam realmente caracterizadores do adesivo em estudo. O provete 1 foi anulado por erro na preparação da superfície (Figura 91).

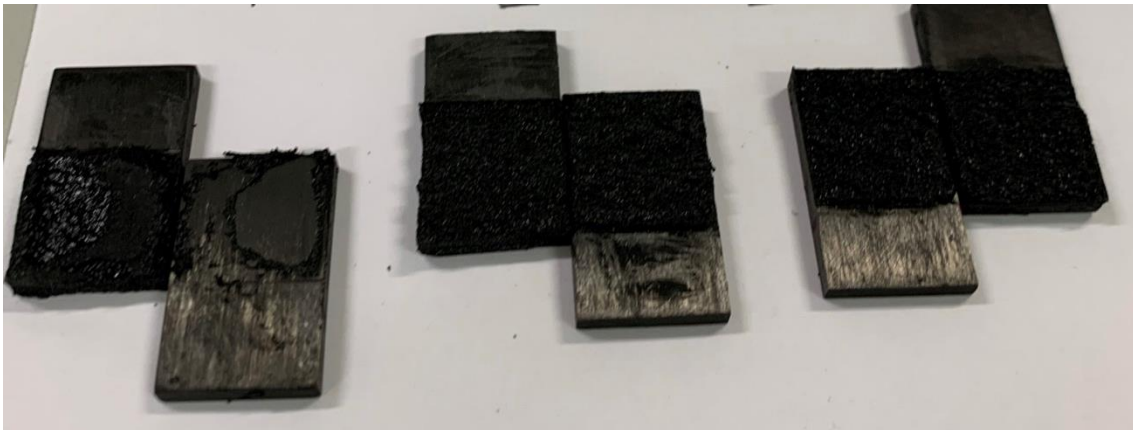


Figura 91 – Modo de rotura provetes 35 GF phr

Em relação aos provetes com concentração de 55 GF phr, já é possível verificar que os provetes todos apresentam rotura coesiva. Os valores obtidos nesta concentração podem ser tidos em conta para validação de resultados (Figura 92).

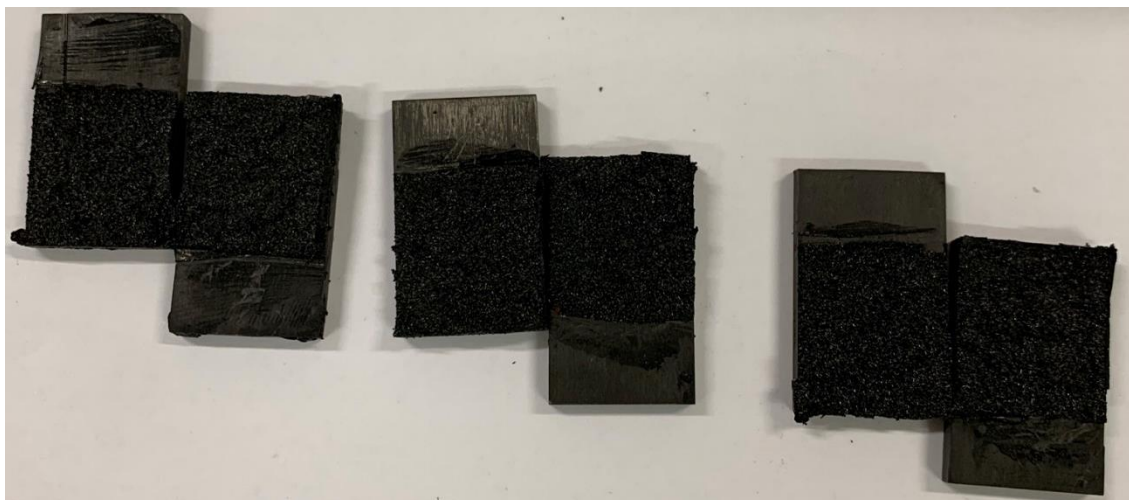


Figura 92 – Modo de rotura provetes 55 GF phr

### 3.4 Ensaios de fratura à tração

Neste capítulo são abordados os ensaios de fratura à tração, ensaios *Double-Cantilever Beam* (DCB). Estes ensaios permitem determinar a tenacidade à fratura em puro modo I. Para isso foi necessário o fabrico de provetes DCB, descreve-se o modo no capítulo 3.4.1 incluindo o modo de preparação dos provetes, processos de colagem e preparação para ensaio.

#### 3.4.1 Fabrico dos provetes

Neste trabalho experimental foram construídos os provetes DCB. Iniciou-se o processo com a construção das placas de carbono-epóxico descritas no capítulo 3.3.1. Foi necessário recorrer a este tipo de material para os aderentes devido à fraca adesão do adesivo a materiais de tipo metálico. Nesta dissertação são abordados quatro tipos de concentrações de fibra de vidro no adesivo. Assim sendo, todos os ensaios respeitam esse pressuposto, sendo que foram construídos três provetes DCB por cada concentração, num total de 12.

Na Figura 93 apresenta-se um esquema de provete DCB utilizado. Tendo em conta a espessura reduzida de cada um dos braços do provete, é necessário colar uma dobradiça em cada um dos braços para que seja possível aplicar corretamente a solicitação.

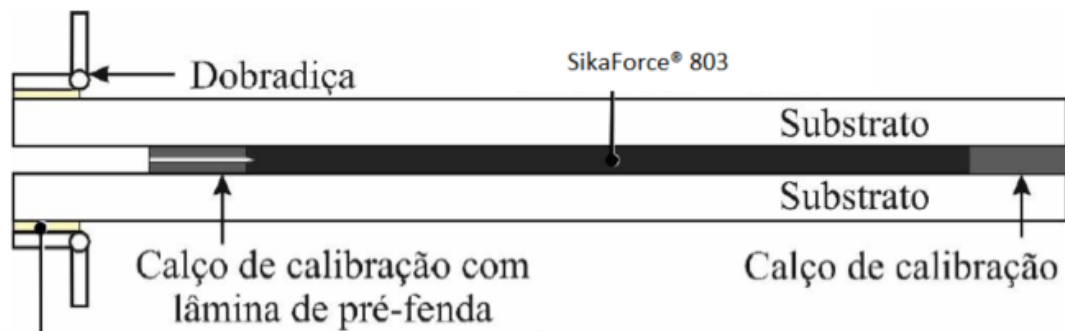


Figura 93 - Esquema do provete DCB [7]

Os provetes são obtidos a partir da placa de carbono epóxico cuja construção está descrita no capítulo 3.1.1. Os aderentes utilizados nos provetes DCB possuem 3 mm de espessura, 15 mm de largura e 140 mm de comprimento. Na Figura 94 apresentam-se as dimensões relevantes do provete DCB.

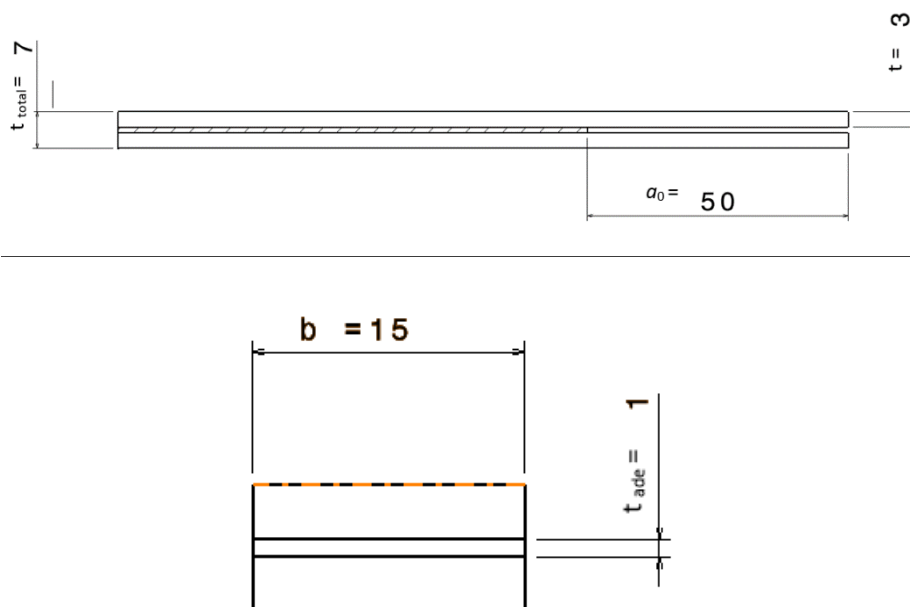


Figura 94 - Provetes DCB

Procede-se ao tratamento da superfície do aderente na zona de colagem. Este procedimento foi feito manualmente com recurso a uma lixa de granulação 80. Findo o processo de lixagem dos 24 aderentes, deu-se continuidade com a limpeza dos mesmos com acetona. Utilizou-se papel embebido em acetona e procedeu-se à limpeza das superfícies de modo a remover as impurezas e partículas de compósito provenientes da

lixagem, e a retirada de gordura da superfície que pode promover a fraca adesão do adesivo e conseqüentemente eliminação do resultado (Figura 95).



Figura 95 - Aderentes após lixagem e limpeza

Para a construção dos provetes foi necessária a utilização de calços em locais distintos do provete, de forma a garantir o valor desejado de  $t_{ade}$  ao longo da junta. Este método é usado pois o provete apresenta o comprimento de colagem bastante elevado, e poderiam existir zonas em que a espessura de camada não fosse a pretendida. Também é utilizado um espaçador para simular o efeito de uma fenda inicial e criando artificialmente uma concentração de tensões. Para o efeito, foi usada uma lamina de barbear com 0,1 mm de espessura e duas chapas com 0,45 mm para a criação da pré fenda, e uma chapa metálica com 1 mm de espessura para garantir a espessura de camada.

A preparação dos calços iniciou com uma limpeza de todos os componentes metálicos com papel embebido em acetona. Para o fabrico do espaçador utilizado na pré fenda, utilizou-se o adesivo estrutural cianoacrilato Loctite® Super Cola 3, com o intuito de ligar permanentemente a lâmina de barbear à zona de suporte da mesma. Para este efeito, foi usado um pincel que vem no recipiente do adesivo.

O desmoldante é essencial para a preservação dos auxiliares de construção dos provetes, e para própria proteção dos provetes aquando da sua remoção dos moldes ou preparação para serem testados. O procedimento tem início com o aquecimento do forno para uma temperatura de 60°C, e de seguida foram colocadas as chapas metálicas

e as lâminas no forno durante cerca de 15 minutos. Permitindo assim uma melhor adesão do desmoldante Loctite® Frekote 770-NC. O procedimento de aplicação do desmoldante foi realizado com 3 passagens, com auxílio de um pincel, em cada superfície das peças metálicas, como se apresenta na Figura 96.



Figura 96 - Aplicação de desmoldante aos componentes metálicos

Após o término da aplicação do desmoldante, os aderentes previamente tratados foram marcados com auxílio de uma caneta de tinta permanente, de modo a serem identificados durante todo o processo. Utilizou-se uma nomenclatura idêntica aos *block shear*, com a seguinte ordem “DBC\_803\_0\_1”, sendo respetivamente, identificação do provete, identificação do adesivo, informação quanto à concentração do adesivo usado na junta e número do provete de ensaio. Começou por se aplicar umas gotas de adesivo Loctite® Super Cola 3 sobre as zonas previamente delineadas, para possibilitar a fixação das placas metálicas ao aderente. Com bastante cuidado para não contaminar as superfícies após limpeza, aplicaram-se as placas metálicas sobre o aderente e deixou-se curar o adesivo, como apresentado na Figura 97.



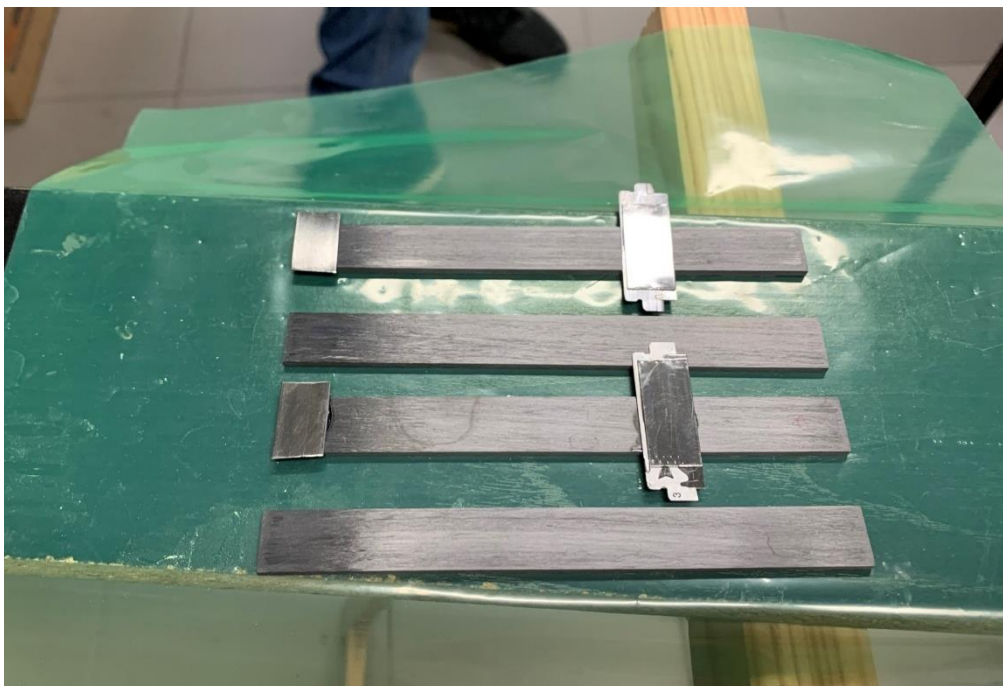


Figura 97 - Aderentes para provetes DCB com calços metálicos

Os restantes aderentes foram alinhados por concentrações, o que significa que cada conjunto de três provetes correspondem a uma concentração de fibras de vidro no adesivo diferente (Figura 98).



Figura 98 - Alinhamento dos aderentes para aplicação de adesivo

De seguida, iniciou-se a preparação do adesivo. Seguiu-se a mesma ordem de quantidades e grandezas descritos no capítulo 3.2.1. No caso da concentração de 0 GF phr de fibra de vidro a aplicação do adesivo deu-se com auxílio de uma pistola, pois o adesivo é fornecido sob a forma de bisnaga (Figura 99).

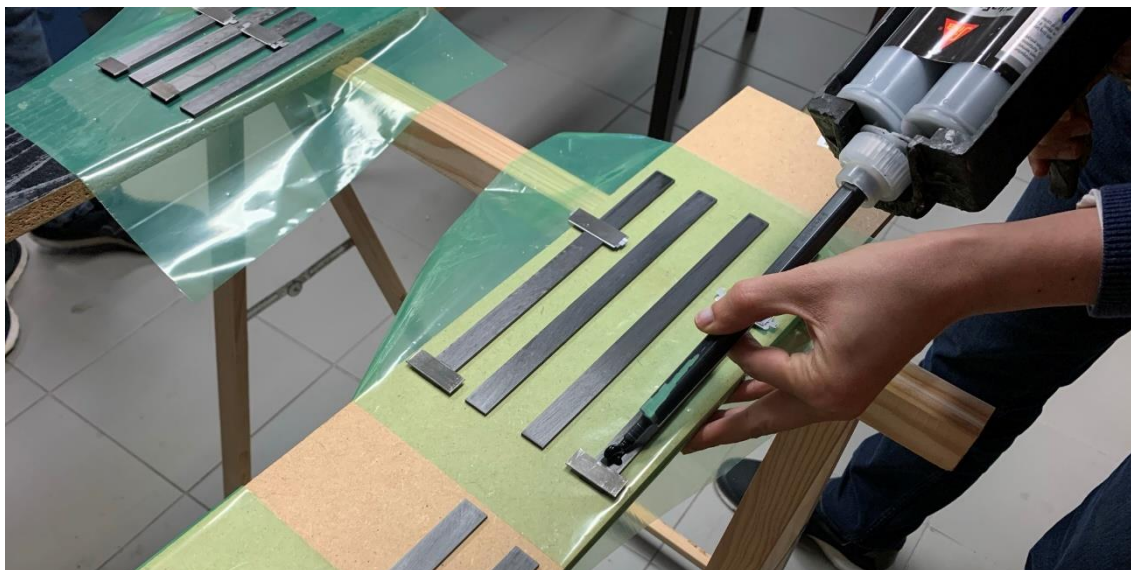


Figura 99 - Aplicação de adesivo com auxílio de pistola

Para as restantes concentrações de adesivo, as misturas foram aplicadas através de uma espátula. Isto deve-se à obrigatoriedade de mistura das fibras de vidro com o adesivo num recipiente, o que impossibilita o uso da pistola no recipiente em forma de bisnaga. Com o adesivo aplicado, colocou-se o aderente superior. Para este efeito, houve especial cuidado com o alinhamento dos aderentes. Posteriormente, exerceu-se pressão manualmente em toda a zona de colagem, o que resultou na saída do adesivo em excesso pelas laterais e topo. De seguida, colocaram-se os grampos de fixação nos provetes para os manter na posição correta durante o processo de cura, como se apresenta na Figura 100.



Figura 100 - Provetes DCB finalizados para cura

Após terminado o processo de cura, é necessário efetuar o acabamento final para os provetes estarem em situação de poderem ser testados. O procedimento iniciou-se, à



semelhança dos outros provetes à base de carbono-epóxico, com a remoção do excesso de adesivo dos mesmos. Neste processo, foi utilizado um x-acto, um alicate e a fresa mecânica. Como o adesivo é bastante dúctil, foi possível eliminar a maior parte do excesso com o x-acto e alicate. Nas localizações mais difíceis, usou-se a fresa mecânica. Neste caso foi de extrema importância a limpeza correta das superfícies laterais dos provetes, para aplicação posterior de uma escala para medição da propagação da fenda aquando do ensaio. Para este fim, utilizou-se líquido corretor de cor branca, para deste modo fazer mais contraste com a fenda. Após a aplicação do líquido corretor nas laterais, colou-se a escala na lateral do provete. Esta escala ficou a 50 mm do topo do provete que não possui adesivo, designa-se esta medida por  $a_0$ . As escalas foram colocadas, bem como distanciadas do topo na proporção da medida  $a_0$ . Na Figura 101 é possível ver o aspeto final da escala sob o provete.

