



Avaliação experimental de materiais compósitos reutilizados

JOÃO MIGUEL ALVES PICADO

julho de 2024

Avaliação Experimental de Materiais Compósitos Reutilizados

João Miguel Alves Picado

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica, Área de Especialização em
Construções Mecânicas**

Orientador: Professor Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Coorientador: Professor Doutor Ricardo Fernando Rodrigues Pinto

Supervisor da empresa: Doutor Jhonny de Sá Rodrigues

Júri:

Presidente:

Armando José Vilaça de Campos, Professor Adjunto, ISEP

Vogais:

Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, Professor Adjunto, ISEP

Rita de Cássia Mendonça Sales-Contini, Professor Associado, FATEC

Porto, julho 2024

Agradecimentos

Ao Professor Doutor Raúl Duarte Salgueiral Campilho, orientador da presente dissertação, por todo o apoio dado desde o início do desenvolvimento da mesma e pela disponibilidade e dedicação demonstradas ao longo dos últimos meses.

Ao Professor Doutor Ricardo Fernando Rodrigues Pinto e ao Doutor Jhonny de Sá Rodrigues, coorientadores da presente dissertação, essenciais no desenvolvimento da parte experimental desta, nomeadamente na aquisição dos materiais e no fabrico das placas e dos provetes utilizados nos ensaios experimentais, assim como no tratamento de dados dos mesmos.

Aos meus pais, irmã, avós e restante família por todo o apoio, motivação e compreensão.

Aos meus amigos por todos os momentos de convívio com que me brindaram no decorrer dos últimos meses.

Resumo

A presente dissertação tem como principais objetivos a avaliação da resistência de materiais compósitos reciclados e o estudo da viabilidade da sua reciclagem e reutilização, através de simulações numéricas e experimentais. Primeiramente, foi realizada uma pesquisa profunda sobre os temas inerentes aos objetivos da dissertação com o intuito de aprofundar os conhecimentos na área dos materiais compósitos. Com vista à realização dos ensaios experimentais, foram produzidas quatro placas compósitas de resina termoplástica reforçada com fibra de vidro, através de um processo de infusão a vácuo. Numa das placas, utilizam-se as sobras de fibra de vidro, obtidas através do processo de corte da mesma, em pedaços com tamanho aleatório para obter um compósito considerado reciclado. Duas placas são reforçadas com fibra de vidro e também com pequenas partículas de PA e de PP, recicladas a partir de componentes automóveis. A outra placa consiste na sobreposição simples de camadas de fibra de vidro, utilizado apenas material virgem. Todas as placas são produzidas com a mesma matriz de resina termoplástica. O processo de produção das placas compósitas foi realizado nas instalações do INEGI, recorrendo ao método de infusão de resina sob ação de vácuo. Posteriormente, com recurso aos equipamentos do ISEP, procedeu-se à preparação dos provetes e aos ensaios experimentais dos mesmos. Foram realizados ensaios de tração, ensaios de fratura em modo I (com provetes DCB), ensaios de fratura em modo II (com provetes ENF) e ensaios de corte pelo método *Block Shear* (BS) com vista à caracterização dos quatro tipos de compósitos produzidos. A comparação dos resultados obtidos permite tirar conclusões relativamente à viabilidade da reciclagem e reutilização de compósitos que, em situações normais, seriam desperdiçados. De modo a finalizar o trabalho experimental e fazendo uma ponte com a indústria da energia eólica, realizou-se um caso de estudo baseado numa pá eólica. No caso de estudo, percebeu-se que a utilização de partículas de fibras de vidro na placa 2 apresenta uma mais-valia, uma vez que os provetes desta placa foram os que obtiveram melhores indicadores quando se relacionaram as propriedades obtidas nos ensaios experimentais com os custos associados ao fabrico do compósito. Tendo em conta um desenvolvimento sustentável, a placa 2 foi a que suscitou um maior interesse neste estudo.

Palavras-chave: Compósitos, Reciclagem, Sustentabilidade.

Abstract

The main objectives of this dissertation are to evaluate the strength of recycled composite materials and to study the feasibility of their recycling and reuse through numerical and experimental simulations. Firstly, an in-depth research was conducted on the topics related to the dissertation's objectives in order to deepen the knowledge in the field of composite materials. For the experimental tests, four composite plates made of thermoplastic resin reinforced with fiberglass were produced through a vacuum infusion process. One of the plates used fiberglass scraps, obtained from the cutting process, in randomly sized pieces to create a composite considered recycled. Two plates are reinforced with fiberglass and also with small particles of PA and PP, recycled from automotive components. The other plate consists of a simple overlay of fiberglass layers, using only virgin material. All plates were produced with the same thermoplastic resin matrix. The production process of the composite plates was carried out at INEGI facilities, using the vacuum resin infusion method. Subsequently, using ISEP equipment, the specimens were prepared and experimentally tested. Tensile tests, mode I fracture tests (with DCB specimens), mode II fracture tests (with ENF specimens), and shear tests using the Block Shear (BS) method were conducted to characterize the four types of composites produced. The comparison of the obtained results allows drawing conclusions regarding the feasibility of recycling and reusing composites that would normally be wasted. In order to finalize the experimental work and connect it with the wind energy industry, a case study based on a wind turbine blade was conducted. In the case study, it was found that the use of fiberglass particles in plate 2 offers an advantage, as the specimens from this plate achieved the best indicators when relating the experimental properties to the associated manufacturing costs of the composite. Considering sustainable development, plate 2 generated the most interest in this study.

Keywords: Composite, Recycling, Sustainability.

Índice

1. Introdução	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Objetivos.....	1
1.3. Metodologia.....	2
1.4. Estrutura da dissertação.....	2
2. Revisão Bibliográfica	3
2.1. Materiais compósitos avançados	3
2.1.1. Enquadramento dos materiais compósitos	3
Fibras de reforço.....	4
Fibras naturais	4
Fibras sintéticas	5
Fibras de vidro	5
Fibras de carbono	7
Fibras de aramida (<i>Kevlar</i>)	8
2.1.2. Matrizes	9
Resinas de poliéster	12
Resinas de epóxico	13
Resinas fenólicas.....	13
2.1.3. Processos de fabrico	14
Moldação manual	15
Moldação por projeção	16
Enrolamento filamentar	16
Moldação por vácuo	17
Moldação por injeção	17
Moldação por compressão	17
Moldação por pultrusão	18
Moldação por centrifugação.....	18
SMC (<i>Sheet Moulding Compound</i>).....	19
2.2. Caracterização de materiais compósitos	20
2.2.1. Ensaio de composição de compósitos.....	20
Densidade	20
Fração volúmica de fibras	21
Conteúdo de vazios.....	22
Humidade	23
2.2.2. Ensaio de caracterização mecânica	23
Tração a 0° e 90°	23
Compressão a 0° e 90°	24

Corte	25
Flexão	28
2.2.3. Ensaio de fratura.....	29
Modo I	30
Modo II	30
Modo misto (I + II)	31
2.2.4. Estado-da-arte	31
2.3. Reciclagem e reutilização de materiais compósitos	33
2.3.1. Contextualização e interesse	33
2.3.2. Reforços e matrizes	35
2.3.3. Métodos de separação fibra/matriz	38
Pirólise (<i>thermal degradation</i>)	38
Trituração (<i>mechanical grinding</i>)	38
Termoformação.....	39
Incineração.....	39
Dissolução por ácidos.....	40
2.3.4. Reutilização e tratamentos necessários	41
2.3.5. Estudo de viabilidade.....	42
2.3.6. Estado-da-arte	43
3. Desenvolvimento	47
3.1. Objetivos do desenvolvimento	47
3.2. Metodologia do trabalho experimental	47
3.3. Materiais utilizados.....	48
3.3.1. Seleção dos materiais e componentes a reutilizar	48
3.3.2. Propriedades dos materiais	49
3.3.3. Vantagens e desvantagens do uso dos materiais em pás eólicas.....	51
3.4. Produção dos provetes de ensaio	52
3.4.1. Definição do tipo de ensaios a realizar	52
3.4.2. Procedimentos para a reutilização do material triturado.....	52
3.4.3. Processo de fabrico de provetes reciclados	54
3.4.4. Fabrico dos provetes de tração	62
3.4.5. Fabrico dos provetes <i>Block Shear</i> (BS).....	63
3.4.6. Fabrico dos provetes DCB	64
3.4.7. Fabrico dos provetes ENF	67
3.5. Ensaio dos provetes.....	68
3.5.1. Ensaio de tração	69
Caraterização do ensaio de tração e normas associadas	69
Resultados obtidos	71
Discussão de resultados	74

3.5.2. Ensaio ao corte de <i>Block Shear</i> (BS).....	79
Caraterização do ensaio ao corte de BS	79
Resultados obtidos	80
Discussão de resultados	81
3.5.3. Ensaio de fratura em modo I (DCB)	85
Caraterização do ensaio DCB e normas associadas	85
Resultados obtidos	88
Discussão de resultados	90
3.5.4. Ensaio de fratura em modo II (ENF)	95
Caraterização do ensaio ENF e normas associadas	95
Resultados obtidos	98
Discussão de resultados	99
3.6. Estudo de viabilidade	102
4. Conclusão.....	105
4.1. Conclusões finais	105
4.2. Trabalhos futuros	106

Lista de Figuras

Figura 1- Proteus, aeronave de exploração para elevadas altitudes, <i>Scale Composites</i> [2]	3
Figura 2- Bicicleta de fibra de carbono produzida pela BMW [3]	3
Figura 3- Materiais utilizados no Boeing 787 [4].....	4
Figura 4- Estrutura de teto solar de fibra natural <i>FiberFrame</i> no Mercedes-Benz E-Class 2017 [6]	5
Figura 5- Componentes com fibras naturais usados no BMW M4 GT4 [7]	5
Figura 6- Tipos principais de fibras sintéticas [8]	5
Figura 7- Produto final de fibra de vidro após processo [10]	6
Figura 8- Propriedades dos diferentes tipos de fibra de vidro [11]	6
Figura 9- Painéis em fibra de vidro como revestimento de edifício [12]	7
Figura 10- Barco Benetti FB801 M/Y VICA com o casco em fibra de vidro e superestrutura em alumínio [13]	7
Figura 11- Retrovisor de automóvel feito com fibra de carbono [15]	8
Figura 12- Fibra de grafite enrolada [16]	8
Figura 13- Processo de produção de fibra de carbono [17]	8
Figura 14- Parte final do processo de produção de fibra de carbono [18]	8
Figura 15- Processo de produção de <i>kevlar</i> [19].....	9
Figura 16- Fibras de <i>kevlar</i> [22].....	9
Figura 17- Utilização de <i>kevlar</i> em luvas resistentes [23]	9
Figura 18- Coletes balísticos de segurança com <i>kevlar</i> [24]	9
Figura 19- Divisão de tipos de matrizes dos materiais compósitos [25].....	10
Figura 20- Estrutura de estádio produzida em compósito polimérico de matriz termoplástica [26].....	11
Figura 21- Componentes de automóveis fabricados com polipropileno – compósito polimérico de matriz termoplástica [27].....	11
Figura 22- Uso de resina de poliéster em fibra de vidro [28]	12
Figura 23- Processo de produção de resina de poliéster [30]	12
Figura 24- Exemplo de aplicação de resina epóxi em madeiras [32]	13
Figura 25- Resina epóxi utilizada para arranjo de componentes [33]	13
Figura 26- Exemplos de estados da resina fenólica e algumas das aplicações [34]	14
Figura 27- Moldação manual utilizando um molde aberto [35]	15
Figura 28- Moldação por compressão com molde fechado [36]	15
Figura 29- Moldação por injeção em molde fechado [37]	15
Figura 30- Processo de formação de um SMC [44]	19
Figura 31- Aparelho para ensaio de densidade [46].....	20
Figura 32- Constituintes do aparelho utilizado para ensaios de densidade [47].....	20
Figura 33- Forno usado para ensaios de conteúdo de vazios [50]	22
Figura 34- Máquina de ensaios de tração e esquema do ensaio [51]	23
Figura 35- Máquina de ensaios de compressão a) e provetes b) pela norma ASTM D3410 [57]	25

Figura 36- Provetes $\pm 45^\circ$ para ensaios ao corte [58]	25
Figura 37- Aparelho para ensaios losipescu [61]	26
Figura 38- Ensaio de corte em calha dupla a) e em calha tripla b) [63]	27
Figura 39- Equipamento para ensaio <i>V-Notched</i> [65]	27
Figura 40- Exemplificação de ensaio de flexão em 3 pontos [67]	28
Figura 41- Equipamento de ensaio de flexão em 3 pontos [68]	28
Figura 42- Realização de ensaio de flexão em 4 pontos [70]	29
Figura 43- Modos fundamentais de propagação de fratura [71]	29
Figura 44- Proвете e dispositivo de ensaio para ensaios MMB [78]	31
Figura 45 - Quantidade de compósitos reforçados com fibra de carbono reciclados e previsão futura dos mesmos, dados de 2020 [86]	34
Figura 46 - Geração de energia eólica [88]	35
Figura 47 - Pás eólicas em aterro sanitário [89]	35
Figura 48 - Processo de reciclagem e reutilização de fibras de carbono na indústria aeronáutica [91]	36
Figura 49- Processo de pirólise e oxidação de compósitos reforçados com fibra de carbono e matriz de resina epóxi [97]	38
Figura 50- Fibra de carbono após trituração [98]	39
Figura 51- Termoformação de painéis de compósito [99]	39
Figura 52- Geração de energia através da inceneração de compósitos [100]	40
Figura 53 - Separação de fibras da resina através de dissolução por ácidos [92]	41
Figura 54- Secção reta e constituinte de uma pá eólica [106]	49
Figura 55- Resina SikaBiresin CR83	51
Figura 56- Endurecedor SikaBiresin CH83-6	51
Figura 57- Sequência de empilhamento para as placas 2, 3 e 4	53
Figura 58- Camadas da placa 1 (apenas fibra de vidro)	53
Figura 59- Deposição da fibra de vidro cortada aleatoriamente na placa 2	53
Figura 60- Deposição e nivelamento do PA na placa 3	54
Figura 61- PP disposto e nivelado na placa 4	54
Figura 62- Medição das tiras de fibra de vidro	54
Figura 63- Corte das camadas de fibra de vidro	54
Figura 64- Camadas de fibra de vidro após corte	54
Figura 65- Processo de infusão a vácuo	55
Figura 66- Desmoldante utilizado	55
Figura 67- Aplicação do desmoldante no molde	55
Figura 68- Deposição da <i>peel-ply</i> na placa 1	56
Figura 69- Deposição da folha picotada	56
Figura 70- Aplicação da <i>flow-mesh</i> na placa 1	57
Figura 71- Linha de entrada da resina	57
Figura 72- Linha de saída da resina	57
Figura 73- Colocação do saco de vácuo na placa 1	58
Figura 74- Pregas criadas no saco de vácuo	58
Figura 75- Reservatório de resina	58

Figura 76- Bomba de vácuo	58
Figura 77- Resina	59
Figura 78- Endurecedor	59
Figura 79- Mistura da resina e do endurecedor.....	59
Figura 80- Início da injeção de resina na placa 3.....	59
Figura 81- Fase final do processo de cura da placa 3	59
Figura 82- Serra de corte do INEGI	60
Figura 83- Marcação da esquadria e das tiras	61
Figura 84- Ilustração da divisão das placas nos quatro tipos de provetes	61
Figura 85- Provetes finais obtidos das placas 1 e 2	62
Figura 86- Esquema e dimensões dos provetes tipo "osso de cão"	62
Figura 87- Dimensões dos provetes de tração.....	62
Figura 88- Dimensões dos provetes BS antes da maquinagem	63
Figura 89- Provetes BS finais.....	63
Figura 90- Facejamento dos provetes BS	63
Figura 91- Maquinação de um lado do provete BS	64
Figura 92- Maquinação do lado oposto do provete BS.....	64
Figura 93- Camada de Teflon® na placa 1	64
Figura 94- Dimensões dos provetes DCB	65
Figura 95- Corte das dobradiças com serra manual	65
Figura 96- Araldite 2015-1	66
Figura 97- Pistola de aplicação do adesivo	66
Figura 98- Colagem das dobradiças no primeiro lado dos provetes DCB	66
Figura 99- Colagem da segunda dobradiça nos provetes DCB	66
Figura 100- Fresadora da oficina do ISEP	66
Figura 101- Fresa fina utilizada para remoção de excesso de adesivo	66
Figura 102- Pintura da face lateral dos provetes DCB com tinta corretora branca	67
Figura 103- Dimensões dos provetes ENF	67
Figura 104- Abertura da pré-fenda nos provetes ENF	68
Figura 105-Colagem da escala milimétrica nos provetes ENF	68
Figura 106- Máquina de ensaios Shimadzu AG-X 100 do LET do ISEP	68
Figura 107- Comando da máquina de ensaios.....	69
Figura 108- Marcação das áreas de amarração e identificação dos provetes de tração.....	70
Figura 109- Setup de ensaio com extensómetro utilizado nos ensaios de tração	70
Figura 110- Provetes de tração da placa 1 após ensaios	72
Figura 111- Pormenorização da rotura ocorrida nos provetes de tração da placa 1	72
Figura 112- Provetes de tração da placa 2 após ensaios	72
Figura 113- Pormenorização da rotura ocorrida nos provetes de tração da placa 2	72
Figura 114- Provetes de tração da placa 3 após ensaios	73
Figura 115- Pormenorização da rotura ocorrida nos provetes de tração da placa 3	73
Figura 116- Provetes de tração da placa 4 após ensaios	73
Figura 117- Pormenorização da rotura ocorrida num provete de tração da placa 4	73
Figura 118- Curvas $P-\delta$ dos provetes da placa 1	74

Figura 119- Curvas $P-\delta$ dos provetes da placa 2	74
Figura 120- Curvas $P-\delta$ dos provetes da placa 3	75
Figura 121- Curvas $P-\delta$ dos provetes da placa 4	75
Figura 122- Gráfico $\sigma-\epsilon$ dos provetes da placa 1	76
Figura 123- Gráfico $\sigma-\epsilon$ dos provetes da placa 2	76
Figura 124- Gráfico $\sigma-\epsilon$ dos provetes da placa 3	77
Figura 125- Gráfico $\sigma-\epsilon$ dos provetes da placa 4	77
Figura 126- Comparação da $\sigma_{0,2\%}$ das quatro placas.....	78
Figura 127- Comparação da $\sigma_{m\acute{a}x}$ das quatro placas	78
Figura 128- Comparação da σ_{rot} das quatro placas	78
Figura 129- Comparação de E das quatro placas	79
Figura 130- Imagem frontal do <i>setup</i> de ensaio BS.....	80
Figura 131- Imagem lateral do <i>setup</i> de ensaio BS	80
Figura 132- Provetes BS da placa 1 após ensaios.....	81
Figura 133- Provetes BS da placa 2 após ensaios.....	81
Figura 134- Provetes BS da placa 3 após ensaios.....	81
Figura 135- Provetes BS da placa 4 após ensaios.....	81
Figura 136- Curva $P-\delta$ dos provetes da placa 1 à fratura em modo I	82
Figura 137- Curva $P-\delta$ dos provetes da placa 2 à fratura em modo I	82
Figura 138- Curva $P-\delta$ dos provetes da placa 3 à fratura em modo I	82
Figura 139- Curva $P-\delta$ dos provetes da placa 4 à fratura em modo I	82
Figura 140- Curvas $T-Y$ dos provetes da placa 1 ao corte	83
Figura 141- Curvas $T-Y$ dos provetes da placa 2 ao corte	83
Figura 142- Curvas $T-Y$ dos provetes da placa 3 ao corte	84
Figura 143- Curvas $T-Y$ dos provetes da placa 4 ao corte	84
Figura 144 - Setup do ensaio DCB	85
Figura 145 - Câmara utilizada para registo da abertura da fenda no ensaio DCB	86
Figura 146- Medição da pré-fenda nos provetes DCB	86
Figura 147- Curva R típica de um compósito [112]	87
Figura 148- Provete DCB da placa 1 após ensaio	88
Figura 149- Demonstração da uniformidade de rotura dos provetes DCB da placa 1	88
Figura 150- Provete DCB da placa 2 após ensaio	89
Figura 151- Visão geral dos provetes DCB da placa 2 após os ensaios	89
Figura 152- Pormenorização da rotura de um provete DCB da placa 3	89
Figura 153- Visão geral dos provetes DCB da placa 3 após ensaios	89
Figura 154- Provete DCB da placa 4 após ensaio	89
Figura 155- Curvas $P-\delta$ dos provetes da placa 1	90
Figura 156- Curvas $P-\delta$ dos provetes da placa 2	90
Figura 157- Curvas $P-\delta$ dos provetes da placa 3	91
Figura 158- Curvas $P-\delta$ dos provetes da placa 4	91
Figura 159- Curva R do provete 6 da placa 1.....	92
Figura 160- Curva R do provete 1 da placa 2.....	92
Figura 161- Médias de G_{Ic} obtidas pelo método CBBM	94

Figura 162- Médias de G_{Ic} obtidas pelo método CBT	94
Figura 163- Médias de G_{Ic} obtidas pelo método CCM	94
Figura 164 - Colocação do provete ENF nos apoios	95
Figura 165 - Marcação das linhas auxiliares de alinhamento dos provetes ENF no <i>setup</i>	95
Figura 166 - <i>Setup</i> de ensaio ENF	96
Figura 167 - Câmara fotográfica utilizada nos ensaios ENF.....	96
Figura 168- Provetes ENF da placa 1 após ensaios.....	98
Figura 169- Provetes ENF da placa 2 após ensaios.....	98
Figura 170- Provetes ENF da placa 3 após ensaios.....	98
Figura 171- Provetes ENF da placa 4 após ensaios.....	98
Figura 172- Curvas $P-\delta$ dos provetes da placa 1 à fratura em modo II.....	99
Figura 173- Curvas $P-\delta$ dos provetes da placa 2 à fratura em modo II.....	99
Figura 174- Curvas $P-\delta$ dos provetes da placa 3 à fratura em modo II.....	99
Figura 175- Curvas $P-\delta$ dos provetes da placa 4 à fratura em modo II.....	100
Figura 176- Médias de G_{IIC} obtidas pelo método CBBM.....	101
Figura 177- Médias de G_{IIC} obtidas pelo método DBT.....	102
Figura 178- Médias de G_{IIC} obtidas pelo método CBT	102
Figura 179- Médias de G_{IIC} obtidas pelo método CCM.....	102

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Principais tipos de fibra de vidro e características, adaptado de [9]	6
Tabela 2 - Divisão dos processos em molde aberto e fechado e exemplos	15
Tabela 3 - Estado da arte de ensaios de caracterização de materiais compósitos	32
Tabela 4 - Tipos de processos de reciclagem, adaptado de [87]	41
Tabela 5 - Estado da arte de reciclagem e reutilização de materiais compósitos	44
Tabela 6- Propriedades de vários tipos de fibra de vidro [190].....	50
Tabela 7- Propriedades à tração dos provetes da placa 1	76
Tabela 8- Propriedades à tração dos provetes da placa 2	76
Tabela 9- Propriedades à tração dos provetes da placa 3	77
Tabela 10- Propriedades à tração dos provetes da placa 4.....	77
Tabela 11- Resultados experimentais dos provetes da placa 1 ao corte	83
Tabela 12- Resultados experimentais dos provetes da placa 2 ao corte	84
Tabela 13- Resultados experimentais dos provetes da placa 3 ao corte	84
Tabela 14- Resultados experimentais dos provetes da placa 4 ao corte	85
Tabela 15- G_{Ic} dos provetes da placa 1	92
Tabela 16- G_{Ic} dos provetes da placa 2	93
Tabela 17- G_{Ic} dos provetes da placa 3	93
Tabela 18- G_{Ic} dos provetes da placa 4	93
Tabela 19- G_{IIc} dos provetes da placa 1	100
Tabela 20- G_{IIc} dos provetes da placa 2	100
Tabela 21- G_{IIc} dos provetes da placa 3	101
Tabela 22- G_{IIc} dos provetes da placa 4	101
Tabela 23- Apresentação dos custos em FV das quatro placas	103
Tabela 24- Relação custo-propriedades das quatro placas.....	103
Tabela 25 - Tipos de elementos	119
Tabela 26 – Estado da arte de técnicas de modelação	127
Tabela 27- Medidas dos provetes de tração	129
Tabela 28- Medidas dos provetes BS	130

Acrónimos e Símbolos

Lista de Acrónimos

4ENF	<i>4- Point End Notched Flexure</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BMC	<i>Bulk Moulding Compound</i>
BMW	<i>Bayerische Motoren Werke</i>
BS	<i>British Standards</i>
BS	<i>Block Shear</i>
CBBM	<i>Compliance Based Beam Method</i>
CBT	<i>Corrected Beam Theory</i>
CCM	<i>Compliance Calibration Method</i>
CMC	<i>Compósito de Matriz Cerâmica</i>
CMM	<i>Compósito de Matriz Metálica</i>
CMP	<i>Compósito de Matriz Polimérica</i>
CV	<i>Coeficiente de Variação</i>
DBT	<i>Direct Beam Theory</i>
DCB	<i>Double Cantilever Beam</i>
ELS	<i>End Loaded Split</i>
ENF	<i>End Notched Flexure</i>
FV	<i>Fibra de Vidro</i>
INEGI	<i>Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial</i>
ISEP	<i>Instituto Superior de Engenharia do Porto</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MEF	<i>Método de Elementos Finitos</i>
MMB	<i>Mixed-Mode Bending</i>
P.Porto	<i>Instituto Politécnico do Porto</i>
PA	<i>Poliamida</i>
PAN	<i>Poliacrilonitrilo</i>
PP	<i>Polipropileno</i>
SLB	<i>Single-Leg Bending</i>

SMC	<i>Sheet Moulding Compound</i>
TCL	Teoria Clássica dos Laminados
TMC	<i>Thick Moulding Compound</i>
UE	União Europeia
ZPF	Zona de Processo de Fratura

Lista de Símbolos

S_0	Área de secção	m ²
a	Comprimento de fenda	m
a_0	Comprimento de fenda inicial	m
L	Comprimento do provete	m
ε	Deformação	adimensional
ε_0	Deformação inicial	adimensional
δ	Deslocamento	m
U	Energia de deformação	J
h	Espessura do provete	m
Δ	Fator de correção de rotação e deslocamento	adimensional
C	Flexibilidade	
C_0	Flexibilidade inicial	
P	Força	N
B	Largura do provete	m
m	Massa	kg
G	Módulo de corte	Pa
E_f	Módulo de flexão	Pa
E	Módulo de Young	Pa
G_{Ic}	Taxa crítica de libertação de energia em modo I	N/m
G_{IIc}	Taxa crítica de libertação de energia em modo II	N/m
T	Temperatura	°C
σ	Tensão	Pa
$\sigma_{0,2\%}$	Tensão a 0,2% de deformação	Pa
σ_{ced}	Tensão de cedência	Pa
T	Tensão de corte	Pa
$T_{máx}$	Tensão de corte máxima	Pa
σ_{rot}	Tensão de rotura	Pa

ΔL	Variação de comprimento	m
w	Velocidade angular	rpm

1. Introdução

1.1. Contextualização

Nos últimos anos a sustentabilidade do planeta tem sido colocada em causa devido à poluição ambiental e à escassez de recursos naturais. Deste modo, a procura por energias renováveis tem um papel determinante para poupar o planeta e permite abandonar aos poucos as fontes convencionais de energia. Conseguir abdicar de matérias-primas finitas e apostar em recursos que estão disponíveis na natureza e que se regeneram continuamente representa um grande avanço para a geração de energia de forma menos poluente a nível de emissões, visando a preservação dos recursos do planeta Terra.

Atualmente, as fontes de energia renováveis podem dividir-se em seis categorias: hídrica (energia da água dos rios); solar (energia do sol); eólica (energia do vento); geotérmica (energia do interior do planeta); oceânica (energia das ondas e marés) e biomassa (energia da matéria orgânica). Em Portugal destaca-se a utilização de cinco fontes de energias renováveis (eólica, solar, hídrica, biomassa e geotérmica). Neste âmbito, importa referir que Portugal é um dos maiores produtores mundiais de energia solar e eólica dadas as condições ambientais que caracterizam este país.

Com vista a um aproveitamento de recursos ainda maior e à diminuição da poluição ambiental, existem métodos construtivos sustentáveis que podem ser desenvolvidos. Assim, a presente dissertação foca-se no estudo da reciclagem e reutilização de materiais que são utilizados na produção de componentes de geração de energia eólica, mais especificamente nos compósitos que constituem a estrutura externa das pás eólicas.

1.2. Objetivos

O principal objetivo adjacente à presente dissertação consiste em avaliar a resistência mecânica e à fratura de materiais compósitos reciclados, e efetuar a comparação com compósitos fabricados com materiais novos, constituídos pela mesma matriz e apenas com alterações no reforço. Para tal, foram realizados ensaios de tração por ensaio de provetes maciços, corte pelo ensaio *Block Shear* (BS) e ensaios de fratura em modo I e em modo II pelos ensaios *Double Cantilever Beam* (DCB) e *End Notched Flexure* (ENF), respetivamente, com os diferentes tipos de provetes fabricados. Deste modo, é possível tirar conclusões sobre a viabilidade da reciclagem e reutilização dos compósitos e quais as vantagens e desvantagens associadas aos processos e ao desempenho desses mesmos materiais em várias aplicações.

1.3. Metodologia

O primeiro passo para a realização do estudo da presente dissertação é fazer uma boa revisão de literatura sobre o tema a abordar, em que seja possível entender o meio envolvente ao tema em questão e em que contexto técnico é que este se insere. Posteriormente, são definidos os temas que devem ser alvos de pesquisa e é realizada a divisão dos subcapítulos a abordar no capítulo de revisão bibliográfica. Para cada assunto recorreu-se maioritariamente a livros, artigos e normas para fundamentar o conteúdo da revisão bibliográfica, sendo que também foram utilizadas imagens e gráficos para auxiliar o texto. Posteriormente, foram fabricadas as placas compósitas que deram origem aos provetes para os quatro ensaios experimentais. Após isso, os provetes foram preparados e ensaiados e foi realizado o tratamento dos dados obtidos através dos ensaios experimentais. Por fim, fez-se a análise dos resultados.

1.4. Estrutura da dissertação

A dissertação encontra-se dividida em quatro capítulos principais, cuja designações e ordem são as seguintes: Introdução; Revisão Bibliográfica; Desenvolvimento; Conclusão. Dentro dos capítulos enunciados constam os subcapítulos inerentes a cada um. Neste capítulo, Introdução, é feita uma breve contextualização do tema e são expostos os objetivos, a metodologia e a estrutura do relatório. No segundo capítulo, centra-se a revisão da literatura e estado da arte mais relevante do relatório e inclui três subcapítulos: Materiais compósitos avançados, Caracterização de materiais compósitos e, por fim, Reciclagem e reutilização de materiais compósitos. Posteriormente, o terceiro capítulo diz respeito ao trabalho desenvolvido na dissertação. Este é denominado por Desenvolvimento, em que se encontram descritos os materiais utilizados, os procedimentos para a produção dos provetes de ensaio, assim como os ensaios experimentais dos mesmos e os resultados obtidos em cada um. No último capítulo, são realizadas as conclusões inerentes ao tema em estudo, retiradas através do desenvolvimento da dissertação e são sugeridos trabalhos futuros interessantes para a continuação deste estudo.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Materiais compósitos avançados

Neste capítulo pretende-se fazer uma abordagem aos materiais compósitos, introduzindo primeiramente alguns conceitos essenciais e posteriormente especificando os vários tipos de materiais mais utilizados atualmente na matriz e no reforço. Também são descritos os vários processos de fabrico de um material compósito e as aplicações com mais interesse destes.

2.1.1. Enquadramento dos materiais compósitos

Um material é classificado como compósito quando resulta da combinação a nível macroscópico de dois ou mais materiais com propriedades físicas e químicas distintas. Deste modo, uma das grandes vantagens destes materiais foca-se no aproveitamento das características de ambos os componentes associados a fim de obter um material com melhores propriedades do que cada um dos materiais isolados [1]. Os materiais que se pretendem unir, o reforço e a matriz, necessitam de ter afinidade química e física para que seja possível a sua utilização em conjunto sem que ocorram problemas de adesão ou de reações químicas adversas. A necessidade de fabricar materiais compósitos surgiu de forma natural há muitos milhares de anos, em que as aplicações eram básicas assim como reforçar construções. Atualmente, estes são extremamente importantes em várias áreas industriais, destacando-se os compósitos de elevado desempenho utilizados na indústria aeronáutica para o fabrico de componentes de aeronaves (Figura 1 e Figura 3), assim como nas indústrias automóvel e espacial. Estes materiais são também cada vez mais utilizados para o fabrico de artigos desportivos (Figura 2) e para componentes eletrónicos, entre outras aplicações.



Figura 1- Proteus, aeronave de exploração para elevadas altitudes, *Scale Composites* [2]



Figura 2- Bicicleta de fibra de carbono produzida pela BMW [3]

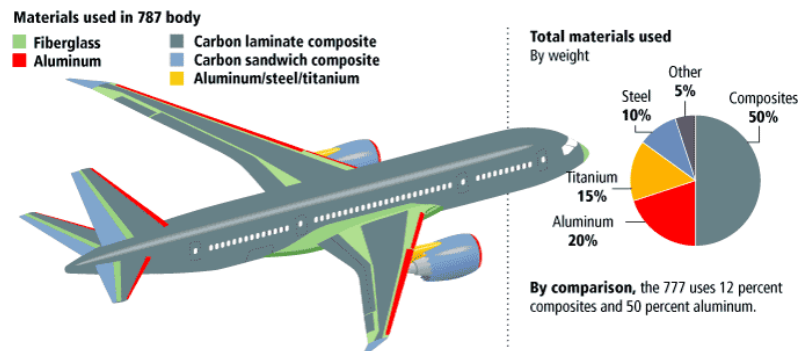


Figura 3- Materiais utilizados no Boeing 787 [4]

A utilização de materiais compósitos depende da finalidade da sua aplicação, ou seja, das propriedades que se pretendem para determinada aplicação, das condições físicas, químicas e ambientais a que irá estar sujeito o compósito. Para cada aplicação deve ter-se em conta as propriedades que permitem o material cumprir os requisitos pretendidos, assim como resistência mecânica, rigidez, peso, resistência à fadiga, resistência à corrosão, entre outras.

Fibras de reforço

Na constituição de um material polimérico, o reforço correspondente à fase dispersa é o material responsável por garantir as propriedades químicas e físicas ao produto final. Geralmente, pretende-se que este material tenha elevada resistência e rigidez. Este pode surgir sob a forma de partículas, fibras curtas ou fibras longas, sendo que os reforços são normalmente utilizados sob a forma de fibras, uma vez que desta forma apresentam excelentes propriedades mecânicas. As fibras são responsáveis pela estabilidade estrutural do compósito e estabelecem a resistência mecânica deste. Estas caracterizam-se por apresentarem, de um modo geral, elevada flexibilidade, resistência na direção do carregamento e por possuírem um elevado comprimento. Alguns exemplos de fibras utilizadas atualmente com mais frequência em diversas indústrias são fibra de carbono, fibra de vidro, fibra de aramida (*kevlar*), entre outras. As fibras podem ser classificadas quanto à sua origem como fibras naturais ou fibras sintéticas e em relação à sua forma como fibras contínuas ou fibras descontínuas.

Fibras naturais

Tendo em vista um desenvolvimento sustentável, de forma a dar seguimento a uma indústria cada vez menos poluente, também no fabrico de materiais compósitos se tem evoluído com a utilização de fibras naturais. As fibras naturais são fibras extraídas de elementos de origem natural e subdividem-se em fibras de origem animal, vegetal ou mineral. Estas são utilizadas no fabrico de compósitos desde os primórdios da humanidade para aplicações mais básicas, sendo atualmente utilizadas em compósitos estruturais de elevada exigência mecânica. Com o propósito de redução de custos nas empresas, de forma a diminuir a pegada ecológica, as fibras naturais tornaram-se um tema de estudo com muita relevância para várias secções do setor industrial [5]. Uma das áreas que suscita maior curiosidade é a indústria automóvel uma vez que é difícil perceber de que modo é que as fibras podem ser implementadas em componentes

automóveis. As empresas automóveis Mercedes e BMW são duas das principais marcas a utilizar compósitos de fibras naturais em algumas partes dos seus carros, sendo que a Mercedes opta por construir a estrutura de tetos solares de alguns modelos com fibras naturais (Figura 4) e a BMW em componentes da mala de certos automóveis (Figura 5).



Figura 4- Estrutura de teto solar de fibra natural *FiberFrame* no Mercedes-Benz E-Class 2017 [6]



Figura 5- Componentes com fibras naturais usados no BMW M4 GT4 [7]

Fibras sintéticas

As fibras sintéticas são obtidas essencialmente a partir de polímeros sintéticos e são as fibras mais utilizadas para aplicações estruturais em que seja necessária resistência a elevados esforços mecânicos. Quando as fibras sintéticas são embebidas numa matriz, o compósito formado apresenta excelentes propriedades mecânicas e leveza. As fibras sintéticas com maior relevância e utilização são as fibras de vidro, fibras de carbono e as fibras aramídicas, apesar de outras fibras como as fibras de boro também poderem ser incluídas neste grupo representado na Figura 6.



Figura 6- Tipos principais de fibras sintéticas [8]

Fibras de vidro

A fibra de vidro rapidamente se tornou um dos materiais mais utilizados como reforço de materiais compósitos dada a sua elevada resistência à tração e compressão, baixo peso específico e também pelo facto de apresentarem um custo mais baixo relativamente a outras fibras [9]. O método de fabrico mais utilizado é o estiramento do vidro fundido, no qual este é conduzido por canais através de uma fieira e é mantido a uma temperatura constante aproximadamente igual à sua temperatura de fusão (cerca de 1250 °C) de modo a manter o vidro no estado líquido. Posteriormente, os filamentos de vidro fundido passam por um processo de arrefecimento à saída da fieira, sendo assim atribuída a configuração final sob a forma de fibras como se pode visualizar na Figura 7. Por fim, as fibras são submetidas a

tratamentos superficiais que podem ser diferentes dependendo da finalidade a que se destinam as mesmas. No final do processo são obtidos filamentos de fibra de vidro com diâmetros na ordem dos μm e é aplicado um revestimento que visa unir os filamentos e proteger as fibras da abrasão [1]. As fibras de vidro são divididas em vários tipos, sendo existem três tipos de fibra que despertam maior interesse em várias indústrias, conforme se verifica na Tabela 1. As propriedades correspondentes aos diferentes tipos de fibra de vidro encontram-se condensadas na Figura 8.