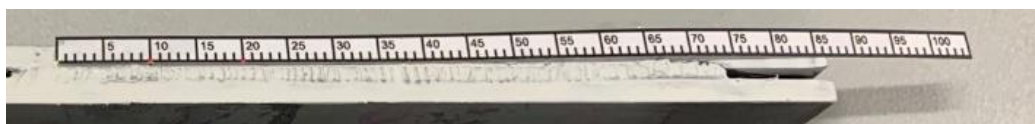


Figura 101 - Escala de controlo da propagação da fenda

Estas sofreram o mesmo procedimento de limpeza com acetona, a fim de remover qualquer tipo de gorduras de manuseamento. Para a fixação das mesmas aos provetes, foi utilizado um adesivo estrutural diferente do em estudo na presente dissertação. Este possui elevada resistência, pelo que é ideal para o propósito a que se destinam. De notar, que se poderia ter usado outro adesivo com uma resistência teórica superior ao do adesivo em estudo, de modo a não ocorrer descolagem entre a dobradiça e o provete durante o ensaio. A Figura 102 demonstra os provetes DCB após a aplicação das dobradiças.



Figura 102 - Provette DCB finalizado

### 3.4.2 Ensaio dos provetes

Os ensaios foram realizados em 12 provetes, três de cada concentração de adesivos a uma velocidade de 4mm/min e à temperatura ambiente.

Para posteriormente serem tratados os dados, recolheram-se individualmente os valores de  $a_0$  de cada provete com auxílio de um paquímetro digital. Adicionalmente às medidas de  $a_0$ , mediram-se as espessuras e larguras dos provetes, para serem usadas no tratamento de dados e cálculos de propriedades. As espessuras medidas são de  $t$ ,  $t_{total}$ , o que corresponde a soma das espessuras dos aderentes e espessura total do provete, procedimento realizado para obter a  $t_{ade}$ . Foi também necessário obter a medida da largura do provete ( $b$ ). Para o caso em estudo, foram efetuadas duas medições para cada provete. Estes valores são apresentados na Tabela 27, Tabela 28, Tabela 29, Tabela 30.

Tabela 27 - Espessura adesivo provetes DCB 0 GF phr

GF phr		Provetes					
		b (mm)	Média	$a_0$ (mm)	$t_{total}$ (mm)	$t$ (mm)	$t_{ade}$ (mm)
0	1	15,14	15,29	50,08	6,61	5,44	1,17
		15,44					
	2	15,05	15,34	46,94	6,67	5,70	0,97
		15,63					
	3	14,96	15,00	50,79	6,75	5,62	1,07
		15,05					

Tabela 28 - Espessura adesivo provetes DCB 15 GF phr

GF phr		Provetes					
		b (mm)	Média	$a_0$ (mm)	$t_{total}$ (mm)	$t$ (mm)	$t_{ade}$ (mm)
15	1	15,06	15,14	49,18	7,17	5,89	1,28
		15,21					
	2	15,27	15,24	51,93	7,2	6,09	1,11
		15,20					
	3	15,28	15,33	54,52	7,02	5,92	1,1
		15,38					

Tabela 29 - Espessura adesivo provetes DCB 35 GF phr

GF phr		Provetes					
		b (mm)	Média	$a_0$ (mm)	$t_{total}$ (mm)	$t$ (mm)	$t_{ade}$ (mm)
35	1	15,11	15,16	47,32	6,80	5,74	1,06
		15,21					
	2	15,14	15,13	47,93	7,00	5,89	1,11
		15,11					
	3	15,17	15,15	54,52	7,15	6,03	1,12
		15,12					

Tabela 30 - Espessura adesivo provetes DCB 55 GF phr

GF phr		Provetes					
		b (mm)	Média	$a_0$ (mm)	$t_{total}$ (mm)	$t$ (mm)	$t_{ade}$ (mm)
55	1	15,38	15,37	47,46	7,05	5,86	1,19
		15,35					
	2	14,96	15,00	45,38	7,25	5,84	1,41
		15,04					
	3	15,40	15,30	49,44	6,97	5,63	1,34
		15,20					

Para a fixação dos provetes na máquina de ensaio, usaram-se as mesmas amarras do ensaio de tração. Primeiro fixou-se o provete na amarra inferior através da dobradiça e ajustou-se o mesmo para que fique numa posição horizontal durante o ensaio com auxílio de uma borracha. De seguida, baixou-se a amarra superior e fixou esta à dobradiça superior do provete. Este procedimento é feito sempre com a escala virada para a zona visível do equipamento de ensaios (Figura 103).



Figura 103 – Provette DCB no equipamento

Para o cálculo posterior do  $G_{Ic}$  foi utilizado um método de correlação de imagem. Para isso é necessária uma máquina fotográfica digital, de modo a ser possível obter imagens a cada 5 segundos de ensaio, e assim relacionar a propagação da fenda com o tempo. A máquina fotográfica utilizada é da marca Canon® EOS 70D de 20 megapixéis, e foi posicionado de modo a abranger a face lateral dos provetes desde o início da escala até ao fim da mesma. Durante os ensaios foram tiradas fotografias a cada 5 segundos até ao comprimento de fenda ser grande ou à rotura do provete ou adesivo. Na Figura 104 pode-se observar o *setup* do ensaio e o posicionamento da máquina fotográfica na zona em frente ao equipamento de ensaios mecânicos.



Figura 104 - Setup ensaio DCB

Para não existirem falhas durante a captura de imagens, foi desenvolvido pelo Professor Isidro Sánchez-Arce um método de acionamento da máquina fotográfica de maneira automática. Este sistema designado por intervalómetro, permite que seja enviado um sinal à câmara fotográfica para que capture uma imagem automaticamente a cada 5 segundos. Para a construção do sistema foi usado o Arduino® Mega. Este equipamento é um microcontrolador em forma de placa que possui canais de *input/output*, uma porta USB, uma porta de alimentação *power jack*, e um botão reset. Apenas é necessário conectar por USB a um computador e ligar a alimentação com um adaptador AC-DC. Associado a placa foi necessário adicionar um optoisolador modelo VISHAY® MOC 8101, que permite que seja emitido o sinal emissor com a frequência desejada. Com este sistema implementado, o equipamento de captura de imagens permitiu uma maior precisão no tempo de captura, bem como uma enorme facilidade de controlo do ensaio, pois evita-se o possível erro humano aquando da captura de imagens. Na Figura 105 pode ser observado o esquema eletrónico de montagem do sistema.



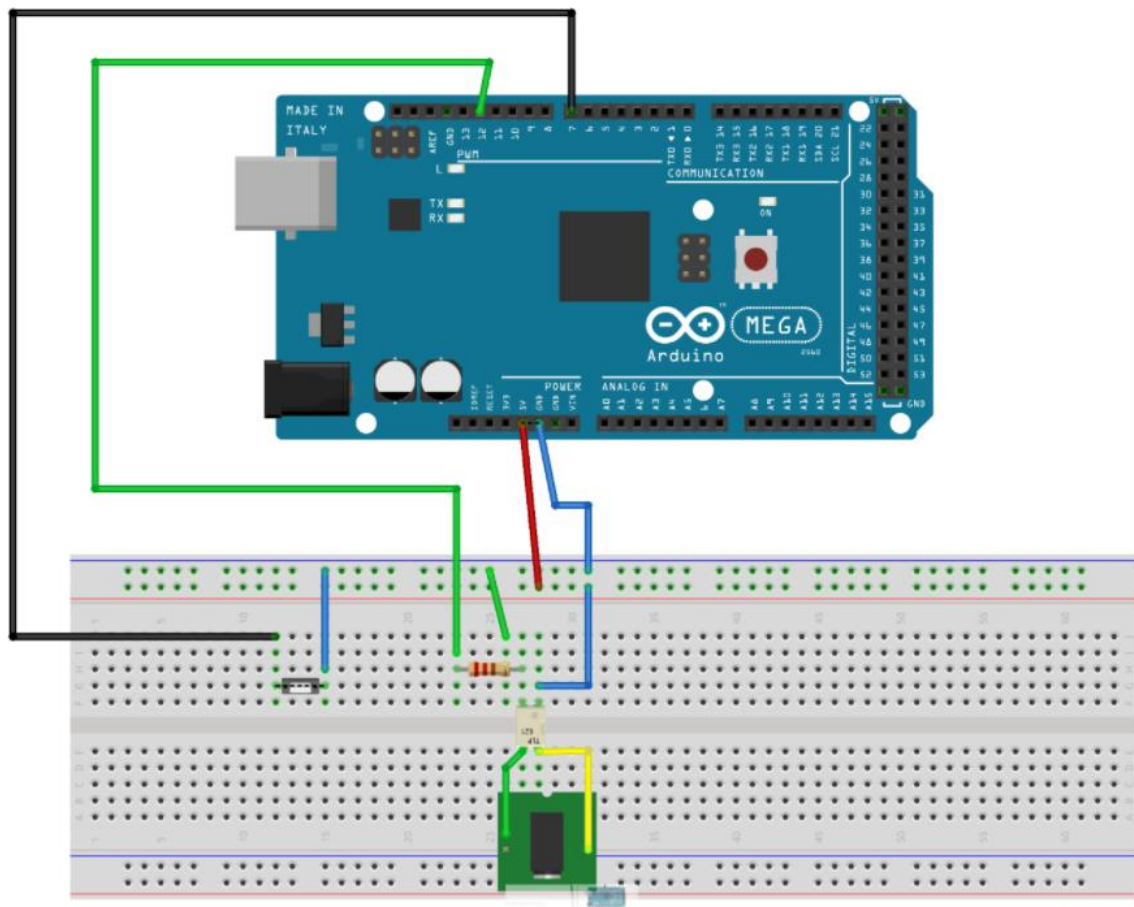


Figura 105 - Esquema eletrônico para captura automática de fotografias (Cortesia do Professor Isidro Sánchez-Arce)

Para melhor compreensão, descreve-se na Figura 106 a lista de componentes utilizados na concepção do sistema.

Label	Part Type	Properties
Part1	Arduino Mega 2560 (Rev3)	type Arduino MEGA 2560 (Rev3)
R1	220Ω Resistor	bands 4; resistance 220Ω; tolerance ±5%; package THT; pin spacing 400 mil
S1	Pushbutton	default state Normally Open; switching circuit SPST; package THT
U1	TLP621	part TLP621; package THT; part # MOC 8101
U2	2.5mm Audio Jack	variant 2.5mm; size 2.5mm; package stereojack2.5mm_stereojack2.5mm

Figura 106 - Lista de componentes (Cortesia do Professor Isidro Sánchez-Arce)

Na Figura 107 pode ser observado o *setup* completo para os ensaios dos provetes DCB, *setup* esse que também é usado nos ensaios ENF.



Figura 107 - Setup ensaio DCB

O equipamento de automatização da captura de imagens, pode ser observado ao pormenor na Figura 108.



Figura 108 - Equipamento para captura automática de imagens

Para os ensaios DCB, os parâmetros medidos foram  $P$ ,  $\delta$ ,  $a$ . O *software* do equipamento de ensaios regista a força e deslocamento das amarras durante o ensaio, sendo este realizado a uma velocidade constante. O equipamento fotográfico regista as imagens a cada 5 segundos, podendo ser possível verificar o aumento da fenda e posteriormente

correlacionar com o tempo de modo a ser possível o tratamento dos dados e obtenção da curva- $R$  e das curvas  $P-\delta$ . Na Figura 109 e Figura 110 pode-se observar um exemplo de uma captura do início do ensaio e perto do final do mesmo.

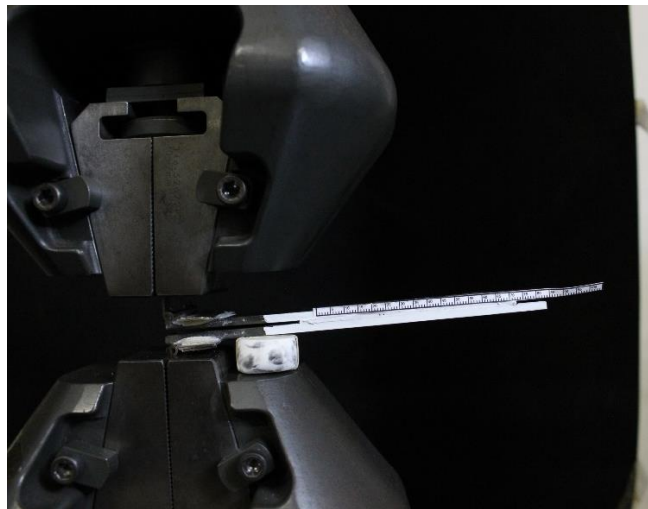


Figura 109 - Foto inicial do ensaio DCB

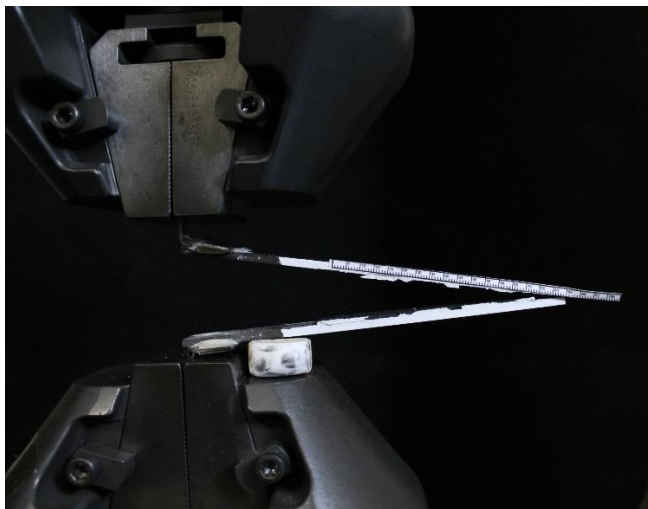


Figura 110 - Foto perto da rotura do ensaio DCB

### 3.4.3 Resultados

Para a determinação das propriedades à fratura à tração do adesivo em estudo, foram usados os métodos de correlação de imagem que usam a medição do comprimento de fendas, CCM e CBT, e o método baseado no comprimento de fenda equivalente, CBBM.

Para o cálculo de  $G_{IC}$  pelo método CCM, utilizou-se a equação (6).



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

Onde a flexibilidade  $C$  é dada pela razão entre  $P$  e  $\delta$  [7]. Para o cálculo de  $G_{Ic}$  pelo método CBT, utilizou-se a equação (7).

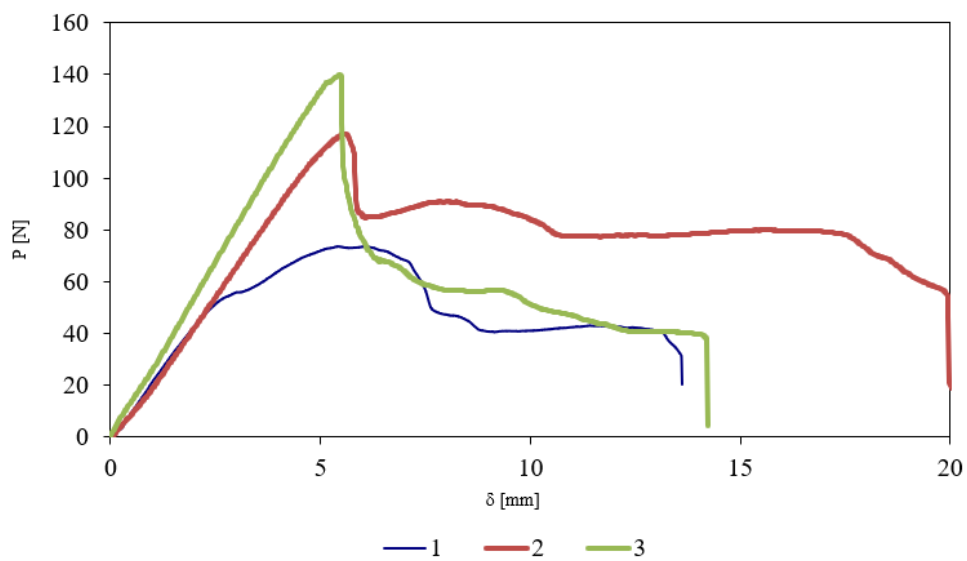
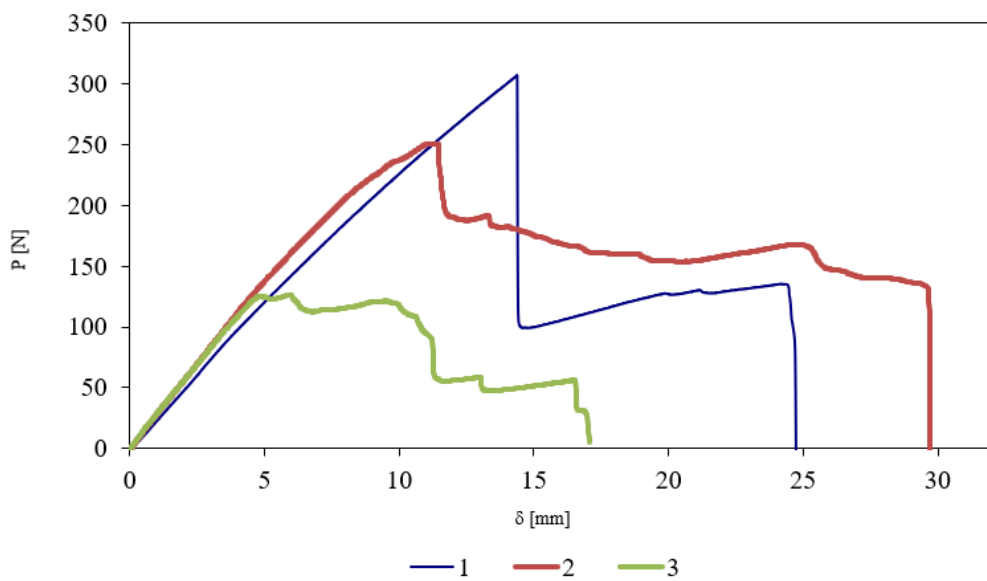
$$G_{Ic} = \frac{3P \times \delta}{2b \times (a + |\Delta|)}, \quad (7)$$

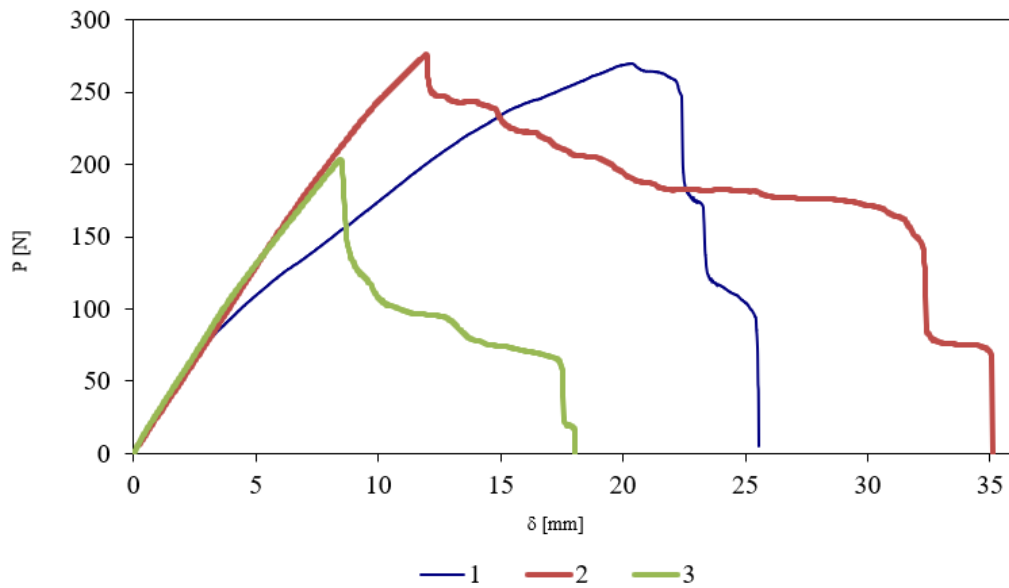
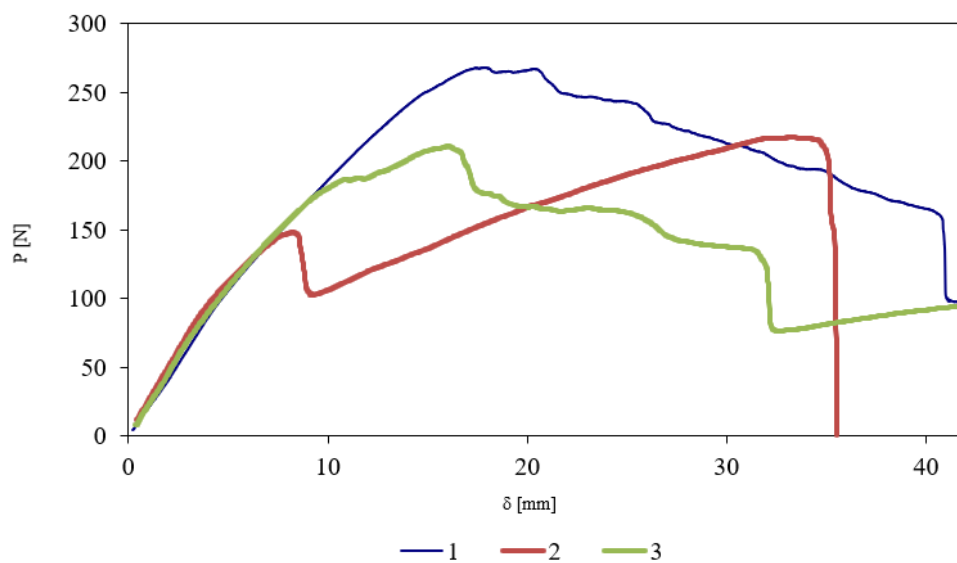
Onde  $\Delta$  é um fator de correção que contabiliza a rotação dos aderentes na extremidade da fenda [7].

Para o cálculo do  $G_{Ic}$  através do método CBBM, consideraram-se um  $a_{eq}$ , durante a propagação de fenda. Neste caso particular do adesivo em estudo, é necessário considerar o efeito da Zona de Processo da Fratura (ZPF). A ZPF é uma zona de material a qual sofre dano por parte de processos inelásticos, como por exemplo microfissuração, e está localizada na extremidade da fenda [6]. Para o cálculo usou-se a equação (8) [7].

$$G_{Ic} = \frac{6P^2}{b^2 \times t} \times \left( \frac{2s_e^2}{t^2 \times E_f} + \frac{1}{5G} \right), \quad (8)$$

De seguida são apresentas as curvas  $P-\delta$  por concentração de fibras de vidro para o adesivo em estudo (Figura 111 até Figura 114).

Figura 111 – Curvas  $P$ - $\delta$  obtidas do ensaio DCB a 0 GF phrFigura 112 – Curvas  $P$ - $\delta$  obtidas do ensaio DCB a 15 GF phr

Figura 113 – Curvas  $P$ - $\delta$  obtidas do ensaio DCB a 35 GF phrFigura 114 – Curvas  $P$ - $\delta$  obtidas do ensaio DCB a 55 GF phr

Ao observar as curvas  $P$ - $\delta$ , foi possível concluir que são bastante idênticas dentro da mesma concentração de fibras de vidro no adesivo. Estas curvas apresentam normalmente três etapas possíveis de identificar. Na primeira etapa é possível observar que as curvas apresentam um comportamento estável e ascendente, resultante da curva apresentar uma evolução linear que pode ser associada a um comportamento elástico. Posto isto, o regime elástico termina e inicia-se um processo de deformação

irreversível no adesivo (ZPF). Neste patamar a energia armazenada no provete atinge o valor de  $G_{IC}$ , o que resulta no início da propagação da fenda. Após atingir o valor de  $P_{máx}$ , inicia-se a terceira etapa, na qual fenda sofre uma fase de propagação autosemelhante.

De seguida, apresenta-se um exemplo de uma curva- $R$  usada para o cálculo de  $G_{IC}$ . Como no geral houve similaridade entre os valores dos métodos usados, foi usada a curva do provete 1 da concentração de fibras de vidro de 0 GF phr (Figura 115).

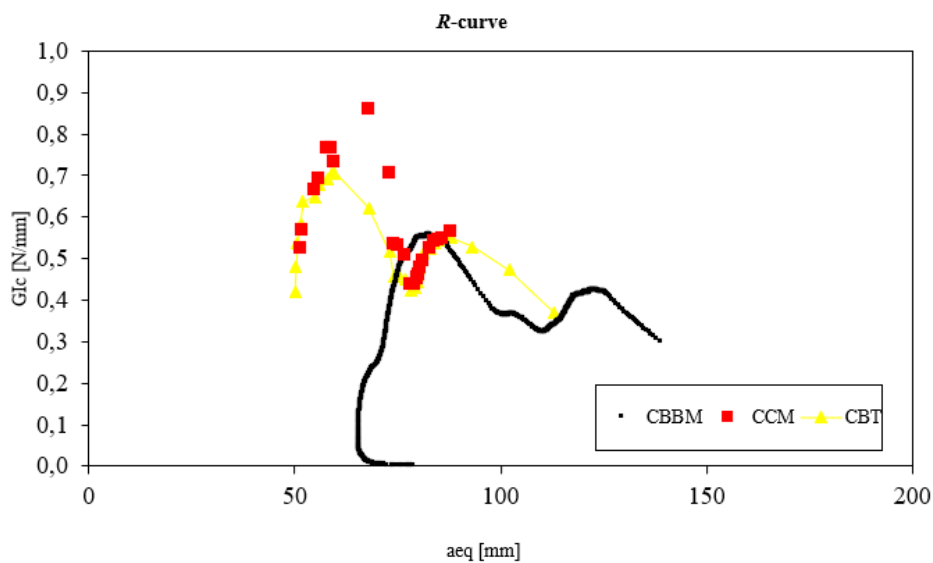


Figura 115 - Curva- $R$  do provete 1 da concentração de 0 GF phr

Após ser concluído este procedimento para todos os provetes em estudo, organizaram-se os dados obtidos de  $G_{IC}$ , sendo apresentados na Tabela 31 até à Tabela 34 por concentração de fibras, provetes e métodos.

Tabela 31 - Valor de  $G_{IC}$  para concentração de 0 GF phr

Concentração/Provete	$G_{IC}$ [N/mm]		
	CCM	CBT	CBBM
CO_1	0,5589	0,5574	0,5564
CO_2	0,7944	0,7873	0,7987
CO_3	0,7020	0,7057	0,7087

<b>Média</b>	0,6851	0,6835	0,6879
<b>Desvio Padrão</b>	0,1186	0,1166	0,1224

Tabela 32 - Valor de  $G_{IC}$  para concentração de 15 GF phr

<b>Concentração/Provete</b>	<b><math>G_{IC}</math> [N/mm]</b>		
	<b>CCM</b>	<b>CBT</b>	<b>CBBM</b>
C015_1	3,2310	3,2872	3,2988
C015_2	3,3328	3,2961	3,3069
C015_3	<b>Anulado</b>		
<b>Média</b>	3,2819	3,2917	3,3029
<b>Desvio Padrão</b>	0,07196	0,0063	0,0057

Tabela 33 - Valor de  $G_{IC}$  para concentração de 35 GF phr

<b>Concentração/Provete</b>	<b><math>G_{IC}</math> [N/mm]</b>		
	<b>CCM</b>	<b>CBT</b>	<b>CBBM</b>
C035_1	6,0110	6,0126	6,0131
C035_2	5,2974	5,2992	5,3050
C035_3	<b>Anulado</b>		
<b>Média</b>	5,6542	5,6559	5,6591
<b>Desvio Padrão</b>	0,5046	0,5044	0,5007

Tabela 34 - Valor de  $G_{IC}$  para concentração de 55 GF phr

<b>Concentração/Provete</b>	<b><math>G_{IC}</math> [N/mm]</b>		
	<b>CCM</b>	<b>CBT</b>	<b>CBBM</b>

C055_1	7,8330	7,4166	7,8865
C055_2	7,8020	7,5346	7,7594
C055_3	<b>Anulado</b>		
<b>Média</b>	7,8175	7,4756	7,8230
<b>Desvio Padrão</b>	0,02193	0,08347	0,08986

O provete 3 da concentração de 15 GF phr apresenta um patamar de rigidez bastante inferior aos restantes, pelo que foi anulado para efeitos de cálculo. O provete 3 da concentração de 35 GF phr apresenta uma queda abrupta do valor de  $P$ . Esta diferença pode ser resultante de uma cedência por parte do material do aderente ou mesmo escorregamento durante o ensaio, pelo que também foi anulado.

Para uma melhor perceção da evolução do valor de  $G_{IC}$ , na Figura 116 apresentam-se os valores em forma de gráfico e organizados por concentração de fibras de vidro. E de notar a similaridade entre todos os métodos para cada concentração, apenas de notar uma ligeira diferença na concentração de 55 GF phr entre os valores obtidos através do método CCM e CBBM e o método CBT. De uma maneira geral o valor de  $G_{IC}$  apresenta um aumento proporcional ao aumento da percentagem de fibras no adesivo.

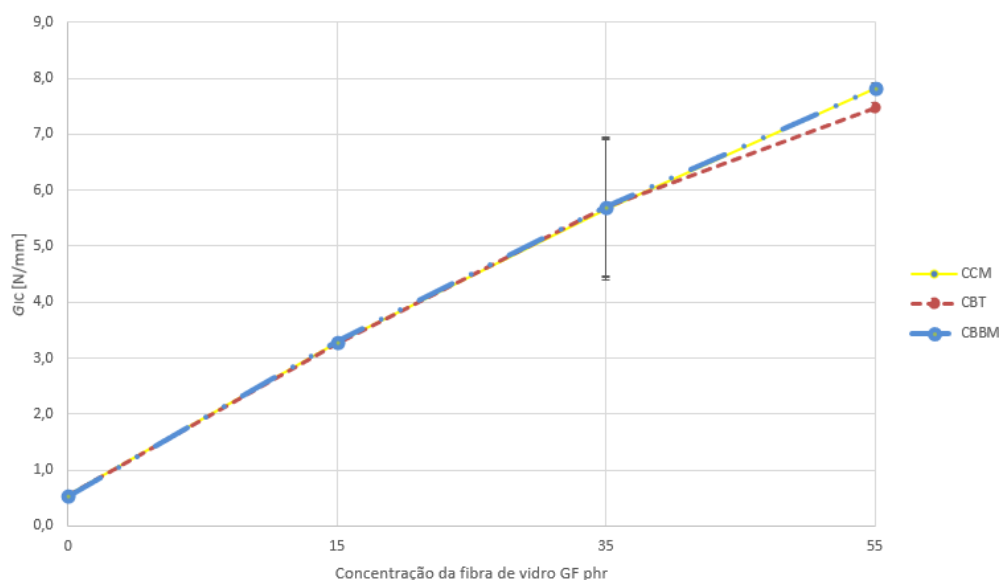


Figura 116 - Evolução do  $G_{IC}$  com a concentração de fibras

De seguida apresenta-se os provetes após ensaio para analisar o tipo de rotura que ocorreu nos mesmos. Para a concentração de 0 GF phr, pode-se observar que na sua maioria a rotura ocorrida foi adesiva (Figura 117). Para os provetes com 15 GF phr de fibras de vidro, é possível observar que o provete 3 teve uma rotura mista, este facto pode ser explicado pela curva  $P-\delta$  incerta o que levou a um valor mais baixo de  $P$  (Figura 118). Para os provetes com 35 GF phr de concentração, o provete 1 e 2 apresentam uma rotura mista/coesiva, o que é coerente com os bons resultados. Em relação ao provete 3 apresenta uma rotura adesiva, pelo que pode ter ocorrido uma má preparação da superfície e resultou numa má adesão do adesivo ao substrato e o ensaio foi anulado (Figura 119). Os provetes com concentração de 55 GF phr apresentam no provete 1 e 2 rotura mista/coesiva. O provete 3 apresenta uma rotura mista, mas os valores não foram consistentes para validação do ensaio (Figura 120).



Figura 117 – Superfície de fratura provetes DCB 0 GF phr



Figura 118 – Superfície de fratura provetes DCB 15 GF phr



Figura 119 – Superfície de fratura provetes DCB 35 GF phr





Figura 120 – Superfície de fratura provetes DCB 55 GF phr

### 3.5 Ensaios de fratura ao corte

O presente capítulo aborda os ensaios de fratura ao corte com provetes ENF. São abordadas as diferenças entre estes dois tipos de ensaios e preparação de provetes.

#### 3.5.1 Fabrico dos provetes

Os provetes ENF foram obtidos através das mesmas placas de carbono-epóxico fabricadas anteriormente, cujo processo está descrito no capítulo 3.3.1. Foram utilizados três provetes por concentração de fibras de vidro num total de 12 provetes. Na Figura 121 pode-se observar um exemplo da configuração nos provetes ENF.

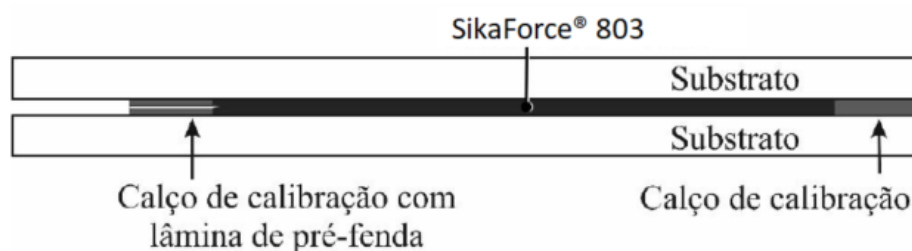


Figura 121 - Esquema provete ENF

Como já se explicou, todos os provetes obedecem a normas de dimensões. Neste caso, os aderentes utilizados nos provetes possuem 3 mm de espessura, 15 mm de largura e

230 mm de comprimento. Na Figura 122 apresentam-se as dimensões relevantes do provete.

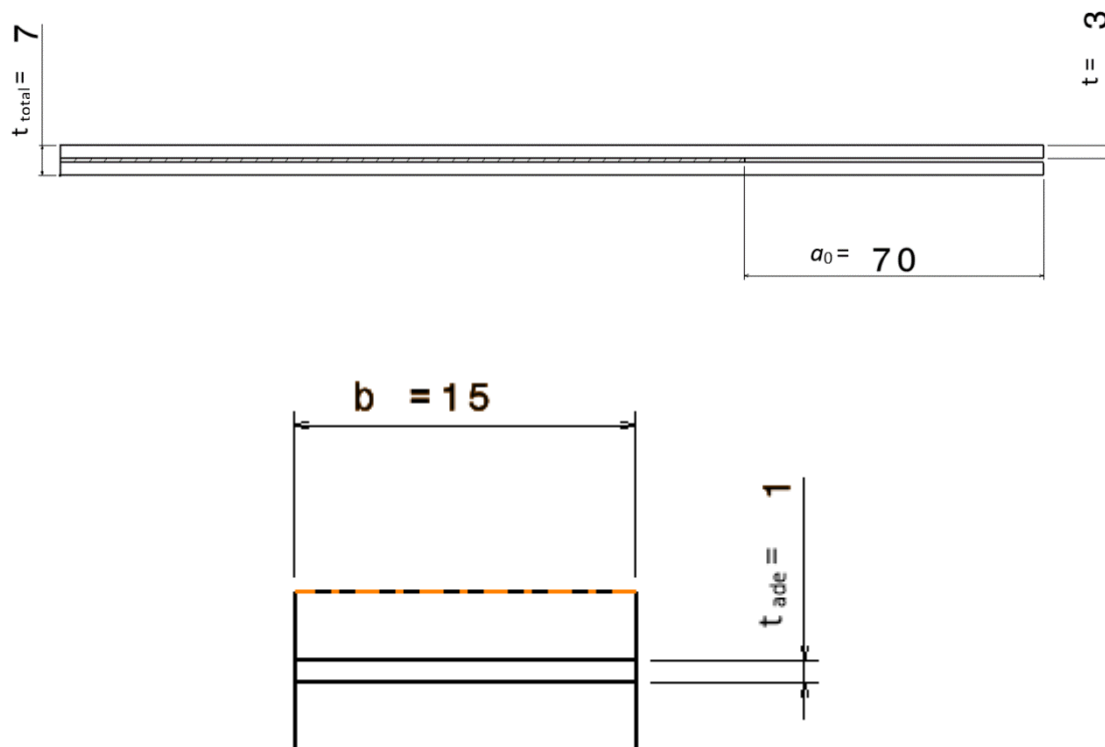


Figura 122 - Dimensões provete ENF

De seguida deu-se início à preparação dos provetes. À semelhança dos ensaios DCB, os aderentes requerem a mesma preparação. Posto isto, deu-se início ao processo de lixagem manual com auxílio de uma lixa. Neste caso, a zona de lixagem será maior, pois também é maior a zona de colagem e colocação de adesivo. No total foram lixados 24 aderentes de modo a corresponder a todos os provetes necessários à realização dos ensaios. Na Figura 124 apresenta-se os aderentes prontos para iniciar o processo de colagem.