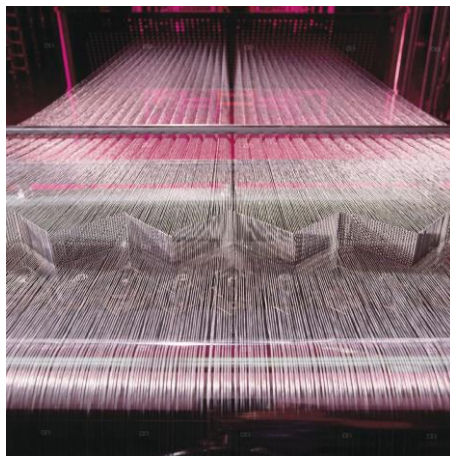


Figura 7- Produto final de fibra de vidro após processo [10]

Tabela 1 – Principais tipos de fibra de vidro e caraterísticas, adaptado de [9]

Tipo de fibra de vidro	Designação	Caraterísticas
Tipo C	<i>chemical</i>	Corresponde ao tipo de fibra de vidro mais utilizado como reforço de materiais compósitos de matriz polimérica. Provém de um vidro de borossilicato que apresenta boas propriedades elétricas, mecânicas e química.
Tipo E	<i>eletrical</i>	Apresenta boas propriedades de isolamento elétrico, baixo teor alcalino, boa resistência à tração e também uma boa rigidez à flexão.
Tipo S	<i>stiffness</i>	Propriedades mecânicas superiores às fibras de vidro do tipo E, apresentam um bom acabamento superficial e têm custo mais elevado do que as fibras anteriores.

Glass fiber type	Silicon dioxides (SiO_2) (%)	Density (g/cm^3)	Tensile strength (MPa)	Modulus (GPa)	Elongation at break (%)
A-type	63–72	2.44	3300	72	4.8
C-type	64–68	2.56	3300	69	4.8
D-type	72–75	2.11	2500	55	4.5
E-type	52–56	2.54	3448	72	4.7
R-type	56–60	2.52	4400	86	5.1
S-type	64–66	2.53	4600	89	5.2
ECR-type	54–62	2.72	3400	80	4.3
AR-type	55–75	2.7	1700	72	2.3

Figura 8- Propriedades dos diferentes tipos de fibra de vidro [11]

As fibras de vidro caracterizam-se pela boa resistência à corrosão, baixo peso específico, boa resistência, liberdade de processo e de forma, o que resulta num fácil manuseamento durante o fabrico. Deste modo, as fibras de vidro podem ser utilizadas numa vasta gama de aplicações em que garantem uma boa relação entre qualidade e baixo custo, por exemplo no revestimento de edifícios (Figura 9) ou em estruturas de barcos (Figura 10).



Figura 9- Painéis em fibra de vidro como revestimento de edifício [12]



Figura 10- Barco Benetti FB801 M/Y VICA com o casco em fibra de vidro e superestrutura em alumínio [13]

Fibras de carbono

As fibras de carbono foram uns dos primeiros reforços a ser utilizados em aplicações críticas, com o objetivo de reduzir a massa dos componentes. As aplicações de materiais compósitos com este tipo de reforço são cada vez mais variadas, com predominância nas indústrias aeronáutica, espacial e automóvel em componentes da carroçaria e em acessórios (Figura 11). Estes compósitos caracterizam-se por apresentar elevada resistência à tração e módulo de elasticidade, e também baixo peso específico [14]. Dentro da classe das fibras de carbono distinguem-se duas categorias. As fibras que apresentam percentagens de carbono entre os 80% e 95% são denominadas por fibra de carbono, enquanto que as fibras de grafite (Figura 12) têm percentagens de carbono superiores a 95%, podendo mesmo chegar aos 99% [1].

Relativamente ao processo de produção das fibras de carbono, Thomas Edison foi o primeiro a produzir filamentos de carbono a partir a pirólise do algodão para utilizar em lâmpadas incandescentes em 1878. A tecnologia foi sendo melhorada e, anos mais tarde, por volta de 1950, surge a primeira fibra contínua comercial produzida através da carbonização de rayon sintético. Dez anos mais tarde, no Japão e em Inglaterra, o processo foi melhorado e começou a utilizar-se poliacrilonitrilo (PAN) para a produção de fibras de carbono. Esta técnica é ainda a mais utilizada atualmente, dada a sua eficiência [14], e apenas tem sido melhorada com vista ao aumento da resistência das fibras, do seu módulo de elasticidade e de forma a diminuir deformações e falhas. A tecnologia mais recente, depois de efetuadas as melhorias, centra-se na decomposição térmica de principalmente três precursores orgânicos: a celulose, o poliacrilonitrilo (PAN) e o alcatrão. Os precursores são compostos utilizados nas reações químicas para originar um composto com diferentes propriedades mecânicas do original, sendo o PAN aquele que é mais utilizado atualmente [14]. Na Figura 13 encontra-se ilustrado o processo de produção de fibra de carbono. Na parte final do processo é possível conferir o formato final das fibras de carbono sob a forma de filamentos, como ilustrado na Figura 14.



Figura 11- Retrovisor de automóvel feito com fibra de carbono [15]



Figura 12- Fibra de grafite enrolada [16]

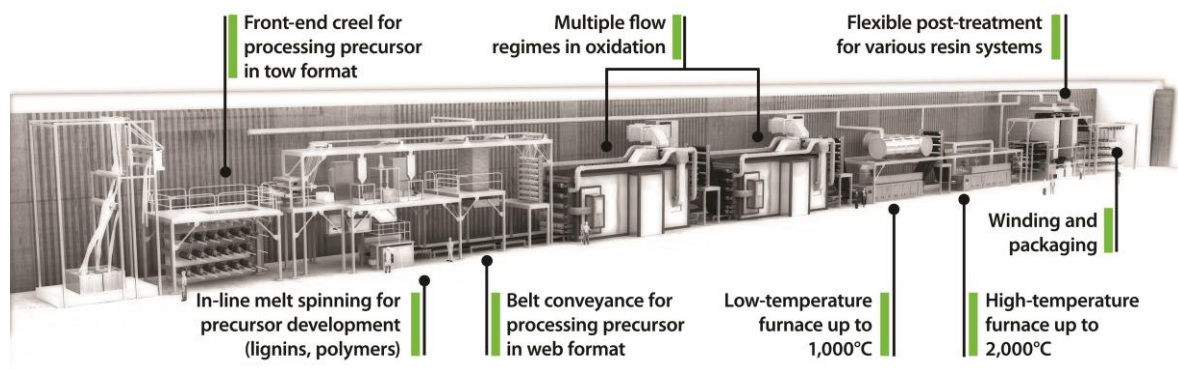


Figura 13- Processo de produção de fibra de carbono [17]



Figura 14- Parte final do processo de produção de fibra de carbono [18]

Fibras de aramida (*Kevlar*)

As fibras de aramida ou *kevlar* são fibras sintéticas orgânicas produzidas a partir de poliamidas aromáticas e foram inicialmente desenvolvidas pela *DuPont Co.* em 1972. Mais tarde, este compósito passou a ser produzido comercialmente com o fim de substituir o aço em algumas aplicações. Posteriormente, outras empresas também estudaram as utilidades das fibras de aramida e desenvolveram fibras similares. As fibras de *kevlar* são produzidas a partir de um processo de extrusão de uma solução polimérica mantida a baixa temperatura, esquematizado na Figura 15. Este processo confere uma melhoria das propriedades mecânicas do reforço, uma vez que existe um alinhamento da cadeia molecular do material [1].

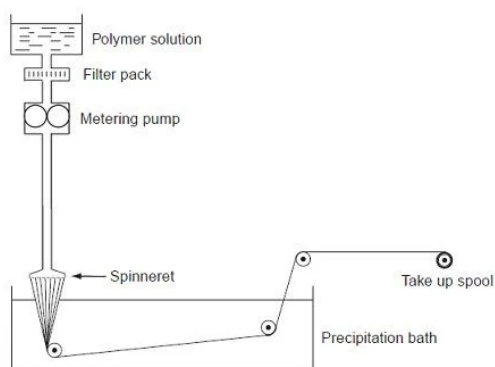


Figura 15- Processo de produção de *kevlar* [19]

Estas fibras caracterizam-se por apresentarem baixa densidade, boa relação entre a rigidez e o peso e boa tenacidade, ótima resistência ao impacto e à fadiga, resistência à tração consideravelmente elevada, mas não resistem tão bem à compressão. Apresentam ainda uma boa capacidade de amortecimento de vibrações, boa resistência a solventes orgânicos, combustíveis e lubrificantes, assim como a ácidos e alcalis. Estes compósitos são bons isoladores elétricos e térmicos [20]. Uma das desvantagens já referidas é a fraca resistência a esforços de compressão. Para além disso, as fibras de aramida têm baixa resistência à flexão e são sensíveis ao corte interlamelar dada a fraca ligação intermolecular que se estabelece entre as fibras e a matriz [21]. Dadas as suas características, as fibras de *kevlar* (Figura 16) são utilizadas para a produção equipamentos de proteção industrial (Figura 17).e de equipamentos de segurança, como artigos antibalísticos (Figura 18).

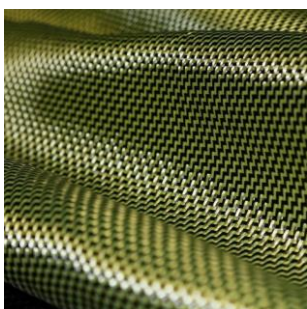


Figura 16- Fibras de *kevlar* [22]



Figura 17- Utilização de *kevlar* em luvas resistentes [23]



Figura 18- Coletes balísticos de segurança com *kevlar* [24]

2.1.2. Matrizes

A matriz constitui a fase contínua de um material compósito e é responsável por conferir estabilidade estrutural, visto que é um elemento que mantém a coesão das fibras de reforço e as protege do meio envolvente. Para além disso, a matriz ainda tem como função distribuir o carregamento pelas fibras [1]. Os materiais compósitos podem ser de matriz polimérica - CMP (Compósito de Matriz Polimérica), cerâmica – CMC (Compósito de Matriz Cerâmica) ou metálica – CMM (Compósito de Matriz Metálica), sendo que a primeira é a matriz com mais interesse para aplicações industriais. Esta divisão está esquematizada na Figura 19.

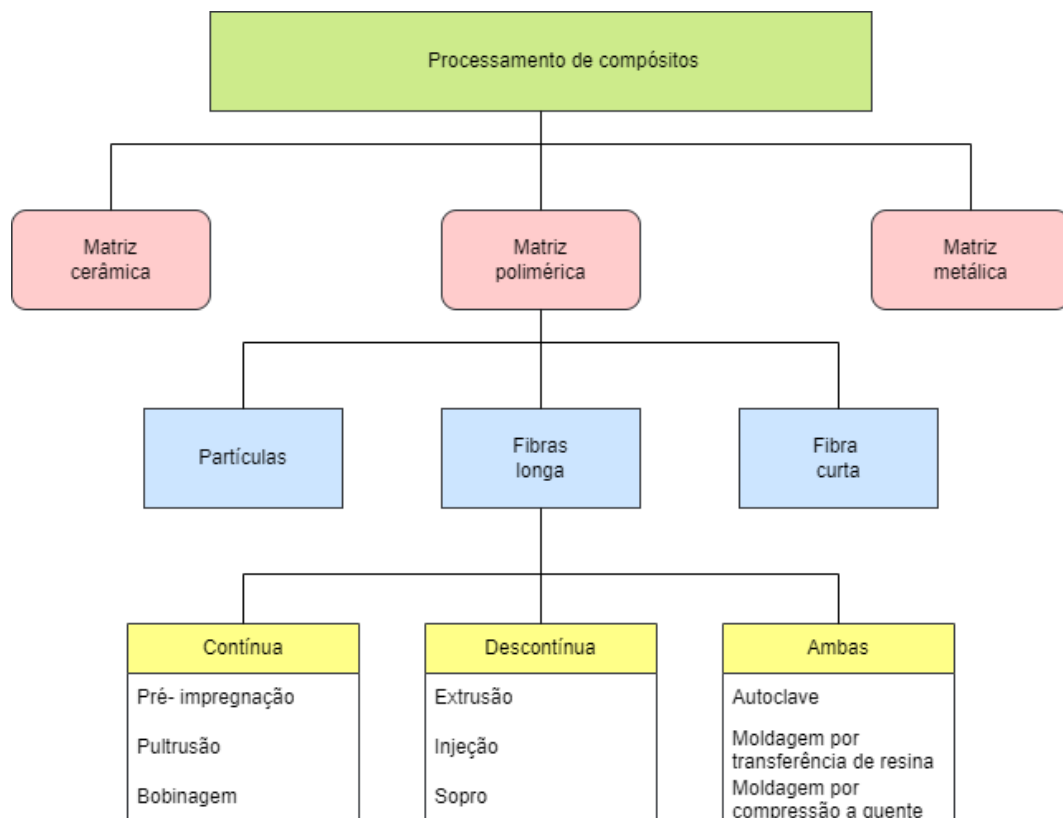


Figura 19- Divisão de tipos de matrizes dos materiais compósitos [25]

As matrizes poliméricas podem ser divididas em matrizes poliméricas termoplásticas e matrizes poliméricas termoendurecíveis. As matrizes termoplásticas são formadas por macromoléculas individuais lineares de grandes dimensões que não apresentam qualquer reticulação entre si [1]. A característica que mais se destaca neste tipo de matriz, e que é tida como uma vantagem, é o facto de ser possível recuperar o estado inicial do material após a sua conformação, através do aquecimento do mesmo. Os materiais termoplásticos utilizados neste tipo de matriz são constituídos por macromoléculas unidas através de ligações secundárias, assim como ligações de *Van der Waals* e ligações de hidrogénio. Pelo efeito do calor, estas ligações são temporariamente quebradas, passando assim a existir a mobilidade das moléculas que formam o material. Posteriormente, à medida que a temperatura diminui, as moléculas vão perdendo a sua mobilidade e estabilizam nas posições em que se encontram, altura em que voltam a ser estabelecidas as ligações secundárias entre estas que conferem uma nova forma ao material. Os materiais termoplásticos caracterizam-se por apresentarem maior resistência ao impacto, maior rigidez e menor higroscopicidade, ou seja, maior capacidade de absorção, relativamente aos materiais termoendurecíveis. As aplicações de materiais compósitos de matriz termoplástica são muito variadas, desde ao uso destes em artigos de decoração, estruturas exteriores de edifícios (Figura 20) até ao uso em componentes de automóveis (Figura 21), entre outras aplicações mais correntes.



Figura 20- Estrutura de estádio produzida em compósito polimérico de matriz termoplástica [26]

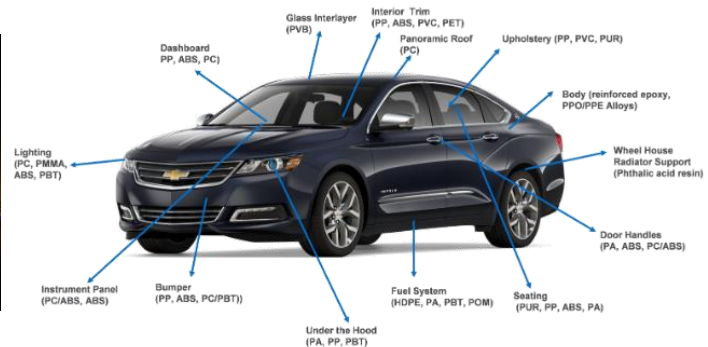


Figura 21- Componentes de automóveis fabricados com polipropileno – compósito polimérico de matriz termoplástica [27]

Os materiais termoendurecíveis não adotam o mesmo comportamento uma vez que depois de serem conformados já não é possível reverter o processo, ou seja, estes não voltam ao estado inicial. Este facto deve-se às ligações cruzadas estabelecidas entre as cadeias moleculares que conferem estruturas tridimensionais bastante rígidas. Os compósitos termoendurecíveis caracterizam-se por apresentarem um comportamento frágil numa vasta gama de temperaturas, comportamento elástico que permite a sua deformação. No processamento de um compósito termoendurecível é necessário utilizar um catalisador para que seja iniciado o processo de cura e posteriormente o material assumir a sua forma final. Nas matrizes termoendurecíveis, o primeiro passo para a obtenção do compósito é selecionar a resina, o acelerador e o catalisador. Posteriormente, realiza-se a mistura dos componentes em proporções adequadas. A mistura dos componentes origina o início da polimerização e da formação da estrutura molecular da matriz. O passo seguinte a executar é a deposição do material e a conformação do mesmo. Existem alguns fatores a ter em conta quando se escolhe o material a utilizar como matriz de um polímero, assim como o tempo de manuseamento, tempo de fixação, entre outros. O processo de cura começa assim que a mistura dos componentes é efetuada e este processo pode ser feito à temperatura ambiente ou necessitar de uma aplicação de calor adicional para diminuir o tempo de cura.

Os materiais poliméricos de matriz termoendurecível são os mais utilizados para casos de uso estrutural em que se pretende que o polímero tenha elevada rigidez, estabilidade térmica e dimensional, boas propriedades de isolamento elétrico e térmico e resistência à fluência. Uma grande vantagem das resinas termoendurecíveis em relação às resinas termoplásticas é a facilidade com que a resina é impregnada no reforço devido à sua eficiente distribuição pelos espaços entre as fibras do material de reforço. Isto deve-se à menor viscosidade, ou seja, maior fluidez das resinas termoendurecíveis. Visto que os compósitos termoendurecíveis são aqueles que suscitam maior interesse, tendo em conta o tema da dissertação, serão caracterizadas as resinas termoendurecíveis mais utilizadas em aplicações de engenharia.

Resinas de poliéster

As resinas de poliéster dividem-se em duas subclasses designadas por resinas de poliéster saturado e resinas de poliéster insaturado. A grande diferença é ao nível da cadeia molecular de cada uma, visto que nos poliésteres insaturados existem insaturações entre os átomos de carbono [1]. Os poliésteres insaturados são aqueles que despertam maior atenção na indústria, uma vez que apresentam boas propriedades mecânicas, físicas e elétricas, estabilidade dimensional, baixo custo e facilidade de processamento, tornado as suas aplicações versáteis. Esta é aplicada no estado líquido e é compatível com muitos materiais (Figura 22).



Figura 22- Uso de resina de poliéster em fibra de vidro [28]

Inicialmente, a resina de poliéster insaturado surge no estado líquido, para que se dê início à sua cura, e é necessária a adição de catalisadores que reagem com as moléculas da resina líquida e de calor, que conferem um aumento da viscosidade da resina ao longo do tempo [29]. O processo de cura contém duas etapas. A primeira etapa desenvolve-se desde a mistura dos componentes (resina e catalisador) até se atingir o ponto gel da mistura, que consiste no ponto em que a viscosidade da mistura cresce exponencialmente. A segunda etapa foca-se no restante processo até se atingir a consistência final. A velocidade com que se realiza o processo de cura depende de vários fatores, assim como do teor de resina, tipo e quantidade de catalisador utilizado e condições de temperatura e humidade a que se realiza o processo [1]. O processo de produção da resina de poliéster encontra-se resumido na Figura 23.