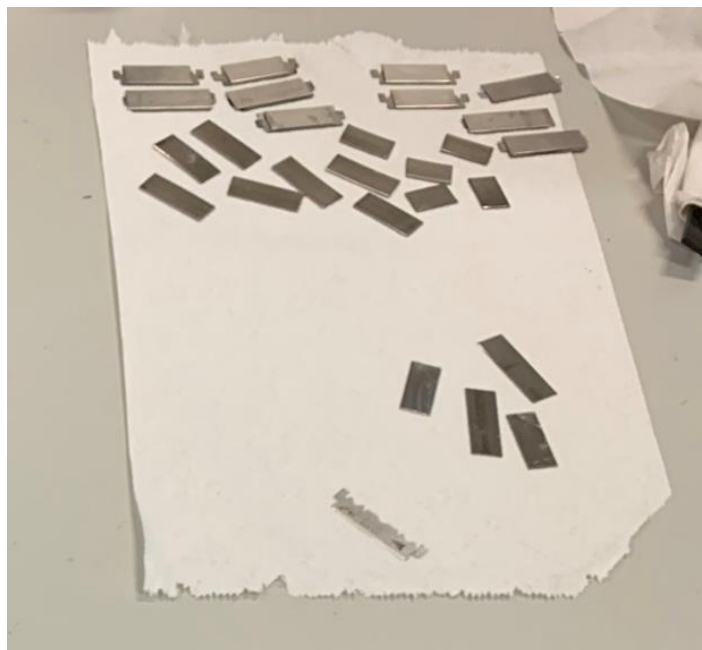


Figura 123 – Fitas calibradas usadas para calços



Figura 124 - Aderentes ENF prontos para colagem

Finalizado este processo, iniciou-se o processo de colagem. Para isto foram identificados os provetes com auxílio de uma caneta de tinta permanente com a nomenclatura “ENF\_803\_0\_1”, sendo respectivamente, tipo de provete, tipo de adesivo, concentração de fibras de vidro e número de provete. Com os aderentes posicionados, colaram-se os

calços nas posições corretas. Sendo o calço da pré fenda colado a uma distância de  $a_0 = 70$  mm, do topo do provete do lado que não foi preenchido com adesivo (Figura 125).



Figura 125 - Aderentes ENF posicionados para colagem

A quantidade de adesivo preparada foi sempre de 50 g por concentração, como descrito no capítulo referente ao fabrico dos provetes de adesivo maciço (Figura 126).

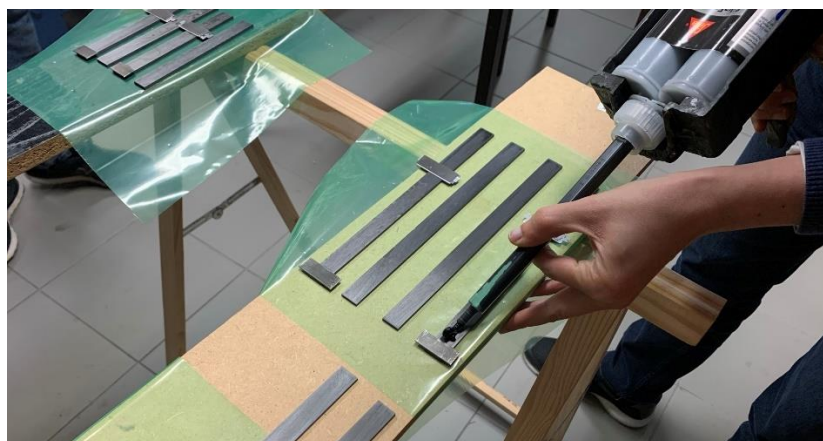


Figura 126 - Aplicação do adesivo nos aderentes

Após a aplicação do adesivo, colocaram-se os aderentes superiores sobre o adesivo e fez-se pressão para garantir a boa adesão e espessura de camada pretendida. De ressaltar o cuidado no alinhamento dos aderentes aquando da construção da junta. Após garantido o alinhamento correto, colocaram-se grampos de fixação e deixaram-se os provetes a repousar para o processo de cura (pois estes podem deslizar sob o efeito de *aquaplaning*), como se apresenta na Figura 127.



Figura 127 - Provetes finalizados para cura

Finalizado o processo de cura, deu-se início à limpeza do excesso de adesivo dos provetes (Figura 128).



Figura 128 - Provete com a escala colada

### 3.5.2 Ensaio dos provetes

Para a realização dos ensaios, foi necessário a recolha de algumas dimensões dos provetes. Iniciou-se com a recolha do valor de  $a_0$  com auxílio de um paquímetro digital. Os valores obtidos podem ser vistos na **Erro! A origem da referência não foi encontrada..**

Adicionalmente às medidas de  $a_0$ , mediram-se as espessuras e larguras dos provetes, para serem usadas no tratamento de dados e cálculos de propriedades. As espessuras medidas são de  $t$ ,  $t_{total}$ , o que corresponde a soma das espessuras dos aderentes e espessura total do provete, procedimento realizado para obter a  $t_{ade}$ . Foi também necessário obter a medida da largura do provete ( $b$ ). Para o caso em estudo, foram efetuadas duas medições para cada provete. Estes valores são apresentados na Tabela 35 até à Tabela 38.

Tabela 35 - Dimensões provetes ENF 0 GF phr

GF phr		Provetes					
		b (mm)	Média	$a_0$ (mm)	$t_{total}$ (mm)	$t$ (mm)	$t_{ade}$ (mm)
0	1	15,22	15,15	72,88	6,43	5,44	0,99
		15,04					
	2	15,12	15,13	68,76	6,50	5,33	1,17
		15,14					
	3	14,84	14,96	67,34	6,43	5,28	1,15
		15,08					

Tabela 36 - Dimensões provetes ENF 15 GF phr

GF phr		Provetes					
		b (mm)	Média	$a_0$ (mm)	$t_{total}$ (mm)	$t$ (mm)	$t_{ade}$ (mm)
15	1	15,22	15,26	66,99	6,78	5,89	0,89
		15,30					
	2	15,10	15,11	66,39	7,07	6,09	0,98
		15,11					
	3	15,23	15,27	67,08	6,95	5,92	1,03
		15,31					

Tabela 37 - Dimensões provetes ENF 35 GF phr

GF phr		Provetes					
		b (mm)	Média	$a_0$ (mm)	$t_{total}$ (mm)	$t$ (mm)	$t_{ade}$ (mm)
35	1	15,08	15,16	74,40	6,78	5,74	1,04
		15,25					
	2	15,07	15,13	72,20	6,94	5,89	1,05
		15,18					
	3	15,52	15,42	69,30	7,08	6,03	1,05
		15,32					

Tabela 38 - Dimensões provetes ENF 55 GF phr



GF phr		Provetes					
		b (mm)	Média	$a_0$ (mm)	$t_{total}$ (mm)	$t$ (mm)	$t_{ade}$ (mm)
55	1	15,38	15,37	69,23	6,89	5,86	1,03
		15,35					
	2	15,12	15,12	66,82	6,95	5,84	1,09
		15,11					
	3	15,20	15,20	67,15	7,02	5,82	1,20
		15,19					

Para o ensaio dos provetes ENF, foi necessário a utilização de um *setup* para ensaios de flexão a três pontos. Esta ferramenta é composta por uma mesa com 2 rolos de apoio que foram calibrados para terem uma distância de 200 mm entre si. A peça superior é composta por um punção de carga que se desloca durante o ensaio aplicando a solicitação, de modo a ser possível propagar a fenda previamente feita numa solicitação à flexão. O passo seguinte consistiu na colocação do provete devidamente alinhado sobre a mesa de suporte, para garantir que o punção superior estaria alinhado a meio vau. Uma situação particular deste ensaio foi a inclusão de folha de Teflon® entre os substratos do provete para que o escorregamento relativo não causasse atrito entre ambos (Figura 130). Na Figura 129 é possível observar o *setup* para o ensaio ENF.

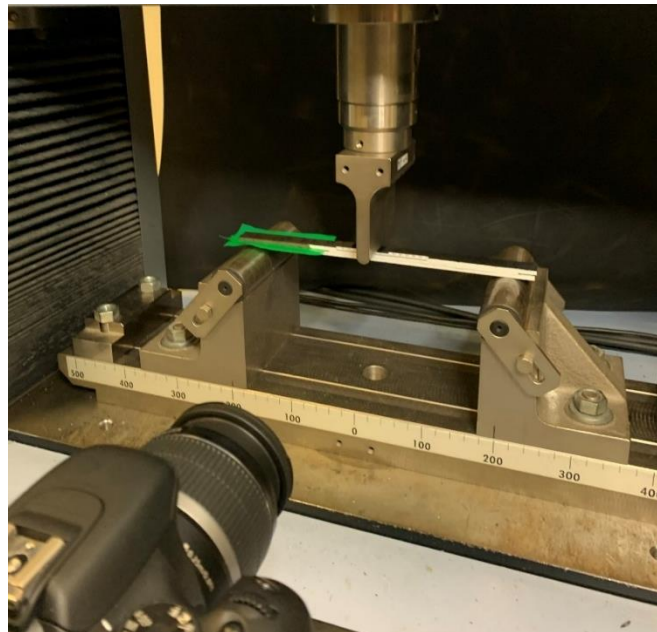


Figura 129 - *Setup* ensaio provetes ENF

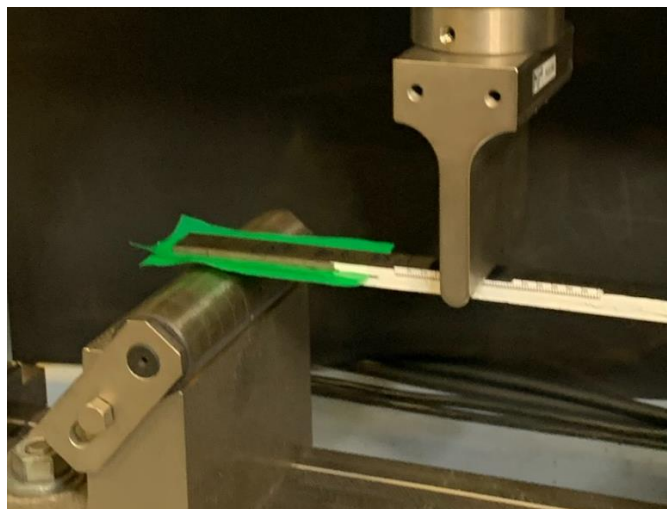


Figura 130 - Pormenor folhas de Teflon®

Seguidamente, deu-se início ao ensaio com o ajuste do punção superior a baixa velocidade. Este ajuste é feito manualmente até entrar em contacto com o provete. A velocidade de ensaio utilizada para este ensaio foi de 3 mm/min. Para o cálculo de  $G_{IIC}$  foi utilizado o mesmo método de correlação de descrito no capítulo 3.4.2. Na Figura 131 é apresentado novamente o *setup* de ensaio com uma vista geral.



Figura 131 - *Setup* geral ensaio ENF



De seguida, são apresentadas, como exemplo, uma captura do início do ensaio e uma próxima do fim do ensaio (Figura 132, Figura 133). É possível observar a flexão sofrida pelo provete que leva a propagação da fenda como assinalado na Figura 133.

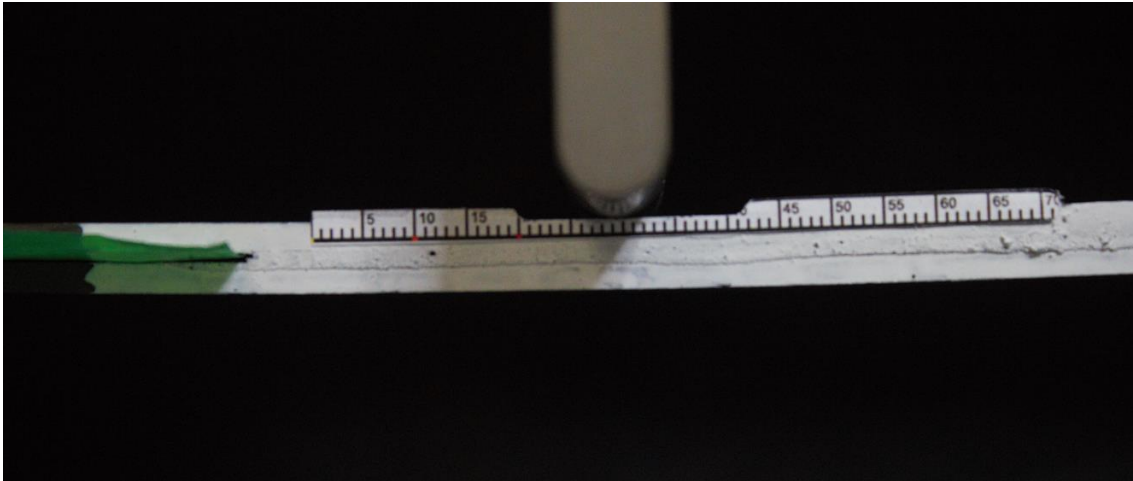


Figura 132 - Início do ensaio com provete ENF

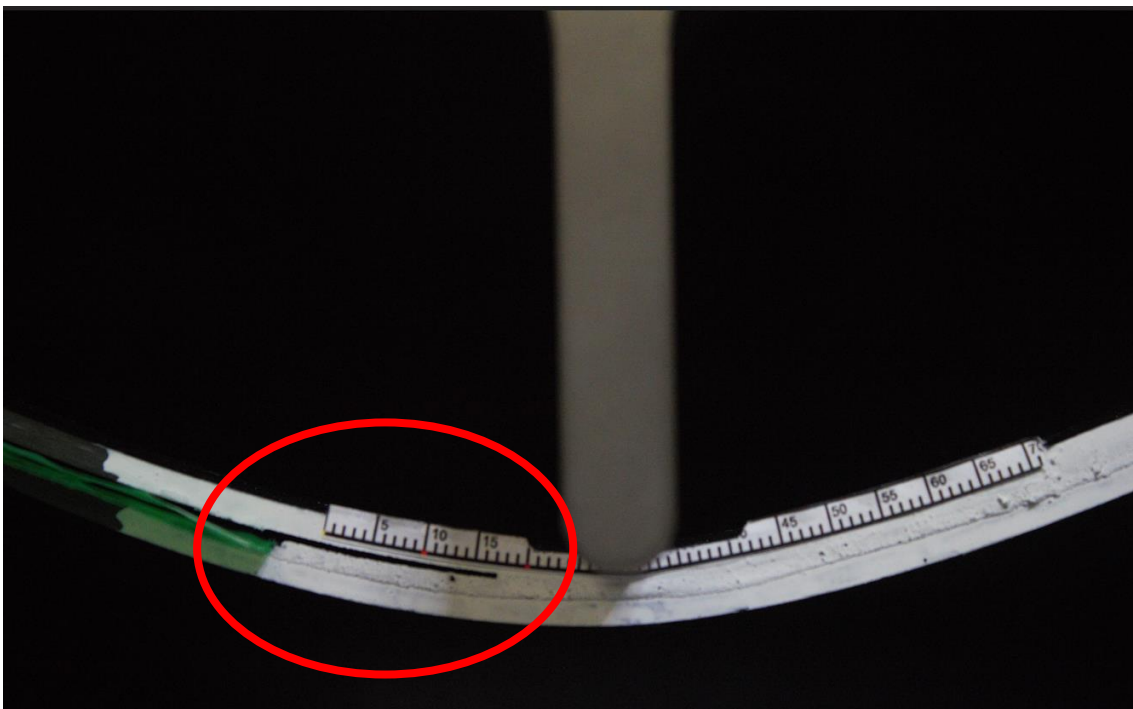


Figura 133 – Próximo do fim do ensaio com provete ENF

O *software* regista a força aplicada e o deslocamento, resultando na possibilidade de cálculo do  $G_{IIC}$  e obtenção das curvas  $R$  e  $P-\delta$ .

### 3.5.3 Resultados

Para a determinação das propriedades à fratura ao corte do adesivo em estudo, foram usados os métodos de correlação de imagem que usam a medição do comprimento de fendam, CCM e CBT, e o método baseado no comprimento de fenda equivalente, CBBM. De seguida, estes métodos são explicados com a alteração das equações. Adicionalmente foi necessário usar o método DBT.

Para o cálculo de  $G_{IIc}$  pelo método CCM, utilizou-se a equação (9) [6].

$$G_{IIc} = \frac{3P^2 \times C_1 \times a^2}{2b}, \quad (9)$$

Para o cálculo de  $G_{IIc}$  pelo método CBT, utilizou-se a equação (10) [6].

$$G_{IIc} = \frac{9P^2 \times (a + | \Delta_{II} |)}{4b^2 \times t^3 \times E_1}, \quad (10)$$

Para o cálculo de  $G_{IIc}$  pelo método DBT, utilizou-se a equação (11) [6].

$$G_{IIc} = \frac{9P^2 \times a^2}{16b^2 \times t^3 \times E}, \quad (11)$$

Para o cálculo de  $G_{IIc}$  pelo método CBBM, utilizou-se a equação (12) [6].

$$G_{IIc} = \frac{9P^2 \times a_{eq}^2}{16b^2 \times t^3 \times E}, \quad (12)$$

De seguida são apresentadas as curvas  $P-\delta$  por concentração de fibras de vidro para o adesivo em estudo (Figura 134 até à Figura 137). Devido ao elevado número de ensaios

não validados pelo facto de ter ocorrido rotura dos aderentes antes do início da propagação da fenda devido à ductilidade do adesivo, são apenas apresentadas as curvas e resultados para os provetes válidos.