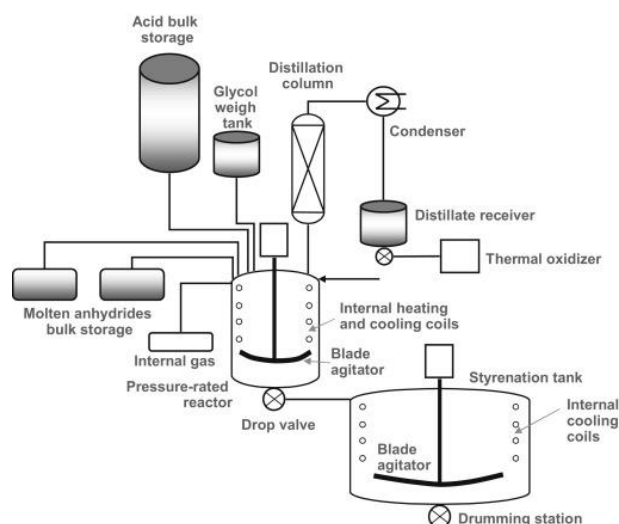


Figura 23- Processo de produção de resina de poliéster [30]

Resinas de epóxi

As resinas de epóxi, vulgarmente conhecidas por epóxis, são uma das classes de resinas mais utilizada para aplicações estruturais com uma crescente utilização em ligações adesivas. Este tipo de resina apresenta uma grande versatilidade de aplicações, uma vez que são facilmente modificáveis, e podem apresentar-se sob forma líquida, pasta ou sólida. Estas são especialmente utilizadas em aplicações que envolvem madeiras (Figura 24). Uma das grandes vantagens das resinas epóxi é a elevada adesão que estas estabelecem com o material de reforço, sendo assim utilizadas para a colagem de peças (Figura 25). Esta característica deve-se à polaridade dos grupos que constituem as cadeias moleculares, que cria forças intermoleculares entre a resina epóxi e a superfície adjacente em que esta é impregnada [31]. As vantagens que mais se destacam, para além da alta adesão, são a elevada resistência mecânica e química, assim como boa resistência à tração, ao corte, à fluência e a elevadas temperaturas [1]. O processo de cura envolve baixa contração do material (por volta de 2%) e ausência de emissão de produtos voláteis. O custo da resina epóxi confere um ponto negativo em comparação com outras classes de matrizes termoendurecíveis e ainda surgem como desvantagens a fraca resistência ao arrancamento e baixa tenacidade de algumas resinas.



Figura 24- Exemplo de aplicação de resina epóxi em madeiras [32]



Figura 25- Resina epóxi utilizada para arranjo de componentes [33]

Resinas fenólicas

As resinas fenólicas obtêm-se a partir de um processo de sintetização em que existe a reação entre o fenol e o formaldeído utilizando soluções ácidas ou básicas, de acordo com o tipo de resina que se pretende produzir. Estas podem ainda apresentar-se no estado líquido ou sólido, sendo que deste modo se pode selecionar o estado que melhor se adequa para a aplicação pretendida. Existem vários fatores que condicionam o produto final, sendo eles a estrutura química do material no estado inicial, o tipo de catalisadores utilizados, as proporções de fenol e de formaldeído, o pH do meio e as condições de temperatura em que se realiza o processo de formação da resina. As resinas fenólicas são particularmente utilizadas em aplicações em que a resistência ao calor e ao fogo são fatores decisivos [1]. Deste modo, estas são utilizadas em calços de travão, discos abrasivos, lixas, compostos de moldação, processamento de madeira, materiais de isolantes refratários, revestimentos, entre outras aplicações (Figura 26). As vantagens deste tipo de resinas incluem o bom comportamento em relação ao fogo (altas

temperaturas), garantia de estabilidade dimensional e custo reduzido quando comparado com outras resinas. As resinas fenólicas não se adequam à utilização em aplicações estruturais de elevado desempenho, uma vez que existe a libertação de produtos voláteis no processo de cura. Outra desvantagem destas resinas é a frágil ligação de metal com madeira.

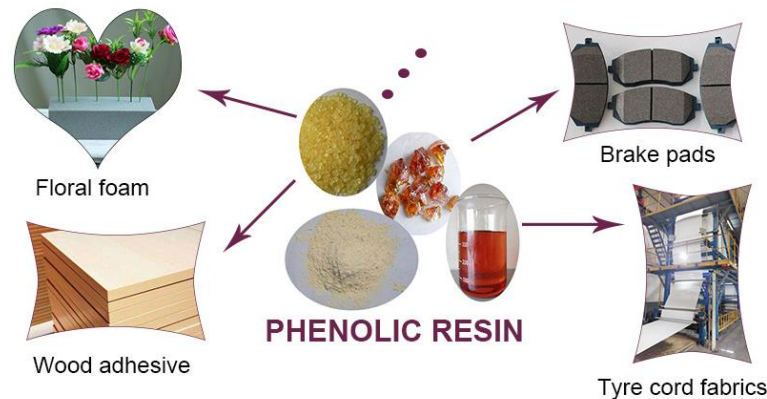


Figura 26- Exemplos de estados da resina fenólica e algumas das aplicações [34]

2.1.3. Processos de fabrico

O processo de fabrico dos materiais compósitos determina a configuração final dos mesmos. A inovação dos processos de fabrico de materiais compósitos tem permitido diminuir os custos relacionados com a produção e com a mão-de-obra, e tornar os processos mais rápidos e eficientes, reduzindo o desperdício. Com o avanço da tecnologia, ao longo das últimas décadas, também se tornou possível a automatização de processos e ainda desenvolver técnicas e processos que visam a reciclagem e a reutilização de materiais compósitos, contribuindo assim para o desenvolvimento sustentável das indústrias [1]. Este avanço permitiu a implementação dos materiais compósitos em indústrias de elevadas exigências assim como nas áreas de aeronáutica, aeroespacial, construção civil, entre outras. Os processos de fabrico de materiais compósitos podem ser divididos em dois tipos, designadamente processos em molde aberto ou processos em molde fechado. A diferença no tipo de molde que é utilizado tem influência nas propriedades mecânicas finais dos componentes, assim como na sua geometria e acabamento superficial. Para modelar a resina e o reforço dos materiais compósitos é necessária uma ferramenta (molde) que tem como função atribuir a forma pretendida ao compósito.

Os processos em molde aberto apenas conferem um bom acabamento numa das superfícies, ou seja, aquela que está em contacto com o molde, já que apenas é utilizado meio molde como se pode visualizar na Figura 27. Uma vez que se trata de um molde aberto, as pressões exercidas no processo são relativamente baixas, pelo que se torna possível o fabrico de peças com alguma complexidade e de grandes dimensões. Uma das desvantagens associadas a este tipo de processo diz respeito à baixa reprodutibilidade de peças produzidas.

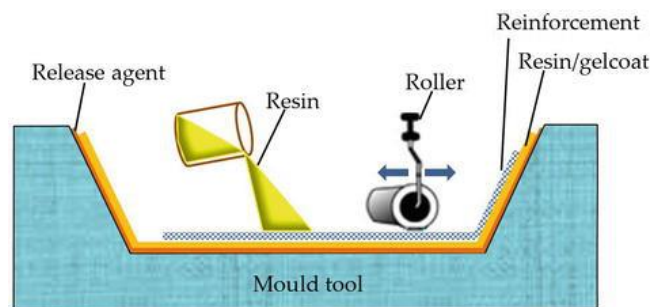


Figura 27- Moldagem manual utilizando um molde aberto [35]

Os processos de fabrico de materiais compósitos em molde fechado apresentam como vantagens a sua elevada reprodutibilidade, ótimo acabamento nas duas superfícies, e a nível ambiental o facto de emitirem uma menor quantidade de produtos nocivos. Este tipo de processo realiza-se em contextos em que se pretende uma maior produtividade, utilizando pressões mais elevadas no processo, o que no entanto limita a complexidade e dimensões das peças a produzir [1]. Nestes processos podem ser incluídos a moldagem por compressão (Figura 28), a moldagem por injeção (Figura 29), entre outros que se encontram listados na Tabela 2.

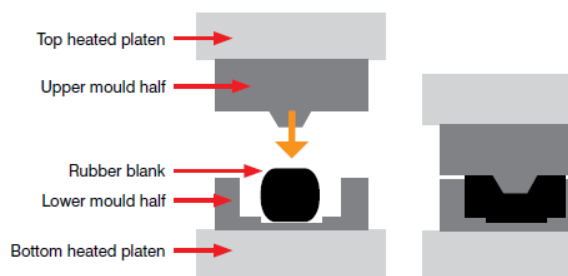


Figura 28- Moldagem por compressão com molde fechado [36]

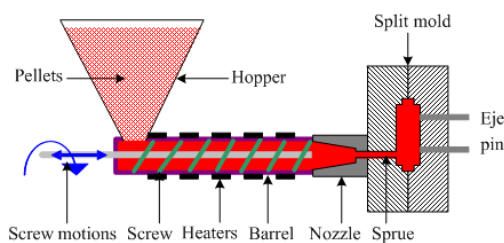


Figura 29- Moldagem por injeção em molde fechado [37]

Tabela 2 - Divisão dos processos em molde aberto e fechado e exemplos

Tipo de molde	
Molde aberto	Molde fechado
Moldagem manual	Moldagem por vácuo
Moldagem por projeção	Moldagem por injeção
Enrolamento filamental	Moldagem por compressão
	Moldagem por pultrusão
	Moldagem por centrifugação

Moldagem manual

A moldagem manual é o processo mais simples para realizar a moldagem de um material compósito. O processo consiste na disposição manual e empilhamento de camadas de reforço sob a forma de fibras ou de manta, realizando a impregnação das camadas com resina [38]. Para tal, é necessária a preparação prévia do molde. Utilizado um molde aberto, deve ser aplicada uma resina de poliéster para garantir um bom acabamento superficial do material no final do processo [1]. Posteriormente, o molde com a camada de resina deve ser endurecido

num forno a uma temperatura de aproximadamente 50°C e ainda deve ser aplicado um agente desmoldante no molde. No final do processo, obtém-se um material heterogéneo. A moldação manual caracteriza-se por ser um processo simples, que não necessita de mão de obra qualificada, refletindo-se assim em custos relativamente baixos associados ao processo. A principal vantagem deste processo de moldação, para além da simplicidade e do custo reduzido já mencionados, é a flexibilidade do processo, uma vez que permite realizar a moldação de componentes com poucas restrições de geometria. Contudo, a moldação manual apresenta algumas desvantagens que são responsáveis pelo abandono deste processo e opção por processos mais complexos. Este processo, uma vez que é realizado em molde aberto, liberta produtos voláteis para o meio ambiente e, deste modo, é necessário realizar este processo em ambientes controlados, com boa ventilação. A baixa produtividade também é uma limitação associada a este processo, assim como a necessidade de acabamento superficial.

Moldação por projeção

O processo consiste na projeção de uma mistura de partículas de reforço com resina diretamente no molde, através de uma pistola de projeção [39]. A resina no estado líquido com relativa viscosidade é conduzida para a cabeça da pistola de projeção, simultaneamente com a fibra sob a forma de *roving*. Na cabeça da pistola, a fibra é cortada com as dimensões pretendidas para cada aplicação e é projetada para o molde através do jato de resina [1]. O passo inicial do processo é realizar a limpeza do molde e aplicar um desmoldante. Posteriormente, aplica-se um gel que tem o objetivo de dar um acabamento superficial à peça, e é dado um tempo para que este endureça. Através da pistola de pulverização, dá-se início à projeção da mistura de fibras e resina. Após a projeção, são usados rolos e escovas para remover o ar e humedecer a mistura, se for necessário. Por fim, a peça é deixada a curar sob o molde e quando finalizado o tempo de cura, procede-se à extração da peça do molde e realiza-se o acabamento superficial necessário. O processo de cura pode ser realizado à temperatura ambiente ou o molde pode ser colocado num forno a temperaturas elevadas para acelerar este processo [39]. À semelhança da moldação manual, o processo deve ser realizado em ambientes controlados, uma vez que existe a libertação de produtos voláteis para o meio envolvente [1].

Enrolamento filamental

O processo de enrolamento filamental é um processo comum de moldação contínua com o objetivo de produzir uma vasta gama de produtos com configuração tubular, assim como reservatórios de pressão, tubos, tanques de armazenamento, eixos de transmissão, entre outros [39]. O enrolamento filamental é realizado através de um mandril, no qual é depositada fibra em forma de *roving* impregnada com resina [1]. É necessário garantir a deposição uniforme das fibras na superfície do mandril para que se obtenha a espessura desejada e para que a orientação das camadas esteja de acordo com o tipo de solicitações a que a peça irá estar sujeita em condições de funcionamento. Após o enrolamento dos filamentos estar concluído, procede-se à polimerização do material depositado no mandril também à cura do mesmo, através de um forno ou de luzes infravermelhas. As resinas termoendurecíveis são as mais

adequadas para este processo, contudo também podem ser utilizadas resinas termoplásticas apesar de o processo ser mais complicado. As vantagens associadas ao enrolamento filamentar são a sua simplicidade, automatização, possibilidade de produzir peças com dimensões elevadas e adaptação da orientação das fibras. As desvantagens centram-se nas limitações de formato das peças e na necessidade de acabamentos superficiais no final do processo.

Moldação por vácuo

Trata-se de um processo de molde fechado ao qual é aplicada a condição de vácuo, de modo a remover ar, gases e produtos voláteis gerados durante o processo. Para tal, é necessária a utilização de moldes estanques. No início do processo é incorporado um meio de distribuição permeável à pré-forma, servindo como uma camada superficial na qual é injetada a resina no interior do molde, a baixa pressão [40]. Em alguns casos, a resina e o reforço são ambos injetados ao mesmo tempo no interior do molde [1]. O tempo para encher o molde é um parâmetro crítico quando se pretendem produzir peças com grandes dimensões. Após a injeção da resina, o molde é fechado e aplica-se vácuo no seu interior. Uma das grandes vantagens da utilização da moldação a vácuo é o facto de serem produzidas superfícies lisas, com reduzidas quantidades de vazios nas peças. Este processo permite uma produção com boa cadência.

Moldação por injeção

A moldação por injeção é um processo repetitivo que permite a produção de grandes séries de peças. O processo consiste na injeção de plásticos derretidos para uma ou várias cavidades do molde, onde é mantido sob pressão até que fique no estado sólido, ou seja, até que a resina cure. Após a solidificação, o plástico é removido do molde [41]. O processo divide-se em várias etapas, sendo a primeira etapa o desenvolvimento do molde de acordo com o formato da peça que se pretende produzir. Posteriormente, são colocados os equipamentos auxiliares ao molde. Depois, devem ser verificadas e definidas as condições de realização do processo e se estas estão adequadas às normas de segurança. O molde é fechado e a matéria plastificada é conduzida até à câmara de injeção. De seguida, é realizada a injeção da matéria no molde e é aplicada pressão no interior do mesmo, para evitar a contração das peças. Após o arrefecimento da peça, esta pode ser removida. O processo de moldação por injeção é cíclico e, deste modo, logo após o arrefecimento e extração da peça, dá-se início a um novo ciclo [1]. Este processo de moldação permite a produção de peças de geometrias complexas numa única operação.

Moldação por compressão

A moldação por compressão é um processo de uso comum na indústria para produção de peças compósitas de pequeno e médio tamanho, em grandes volumes de produção, mas também é adequado para produzir pequenas quantidades. Neste processo são utilizados um molde macho e um molde fêmea, formando um molde combinado. A moldação por compressão consiste na consolidação do material nos moldes, através da aplicação de cargas exteriores recorrendo a uma prensa [39]. O processo pode ser realizado a frio ou a quente. Na moldação por

compressão a frio, as pressões exercidas são relativamente baixas, assim como as temperaturas que se compreendem entre 30 °C e 45 °C. Deste modo, o custo associado ao processo é menor do que na moldação por compressão a quente, uma vez que as prensas são mais leves e os moldes não necessitam de ser resistentes a altas temperaturas. Este processo tem uma cadência de produção média e produz peças com acabamentos superficiais imperfeitos. Outras limitações associadas à compressão a frio são a fraca precisão dimensional e a dificuldade em produzir nervuras ou outros pormenores nas peças. O processo de moldação por compressão a quente segue os mesmos princípios da moldação a frio mas, neste caso, os moldes são pré-aquecidos e as temperaturas podem chegar aos 170 °C [1]. As pressões exercidas na moldação a quente também podem atingir valores elevados, o que impõe a utilização de moldes mais resistentes. As peças produzidas têm maior resistência mecânica do que aquelas que são produzidas por compressão a frio e a cadência de produção é ligeiramente superior.

Moldação por pultrusão

A moldação é um processo de produção contínuo e tem como objetivo obter perfis de secção constante, que pode ser sólida ou oca. Neste processo, as fibras são tracionadas e são conduzidas para um banho de resina através de roletes cerâmicos, realizando-se automaticamente a impregnação das fibras. Posteriormente, as fibras impregnadas de resina são conduzidas através de uma fieira, a velocidade constante. A fieira serve de matriz e é o elemento responsável por dar a forma do perfil. Importa realçar que a matriz é aquecida e a temperatura da mesma e a velocidade de tração são parâmetros que dependem das características de cura da resina. O processo de cura da resina é realizado dentro da matriz e no final do processo obtém-se um compósito com a forma da secção transversal da mesma. Por fim, o compósito é conduzido para uma zona que permite o arrefecimento do mesmo e é cortado no comprimento pretendido através de uma serra de corte [39]. Podem ou não ser utilizados processos de acabamento no compósito produzido. Este processo é vantajoso na medida que permite a produção contínua e automatizada, não sendo necessária muita mão de obra e permite a obtenção de produtos com excelentes propriedades mecânicas na direcção longitudinal [1]. As principais desvantagens da pultrusão são a limitação de produzir perfis de secção constante e a limitação da fraca resistência da secção transversal ao perfil.

Moldação por centrifugação

A centrifugação consiste num processo de moldação em molde fechado e é utilizado para a produção de peças ocas. O processo inicia-se com a introdução de uma resina e de um reforço sob a forma de *roving* num molde metálico cilíndrico em rotação [1]. A rotação do molde é responsável por produzir uma pressão centrífuga que faz com que se dê a infiltração completa da resina no reforço [42]. Após a polimerização do material, é formada uma peça cilíndrica. O parâmetro que define a forma final das peças é a velocidade de rotação do molde metálico. Deste modo, a velocidade de rotação deve ser adequada, tendo em conta o tipo e a quantidade de reforço que se pretende utilizar, a viscosidade da resina e as dimensões da peça pretendidas. As vantagens associadas a este processo são o facto de produzir peças com bom acabamento

superficial, uma vez que se obtêm peças com as faces lisas, boa cadência de produtividade e a facilidade do controlo do processo durante o fabrico das peças. Devido à pressão centrífuga resultante da rotação do molde, as bolhas de ar são removidas da peça. As desvantagens da moldação são o elevado custo dos equipamentos e da sua instalação, o facto de estarem limitadas a produzir apenas peças ocas cilíndricas e a necessidade de mão de obra com qualificação para operar este tipo de processo.

SMC (*Sheet Moulding Compound*)

No presente capítulo é dado particular destaque aos SMC (*Sheet Moulding Compound*), devido à sua particular afinidade com o tema da dissertação a desenvolver, que envolve o fabrico de pás eólicas, constituídas por fibra de vidro e resina epóxi. A designação SMC refere-se a um compósito termoendurecível de moldação por compressão de fibras curtas e resina, produzido sob a forma de manta. As aplicações deste tipo de compósitos centram-se em situações em que seja necessária uma boa resistência mecânica e elevada resistência ao impacto. Estes materiais são facilmente modificados, dada a sua flexibilidade, o que permite a aplicação destes em casos em que é necessário executar detalhes como saliências ou nervuras. Os SMC são úteis quando se pretende produzir peças com alguma complexidade e as vantagens associadas a estes são a boa resistência à corrosão, a elevadas temperaturas, a agentes químicos.