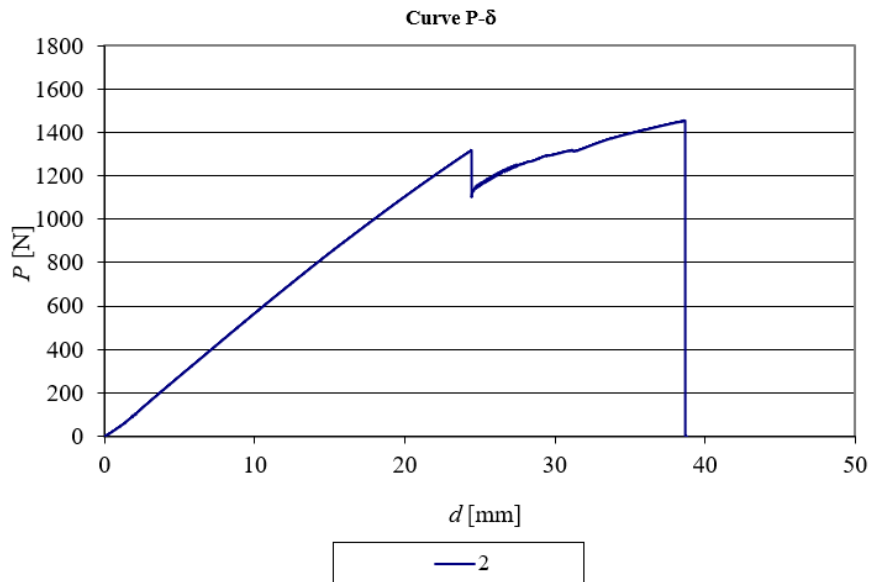


Figura 134 - Curva  $P$ - $\delta$  para provete 2 com 15 GF phr

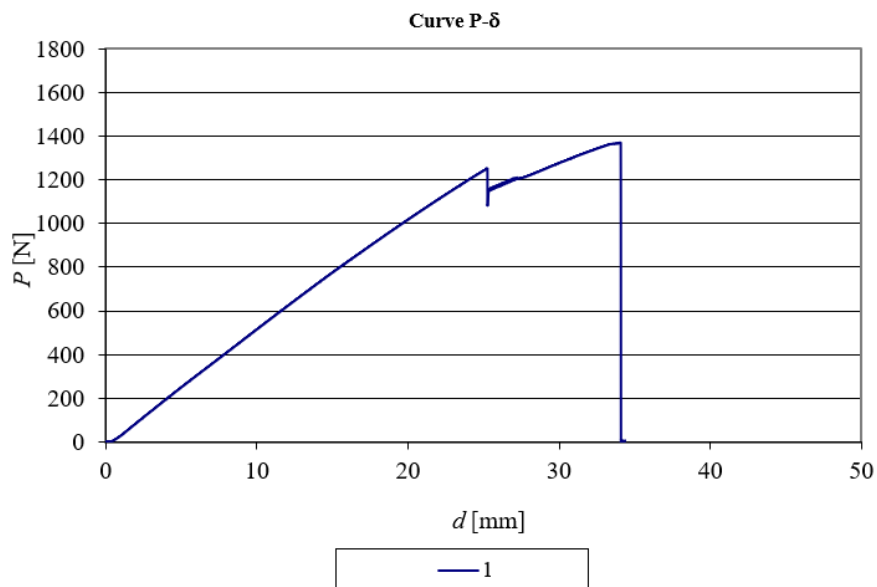
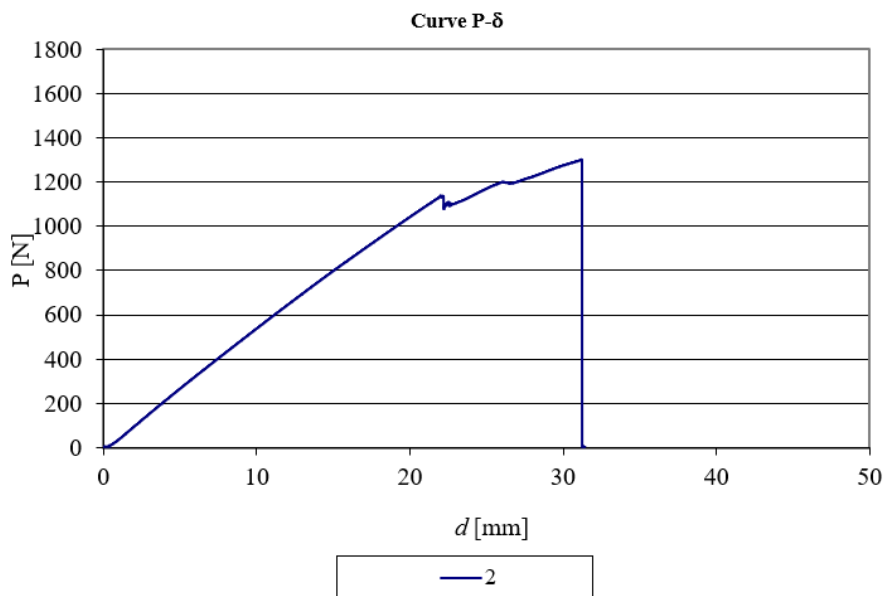
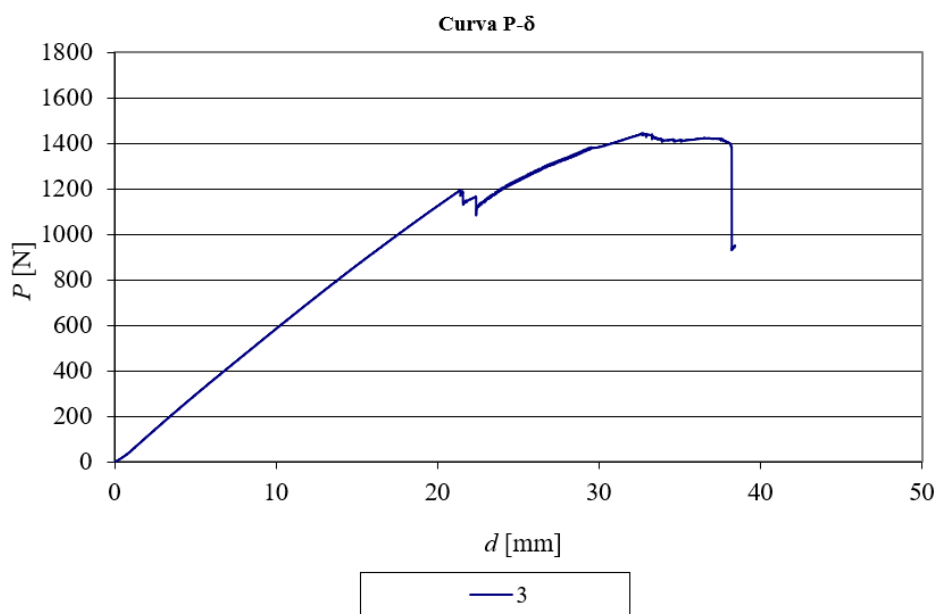


Figura 135 - Curva  $P$ - $\delta$  para provete 1 com 35 GF phr

Figura 136 - Curva P- $\delta$  para provete 2 com 55 GF phrFigura 137 - Curva P- $\delta$  para provete 3 com 55 GF phr

De igual modo procedeu-se à obtenção das curvas  $R$ . Como descrito anteriormente, este cálculo efetuou-se apenas para os provetes cujo ensaio foi validado. Da Figura 138 até à Figura 141 podem ser analisadas as curvas  $R$  para os provetes ensaiados.

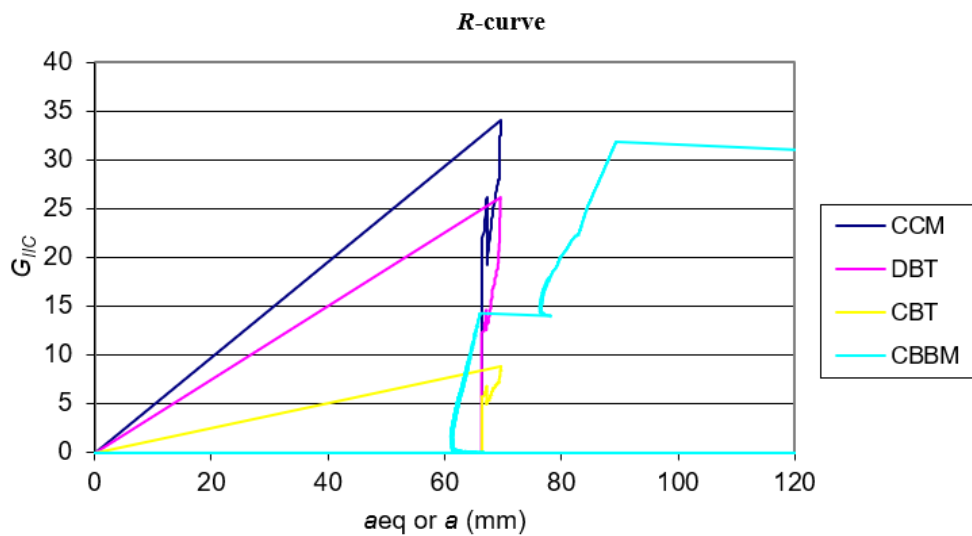


Figura 138 - Curva-R para provete 2 com 15 GF phr

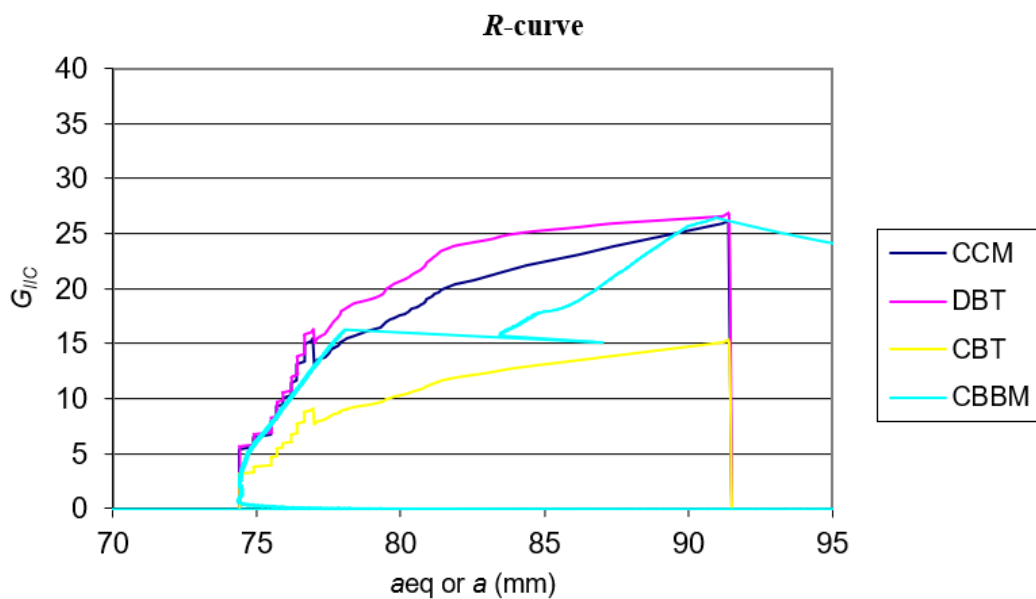


Figura 139 - Curva-R para provete 1 com 35 GF phr

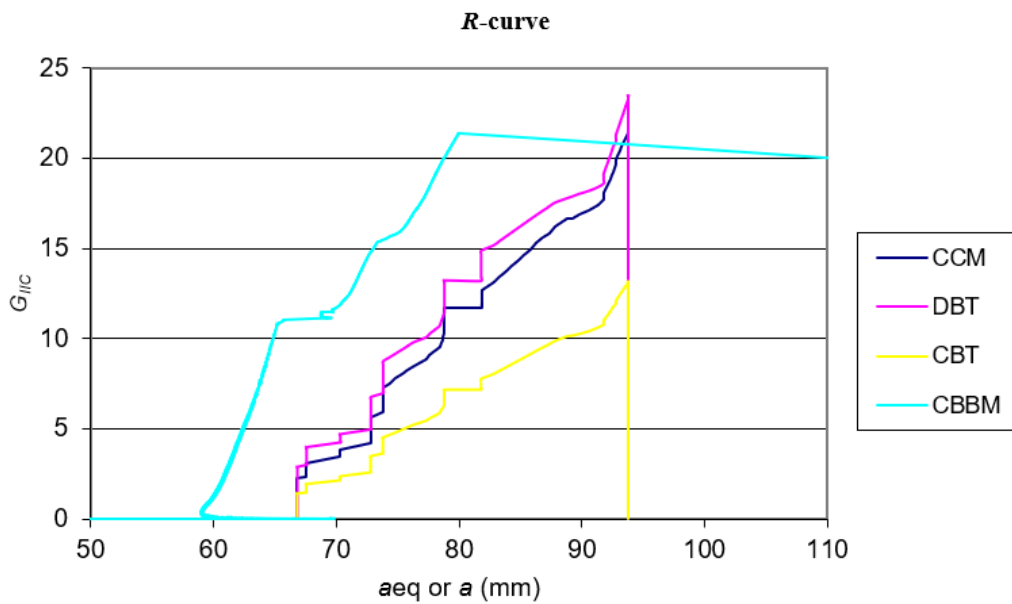


Figura 140 - Curva-R para provete 2 com 55 GF phr

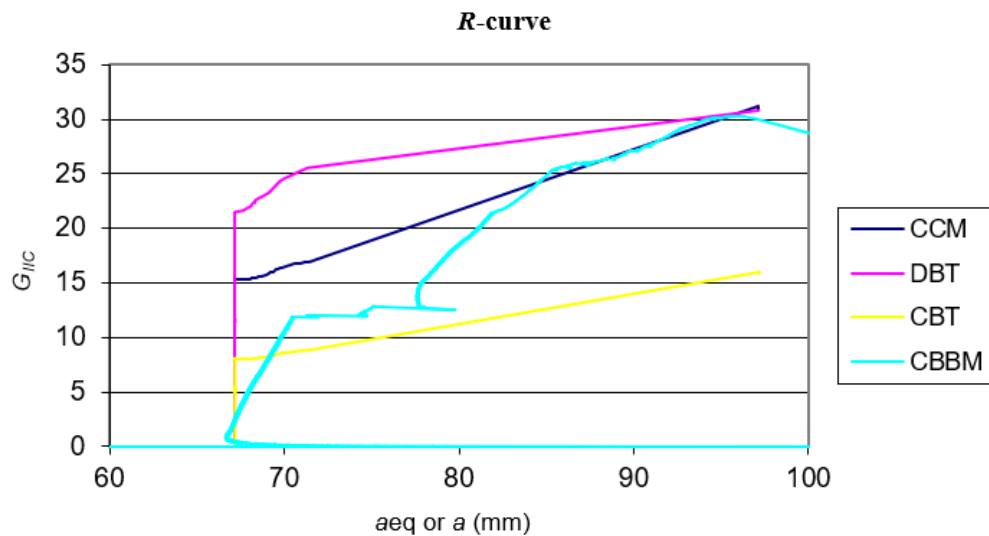


Figura 141 - Curva-R para provete 3 com 55 GF phr

As curvas  $P$ - $\delta$  têm um comportamento muito semelhante até atingirem o valor  $P_{m\acute{a}x}$ . Neste caso, foi possível generalizar o comportamento destas durante a fase inicial. No início, é possível verificar um crescimento das curvas de forma linear e constante, correspondendo a um comportamento elástico reversível. De seguida, e por causa da ductilidade elevada do adesivo seleccionado, os provetes apresentavam cedência parcial

por parte das fibras dos aderentes, voltando posteriormente ao seu crescimento original, mas desta vez com uma inclinação bastante menor. Como descrito anteriormente, isto levou a um elevado número de ensaios não válidos. No caso dos ensaios dados como válidos, a fenda propagou-se sem que fosse notório um rompimento de fibras nos aderentes.

Posto isto, analisou-se as curvas-*R* do adesivo em estudo nesta dissertação. Verificou-se uma evolução semelhante de  $G_{IIC}$  para os métodos CBBM, CCM e DBT. Sendo que no caso do método CBT, existe uma discrepância com registo de valores inferiores, o que pode ser contabilizado com a ausência da contabilização dos efeitos do atrito [1].

Após ser concluído este procedimento para todos os provetes em estudo, organizaram-se os dados obtidos de  $G_{IIC}$ , sendo apresentados na Tabela 39 até à Tabela 41 por concentração de fibras, provetes e métodos.

Tabela 39 – Valor de  $G_{IIC}$  para concentração de 15 GF phr

Concentração/Provete	$G_{IIC}$ [N/mm]			
	CCM	CBT	DBT	CBBM
C015_1	Anulado			
C015_2	25,3293	8,6995	25,7623	25,9669
C015_3	Anulado			
<b>Média</b>	25,3293	8,6995	25,7623	25,9669

Tabela 40 – Valor de  $G_{IIC}$  para concentração de 35 GF phr

Concentração/Provete	$G_{IIC}$ [N/mm]			
	CCM	CBT	DBT	CBBM
C035_1	26,1354	13,3467	26,0496	26,2589
C035_2	Anulado			
C035_3	Anulado			

<b>Média</b>	26,1354	13,3467	26,0496	26,2589
--------------	---------	---------	---------	---------

Tabela 41 – Valor de  $G_{IIC}$  para concentração de 55 GF phr

<b>Concentração/Provete</b>	<b><math>G_{IIC}</math> [N/mm]</b>			
	<b>CCM</b>	<b>CBT</b>	<b>DBT</b>	<b>CBBM</b>
<b>C055_1</b>	29,5296	11,7958	28,8384	31,4075
<b>C055_2</b>	<b>Anulado</b>			
<b>C055_3</b>	30,7740	15,8467	31,0273	30,2617
<b>Média</b>	30,2784	13,8212	29,8062	30,8346
<b>Desvio Padrão</b>	1,0590	2,8644	1,3687	0,8102

Observaram-se os valores obtidos de  $G_{IIC}$  e foi possível concluir que houve um ligeiro aumento gradual entre concentrações. Apesar da quantidade de provetes ser baixa, pode-se afirmar que com o aumento da concentração de fibras do adesivo, resulta um aumento da tenacidade ao corte do adesivo aditivado.