Os SMC são obtidos através de um processo de fabricação contínua (Figura 30), que pode ser dividido em duas etapas [43]. A primeira etapa é a preparação do pré-impregnado (*prepreg*), que consiste na mistura da resina com as cargas, catalisadores, agentes de anti corrosão, espessantes, entre outros, de modo a conferir as propriedades mecânicas pretendidas no material. Já a segunda etapa refere-se à moldação por compressão através de um molde com o formato desejado. Podem ser referenciados outros compostos de moldação como os TMC e os BMC. Os TMC's (*Thick Moulding Compound*) distinguem-se dos SMC's, uma vez que a espessura destes é superior aos SMC's. Deste modo, evita-se a utilização de tantas camadas para formar uma peça mais espessa. Nestes compostos de moldação, o tamanho das fibras e a distribuição das mesmas são aleatórias. Em relação aos BMC's (*Bulk Moulding Compound*), estes compostos de moldação apresentam uma menor resistência mecânica do que os SMC's, uma vez que neste é utilizada uma menor quantidade de fibras. Os BMC's consistem numa mistura sob a forma de pasta que contém resina e fibras curtas.

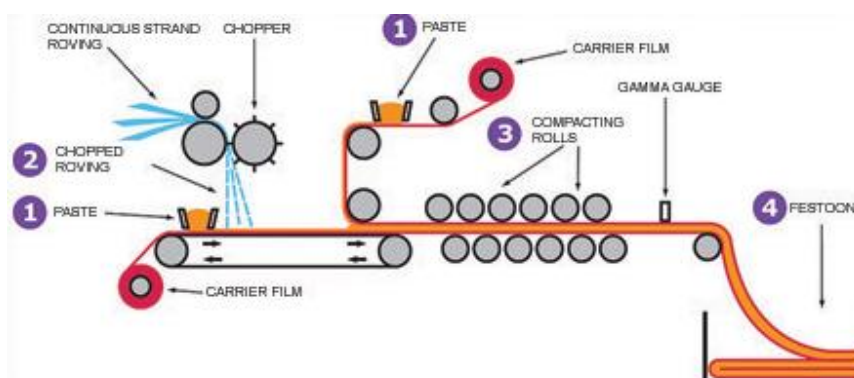


Figura 30- Processo de formação de um SMC [44]

2.2. Caraterização de materiais compósitos

No presente subcapítulo pretende-se introduzir os ensaios mecânicos que melhor se adequam com vista a caraterizar os materiais compósitos. Na caraterização de materiais compósitos, as técnicas de modelação são um aspeto importante, referido no Apêndice A.

2.2.1. Ensaios de composição de compósitos

Densidade

O ensaio de densidade mais comum baseia-se na norma ASTM D792 [45], segundo a qual primeiramente é determinada a massa do provete em análise, e posteriormente o mesmo é colocado a flutuar num recipiente que contém uma mistura de líquidos, a uma temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$. A mistura de dois líquidos contém um líquido com menor densidade do que o material em análise e o outro é um líquido mais denso que este. O líquido mais denso é adicionado à mistura faseadamente até ao ponto em que se atinge o equilíbrio da amostra, ou seja, até que o provete se encontre a flutuar. Nesse ponto de equilíbrio, pode admitir-se que a densidade do material corresponde à densidade da mistura nesse momento. As bolhas que surgem no líquido do recipiente devem ser eliminadas e, caso não seja possível efetuar a sua remoção, o ensaio deve ser feito em vácuo. O recipiente não deve contactar com o provete nem com o utensílio utilizado para segurar o provete. A massa do provete suspenso no líquido é, por fim, determinada. É necessário calcular a gravidade específica, antes de calcular a densidade do provete. Deste modo, a gravidade específica é determinada pela expressão:

$$\frac{\text{Massa do provete no ar}}{\text{Massa do provete no ar} + \text{Massa do provete totalmente imerso} - \text{Massa do fundador de fio}} \quad (1)$$

Por fim, a densidade do provete é dada pela expressão:

$$D_{23^\circ\text{C}}, \text{ kg/m}^3 = \text{sp gr}_{23/23^\circ\text{C}} \times 997,5 \quad (2)$$

O aparelho que se pode visualizar na Figura 31 e esquematizado na Figura 32 é o aparelho utilizado para este ensaio. Relativamente ao processo e técnicas de ensaio, importa referir que a amostra deve ter as suas dimensões bem definidas.



Figura 31- Aparelho para ensaio de densidade [46]

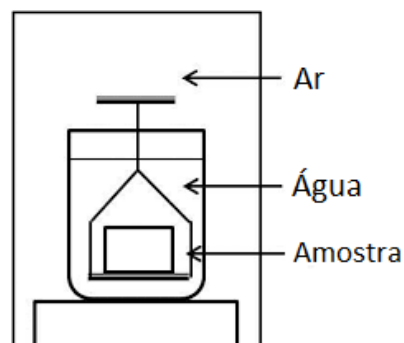


Figura 32- Constituintes do aparelho utilizado para ensaios de densidade [47]

Fração volúmica de fibras

A fração volúmica de fibras de um material compósito torna-se essencial para caraterizar as propriedades mecânicas de um compósito. Teoricamente, quanto maior for a fração volúmica de fibras, maior será a resistência do material. A fração volúmica de fibras relaciona o volume ocupado pelas fibras do compósito com o volume total do mesmo, tendo em conta a densidade de cada material (fibra e matriz).

Através da utilização da norma ASTM D3171-22 [48] de determinação da fração volúmica de fibras, existem dois procedimentos que podem ser seguidos. O primeiro método é específico para laminados e baseia-se em cálculos de acordo com a espessura do compósito [39] e, de acordo com o tema da dissertação, não tem interesse para este caso. O segundo método consiste na remoção da matriz através de dissolução ou ignição da mesma. De forma a separar a matriz do reforço, as amostras são colocadas num meio de dissolução próprio em que existe um aquecimento até que o material correspondente à matriz se dissolva na solução, restando apenas as fibras no fim do processo através da filtragem da solução. Neste método, são preparadas amostras a partir do componente a analisar e posteriormente estas são secas e arrefecidas. De seguida, determina-se a densidade das amostras com recurso à norma ASTM D792-20 [45]. Por fim, é possível determinar a fração volúmica de fibras, tendo em conta a densidade da matriz e do reforço e o teor de cada um destes. Quando se opta por realizar a ignição, a amostra é colocada num forno, cerca de duas horas ou até que a matriz desapareça, a 565°C. No final do processo, o material de reforço que sobra é seco e arrefecido e, por fim, é determinada a massa do mesmo. É considerado um método simples e eficaz de determinação da fração volúmica de fibras. Contudo, apresenta limitações, uma vez que o reforço pode ser queimado, e deste modo causa resultados incorretos no cálculo da fração volúmica de fibras. A fração volúmica de fibras é determinada pela relação entre o volume de fibras e o volume do compósito inicial. Os cálculos para a fração volúmica de fibras são os seguintes:

$$M_c = M_f + M_m \quad (3)$$

$$V_f = \frac{M_f}{\rho_f} \quad (4)$$

$$V_m = \frac{M_m}{\rho_m} \quad (5)$$

$$V_c = V_f + V_m \quad (6)$$

$$v_f = \frac{V_f}{V_c} \quad (7)$$

$$v_m = \frac{V_m}{V_c} \quad (8)$$

sendo:

M_c : Massa do provete do compósito

M_f : Massa das fibras de reforço

M_m : Massa da matriz

P_f : Densidade das fibras de reforço

P_m : Densidade da matriz

V_c : Volume do provete do compósito

V_f : Volume das fibras de reforço

V_m : Volume da matriz

v_f : fração volúmica de fibras

v_m : Fração volúmica da matriz

Conteúdo de vazios

Os vazios nos materiais compósitos correspondem a espaços que não foram preenchidos pela matriz e tornam-se locais de fragilidade no compósito. Com recurso à norma ASTM D2584-18 [49], pode determinar-se o conteúdo de vazios de amostras de um componente em material compósito. O processo consiste na queima do compósito até que restem apenas cinzas e carbono. Os resíduos de carbono são reduzidos a cinzas através do aquecimento por parte de um forno a 565°C (Figura 33), até que todo o material carbonáceo tenha desaparecido. Por fim, os resíduos são arrefecidos até à temperatura ambiente e pesados. O conteúdo de vazios corresponde à perda percentual de massa do compósito durante a ignição, sendo calculada por:

$$m_{perdida}, \% = \frac{W_1 - W_2}{W_1} * 100 \quad (9)$$

sendo:

W_1 = Massa do provete inicial

W_2 = Massa dos resíduos



Figura 33- Forno usado para ensaios de conteúdo de vazios [50]

Humidade

A humidade, à semelhança da temperatura, é um fator que condiciona o desempenho dos materiais compósitos, diminuindo a resistência mecânica dos mesmos. O estudo dos efeitos higrométricos torna-se ainda mais importante quando se trata de compósitos de matriz polimérica que apresentam comportamento viscoelástico. A absorção de humidade por parte de um material compósito enfraquece as ligações que se estabelecem na matriz [1]. Para determinar o teor de humidade de um componente em material compósito, são utilizados os procedimentos explícitos na norma ASTM D792 [45], explicada em 0. Através do processo, determina-se a massa das fibras de reforço e a massa da matriz. O procedimento de cálculo da humidade torna-se simples uma vez que apenas é comparado o peso antes e após a secagem. Este valor deve estar entre 1 e 2 % de humidade em compósitos de matriz polimérica.

2.2.2. Ensaios de caracterização mecânica

Os ensaios de caracterização mecânica são importantes para a determinação das propriedades mecânicas na medida em que é possível obter alguns dos seus valores num contexto real de utilização, submetendo amostras a variados tipos de solicitações, assim como, tração, compressão, corte e flexão.

Tração a 0 e 90°

Os ensaios de tração permitem determinar propriedades importantes para o projeto de estruturas compósitas, assim como o módulo de elasticidade, tensão de cedência, tensão de rotura e coeficiente de Poisson da amostra em estudo. Habitualmente, executam-se ensaios de tração a 0° ou 90°, ou seja, com as fibras dos laminados a 0° ou 90° em relação ao eixo de carregamento. Este ensaio é mais indicado para compósitos unidirecionais. Para a realização do ensaio utiliza-se uma máquina de ensaios de tração (Figura 34), é fixado um provete em posição vertical, através das duas extremidades. Posteriormente, são ajustados os parâmetros de ensaio, como a velocidade de ensaio, entre outros. O ensaio é realizado através da aplicação gradual do deslocamento da extremidade superior do provete, enquanto a extremidade inferior se mantém fixa. O fim do ensaio dá-se quando existe a rotura do provete.

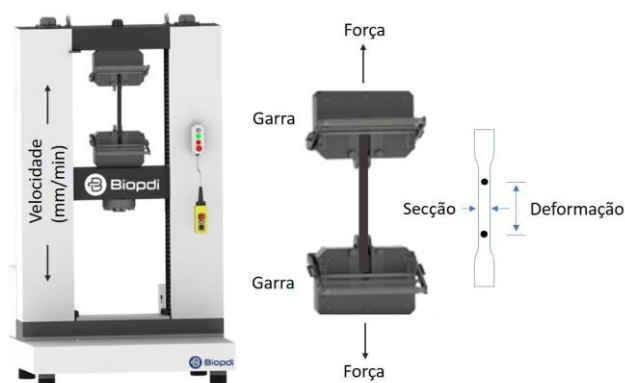


Figura 34- Máquina de ensaios de tração e esquema do ensaio [51]

As dimensões dos provetes e os parâmetros de ensaio são estabelecidos pelas normas que se pretendam seguir, assim como ASTM D3039 [52], BS 2782 [53] e ISO 527 [54], sendo a norma ASTM D3039 a mais comum [39]. O uso de um extensômetro torna-se útil para obter os valores do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson [1]. No final de cada ensaio, o *software* fornece uma série de dados como a força aplicada e o deslocamento a cada instante de tempo, o que permite, através da aplicação de fórmulas, determinar a tensão e a deformação em cada um desses instantes.

Compressão a 0° e 90°

Os ensaios de compressão a 0° e 90° são realizados com vista a determinar a resistência dos provetes, obter o módulo de compressão, a deformação à compressão final e o coeficiente de Poisson em compressão. O procedimento deste tipo de ensaios consiste na fixação de provetes numa máquina de ensaios adequada, seguida da aplicação de um deslocamento gradual, com o intuito de comprimir o provete. O deslocamento é efetuado numa das extremidades do provete até que o mesmo falhe, ou seja, até que o provete sofra rotura. Deste modo, obtêm-se os gráficos que relacionam a deformação em função da tensão do provete a cada instante. Deste modo, é possível verificar o valor da tensão de rotura. Utilizando os dados fornecidos pelo *software*, depois da realização do ensaio, é possível determinar as propriedades do compósito à compressão.

Encontram-se documentadas algumas dificuldades associadas aos ensaios de compressão, principalmente devido ao fenómeno de encurvadura e na transmissão de carga ao provete, que podem conduzir a dúvidas acerca da validade dos resultados obtidos [39]. Para tentar evitar que ocorra encurvadura nos provetes, é necessário ter especial atenção às dimensões dos mesmos, tentando diminuir o seu comprimento, embora de forma controlada para evitar concentração de tensões, no caso de os comprimentos serem pequenos. A direção do carregamento e a orientação das fibras também condicionam os ensaios de compressão, definindo assim se o provete será mais crítico ao fenómeno de encurvadura ou à rotura das fibras. Ao longo do tempo foram definidas várias normas para a realização de ensaios de compressão, sendo as mais importantes de referenciar a ASTM D695 [55], D3410 [56], D6641 [39]. A norma ASTM D695-15 [55] exige que sejam colocadas guias nas laterais dos provetes de modo a evitar a encurvadura destes provetes durante o ensaio. Esta norma não é adequada para compósitos de elevada resistência e apresenta maior veracidade dos resultados quando se trata de provetes com a orientação das fibras a 90° em relação ao eixo de carregamento, uma vez que, para provetes com as fibras orientadas a 0°, podem surgir fissuras transversais nas extremidades do provete. A norma ASTM D3410 [56] apresenta o método mais usual de ensaio dada a sua simplicidade. O provete tem área retangular e pode ou não conter suporte de laterais. O dispositivo de ensaio está ilustrado na Figura 35. Os provetes mais adequados para este ensaio têm a orientação das fibras a 0° em relação ao eixo de carregamento, uma vez que são provocadas tensões no provete, ao ser aplicado o carregamento. As dimensões do provete têm de ser adequadas à resistência à compressão e ao módulo de compressão esperados, tendo sempre em atenção para evitar o fenómeno de encurvadura.

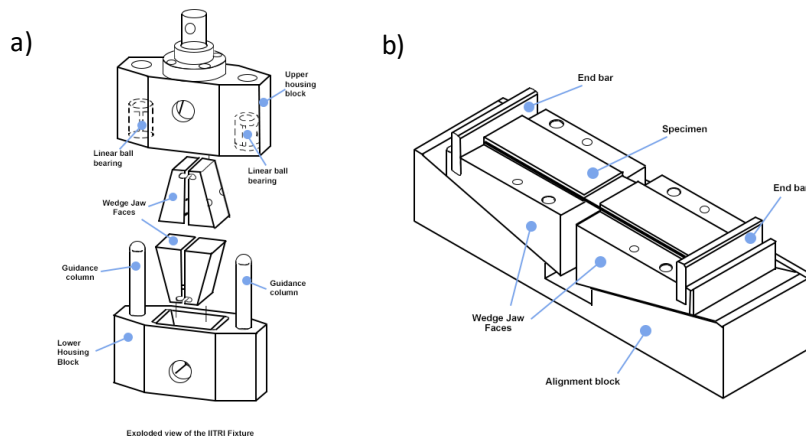


Figura 35- Máquina de ensaios de compressão a) e provetes b) pela norma ASTM D3410 [57]

Corte

Tração $\pm 45^\circ$

Este ensaio baseia-se em solicitar um provete à tração uniaxial numa máquina universal de ensaios. O provete é constituído por fibras orientadas a 45° e a -45° e ambas as extremidades do mesmo são fixas e é aplicada uma força de tração cada vez maior na extremidade superior do provete. As fibras são solicitadas ao corte puro e, através dos dados de deslocamento e força aplicada em função do tempo, é possível estimar a tensão de cedência e a tensão de rotura do gráfico tensão-deformação, assim como o módulo de elasticidade do material através do declive da reta no domínio elástico.

De modo a solicitar os provetes a esforços de corte, é necessário que a orientação das fibras dos provetes seja de 45° relativamente ao eixo de carregamento [39], conforme indicado na Figura 36. Porém, este tipo de ensaio pode não ser o mais indicado para obter a resistência ao corte do material compósito em que os provetes são fabricados, uma vez que o material não está sujeito apenas a tensões de corte, existindo ainda tensões normais associadas [1]. Podem ser seguidas várias normas para realizar este tipo de ensaios assim como a ASTM D3039, ISO 527, BS 2782 e CRAG 300-302. Estas normas são determinantes para seleccionar a velocidade do ensaio, as dimensões dos provetes, entre outros fatores.

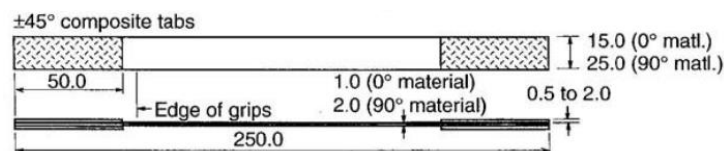


Figura 36- Provetes $\pm 45^\circ$ para ensaios ao corte [58]

Iosipescu (V-Notch Beam Shear Test)

O ensaio *Iosipescu* enquadra-se nos ensaios de corte para caracterização de materiais compósitos, cuja designação advém do investigador que deu origem ao ensaio. Posteriormente, este ensaio foi adotado pela norma ASTM D5379 [59], apesar de ter sofrido pequenas

modificações. O processo de ensaio consiste na aplicação de uma carga que provoca corte puro no provete através da aplicação de um par de forças que provocam momentos fletores (Figura 37). Os provetes têm entalhes a meio da secção. Nessas zonas, existem tensões de corte associadas ao carregamento e o momento fletor é nulo. Para realizar a medição da deformação e posteriormente das tensões de corte, é necessário colocar dois extensómetros orientados a 45° e a -45° , em relação ao eixo vertical [1]. A fixação do provete no aparelho é feita entre um bloco fixo e um bloco móvel. O carregamento é efetuado na parte superior do bloco móvel e a carga é transmitida através de um pino de alinhamento contido no bloco móvel, dando-se o deslizamento do mesmo [60].