De seguida apresenta-se os provetes após ensaio para analisar o tipo de rotura que ocorreu nos mesmos. Para a concentração de 0 GF phr, não foram adquiridas imagens pois todos os provetes cederam prematuramente. Para a concentração de 15 GF phr, é possível verificar um ligeiro início de fenda no provete 2 (Figura 142). Para a concentração de 35 GF phr, é notório uma fenda no provete 1 (Figura 143). Para a concentração de 55 GF phr, o provete 3 apresenta uma rotura significativa no aderente, que aconteceu após o término do ensaio (Figura 144).





Figura 142 – Rotura de provetes com 15 GF phr de concentração



Figura 143 – Rotura de provetes com 35 GF phr de concentração



Figura 144 – Rotura de provetes com 55 GF phr de concentração

### 3.6 Ensaios de modo misto em JSS

#### 3.6.1 Fabrico de provetes JSS

Os aderentes têm as dimensões de 15 mm de largura e 140mm de comprimento. Para o total das quatro concentrações de fibra de vidro analisadas, foram necessários dois aderentes por cada provete num total de três provetes ensaiados para cada concentração (Figura 145).

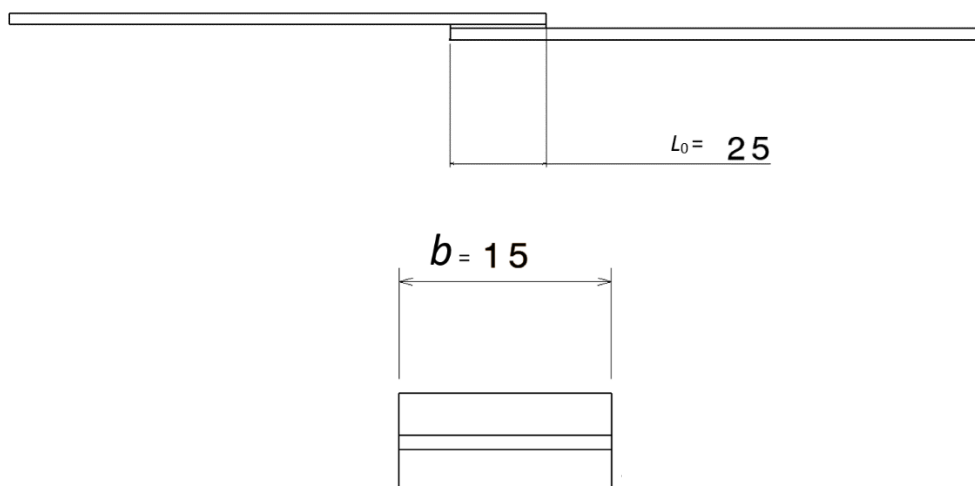


Figura 145 - Dimensões provete junta sobreposição simples

Para a criação da junta e colagem do adesivo esta irá ter uma área de colagem de 15 mm x 25 mm, isto é, o comprimento de sobreposição da junta é de 25 mm (Figura 146).

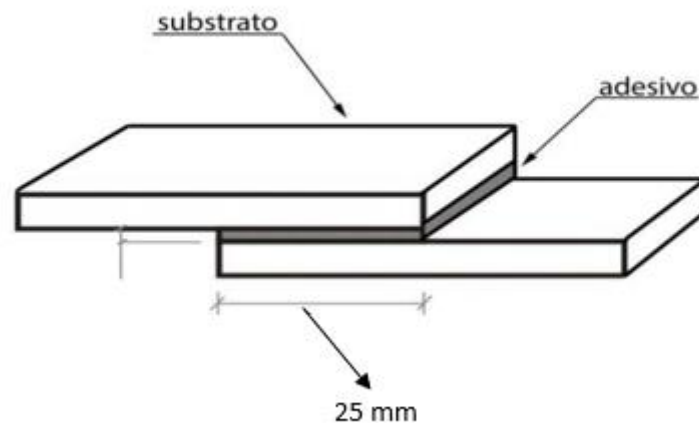


Figura 146 - Comprimento de sobreposição

Uma correta preparação de superfície torna-se essencial a fim de obter uma superfície limpa, molhável, e que garanta uma correta adesão para garantir a validade dos ensaios. Posto isto, após a conclusão do corte deu-se início à preparação das superfícies dos aderentes através de uma lixagem (Figura 147) manual e posterior limpeza com acetona de modo a remover as impurezas (Figura 148).



Figura 147 - Lixa 80 gramagem usada para preparação de superfície



Figura 148 - Aderentes com superfície preparada

Dada por concluída a lixagem e limpeza dos provetes, procedeu-se ao início da construção da junta de sobreposição simples. Este processo inicia-se com a colocação de tiras de madeira sobre cavaletes, as quais irão ter os provetes sobre elas. Por cima das tiras são colocadas folhas de Teflon® para que o adesivo em excesso, aquando da colocação da junta, não escorra e fique colado às tiras de madeira criando irregularidades e desníveis nas mesmas. Os aderentes são marcados com auxílio de uma caneta de tinta permanente. Este processo permite identificar qual a concentração de fibras de vidro e adesivo que cada um leva, e o número do provete para posterior ajuda na análise dos dados caso surja algum problema. Findo a marcação dos provetes, estes foram colocados em posição estratégica sobre as folhas de Teflon®, de modo que após a aplicação do adesivo seja fácil a junção dos aderentes para criação da junta. As quantidades e concentrações do adesivo seguiram o mesmo método referido anteriormente para os provetes *bulk*.



Figura 149 – Colagem dos provetes JSS

Finalizou-se o processo de construção da junta com a aplicação do adesivo. Colocou-se o substrato superior e exerceu-se pressão na zona de localização dos calções de forma ao excesso de adesivo ser expelido, garantindo que se teria a espessura uniforme de 1 mm aproximadamente. De seguida aplicou-se os grampos às juntas para garantir que não haja movimentos na junta durante o processo de cura. No processo foi também necessário, efetuar a marcação dos 25 mm de comprimento de sobreposição e garantir o alinhamento dos aderentes aquando da colagem, sendo estes um dos pontos mais importantes durante a construção das mesmas. Na Figura 149 pode-se observar as juntas finalizadas iniciando o processo de cura.

### 3.6.2 Ensaio dos provetes

Os ensaios de tração com juntas de sobreposição simples usa o *setup* de tração. Neste caso apenas se destaca a diferença em relação aos ensaios *bulk* com o facto de não ser utilizado o extensómetro para medir as deformações reais. Estas deformações serão posteriormente calculadas com os dados obtidos do ensaio.

Os provetes foram identificados previamente com o tipo de ensaio, a concentração de fibras de vidro e o número de provete, seguindo uma nomenclatura do tipo “SLJ\_803\_0\_1”. Antes de realizar do ensaio é necessário obter as dimensões do provete, nomeadamente a largura e o comprimento de sobreposição. Foram retirados dois

valores de cada dimensão e posteriormente foi efetuada a média. Da Tabela 42 até à Tabela 45 pode-se observar os valores obtidos.

Tabela 42 - Dimensões Provetes 0 GF phr

GF phr		Provetes			
		b (mm)	Média	L <sub>0</sub> (mm)	Média
0	1	15,20	15,28	27,79	27,53
		15,36		27,27	
	2	15,04	14,85	28,5	28,83
		14,66		29,15	
	3	15,68	15,53	27,16	27,53
		15,38		27,90	

Tabela 43 - Dimensões Provetes 15 GF phr

GF phr		Provetes			
		b (mm)	Média	L <sub>0</sub> (mm)	Média
15	1	15,23	15,29	30,51	30,50
		15,35		30,48	
	2	15,20	15,18	25,40	25,45
		15,15		25,49	
	3	15,05	15,06	25,88	25,96
		15,06		26,04	

Tabela 44 - Dimensões Provetes 35 GF phr

GF phr		Provetes			
		b (mm)	Média	L <sub>0</sub> (mm)	Média
35	1	15,70	16,00	27,35	27,32
		16,29		27,28	
	2	15,14	15,23	27,42	23,50
		15,32		27,57	
	3	15,36	15,40	26,35	26,50
		15,43		26,65	

Tabela 45 - Dimensões Provetes 55 GF phr

GF phr		Provetes			
		b (mm)	Média	L <sub>0</sub> (mm)	Média
55	1	15,35	15,37	26,79	26,75
		15,39		26,70	
	2	15,47	15,42	26,19	26,34
		15,36		26,49	
	3	15,16	15,11	26,80	26,74
		15,06		26,68	

Os ensaios com provetes tipo JSS realizaram-se à temperatura ambiente. Iniciou-se o processo com a calibração do equipamento e de forma a considerar um valor igual a zero no início de cada ensaio com a medição de cerca de 180 mm de distância entre amarras, sendo este o valor zero de retorno do equipamento (Figura 150). A velocidade do ensaio usada foi de 1 mm/min.



Figura 150 - Setup ensaio JSS

Posteriormente, e finalizados todos os ensaios, procedeu-se ao tratamento dos dados recolhidos através de uma folha de cálculo em Excel®. Esta folha permite calcular as

diferentes propriedades mecânicas obtidas através dos dados dos ensaios, de forma a ser possível a caracterização da influência das fibras de vidro no adesivo.

### 3.6.3 Resultados

Para o cálculo das propriedades mecânicas do adesivo através dos ensaios com JSS, recorreu-se à equação (2) para obter a tensão de rotura no adesivo.

De seguida, são apresentas as curvas  $P$ - $\delta$  relativas a cada concentração de adesivo (Figura 151 até à Figura 154).

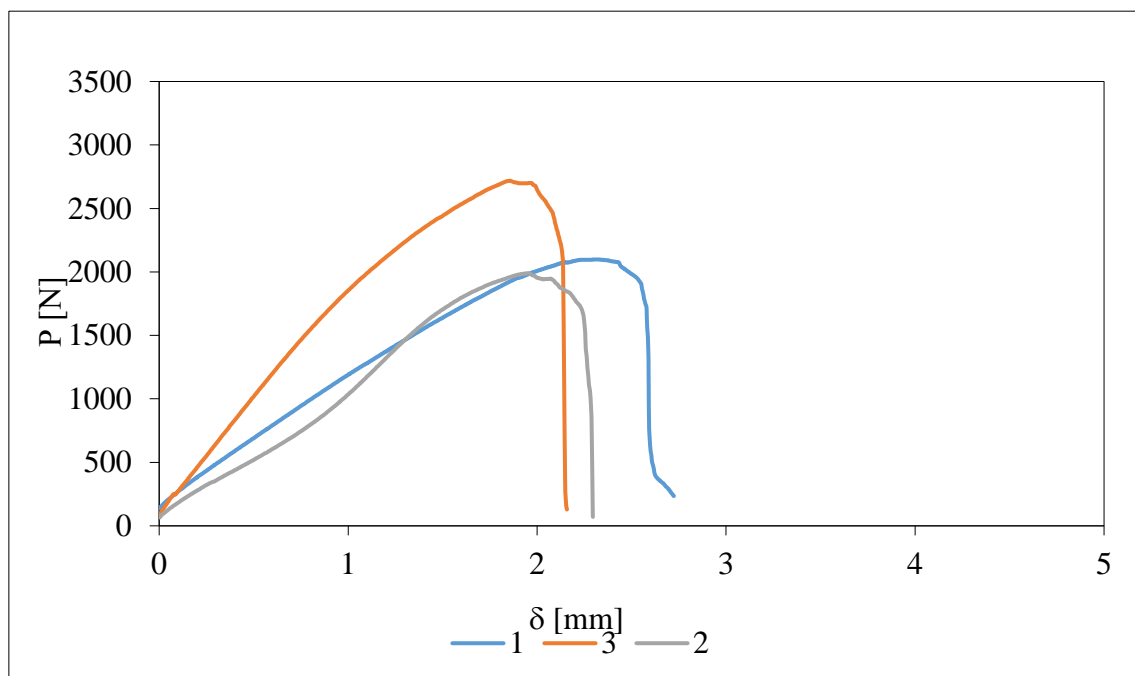
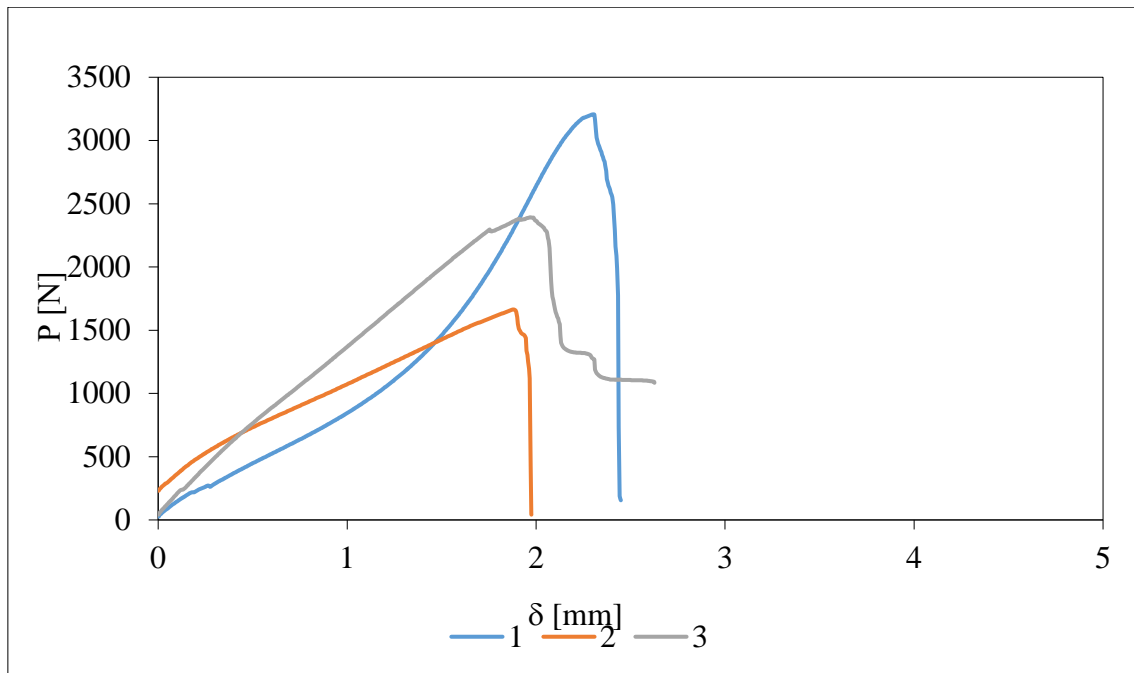
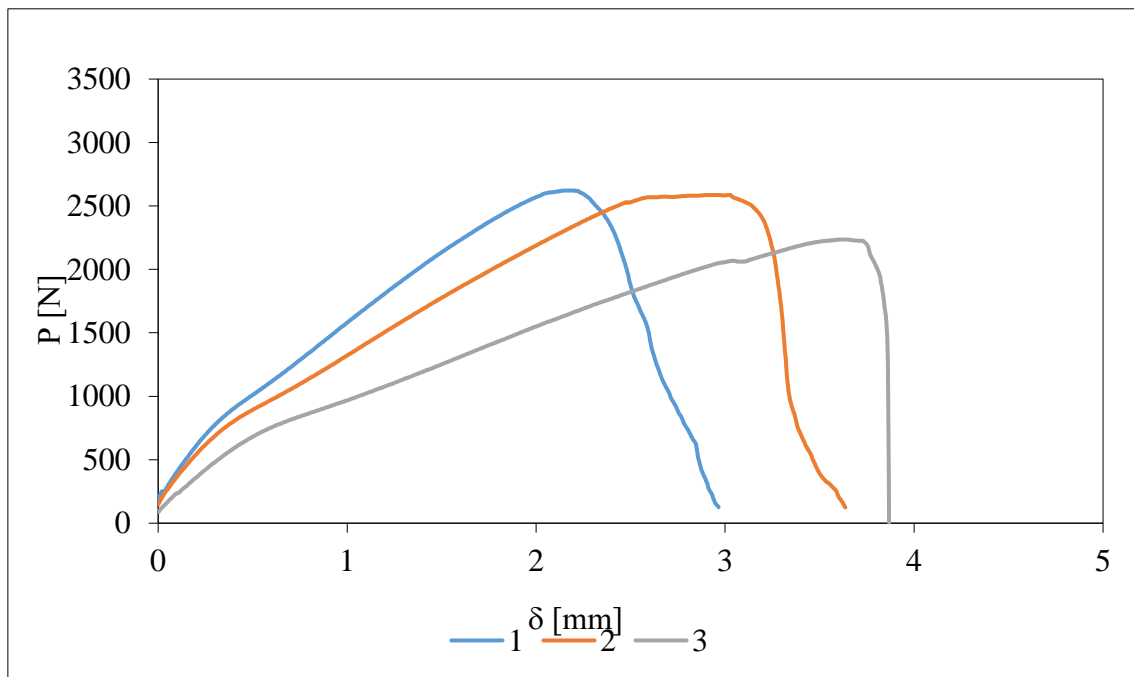
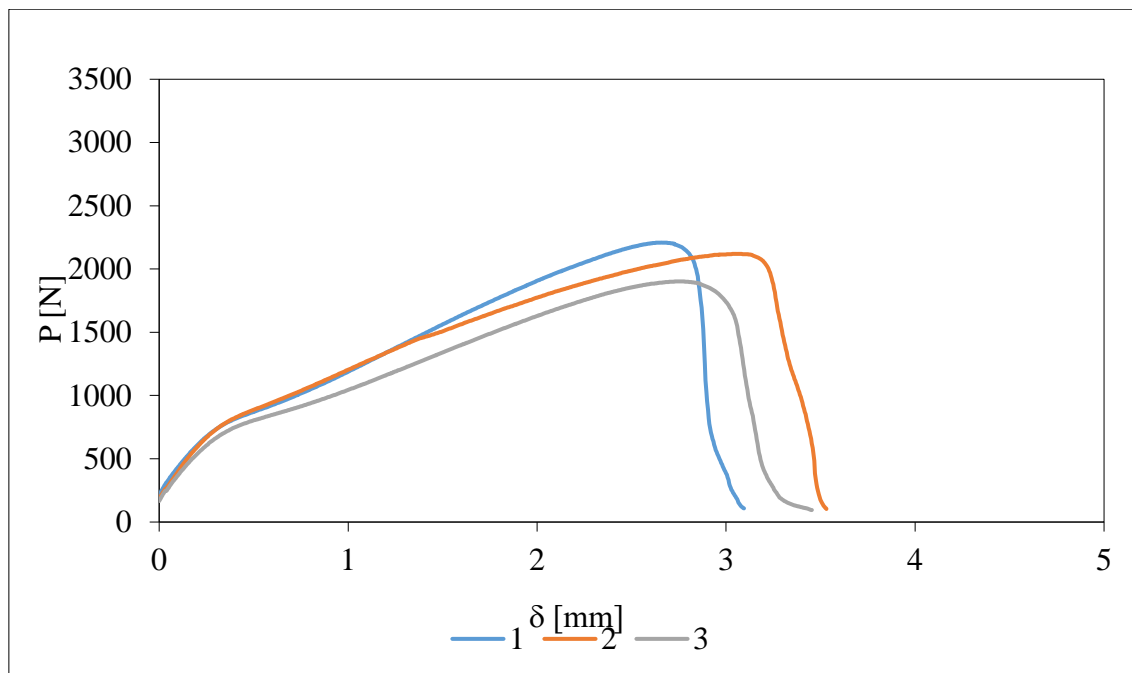