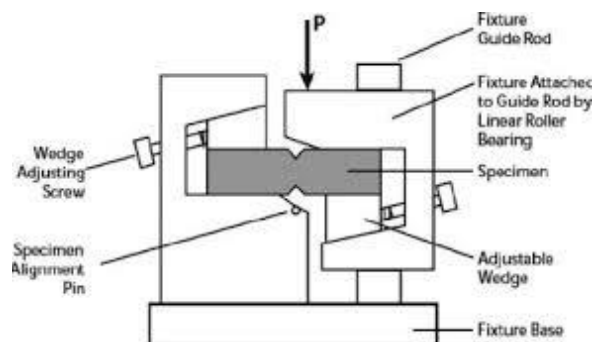


Figura 37- Aparelho para ensaios Iosipescu [61]

Rail Shear Test (Ensaio de corte em calha)

De acordo com a norma ASTM D4255 [62], o ensaio de corte através de calhas pode assumir duas configurações: ensaio em calha dupla ou em calha tripla. Ambos os métodos pretendem estudar as propriedades do material ao corte no plano do provete. Na realização do ensaio são impostas cargas de tração ou de compressão, sendo a força de tração a mais utilizada neste tipo de ensaio [39].

No ensaio de corte em duas calhas, os provetes são colocados entre dois pares de calhas e são fixos longitudinalmente através de três parafusos ao longo das calhas. Deste modo, a transferência de carga através de ligações pré-esforçadas é executada a partir de forças de atrito que se estabelecem entre as calhas e o provete. À semelhança do ensaio Iosipescu, a medição das deformações também é feita através de dois extensómetros orientados a $+45^\circ$ e -45° . No ensaio com calha tripla, os provetes são colocados entre dois pares de calhas e fixos a uma placa de base através de três parafusos. É adicionado mais um par de calhas fixas ao centro dos provetes, diferenciando-se assim este ensaio do ensaio de corte em duas calhas. As diferenças na configuração dos dois tipos de ensaio de corte em calhas são perceptíveis na Figura 38. Para a realização do ensaio é aplicada um deslocamento que provoca compressão nas calhas adicionais, que consequentemente irá provocar um esforço de corte no plano do provete. A norma ASTM D4255 [62] indica que, para os ensaios em calha dupla, os provetes devem apresentar a forma de lâminas retangulares de 152 mm x 76 mm, enquanto para os ensaios em calha tripla estes devem ser de 152 mm x 137 mm. Já a espessura dos provetes, para ambos os casos, não tem valor fixo, mas deve ser adequada de modo a evitar a encurvadura devido a espessuras finas, e também de modo a evitar o escorregamento e esmagamento com consequente rotura, decorrente da aplicação de cargas demasiado elevadas para a espessura

dos provetes. Em função do exposto, sugere-se que as espessuras dos corpos de prova se localizem entre 1,27 mm e 3,17 mm [39]. Importa ainda realçar que, em ambos os ensaios, os provetes não se encontram apenas sujeitos a corte puro, já que também surgem tensões normais e momentos derivados da metodologia do ensaio e das cargas impostas. Deste modo, os resultados podem não refletir exatamente o que se espera a nível de resistência ao corte do material em que os provetes são fabricados.

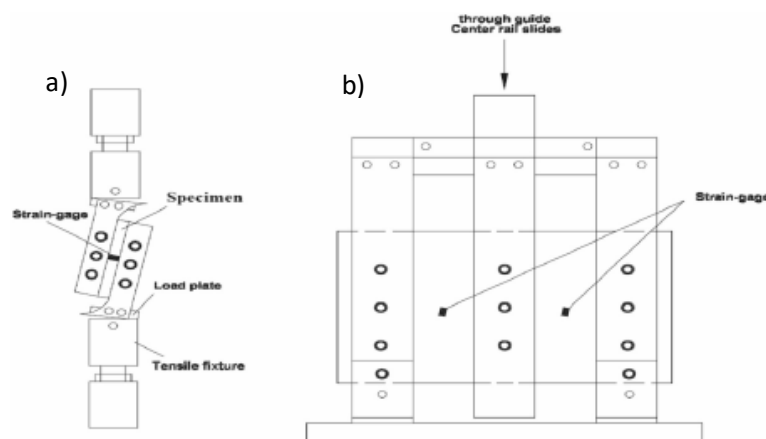


Figura 38- Ensaio de corte em calha dupla a) e em calha tripla b) [63]

V-Notched

Este tipo de ensaio consiste na determinação de propriedades ao corte do material, de acordo com a norma ASTM D7078 [64], segundo a qual o provete é colocado entre dois pares de calhas de carregamento e é fixo através de parafusos de aperto contidos em ambas as calhas. O provete utilizado neste ensaio apresenta uma forma retangular com um entalhe em “V” no centro de cada uma das arestas horizontais. O facto de o provete ser entalhado faz com que as tensões de corte se concentrem nessa região de entalhe, ou seja, na secção de medição e não se foquem tanto nas zonas onde o provete é fixo. Deste modo, a distribuição de tensões na amostra torna-se mais uniforme. Após a montagem do provete no dispositivo (Figura 39) estar concluída, as duas metades de fixação do provete são tracionadas por parte da máquina de ensaio enquanto o deslocamento é controlado. Devido ao deslocamento entre as duas metades de fixação, é induzido um esforço de corte no provete, provocando a rotura do mesmo. Para a medição da deformação no provete, são colocados dois extensómetros a 45° e a -45° relativamente ao eixo de aplicação do carregamento. Através da relação entre a força e a área da secção obtém-se a tensão de corte induzida no provete que leva à sua rotura.

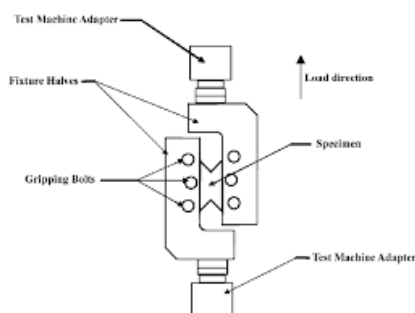


Figura 39- Equipamento para ensaio V-Notched [65]

Flexão

Na caracterização de materiais compósitos, a realização de ensaios de flexão é muito comum, dada a simplicidade e os menores custos inerentes do provete e do método. Estes ensaios são úteis na medida que permitem determinar o módulo de elasticidade do material e a resistência à flexão [39]. Contudo, os resultados obtidos neste tipo de ensaio não são os mais importantes e decisivos para o dimensionamento de um projeto, uma vez que, durante o ensaio, o provete irá estar sujeito a esforços de compressão, tração e corte, ou seja, nunca se pode avaliar isoladamente as propriedades do material à flexão. Deste modo, os ensaios de flexão são mais utilizados como meio de comparação no controlo de qualidade dos materiais [1]. Os ensaios de flexão apresentam essencialmente duas configurações: ensaio de flexão em três pontos (*three-point flexure test*) e ensaio de flexão em quatro pontos (*four-point flexure test*). A diferença principal entre estes dois tipos de testes é o número total de apoios e pontos onde o carregamento é aplicado no provete.

Ensaio de flexão em três pontos

Neste tipo de ensaio, utiliza-se a norma ASTM D790 [66] para definir as dimensões dos provetes e a metodologia de ensaio. O provete deve ser alinhado de modo que a linha imaginária transversal ao mesmo, que engloba o ponto em que o carregamento é aplicado, esteja situada no centro do provete. [39]. O carregamento surge a partir de um cabeçote da máquina de ensaio, a uma taxa constante de aplicação de deslocamento (Figura 40), a uma velocidade de descida constante e definida antes do início do ensaio. Este ensaio baseia-se num provete de secção retangular colocado na máquina de teste através de dois apoios destinados a cada uma das extremidades do provete (Figura 41). Considera-se o valor do deslocamento do cabeçote da máquina e a deflexão a meio do vão como sendo as variáveis do ensaio. O momento fletor máximo centra-se precisamente nesta região, a meio do vão [1].

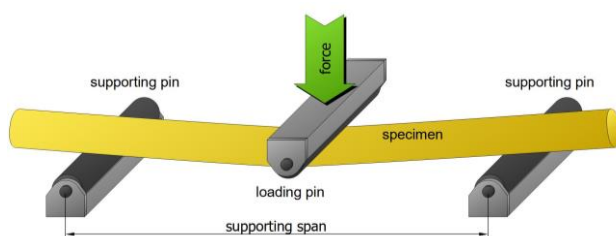


Figura 40- Exemplificação de ensaio de flexão em 3 pontos [67]

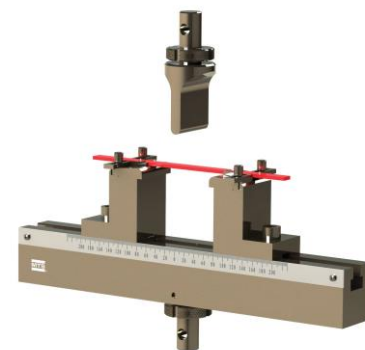


Figura 41- Equipamento de ensaio de flexão em 3 pontos [68]

Ensaio de flexão em quatro pontos

A metodologia de ensaio deste ensaio, em quatro pontos, é muito semelhante ao ensaio de flexão em três pontos, diferindo apenas o modo de carregamento. No ensaio de flexão em quatro pontos o carregamento deixa de ser efetuado em apenas um ponto central da amostra, e passa a realizar-se em dois pontos, havendo uma divisão da força aplicada, como se pode

visualizar na Figura 42. Deste modo, é induzido um comportamento à flexão distinto, uma vez que o momento fletor, ao contrário do que acontece nos ensaios de flexão em três pontos, deixa de ser máximo na zona central e de aplicação da carga e torna-se máximo e constante na zona delimitada pelos pontos de aplicação do carregamento [39]. Executar o ensaio de flexão em quatro pontos também apresenta a vantagem de os esforços de corte associados ao carregamento serem nulos entre os dois pontos de carregamento [1]. As dimensões dos provetes, assim como a distância entre os pontos de carregamento e a distância entre amarras, encontram-se normalizada pela norma ASTM D6272 [69] e deve ser seguida de modo a contribuir para a veracidade dos resultados. As vantagens deste ensaio não são consideradas significativas e, deste modo, o ensaio de flexão em três pontos é o mais utilizado [1].



Figura 42- Realização de ensaio de flexão em 4 pontos [70]

2.2.3. Ensaios de fratura

Uma das maiores preocupações aquando do fabrico ou o uso de laminados compósitos é a delaminação [1]. O fenómeno de delaminação consiste na separação entre lâminas ou camadas adjacentes por ação da solicitação aplicada. Quando ocorre delaminação, ou seja, a separação de camadas e consequente quebra da ligação, existe libertação de energia que é o parâmetro de estudo mais importante associado aos ensaios de fratura em compósitos laminados. Apenas serão abordados os modos de fratura no plano e respetiva combinação. Deste modo, os ensaios de fratura podem subdividir-se em três tipos, ilustrados na Figura 43: Modo I, Modo II e Modo misto I+II. Resumidamente, os três ensaios diferem entre si no modo de solicitação dos provetes. Nos ensaios em Modo I, ambas as faces exteriores são solicitadas à tração. Em modo II o provete é solicitado ao corte. Em modo misto existe a combinação dos dois esforços anteriores.

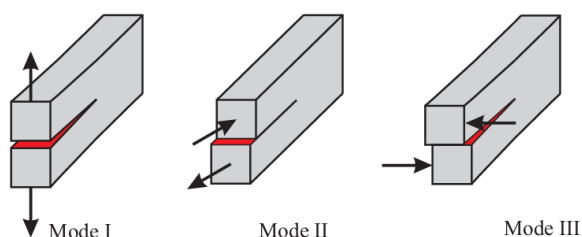


Figura 43- Modos fundamentais de propagação de fratura [71]

Modo I

O teste mais utilizado para avaliar a resistência à fratura em Modo I denomina-se *Double Cantilever Beam* (DCB) e permite determinar a tenacidade à fratura através da medição da energia crítica de fratura em modo I (G_{Ic}) [72]. O ensaio de fratura em Modo I consiste em tracionar ambas as faces externas da amostra, provocando a abertura de uma fenda com direção normal à direção de carregamento. Neste ensaio, as forças externas aplicadas têm a mesma orientação e atuam em sentidos contrários, fazendo com que as duas faces se afastem uma da outra devido à existência de uma pré-fenda e respetiva propagação (Figura 44 e Figura 45). Com vista ao cálculo de G_{Ic} obtêm-se os dados necessários durante a realização do ensaio, assim como a carga aplicada, o deslocamento e o comprimento da fenda. As dimensões dos provetes de secção retangular também são determinantes. Deve ser definido o comprimento da fenda inicial de acordo com a normalização específica para este ensaio [39]. A norma mais utilizada para este ensaio é a ASTM D5528-13 [73].

O valor de G_{Ic} é determinado em função do comprimento da fenda e, deste modo, é possível descrever a curva de resistência do material (curva R). Esta curva caracteriza-se por apresentar um aumento do G_{Ic} com o comprimento da fenda até um patamar em que a curva estabiliza. A curva R deve-se à ligação de algumas fibras das duas partes que estão separadas pela fenda e é causada pela geometria particular do provete DCB [1].

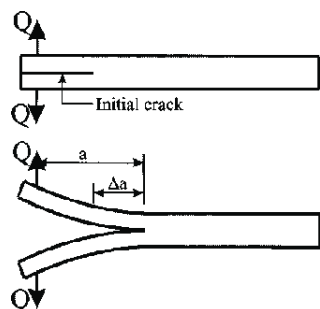


Figura 44 - Provette para ensaios DCB [74]

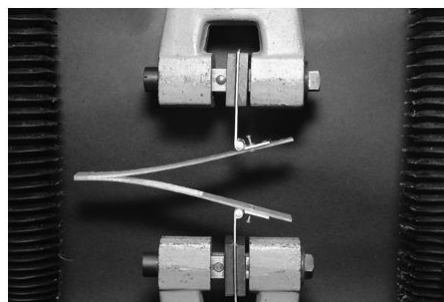


Figura 45 - Demonstração de ensaio DCB [75]

Modo II

O ensaio de fratura em modo II mais utilizado é designado por *End Notched Flexure* (ENF) e visa caracterizar a tenacidade à fratura interlaminar, através do cálculo de G_{IIc} [72]. Este tipo de ensaio assemelha-se a um ensaio de flexão a três pontos em que é aplicada uma carga a meio vão e o provete é apoiado nas duas pontas (Figura 46). A fratura tem início na extremidade em que é realizada a pré-fenda e os resultados do deslocamento em função da carga são gerados para análise. O gráfico gerado de carga-deslocamento permite verificar quais são os pontos de início de não-linearidade e o correspondente início de fratura [39]. Existem algumas reservas acerca do ensaio ENF, dado que a iniciação da fenda se pode dar de forma instável, dependendo do material, caso em que não é possível obter a curva R. Desse modo, foram propostos mais dois ensaios que visam corrigir as limitações do ensaio ENF, sendo estes os ensaios *End Loaded Split* (ELS) e *4- Point End Notched Flexure* (4ENF) [1].

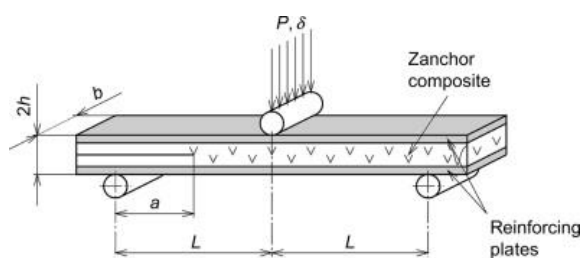


Figura 46 - Esquema de ensaio ENF [76]

Modo misto (I + II)

Os ensaios de fratura em modo misto são baseados numa mistura entre os ensaios em modo I e os ensaios em modo II. Vários testes encontram-se validados na literatura mas um dos testes mais utilizados para realizar este tipo de ensaio designa-se por *Mixed-Mode Bending* (MMB) [72], cujo dispositivo de ensaio se apresenta na Figura 44. Considera-se que este ensaio é a combinação entre os ensaios DCB e ENF. O ensaio MMB foi proposto por Reeder e Crews [77] e posteriormente os mesmos realizaram alterações ao ensaio, tendo em conta as propriedades elásticas do material, em que foram sugeridas correções para a rotação e para o deslocamento na ponta da fenda [1].

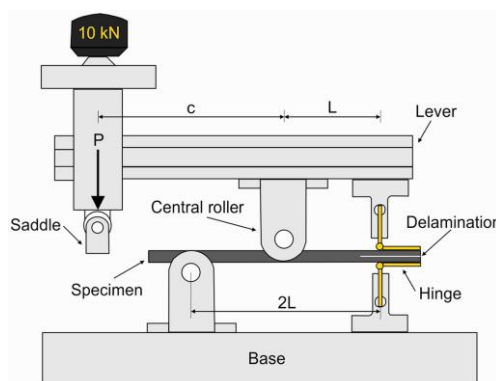


Figura 44- Provete e dispositivo de ensaio para ensaios MMB [78]

2.2.4. Estado-da-arte

O fabrico de materiais compósitos é um processo por vezes complexo, para o qual é necessário realizar vários procedimentos intermédios para obter o produto final. No decorrer dos procedimentos podem ser gerados vários tipos de defeitos, levando ao mau desempenho do compósito nas futuras aplicações. Para minimizar a falha de estruturas ou componentes fabricados em compósitos, é necessário realizar uma avaliação dos materiais que constituem os mesmos. A deteção de defeitos e a avaliação dos mesmos são extremamente importantes para a segurança das estruturas ou dos componentes. Contudo, o facto de os compósitos serem geralmente materiais heterogéneos e anisotrópicos torna complicada a deteção de defeitos e dos locais da estrutura compósita mais suscetíveis a gerar danos [78]. Os testes não destrutivos como os ensaios de densidade, fração volúmica de fibras, conteúdo de vazios ou humidade são essenciais para verificar a qualidade dos materiais aplicados e se o processo de produção dos

materiais compósitos foi bem realizado. Assim, também os custos associados são menores, uma vez que é menos dispendioso reparar os defeitos ou imperfeições encontradas através deste tipo de ensaios do que os custos que podem surgir devido à falha do componente ou da estrutura. O desenvolvimento de novos ensaios não destrutivos é feito com vista à redução dos procedimentos necessários para a obtenção de resultados, ao aumento da velocidade dos ensaios e ainda a realização de ensaios sem existir a paragem das operações em que os materiais se encontram a ser utilizados [79]. A Tabela 2 apresenta o estado da arte de ensaios de caracterização de materiais compósitos.

Tabela 3 - Estado da arte de ensaios de caracterização de materiais compósitos

de Moura et al, [80]	O artigo baseia-se em estudos experimentais e numéricos do comportamento de compósitos de carbono e epóxi quando sujeitos a ensaios de fratura em modo I, modo II e modo misto I + II. Para tal, foram utilizados os ensaios DCB, ENF e SLB sob ação de carga de elevado número de ciclos. Neste estudo foram usados procedimentos baseados no comprimento da fenda equivalente e na avaliação da taxa de libertação de energia de deformação durante os ensaios. Para cada modo de carregamento foram utilizadas as médias dos resultados obtidos experimentalmente, com vista a formular as leis de Paris modificadas. Estas leis experimentais foram utilizadas como um input num modelo de dano em modo misto I + II, apropriado para análises de fadiga com elevado número de ciclos. Verificou-se uma ótima concordância na zona de validação da lei de Paris modificada entre os resultados numérico e os experimentais para os três modos de ensaios de fratura. Este resultado valida o modelo como uma ferramenta apropriada para prever o comportamento de junta adesivas quando sujeitas à fratura.
Keerthi vasan et al, [81]	O objetivo deste estudo é a redução de peso da mola da lâmina de um sistema de suspensão usada em automóveis. O peso da mola é considerado elevado e afeta o desempenho do sistema de suspensão. Deste modo, o estudo visa a substituição do material metálico da mola por compósitos como fibra de vidro, fibra de carbono, fibras aramídicas e resina epóxi. Todas as amostras foram obtidas a partir de um processo de moldação manual e sujeitas a ensaios de tração, flexão e impacto. Os resultados dos ensaios com os diferentes materiais compósitos foram comparados com o material metálico original. Com base nos testes, verificou-se que a mola de lâmina de cada material compósito isoladamente proporciona melhor desempenho do que a mola de lâmina de aço comum. Consequentemente, eficiência do sistema de suspensão aumenta. Contudo, quando os diferentes tipos de fibra são combinados, essas fibras podem perder a resistência e tornar a mola compósita menos resistente do que a mola de aço comum. Verificou-se que o processo de moldação manual influencia a resistência da mola fabricada, uma vez que neste processo existe inclusão de moléculas de ar. As molas compósitas têm maior capacidade de absorção de impacto e consecutivamente melhor amortecimento e efeito de suspensão.