Figura 151 – Curva  $P$ - $\delta$  para provetes 0 GF phr



Figura 152 – Curva  $P-\delta$  para provetes 15 GF phrFigura 153 – Curva  $P-\delta$  para provetes 35 GF phr

Figura 154 – Curva  $P$ - $\delta$  para provetes 55 GF phr

Pela análise das curvas pode-se concluir que não houve grande influência da ação das fibras no adesivo com este tipo de ensaio. As curvas no geral apresentam uma evolução semelhante, e valores semelhantes de  $P$  e  $\delta$ . De notar que pontualmente uma curva sai fora da semelhança geral (exemplo provete 2 da concentração de fibras de 15 GF phr), sendo que estes factos explicam-se por um possível escorregamento durante o ensaio ou fraca adesão do adesivo ao substrato por erro na preparação da superfície. De seguida são apresentados os valores das propriedades na Tabela 46 até à Tabela 49.

Tabela 46 - Propriedades mecânicas ensaio JSS para 0 GF phr

Provete_0 GF phr	Força máxima [N]	Desloc. Rotura [mm]	Tensão máxima [MPa]
1	1839,73	1,751	4,37
2	1988,73	2,295	4,65
3	2500,58	2,158	5,85
<b>Média</b>	2109,68	2,066	4,96
<b>Desvio Padrão</b>	346,63	0,286	0,79

Tabela 47 - Propriedades mecânicas ensaio JSS para 15 GF phr

Provete_15 GF phr	Força máxima [N]	Desloc. Rotura [mm]	Tensão máxima [MPa]
1	2886,80	2,45	6,19
2	1663,38	1,97	4,31
3	2392,07	2,63	6,12
<b>Média</b>	2314,08	2,35	5,54
<b>Desvio Padrão</b>	615,43	0,34	1,07

Tabela 48 - Propriedades mecânicas ensaio JSS para 35 GF phr

Provete_35 GF phr	Força máxima [N]	Desloc. Rotura [mm]	Tensão máxima [MPa]
1	2622,45	2,97	6,00
2	2586,76	3,49	6,18
3	2216,67	3,49	5,43
<b>Média</b>	2475,29	3,32	5,88
<b>Desvio Padrão</b>	224,68	0,30	0,39

Tabela 49 - Propriedades mecânicas ensaio JSS para 55 GF phr

Provete_55 GF phr	Força máxima [N]	Desloc. Rotura [mm]	Tensão máxima [MPa]
1	2208,92	3,09	5,37
2	2119,41	3,49	5,22
3	1902,04	3,45	4,71
<b>Média</b>	2076,79	3,35	5,10
<b>Desvio Padrão</b>	157,82	0,22	0,35

Para existir uma maior facilidade na compreensão dos dados, utilizaram-se os gráficos das Tabela 50, Tabela 51 e Tabela 52 para expor os dados. Neste caso que existe um aumento até à concentração de 35 GF phr nas propriedades em estudo. Pode-se afirmar que existe um ponto máximo para esta concentração com um aumento de cerca de 10% desde a concentração de 0 GF phr, posteriormente há uma ligeira diminuição na concentração de 55 GF phr. Neste caso é possível afirmar que as fibras melhoram as propriedades do adesivo até à concentração de 35 GF phr (Figura 155, Figura 156, Figura 157).

Tabela 50 – Tensão máxima

Tensão Máxima				
GF phr content	0	15	35	55
$\tau_{\text{máx méd}}$ (Mpa)	4,96	5,54	5,87	5,1
Desvio Padrão	0,78	1,07	0,39	0,35

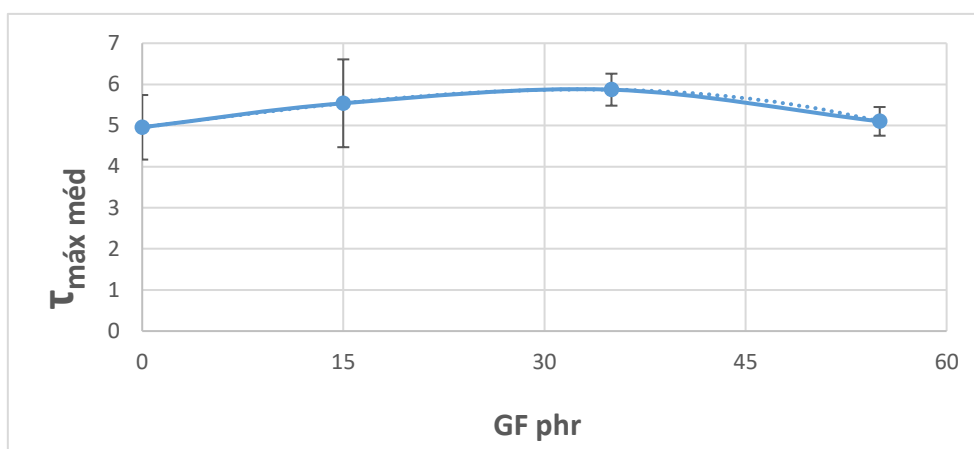


Figura 155 – Gráfico de tensão máxima

Tabela 51 – Deslocamento de rotura

Deslocamento Rotura				
GF phr content	0	15	35	55
$d_{\text{méd}}$ (mm)	2,07	2,35	3,32	3,35
Desvio Padrão	0,29	0,34	0,30	0,22

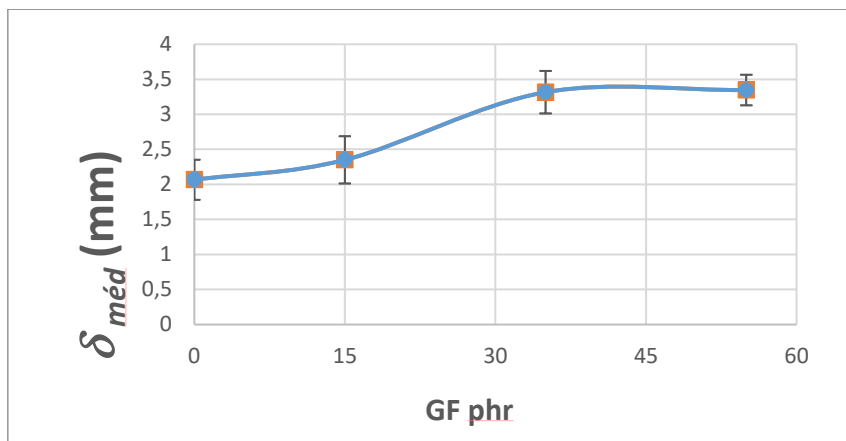


Figura 156 – Gráfico do deslocamento

Tabela 52 – Força máxima

	Força Máxima			
GF phr content	0	15	35	55
$P_{méd}$ (N)	2109,68	2314,08	2475,29	2076,79
Desvio Padrão	346,63	615,43	224,68	157,82

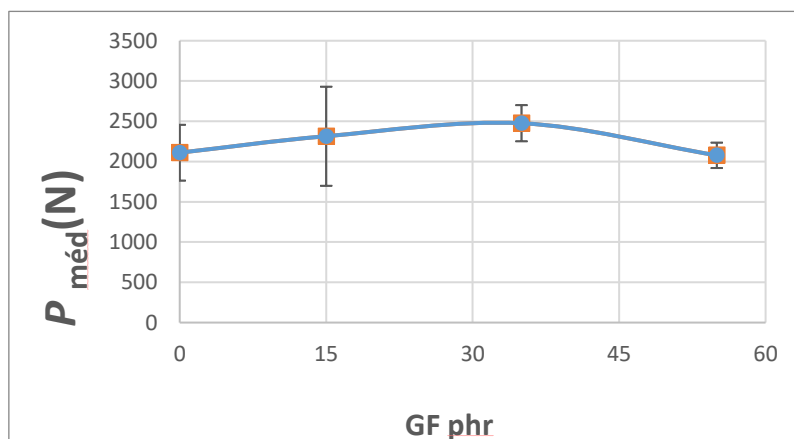


Figura 157 – Gráfico da força máxima

De seguida são apresentados os provetes após ensaio para a análise do modo de rotura. Em resumo, pode-se verificar que os provetes com concentração de 0 GF phr e 15 GF phr apresentam roturas mistas mas maioritariamente podem ser consideradas adesivas

(Figura 158 e Figura 159). No caso dos provetes com 35 GF phr de fibras de vidro, é possível observar que o provete 1 e o provete 2 apresentam rotura coesiva, o que é um bom indicador para os dados obtidos, pois permitem perceber que o material caracterizado foi o adesivo e não o material do aderente (Figura 160). Para os provetes com concentração de 55 GF phr verifica-se que todos apresentam rotura coesiva (Figura 161).



Figura 158 – Provetes JSS após ensaio 0 GF phr



Figura 159 – Provetes JSS após ensaio 15 GF phr

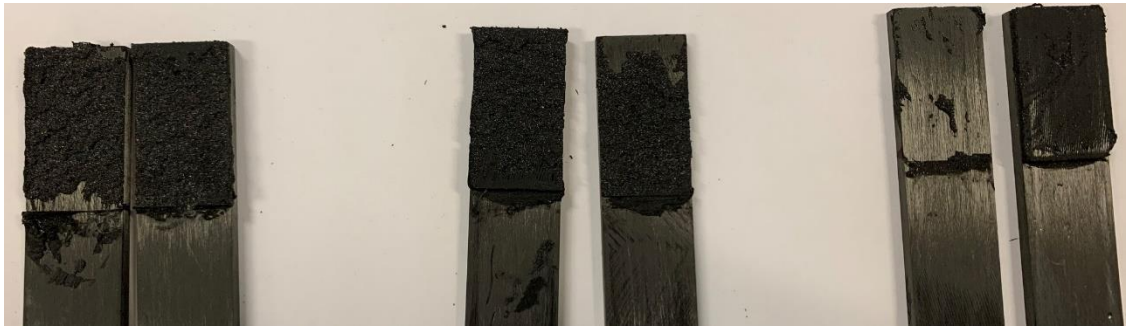


Figura 160 – Provetes JSS após ensaio 35 GF phr



Figura 161 – Provetes JSS após ensaio 55 GF phr





# CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

- 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 de modo misto em JSS
- 4.1 Conclusões
- 4.2 Propostas de trabalhos futuros



## 4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

### 4.1 Conclusões

O principal objetivo desta dissertação foi a caracterização das propriedades mecânicas e de fratura de um adesivo estrutural dúctil, modificado com filamentos de fibra de vidro em diferentes concentrações. O adesivo selecionado para esta dissertação foi o SikaForce® 803, que é um adesivo epóxico estrutural bi-componente. Para a avaliação das propriedades mecânicas do adesivo modificado, foram realizados 5 ensaios experimentais diferentes: ensaios de tração com provetes de adesivo maciço, ensaios mecânicos ao corte através da utilização de provetes do tipo *block shear*, ensaios de fratura à tração com provetes DCB, ensaios de fratura ao corte com provetes ENF e ensaios em modo misto recorrendo ao uso de juntas de sobreposição simples.

Relativamente aos ensaios com provetes maciços, foram estudadas e através da análise dos dados, foi possível verificar que houve uma subida gradual no módulo de Young e, conseqüentemente da tensão limite elástica a 0,2%, com o aumento da concentração de fibras no adesivo. Já nas propriedades associadas ao alongamento e deformação, foi possível verificar que baixou o valor das mesmas, isto pode ser explicado com o aumento de rigidez no adesivo por parte da maior concentração de fibras. As restantes propriedades mantiveram-se estáveis.

Em relação aos ensaios mecânicos ao corte, analisaram-se os dados e concluiu-se que houve um ligeiro aumento na deformação ao corte  $\gamma$ . No módulo  $G$  os valores mantiveram-se estáveis ao longo dos quatro tipos de concentração. Estes resultados demonstram a dificuldade na realização dos ensaios *block shear*.

Com o ensaio DCB foi possível caracterizar as propriedades de fratura à tração do adesivo através do parâmetro de  $G_{Ic}$ . Foram utilizados os métodos que necessitam da medição de  $a$ , como exemplo o CCM e CBT, e os métodos com recurso a medição equivalente como o CBBM. Pode-se concluir o  $G_{Ic}$  aumentou com o aumento da concentração de fibras no adesivo modificado, corroborando a ideia de que as fibras podem ser importantes para certas aplicações.

De igual modo nos ensaios de fratura ao corte com provetes ENF, o  $G_{IIC}$  foi o parâmetro principal em estudo. Concluiu-se que a geometria adotada não é indicada para este conjunto adesivo-substrato, pois quase na totalidade os ensaios foram invalidados.

Em relação aos ensaios em modo misto com provetes JSS, concluiu-se que as propriedades estudadas sofreram um aumento até aos 35 GF phr, sendo este o ponto de inflexão máximo. Posteriormente em todas elas há uma ligeira diminuição para a concentração de 55 GF phr. No geral é possível afirmar esta como possível concentração ideal no ensaio em estudo.

Em suma, grande parte dos objetivos desta dissertação foram atingidos e o estudo da aditivação foi conclusivo e elucidativo das melhorias que podem ser trazidas às aplicações quando usados adesivos aditivados.

#### 4.2 Propostas de trabalhos futuros

Terminada a realização da presente dissertação, seria importante desenvolver alguns trabalhos para um melhor estudo da aditivação, tanto no adesivo escolhido, como no tipo de material da aditivação. Seria interessante desenvolver os seguintes trabalhos:

- Estudo da adição de outro tipo de partículas ao adesivo SikaForce® 803;
- Realização do estudo da adição de fibras de vidro a outro tipo de adesivo, não só do tipo estrutural;
- Realização do estudo da aditivação de outro tipo de fibras de vidro (outro formato ou tamanho) e a influência na modificação de adesivos.
- Repetir os ensaios ENF com diferentes geometrias.
- Repetir os ensaios com pouca taxa de sucesso, após análise cuidada das causas dos insucessos.





**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES  
DE INFORMAÇÃO**





---

## 5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

- [1] E. M. Petrie, *Handbook of Adhesives and Sealants*, 2nd ed., New York: McGraw-Hill handbooks, 2007, p. 1048.
- [2] L. F. Silva, A. G. Magalhães e M. F. Moura, *Juntas Adesivas Estruturais*, Publindústria, Edições Técnicas, 2007, p. 358.
- [3] G. R. M. Tavares, “Caracterização Juntas adesivas com diferentes preparações superficiais,” Trabalho no âmbito de PROLI: Instituto Superior de Engenharia do Porto, Insitituto Superior de Engenharia do Porto, 2016.
- [4] G. R. M. Tavares, “Ensaio de tração - Provete de cobre,” em *Trabalho no âmbito de CAMAT: Instituto Superior de Engenharia do Porto*, Porto, 2017.
- [5] P. Cognard, *Adhesives and Sealants*, USA: Elsevier, 2005.
- [6] T. Faneco, *Caraterização das propriedades mecânicas de um adesivo de alta ductilidade*, Porto: Dissertação de mestrado: Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2014.
- [7] J. Monteiro, *Caraterização das propriedades mecânicas e de fratura*, Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2015.

- 
- [8] S. Pinto, Determinação das propriedades mecânicas à tração de adesivos estruturais frágeis e dúcteis, Porto: Dissertação de mestrado: Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2013.
- [9] J. F. A. Morais, “Desenvolvimento de Ferramentas e provetes para o ensaio Thick Adherend Shear Test TAST,” em *Dissertação de Mestrado: Instituto Superior de Engenharia do Porto*, Porto, 2013.
- [10] A. G. Magalhães, Ensaios Mecânicos e Tecnológicos, 3ª Ed., Porto: Publindustria, 2010.
- [11] A. V. Pocius e A. D. Dillard, *The Mechanics of Adhesion Vol.I*, Virginia: Elsevier Science, 2002.
- [12] *ASTM D 5573-99, Standard Practice for Classifying Failure Modes in Fiber Joints*.
- [13] F. Amaral, “Estudo numérico de juntas adesivas com materiais hiperelásticos,” em *Dissertação de licenciatura: Escola Superior de Tecnologia e Gestão*, Porto, 2008.
- [14] L. Silva e R. Adams, *Handbook of Adhesion Technology*, Berlin: Springer, 2011.
- [15] A. Magalhães, Aplicações das técnicas de emissão acústica e radiografia na caracterização do dano produzido por fluência em juntas de materiais compósitos sujeitos a diferentes condições ambientais, Dissertação de mestrado: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Março, 1999.
- [16] M. Banea, L. F. Silva e R. D. S. G. Campilho, *Moulds design for adhesive bulk joint specimens manufacturing, Vol.32*, pp. 284-292, 2012.