Tabela 2 - Estado da arte de ensaios de caracterização de materiais compósitos (continuação)

Nunes et al, [82]	O objetivo deste artigo consiste no estudo da resistência à flexão de discos compósitos de matriz polimérica anisotrópica através da realização de ensaios não destrutivos de flexão em três pontos. Através dos resultados dos ensaios, é possível perceber que o comportamento dos compósitos à flexão depende de fatores como a orientação das fibras, modo de empilhamento dos laminados, rugosidade da superfície e temperatura de moldação. Os resultados experimentais foram comparados com o <i>software</i> de elementos finitos <i>Algor</i> . Esta comparação demonstrou uma diferença até 13% entre os dois métodos de previsão da resistência dos compósitos à flexão. Através deste estudo, concluiu-se que o ensaio não destrutivo de flexão em três pontos é um ensaio válido e torna-se uma ferramenta útil para prever o comportamento de compósitos anisotrópicos e para validar os resultados obtidos a partir da análise de MEF.
Abdalla et al, [83]	O artigo visa a realização de ensaios para obter as propriedades físicas de materiais compósitos. Para tal, foram cortadas amostras de tubos feitos de compósitos, as quais foram testadas sob pressão interna. Neste estudo, foram realizados vários ensaios de acordo com a norma ASTM D2584 adequada para compósitos reforçados com fibra de vidro e foram também feitos testes de densidade para compósitos reforçados com fibra de carbono. Foram testadas e analisadas quatro amostras com vista à determinação da fração volúmica de fibras. O material que constitui as amostras é obtido a partir de um processo de queima através do método de perda por ignição, respeitando a norma ASTM D2548-68. Neste método, o compósito é colocado num forno e a resina é completamente removida, restando apenas o reforço do material. Neste estudo, o resultado da fração volúmica de fibras mostra que os volumes de fibras variaram entre 46,7% e 48,3%. O valor médio da fração volúmica de fibra de vidro das amostras estudadas foi de 47,6%.

2.3. Reciclagem e reutilização de materiais compósitos

O presente capítulo destina-se à contextualização de um tema que tem tido um papel cada vez mais importante na área dos materiais compósitos, visando esclarecer algumas questões como a viabilidade da reciclagem e da reutilização dos compósitos, tendo em conta os métodos existentes para os dois processos e as limitações inerentes aos materiais.

2.3.1. Contextualização e interesse

A reciclagem de materiais utilizados em aplicações de engenharia tem um grande papel no desenvolvimento sustentável dos processos industriais. Os materiais mais comuns de serem reciclados são os metais, vidros e plásticos. Contudo, existe uma maior dificuldade nos processos de reciclagem dos reforços e das matrizes dos materiais compósitos de engenharia, devido às diferentes propriedades destes, assim como a temperaturas de transição vítrea,

resistência mecânica, entre outras [84]. Os materiais compósitos, nomeadamente os materiais reforçados com fibras, têm sido cada vez mais utilizados para aplicações de engenharia ao longo das últimas décadas em vários setores como a construção, indústria automóvel, indústria aeronáutica, energias renováveis, entre outros [85]. Dentro da categoria dos materiais compósitos reforçados com fibras podem destacar-se alguns reforços como a fibra de carbono, a fibra de aramida e a fibra de vidro, esta última com maior aplicabilidade na indústria, dadas as suas propriedades e versatilidade aliadas ao valor económico mais acessível. O aumento da produção de materiais compósitos reforçados com fibras e a sua utilização têm aumentado. Consequentemente, aumenta também a necessidade de procurar soluções para quando certos componentes em fim de vida deixam de ter utilidade. Como se pode observar na Figura 45, a reciclagem de compósitos reforçados com fibras de carbono entre 2009 e 2020 aumentou imenso a nível mundial. A partir de 2020, de acordo com o mesmo estudo, previu-se que nos anos seguintes o aumento da reciclagem destes compósitos aumentasse e que, por volta de 2035 tendesse a estabilizar. Ainda assim, nem todos os materiais apresentam características que tornem simples aplicar processos de reciclagem, como se observa no caso dos materiais compósitos. Os materiais compósitos reciclados não têm as mesmas propriedades dos compósitos originais, logo a sua utilização será condicionada pela menor qualidade destes, falta de mercados dispostos a consumir os compósitos reciclados e elevado custo de reciclagem [84].

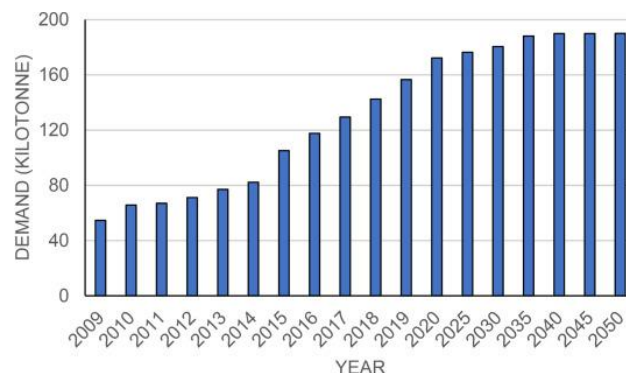


Figura 45 - Quantidade de compósitos reforçados com fibra de carbono reciclados e previsão futura dos mesmos, dados de 2020 [86]

Os materiais compósitos são normalmente depositados em aterros e, uma vez que são constituídos por plásticos, não são considerados biodegradáveis, ou seja, não se decompõem naturalmente num curto espaço de tempo sem poluir o meio ambiente. Contudo, os aterros são locais de grande concentração de poluição e foram gradualmente implementadas leis, como a *Waste Framework Directive 2008/98/EC*, para que se evite a deposição de plásticos e compósitos em aterros e que se reciclem os mesmos. Deste modo, a União Europeia já tomou decisões para que os processos de decomposição de compósitos mais comuns como o depósito em aterros e a incineração deixem de ser uma opção para o fim de vida dos materiais compósitos [1]. Algumas das medidas adotadas passaram por aumentar os impostos sobre os aterros e impor limitações nas quantidades de material abrigadas pelos aterros, obrigando a que se opte por processos de reciclagem e reutilização [85]. Com a implementação de cada vez mais medidas, as empresas de produção e venda de materiais compósitos podem perder algum do terreno que conquistaram ao setor dos materiais metálicos ou outras indústrias uma vez

que, para poderem produzir, também têm de garantir que são capazes de realizar a reciclagem e reutilização de materiais que deixam de ser viáveis utilizar [85]. Atualmente, existe uma grande preocupação com a sustentabilidade do planeta e na preservação de recursos naturais. Para tal, é imprescindível baixar os níveis de poluição ambiental e implementar políticas de reciclagem e reutilização de materiais.

No âmbito da reciclagem de compósitos, adquire especial relevância a temática das energias renováveis. A energia eólica é uma fonte de energia renovável e que tem um papel fundamental para o desenvolvimento sustentável do planeta. Esta é uma fonte de energia limpa e inesgotável e é gerada através de turbinas eólicas (Figura 46). De modo a acompanhar a crescente utilização de turbinas eólicas, o fabrico dos materiais utilizados nestes equipamentos não pode sofrer quebras. As enormes pás eólicas que casualmente são vistas em rotação nas turbinas eólicas são geralmente fabricadas a partir de compósitos de resina epóxida reforçada com fibra de vidro. Durante o fabrico das pás eólicas, cerca de 10% dos materiais tornam-se resíduos provenientes do corte do material [84]. As pás eólicas apresentam uma vida útil estimada entre 20 e 25 anos. Uma vez que a indústria de produção de pás eólicas depende fortemente de materiais compósitos de matriz termoendurecível, existe uma grande preocupação em melhorar as técnicas de reciclagem destes materiais. Anteriormente, após as pás eólicas atingirem o seu fim de vida, estas eram encaminhadas para aterros sanitários para serem decompostas sem qualquer aproveitamento do material (Figura 47). Contudo, dado o valor económico das fibras de vidro que constituem as pás eólicas, surgiu a necessidade de estudar a possibilidade de dar uma nova vida a estes materiais através de processos de reciclagem [87].



Figura 46 - Geração de energia eólica [88]



Figura 47 - Pás eólicas em aterro sanitário [89]

2.3.2. Reforços e matrizes

Dependendo do tipo de matriz dos compósitos, termoplástica ou termoendurecível, existe uma maior ou menor facilidade em utilizar processos de reciclagem para os compósitos. Embora a utilização de compósitos termoendurecíveis em aplicações de engenharia tenha clara preponderância, os compósitos termoplásticos têm como vantagens a resistência a ataques químicos, ciclo de processamento mais curto e melhor reciclabilidade [84]. Os compósitos de matriz termoplástica apresentam maior facilidade em serem reciclados através de simples processos de refundição/aquecimento e nova moldação, sendo posteriormente possível obter novos componentes. Já os compósitos de matriz termoendurecível acarretam problemas adicionais para efetuar a reciclagem, dadas as suas propriedades.

Nos materiais poliméricos reforçados com fibra de carbono, importa destacar a enorme evolução e a crescente utilização que este tipo de compósito sofreu. Devido às suas excelentes propriedades mecânicas, as fibras de carbono são utilizadas na indústria aeronáutica, aeroespacial, automóvel, entre outras com enorme relevância. As fibras de carbono têm vindo a substituir materiais metálicos uma vez que conferem garantia de resistência mecânica e ainda um baixo peso, levando a uma maior eficiência na poupança de energia (combustível, por exemplo), assim como redução de emissões poluentes. Não é necessária muita manutenção deste compósito dada a boa resistência à fadiga e à corrosão. As fibras de carbono são apelativas a nível económico e a sua reutilização é um assunto de grande interesse. Estas fibras podem ser reutilizadas em aplicações de engenharia, preferencialmente em componentes ou estruturas leves e caracterizam-se por apresentarem elevada rigidez e resistência e baixa densidade [90]. Contudo, com o aumento da utilização das fibras de carbono, também surgiu a necessidade de desenvolver técnicas de manutenção preventivas e corretivas para evitar o desperdício destes materiais. À semelhança do que já foi referido anteriormente, as resinas termoendurecíveis são um entrave na reciclagem dos compósitos visto que, depois de processadas, a reação química não é reversível, o que inviabiliza a sua reutilização. As matrizes termoendurecíveis são eficazes na resistência à separação da matriz e do reforço e à deformação física dos componentes compósitos. Nos compósitos reforçados com fibras de carbono pode-se dividir o processo de reciclagem em duas etapas principais, que correspondem à separação do material ou componente que se pretende reciclar dos componentes agregados ao mesmo e, posteriormente, uma etapa que envolve o processo de reciclagem que melhor se adequa para recuperar as fibras com vista a dar-lhes uma nova aplicabilidade. Na Figura 48 é resumido o processo de reciclagem de componentes de aviação de fibra de carbono, em que os resíduos dos componentes já utilizados passam pelo processo de reciclagem térmico de leito fluidizado e, posteriormente, dão origem a um compósito pronto a ser reutilizado.

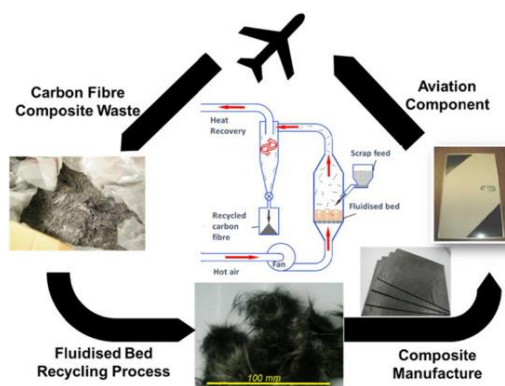


Figura 48 - Processo de reciclagem e reutilização de fibras de carbono na indústria aeronáutica [91]

Em relação aos métodos de reciclagem dos compósitos reforçados com fibras de carbono, destacam-se os três principais tipos de métodos utilizados que são: mecânicos, térmicos e químicos [92]. O primeiro consiste na divisão do material em várias partículas de pequenas dimensões, sem que exista a separação da matriz do reforço e por isso as partículas resultantes são normalmente usadas como cargas em outras aplicações assim como em SMC's e BMC's. Já no segundo tipo de processo de reciclagem, no processo térmico, é possível realizar a separação da matriz e do reforço através da aplicação de calor. A nível económico traz uma maior

vantagem visto que permite a reutilização das fibras de carbono isoladas. Dentro deste tipo de ensaio destacam-se os processos de reciclagem por pirólise, por conversão catalítica e também por utilização de líquidos críticos para separação da matriz e do reforço [92]. Por último, os processos químicos necessitam de mais atenção devido à utilização de produtos químicos que, se não forem neutralizados ou o seu armazenamento não for bem controlado, podem ter um grande impacto ambiental. Porém, neste tipo de processos é possível separar a matriz do reforço e aproveitar as fibras de reforço para outras aplicações sem perda das suas propriedades. No que diz respeito ao material correspondente à matriz (resina), alguns processos químicos fazem a decomposição da resina, enquanto outros processos visam ainda o aproveitamento da mesma. A separação entre as fibras e a matriz corresponde à primeira etapa da maioria dos processos de reciclagem. Tal como foi referido anteriormente, dos três tipos de processos de reciclagem existentes que podem ser mecânicos, térmicos ou químicos, apenas em dois deles, os processos químicos e térmicos, é realizada a extração das fibras da matriz. Já nos processos mecânicos, o material é transformado em pequenas partículas sem existir a separação do reforço (fibras) e da matriz.

A fibra de vidro é um material com grande interesse em aplicações de engenharia. Após ser atingido o tempo de vida útil de componentes em fibra de vidro, existem três caminhos possíveis para a mesma: aterro, incineração e reciclagem [93]. A prática mais comum é a incineração dos componentes. O calor do processo é aproveitado para gerar eletricidade e para alimentar sistemas de aquecimento. Os resíduos provenientes da incineração, as cinzas, são poluentes, pelo que devem ser subterradas ou aproveitadas para uso em construção civil. Contudo, estima-se que o fim do uso da incineração esteja próximo, uma vez que a energia gerada por este processo não justifica a poluição provocada pelo mesmo [84]. O caminho mais desejável para os componentes em fibra de vidro é a reciclagem. A tecnologia mais adequada para o reaproveitamento destes compósitos é a reciclagem mecânica, na qual é feita a trituração das fibras. Contudo, as partículas resultantes do processo apenas são utilizadas para aplicações de exigência inferior à da aplicação original, visto que as fibras recuperadas são difíceis de ligar com a nova resina. Outro problema associado ao processo de reciclagem mecânico é o consumo elevado de energia, que se pode tornar uma razão para utilizar este processo com menor frequência [93]. A pirólise é o método mais viável para a reciclagem dos compósitos reforçados com fibra de vidro, apesar de este provocar a degradação das propriedades mecânicas originais das fibras. A dificuldade da reciclagem de resinas termoendurecíveis, como a epóxida, induz a necessidade de substituir os materiais atualmente utilizados por outros com maior facilidade de reciclagem como, por exemplo, resinas termoplásticas.

De acordo com uma notícia da conhecida estação televisiva *Euronews* [94], investigadores italianos conceberam um protótipo que visa realizar a trituração de materiais compósitos que faziam parte de turbinas eólicas. Esta pesquisa faz parte do projeto europeu *Fibereuse*, que tem como objetivo aumentar a reciclagem de materiais compósitos na União Europeia (EU). A engenheira ambiental do Instituto Italiano de Investigação científica refere que “*o equipamento foi concebido de modo a ser o mais eficiente possível e com vista a reduzir o consumo de energia e da carga que é necessário aplicar nos diferentes processos mecânicos.*” A fábrica italiana

Rivierasca é uma das parceiras do projeto europeu *Fibereuse* e utiliza as fibras recicladas para fazer materiais de construção, com o intuito de criar uma economia circular. Como seria esperado, a fibra de vidro reciclada é ligeiramente menos resistente do que a fibra de vidro produzida de origem. Contudo, esta empresa desenvolveu uma tecnologia que pretende contornar esse problema através da adição de novas fibras de vidro ao processo de fabrico, permitindo compensar uma eventual falta de resistência das fibras de vidro recicladas [95].

2.3.3. Métodos de separação fibra/matriz

Os processos de reciclagem mais tradicionais consistem na queima dos materiais com a libertação de produtos nocivos para o ambiente. Nestes processos, acabam por ser desperdiçados materiais com grande interesse e valor económico como as fibras de vidro, fibras de carbono e resina epóxida. Deste modo, surgiu a necessidade de recorrer a processos mais avançados para a reciclagem de compósitos, assim como a pirólise, trituração, termoformação, incineração e dissolução por ácidos.

Pirólise (*thermal degradation*)

O processo de pirólise consiste na degradação do material em temperaturas elevadas e com a ausência de oxigénio (Figura 49). Devido às condições de temperatura envolvidas no processo, existe alguma probabilidade de as fibras poderem sofrer uma diminuição do seu desempenho mecânico, mesmo que não se atinjam temperaturas tão altas como no caso de queima. Normalmente, considera-se a perda de propriedades insignificante e admite-se que as fibras continuam com a mesma resistência inicial [96]. Deste modo, as fibras podem ser reutilizadas como reforços ou cargas em outras aplicações [1]. Tanto no processo de pirólise como na combustão, a matriz polimérica é perdida e existe o aproveitamento do óleo que é recuperado do processo de modo que este seja um fornecedor de energia.



Figura 49- Processo de pirólise e oxidação de compósitos reforçados com fibra de carbono e matriz de resina epóxi [97]

Trituração (*mechanical grinding*)

A trituração de materiais compósitos tem como objetivo reduzir os componentes em partículas de pequenas dimensões (Figura 50). Após o processo existe uma grande quebra na resistência mecânica das fibras assim como diminuição do módulo e da tenacidade das mesmas, pelo que

os triturados apenas são usados como cargas noutras aplicações [1]. A nível económico as fibras também perdem muito do seu valor devido à degradação após a trituração. Como alternativa, é possível optar por um processo de laminagem em vez de trituração completa para que estas fibras possam ter mais eficácia nas futuras aplicações e tenham maior valor económico [96].



Figura 50- Fibra de carbono após trituração [98]

Termoformação

É um processo simples que consiste no aquecimento dos componentes compósitos que se pretendem reciclar até temperaturas tão elevadas que permitam ultrapassar a temperatura de transição vítrea das matrizes dos mesmos. Posteriormente, o material resultante do processo de aquecimento é colocado num molde aquecido, e após um processo de arrefecimento, obtém-se um novo componente com o formato do molde utilizado (Figura 51).