- 
- [17] A. Pocius e M. Chaudhury, *Surfaces, Chemistry & Applications*, Virginia: Elsevier Science, 2002.
- [18] G. P. Pucillo e e. al, *On the mechanical characterization of materials by Arcan-type specimens*, 23 February 2011.
- [19] M. D. Banea e L. F. Silva, *Mechanical Characterization of Flexible Adhesives*, pp. 261-285, 2009.
- [20] K. Ikegami e e. al., *Benchmark tests on adhesive strenghts in butt, single and double lap joints and double-cantileber beams*, pp. 219-226, 1996.
- [21] M. F. S. F. Moura, A. B. Morais e A. Magalhães, *Materiais Compósitos- Materiais Fabrico e Comportamento Mecânico*, Porto: Publindustria, 2011.
- [22] *Slides Processos de Ligação - Insituto Superior de Engenharia do Porto*.
- [23] A. Nemati, Giv, M., R. Ayatollahi, H. S., S. Ghaffari e L. Silva, "Effect of reinforcements at different scales on mechanical," *THE JOURNAL OF ADHESION*, pp. 1082-1121, 2018.
- [24] V. Kolář, M. Müller, M. Tichý, A. Rudawska e M. Hromasová, "Influence of Preformed Adherent Angle and Reinforcing Glass Fiber on tensile strength of Hybrid Adhesive Bond," *MANUFACTURING T ECHNOLOGY*, vol. 19, nº 5, 2019.
- [25] M. Raj, L. Raj e P. Dave, "Glass fiber reinforced composites of phenolic–urea–epoxy," *Journal of Saudi Chemical Society*, vol. 16, pp. 241-246, 2012.
- [26] C. S. Bang, J. G. Kim e D. G. Lee, "Performance improvement by glass fiber of adhesively bonded metal joints," *Composite Structures*, vol. 96, pp. 321-331, 2013.

- 
- [27] S. B. Chang, P. ChoongHeum e G. L. Dai, "Optimum glass fiber volume fraction in the adhesive for the Al-SUS," *Composite Structures*, vol. 108, pp. 119-128, 2014.
- [28] B. M. Oliveira, "Comparação dos métodos ENF e 4-ENF para determinação da tenacidade ao corte de juntas adesivas," em *Dissertação de mestrado: Instituto Superior de Engenharia do Porto*, Porto, 2016.
- [29] "Box3," [Online]. Available: <https://www.box3.pt/consumiveis/1265-pistola-aplicadora-para-colas-bi-componente.html>. [Acedido em 8 Novembro 2021].

# ANEXOS

## 6.1 ANEXO1



## 6 ANEXOS

### 6.1 ANEXO1

#### 6.1.1 ANEXO2

## PRODUCT DATA SHEET

# SikaForce®-803 L45

## STRUCTURAL ELASTIC 2-COMPONENT POLYURETHANE ADHESIVE

## TYPICAL PRODUCT DATA (FURTHER VALUES SEE SAFETY DATA SHEET)

Properties	SikaForce®-803 L45 (A)	SikaForce®-803 (B)
Chemical base	Polyol	Isocyanate
Color (CQP001-1)	Black	Black
Density (uncured)	1.2 g/cm <sup>3</sup>	1.2 g/cm <sup>3</sup>
	mixed, calculated	1.2 g/cm <sup>3</sup>
Mixing ratio	by volume	1:1
	by weight	1:1
Viscosity (CQP029-4)	at 10 s <sup>-1</sup>	90 Pa·s <sup>A</sup>
		110 Pa·s <sup>A</sup>
Application temperature	15 – 30 °C	
Open time (CQP580-1, -6 / ISO 4587)	45 minutes <sup>B,C</sup>	
Handling time (CQP580-1, -6 / ISO 4587)	time to reach 1 MPa	120 minutes <sup>B,C</sup>
Shore A hardness (CQP023-1 / ISO 7619-1)	80	
Tensile strength (CQP036-1 / ISO 527)	10 MPa <sup>B,D</sup>	
Elongation at break (CQP036-1 / ISO 527)	300 % <sup>B,D</sup>	
E-Modulus (CQP036-1 / ISO 527)	elongation 0.5 – 1 %	25 MPa <sup>B,D</sup>
Tensile lap-shear strength (CQP046-9 / ISO 4587)	10 MPa <sup>B,C,D</sup>	
Glass transition temperature (CQP509-1 / ISO 6721)	-40 °C <sup>D</sup>	
Shelf life	12 months <sup>E</sup>	

CQP = Corporate Quality Procedure

<sup>A)</sup> tested at 20 °C<sup>B)</sup> 23 °C / 50 % r. h.<sup>C)</sup> adhesive layer: 25 x 12.5 x 1.5 mm<sup>D)</sup> cured for 1 week at 23 °C<sup>E)</sup> storage between 15 – 25 °C**DESCRIPTION**

SikaForce®-803 L45 is a flexible, structural two-component polyurethane adhesive, which cures at room temperature. It is designed for bonding large composite or coated metal components with stable properties over large temperature span. The adhesive combines long open time with fast curing and strength build-up. While uncured, it has very good non-sag and compressibility behavior.

**PRODUCT BENEFITS**

- Combination of structural properties and flexibility
- Stable mechanical properties over wide temperature range
- Combining long open time with fast curing for large assemblies
- Good non-sag behavior
- Excellent compressibility
- Accelerated curing at higher temperature
- Does not contain solvents or PVC

**AREAS OF APPLICATION**

SikaForce®-803 L45 is suitable for structural elastic bonding of composites (e.g., CFRP, GFRP) or coated metals in transportation and general industry.

This product is suitable for experienced professional users only. Tests with actual substrates and conditions have to be performed to ensure adhesion and material compatibility.



## CURE MECHANISM

SikaForce®-803 L45 cures by chemical reaction of the two components at room temperature. Higher temperatures accelerate the cure rate and decrease the open time. High humidity reduces the open time as well.

After the open time is reached, the cure reaction proceeds very fast and the viscosity will increase significantly within minutes. The faster the parts are assembled, the faster the adhesion builds up.

## CHEMICAL RESISTANCE

In view of potential chemical or thermal exposure, it is required to conduct a project related testing.

## METHOD OF APPLICATION

### Surface preparation

Surfaces must be clean, dry and free from grease, oil and dust. Additional surface treatment depends on the specific nature of the substrates and is crucial for a long lasting bond. All pre-treatment steps must be confirmed by preliminary tests on original substrates considering specific conditions in the assembly process.

### Application

Cartridge: Extrude adhesive without mixer to equalize the filling levels. Attach the mixer and dispose of a bead of at least the length of the mixer prior to the application.

SikaForce®-803 L45 shall be dispensed from dual cartridges by pneumatic or electric piston guns. Pails are processed with adequate 2-component equipment.

In case of cartridges use the provided Sulzer MixPac Quadro MFQ 08-32D mixer. If dispensed with 2-component equipment, the mixer needs to be tailored for the specific application.

For advice on selecting and setting up a suitable pump system, contact the System Engineering Department of Sika Industry.

### Removal

SikaForce®-803 L45 may be removed from tools and equipment with Sika® Remover-208 or another suitable solvent.

Hands and exposed skin have to be washed immediately using hand wipes such as Sika® Cleaner-350H or a suitable industrial hand cleaner and water.

Do not use solvents on skin.

## FURTHER INFORMATION

The information herein is offered for general guidance only. Advice on specific applications is available on request from the Technical Department of Sika Industry.

Copies of the following publications are available on request:

- Safety Data Sheets

## PACKAGING INFORMATION

SikaForce®-803 L45

Dual cartridge	400 ml
----------------	--------

SikaForce®-803 L45 (A)

Pail	19 kg
------	-------

SikaForce®-803 (B)

Pail	19 kg
------	-------

## BASIS OF PRODUCT DATA

All technical data stated in this document are based on laboratory tests. Actual measured data may vary due to circumstances beyond our control.

## HEALTH AND SAFETY INFORMATION

For information and advice regarding transportation, handling, storage and disposal of chemical products, users shall refer to the actual Safety Data Sheets containing physical, ecological, toxicological and other safety-related data.

## DISCLAIMER

The information, and, in particular, the recommendations relating to the application and enduse of Sika products, are given in good faith based on Sika's current knowledge and experience of the products when properly stored, handled and applied under normal conditions in accordance with Sika's recommendations. In practice, the differences in materials, substrates and actual site conditions are such that no warranty in respect of merchantability or of fitness for a particular purpose, nor any liability arising out of any legal relationship whatsoever, can be inferred either from this information, or from any written recommendations, or from any other advice offered. The user of the product must test the product's suitability for the intended application and purpose. Sika reserves the right to change the properties of its products. The proprietary rights of third parties must be observed. All orders are accepted subject to our current terms of sale and delivery. Users must always refer to the most recent issue of the local Product Data Sheet for the product concerned, copies of which will be supplied on request.

## Milled Fiber MF 7982



### Polymer

#### PUR, PA, PP and others

LANXESS Glass Fiber MF 7982<sup>+</sup> is suitable for a wide range of applications where the reinforcing properties of glass fibers are needed in combination with small initial fiber length and excellent flowability. It is suitable, for example, for the reinforcement of polyurethanes, polyamides and polypropylene.

### Product Description

MF 7982 consists of individual filaments of different lengths

Small average fiber length of 210 µm nominally.

Silane surface treatment

Excellent flowability

### Technical

#### Characteristics

Fiber Diameter (nom.) 14 µm

Av. Fiber Length (nom.) 210 µm

Glass E-Glass (DIN 1259)

Size Polymeric size (≤ 0,05 wt%) with silane

Moisture content ≤ 0,05 wt%

Bulk density approx. 500 kg / m<sup>3</sup>

(Original data ex works)

### Packaging

Big Bag, PE Bag, (see detailed information on next page)

### Storage

The glass fiber should be stored in a dry place, preferably at room temperature and 50 - 70 % relative humidity.

### Contact

For further information please contact:



Mail [glassfiber@lanxess.com](mailto:glassfiber@lanxess.com)

Phone +49 (0)700 glassfiber

+49 (0)700 45277342

## Packaging Information

### MF 7982

Big Bag, recyclable		PE Bags	
Net Weight	800 kg	Net Weight Bag	20 kg
Dimensions Bag	870 x 870 x 1400 mm	Net Weight Pallet	20 kg x 50 = 1000 kg
Dimensions Pallet	1000 x 1200 mm (CP1)	Dimensions Pallet	1300 x 1100 mm (CP7)
Packaging Code	BC00 – FA080P	Packaging Code	SD 00 – BA 100E
Bottom unloading through discharge spout			10 layers per pallet
			

#### Disclaimer

This information and our technical advice - whether verbal, in writing or by way of trials - are given in good faith but without warranty, and this also applies where proprietary rights of third parties are involved. Our advice does not release you from the obligation to verify the information currently provided - especially that contained in our safety data and technical information sheets - and to test our products as to their suitability for the intended processes and uses. The application, use and processing of our products and the products manufactured by you on the basis of our technical advice are beyond our control and, therefore, entirely your own responsibility. Our products are sold in accordance with the current version of our General Conditions of Sale and Delivery.

#### Values

Unless specified to the contrary, the values given have been established on standardized test. The figures should be regarded as guide values only and not as binding minimum values.

# Powerflex Technology



STRUCTURAL ELASTIC  
BONDING TECHNOLOGY  
FOR SikaForce<sup>®</sup> PUR ADHESIVES

BUILDING TRUST



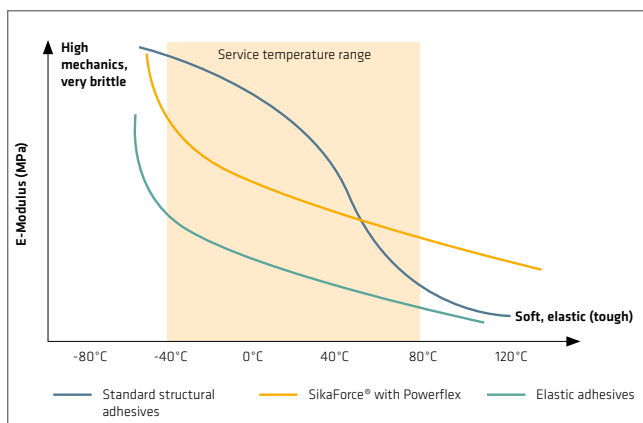


# Powerflex - STRUCTURAL ELASTIC ADHESIVE TECHNOLOGY

**Powerflex IS A UNIQUE ADHESIVE TECHNOLOGY** combining advantages of both structural- and elastic adhesives. Powerflex makes the new generation SikaForce® adhesives an effective solution for bonding and assembly of lightweight vehicles, fiberglass boats, metal fabrications and virtually any application that requires a strong, reliable bond.

The Powerflex technology provides the highest levels of strength combined with lasting elasticity even at low temperatures. With the unique performance characteristics SikaForce® polyurethane adhesives with Powerflex inside outperform the state-of-the-art 2C structural adhesives designed to bond lightweight mate-

rials. They are designed to create long lasting bonds throughout the service life of bonded components no matter what climate conditions they face. Powerflex represents a new generation of SikaForce® structural adhesives making them the ideal solution with unmatched product features.

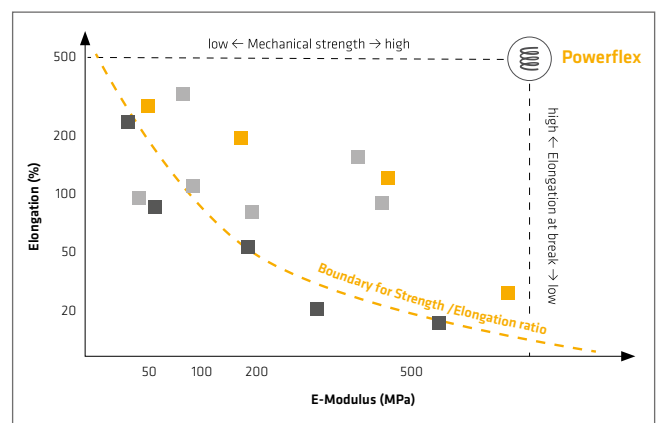


## Constant performance over service temperature

While 1-component polyurethane adhesives provide excellent cold temperature performance regarding elongation, their potential in strength (E-Modulus) is insufficient for high strength bonds. In contrary to this, 2-component structural adhesives offer enormous potential for mechanical strength but are lacking the necessary flexibility at low temperatures needed for bonding mixed materials. Standard 2-component adhesives also show a significant loss of mechanical strength at elevated temperatures (e.g., 80°C). The new generation of SikaForce® 2C polyurethane adhesives with Powerflex inside shows a substantially higher strength retention rate in the heat while keeping its elasticity over the entire service temperature.

## Powerflex stands for a paradigm shift

The new SikaForce® structural adhesives feature a unique combination of structural strength and permanent elasticity. This key performance feature is a potential game changer in the composite industry as it allows to formulate SikaForce® structural adhesives with exceptional mechanical strength without compromising the elongation. Powerflex breaks the boundary of strength- and elongation ratio and is therefore becoming the preferred solution when bonding materials with different thermal expansion coefficients (e.g. CFRP and aluminum). The Powerflex technology therefore provides the end user with unimagined design possibilities involving composite materials.



- Possibilities of SikaForce® with Powerflex
- New customer requirements
- Standard structural adhesives

# SikaForce<sup>®</sup>-800 SERIES WITH Powerflex INSIDE

**SikaForce<sup>®</sup>-800 SERIES** provides unique mechanical characteristics making it an ideal solution for mixed material- and composite bonding. This new generation of structural adhesives brings innovations to market trends and is becoming an integral part when bonding modern lightweight materials.

## Key features of SikaForce<sup>®</sup> adhesives with Powerflex inside

- Combines the high strength of structural- with the flexibility of elastic adhesives
- Keeps flexibility even at low temperatures
- Provides stable mechanical strength over service temperature
- High energy absorption capacity
- No smell compared to other technologies

## Bringing innovation to market trends



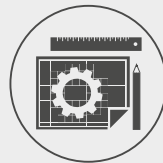
### LIGHTWEIGHT

Allowing multimaterial mix for mass and weight reduction



### PROCESS EFFICIENCY

Providing solutions for ultimate process efficiency



### DESIGN

Enabling modern design with new materials



### DURABILITY

Creating long lasting bonds

	SikaForce <sup>®</sup> -803	SikaForce <sup>®</sup> -840
Technology	2C Polyurethane	2C Polyurethane
Mixing ratio	1:1	1:1
Color (mixed)	Black	Black
Viscosity	Thixotropic paste	Thixotropic paste
Pot life	45 minutes	7 minutes
Handling time	120 minutes	15 minutes
Lapshear strength	10.0 N/mm <sup>2</sup>	15.0 N/mm <sup>2</sup>
Tensile strength	10.0 N/mm <sup>2</sup>	15.0 N/mm <sup>2</sup>
Elongation	250%	100%
E-Modulus	30 N/mm <sup>2</sup>	400 N/mm <sup>2</sup>
Glass transition temp.	-50°C	-45°C

# GLOBAL BUT LOCAL PARTNERSHIP



## WHO WE ARE

Sika is a specialty chemicals company with a leading position in the development and production of systems and products for bonding, sealing, damping, reinforcing and protecting in the building sector and the motor vehicle industry. Sika's product lines feature concrete admixtures, mortars, sealants and adhesives, structural strengthening systems, industrial flooring as well as roofing and waterproofing systems.

Our most current General Sales Conditions shall apply.  
Please consult the Data Sheet prior to any use and processing.



## SIKA SERVICES AG

Tueffenwies 16  
8048 Zurich  
Switzerland

## CONTACT

Phone: +41 58 436 40 40  
Fax: +41 58 436 55 30  
[www.sika.com](http://www.sika.com)

**BUILDING TRUST**