Figura 51- Termoformação de painéis de compósito [99]

Incineração

Este processo baseia-se na queima dos materiais compósitos, obtendo apenas materiais orgânicos que não são biodegradáveis e gases que são posteriormente tratados de modo a evitar a emissão destes diretamente para o meio ambiente. A componente de reciclagem só se aplica a este processo devido ao facto que a energia obtida da incineração seja aproveitada para outros fins. Este processo é ilustrado na Figura 52, e observa-se que, após o processo de divisão dos compósitos em componentes de menores dimensões, é realizada a combustão, processo no qual se dá a queima dos materiais. O calor provocado pelo processo de combustão é aproveitado para a geração de energia, através de uma central implementada no circuito.

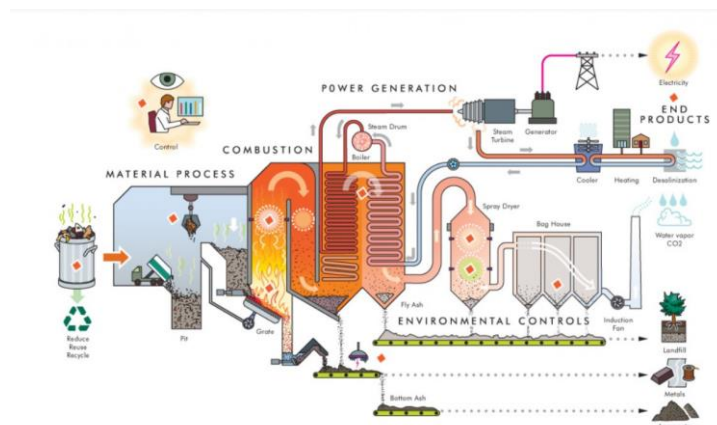


Figura 52- Geração de energia através da inceneração de compósitos [100]

Dissolução por ácidos

Este processo baseia-se na utilização de produtos químicos de forma a dissolver os polímeros através da quebra das ligações químicas estabelecidas entre as suas moléculas. Alguns processos de dissolução exigem ainda condições de elevadas temperaturas e pressões, o que acarreta elevados gastos em energia, e pode inclusivamente levar à degradação das fibras que constituem o compósito. Já o aproveitamento de materiais compósitos com matriz termoplástica é feito a baixas temperaturas levando à recuperação das fibras sem degradação das mesmas. Apesar de ser considerado um processo de reciclagem, este é prejudicial no ponto de vista ambiental uma vez que utiliza produtos nocivos para a separação dos constituintes dos materiais compósitos.

A utilização de fibras de carbono na indústria automóvel tem sido uma tendência nos últimos anos dada a leveza do material comparativamente aos materiais anteriormente utilizados para o fabrico de peças ou componentes dos veículos, conferindo um aumento da performance, principalmente em carros desportivos. Deste modo, a reciclagem das fibras utilizadas em automóveis também tem aumentado, conferindo vantagens a nível financeiro e na gestão ambiental. Uma das marcas mais carismáticas que se destaca nesta área é a *Lamborghini*. Nas instalações da *Lamborghini*, os componentes em fibra de carbono são reciclados e a extração das fibras da matriz resulta de um processo mecânico seguido de um processo químico. Para facilitar o manuseamento e o processamento destes compósitos, os componentes são cortados em partículas de baixas dimensões e posteriormente são encaminhadas para um recipiente de vidro resistente a produtos ácidos a elevadas temperaturas. Através de um processo de dissolução com a utilização de ácido sulfúrico, a solução é aquecida num queimador até uma temperatura a rondar os 110 °C. Assim que a solução começar a ferver, adiciona-se peróxido de hidrogénio que funciona como um acelerador da reação e é responsável por oxidar a matriz, levando à separação das fibras e da matriz. É necessário realizar este processo em ambientes controlados de forma a remover os gases nocivos resultantes do processo e durante o mesmo é obrigatória a agitação mecânica da solução para que a separação ocorra. Por fim, retira-se o recipiente do queimador para que este arrefeça e durante esta etapa de arrefecimento, a solução é separada do reforço com a ajuda de filtros [92].

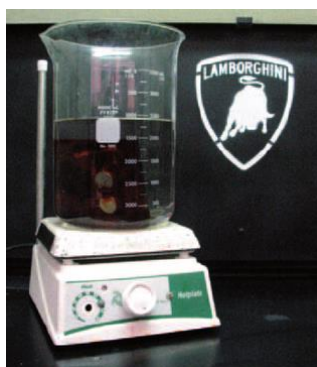


Figura 53 - Separação de fibras da resina através de dissolução por ácidos [92].

2.3.4. Reutilização e tratamentos necessários

Após o processo de reciclagem surge uma nova etapa na vida dos materiais compósitos que é a sua reutilização, ou seja, a aplicação dos mesmos em outras aplicações, não necessariamente iguais às aplicações em que eram anteriormente utilizadas. Portanto, admite-se que o principal objetivo da reciclagem é a reutilização [87]. Tal como acontece na escolha do processo de reciclagem, também na fase de reutilização deve dar-se especial atenção às propriedades dos materiais que se pretendem voltar a utilizar e ainda realizar um estudo de viabilidade dos materiais reciclados para verificar se, após a reciclagem, estes materiais são adequados para as novas aplicações pretendidas. Podem destacar-se os processos de reciclagem mais requeridos, sendo que, como foi referido anteriormente, estes podem dividir-se em mecânicos, térmicos e químicos. Na Tabela 4 pretende-se exemplificar as reutilizações mais comuns em função do processo de reciclagem utilizado para todo os tipos de fibras.

Tabela 4 - Tipos de processos de reciclagem, adaptado de [87]

Método de reciclagem	Processo utilizado	Reutilização e aplicação
Mecânico	Trituração	Reforço na forma de cargas em compósitos
		Reforço de estruturas cimentadas/ de betão na forma de partículas
Térmico	Pirólise	Combustível orgânico líquido
		Óleo ou gás pirolítico
		Compósitos reforçados com fibras curtas recicladas
	Leito/Cama fluidizado	BMC (<i>Bulk Moulding Compound</i>)
		Materiais com soldaduras eletromagnéticas
		Compósitos de elevado módulo
Químico	Pirólise com a utilização de micro-ondas	Compósitos reforçados com fibras curtas
	Fluídos supercríticos	Compósitos reforçados com fibras curtas
	Solvólise	Combustível (gás)

2.3.5. Estudo de viabilidade

Tendo em conta o aumento da utilização de materiais compósitos nas mais variadas aplicações, a produção destes materiais tem de acompanhar o mercado. Assim, uma forma de contribuir para que não haja escassez dos compósitos mais utilizados, como os reforçados com fibra de vidro e com fibra de carbono, estes devem ser reciclados e reutilizados, aumentando a vida útil dos mesmos sem ser necessário produzir, a partir do zero, tantas quantidades de material. Trata-se de uma questão de gestão de recursos assim como de preservação do ambiente. Contudo, existem várias limitações que condicionam os processos de reciclagem e reutilização de materiais compósitos [101], assim como:

- Estes são constituídos por dois ou mais materiais distintos, cujas propriedades dos próprios materiais isoladamente não são iguais, condicionando alguns processos;
- Estes materiais são utilizados em aplicações em conjunto com outros componentes e pode ser complicado fazer a separação e extração do compósito;
- As resinas termoendurecíveis apresentam limitações dado que não podem voltar a ser moldadas após o processo de cura terminar, devido às ligações intermoleculares que se estabelecem neste tipo de matriz;
- A libertação de elementos nocivos no processo de reciclagem pode ser problemática, assim como o armazenamento e o destino final dos resíduos resultantes dos processos;
- Os custos associados podem não ser vantajosos quando se pretende reciclar um componente compósito;
- A falta de pessoal especializado também pode ser uma limitação no desenvolvimento e na inovação desta área.

Os problemas existentes na reciclagem e reutilização dos materiais compósitos devem ser diferenciados em dois grupos: materiais compósitos existentes e materiais compósitos a desenvolver futuramente com maior afinidade para serem reciclados. Os materiais compósitos existentes obrigam ao estudo de novos processos de reciclagem. As tecnologias de reciclagem utilizadas devem ser eficientes, ter um baixo custo e não provocar uma degradação considerável dos materiais. Contudo, têm que ser tidos em consideração alguns aspetos quando se pretende realizar a reciclagem de compósitos já existentes [84]:

- Avaliar as tecnologias disponíveis para reciclar o material de reforço e a matriz;
- Comparar os custos de sucata de compósitos com os associados à reciclagem;
- Comparar a qualidade e as características dos compósitos reciclados com os originais;
- Ter em conta os regulamentos ambientais estipulados para a deposição de compósitos em aterros sanitários e as legislações associadas à inceneração dos compósitos;
- Os custos associados aos processos de reciclagem;
- Fazer uma avaliação do valor económico dos compósitos reciclados e do contributo para o desenvolvimento sustentável da empresa.

2.3.6. Estado-da-arte

A utilização dos materiais compósitos teve início há milhares de anos atrás. A sua evolução foi gradual ao longo dos anos, mas sofreu um grande crescimento nas últimas décadas devido à percepção das potencialidades de compósitos sintéticos para aplicações de elevada exigência. Desde 1932 e até aos dias de hoje, os compósitos reforçados com fibras são aqueles que mais se destacam dadas as suas propriedades como a elevada resistência mecânica, baixo peso-específico, entre outras. Este tipo de fibras é habitualmente utilizado nas indústrias automóvel, aeroespacial, aeronáutica, civil, entre outras.

Com particular destaque à energia eólica e aos compósitos utilizados nesta indústria, a primeira turbina eólica surgiu na Escócia em 1887, para a produção de eletricidade. Porém, a utilização de materiais compósitos em turbinas eólicas apenas se verificou em 1975. Atualmente, qualquer turbina eólica é constituída por compósitos, normalmente resina epóxida reforçada com fibra de vidro. Segundo Hartman [102], a história dos compósitos pode ser dividida em cinco períodos temporais. Entre 1932 e 1946, deu-se a inicialização da indústria de materiais compósitos e utilização dos mesmos em aplicações simples. Posteriormente, entre 1947 e 1960, os compósitos começaram a ser utilizados com mais frequência em partes automóveis e de veículos aéreos, sendo produzidos por processos de pultrusão e pulverização. Mais tarde, entre 1961 e 1996, foi dada relevância ao facto de os compósitos serem resistentes à corrosão e, deste modo, este tipo de materiais surgiu com mais frequência em aplicações de compósitos em tanques, janelas e outras aplicações cujas condições do ambiente ou dos produtos em contacto com o material são desfavoráveis. Mais recentemente, entre 1997 e 2014, deu-se a fase de integração da tecnologia de compósitos híbridos produzidos através de técnicas de moldação. Estes têm maior aplicabilidade em aeronaves comerciais, peças automóveis estruturais e produtos eletrónicos. Atualmente, as investigações sobre materiais compósitos centram-se na reciclagem e reutilização dos mesmos, dando continuação à procura da diminuição do peso dos componentes ou estruturas compósitas e da diminuição de custos associados a este tipo de materiais. As principais soluções para os materiais compósitos em fim de ciclo de vida são a deposição em aterros, incineração e a reciclagem.

Os processos mais tradicionais como o aterro e a incineração têm vindo a ser abandonados devido à implementação de leis ambientais, uma vez que são processos que poluem o meio ambiente e prejudicam a saúde humana. Deste modo, as empresas ainda continuam à procura de processos de reciclagem que também sejam economicamente vantajosos para si mesmas. Contudo, a deposição em aterros continua a ser o destino final dos materiais compósitos. No futuro, espera-se que sejam desenvolvidas técnicas de reciclagem mais eficazes e com maior diversidade de processos para que seja possível adequar estes aos tipos de matrizes e reforços que se pretendem reciclar. A Tabela 5 apresenta o estado da arte de reciclagem e reutilização de materiais compósitos.

Tabela 5 - Estado da arte de reciclagem e reutilização de materiais compósitos

Pegoretti, [103]	Este artigo pretende fazer uma revisão sobre as tecnologias de reciclagem de compósitos termoplásticos reforçados com fibras contínuas. De acordo com a literatura existente, é possível perceber que nos últimos anos existiu uma intensa pesquisa e investigação sobre técnica de reciclagem de materiais compósitos com vista à circularidade da utilização de materiais. A maioria dos resíduos compósitos termoplástico reforçados com fibras contínuas advêm da própria produção dos mesmos. Concluiu-se que processos de reciclagem mecânica e química são os tipos e processos que permitem uma recuperação completa dos constituintes, fibra e matriz, ao longo da produção dos compósitos e no final de vida útil dos mesmos.
Mamanpush et al, [104]	Este trabalho investiga compósitos de segunda geração fabricados de materiais reciclados a partir de pás eólicas em fim de vida e um adesivo de poliuretano. O material reciclado foi primeiramente triturado até que os pedaços atingissem o tamanho pretendido. Posteriormente, é adicionada resina ao material triturado e procede-se a um processo de compressão de modo a compactar a matriz e o reforço e atribuir a espessura final. Neste artigo foi verificada a influência do tamanho das partículas, do teor de humidade e da quantidade de resina nas propriedades de compósitos reciclados. Para tal, estes fatores foram relacionados com a melhoria ou a degradação das propriedades mecânicas dos compósitos reciclados. Os autores concluem que a reciclagem das pás de turbinas eólicas é viável e é um processo promissor para o fabrico de compósitos de elevada performance.
Zhang et al, [86]	Este artigo apresenta uma revisão crítica das tecnologias de recuperação de fibras de carbono e/ou polímeros e de compósitos reforçados com fibras contínuas reciclados até ao ano 2020. Novas pesquisas no campo do desenvolvimento de termoplásticos biodegradáveis surgiram nos últimos anos e estão alinhadas com estratégias radicais de reciclagem para o futuro. Os autores destacam três métodos de reciclagem para compósitos termoplásticos que têm sido amplamente investigados e que se encontram disponíveis para uso comercial em operações industriais. Os três métodos são a reciclagem mecânica, térmica e química.
Ikenaga et al, [105]	O artigo pretende descrever um processo de reciclagem recente para a produção de compósitos reciclados a partir de compósitos reforçados com fibra de vidro. Os autores investigaram a decomposição de compósitos reforçados com fibra de vidro (GFRP) através de uma reação não catalítica utilizando éter monometílico de etilenoglicol (EGMA). O produto resultante da decomposição do GFRP com o EGMA (EGMA-P) apresenta uma elevada reatividade na ligação deste com poliéster insaturado (UP). Deste modo, o material endurecido (EGMA-HM), que apresenta elevada estabilidade térmica, foi preparado a partir de EGMA-P, poliéster insaturado e um agente responsável pela cura. No final do processo obtém-se GFRP reciclado com um elevado ponto de rutura por flexão.

Tabela 5 - Estado da arte de reciclagem e reutilização de materiais compósitos (continuação)

Cousins et al, [96]	Este estudo pretende determinar a viabilidade de reciclar componentes de pás eólicas feitas de um material compósito de resina termoplástica Elium reforçada com fibra de vidro. Foram realizados vários tipos de testes com o objetivo de obter propriedades relevantes para a reciclagem de compósitos. Deste modo, parâmetros como a degradação térmica, trituração e a dissolução da matriz para recuperar os materiais que constituem o compósito foram estudadas para perceber a influência de cada um nas características do material. O método de dissolução da matriz permite a recuperação da matriz polimérica e das fibras de vidro no seu comprimento total. A fibra de vidro mantém a rigidez e a resistência durante o processo de recuperação das mesmas.
Chen et al, [87]	Este artigo apresenta uma visão geral das principais tecnologias de reciclagem e de reutilização de compósitos reciclados. Na opinião dos autores, as tecnologias de reciclagem atuais precisam de ser mais desenvolvidas e são necessárias tecnologias mais baratas, menos poluentes e mais eficientes. Pretende-se que, futuramente, as tecnologias de reutilização de compósitos de alto desempenho sejam desenvolvidas de modo a aumentar o mercado de materiais compósitos reciclados. Relativamente ao material das pás de turbinas eólicas, devem ser criados materiais que sejam amigos do ambiente, utilizando fibras naturais, resina termoendurecível modificada e resina termoplástica reciclável, tornando a energia eólica uma fonte de energia verdadeiramente limpa.

3. Desenvolvimento

No presente capítulo pretende-se dar início ao conteúdo experimental da dissertação. Deste modo, este capítulo foca-se na escolha e caracterização dos materiais utilizados, no desenvolvimento dos ensaios experimentais de tração, corte e fratura em modo I e II. Para tal, é realizada a descrição dos processos de produção dos provetes, tendo em conta o tipo de ensaios a realizar e as normas associadas aos mesmos e são apresentados e discutidos os resultados obtidos.

3.1. Objetivos do desenvolvimento

O principal objetivo da parte experimental da presente dissertação consiste na comparação entre compósitos virgens e compósitos produzidos com reforço reciclado, através da realização de ensaios de tração, corte e ensaios de fratura em modo I e modo II (provetes DCB e ENF, respetivamente). Com isto, pretende-se averiguar a possibilidade de substituição dos materiais novos por materiais que são desperdiçados na produção de compósitos e de materiais de componentes em fim de vida.

3.2. Metodologia do trabalho experimental

O primeiro passo do desenvolvimento experimental deste estudo é a escolha dos materiais a serem utilizados para a produção dos compósitos. Deste modo, uma vez que o tema ao qual é dado um particular destaque na revisão bibliográfica da presente dissertação é a reciclagem e reutilização dos materiais utilizados na produção das pás de turbinas eólicas, recorreu-se a fibra de vidro e uma resina termoplástica para a produção das placas que dão origem aos provetes de ensaio. Posteriormente, depois de escolhidos e adquiridos os materiais necessários, recorreu-se às instalações e respetivos equipamentos do INEGI para realizar o processo de fabrico das placas compósitas por infusão a vácuo. De seguida, foi necessário cortar as placas e transformar estas em provetes nos laboratórios do ISEP. Nestas mesmas instalações foram realizados os ensaios de tração, corte e fratura em modo I e em modo II. Após a realização dos ensaios, foi feito o tratamento de dados através do *Excel* e foram tiradas conclusões sobre os mesmos.

3.3. Materiais utilizados

3.3.1. Seleção dos materiais e componentes a reutilizar

As pás eólicas são formadas por uma matriz termoplástica, sendo utilizadas principalmente as resinas epóxicas, poliésteres ou vinilésteres, e por um reforço de fibra de vidro ou fibra de carbono. A utilização de resinas termoplásticas no fabrico de pás eólicas é a única solução, tendo em vista a reciclagem das mesmas. Contudo, este tipo de resinas necessita de maiores cuidados no processo de cura, visto que este processo deve ser realizado a temperaturas relativamente elevadas. As altas temperaturas podem provocar alterações nas propriedades da resina e acarretam custos de produção. A elevada viscosidade das resinas termoplásticas é uma propriedade condicionante para a impregnação desta no reforço. Em relação ao reforço das pás eólicas, é dada preferência à fibra de vidro, apesar de ser utilizada fibra de carbono em escassas aplicações. A fibra de vidro do tipo E (*“electric glass”* ou *“E-glass”*) é a fibra mais utilizada para o fabrico de pás eólicas. Geralmente, a percentagem de fibra de vidro destes componentes é de cerca de 75% [106]. Em comparação com as fibras de vidro, as fibras de carbono apresentam uma rigidez superior e menor densidade, permitindo assim produzir pás mais finas, mais resistentes e mais leves. Apesar das vantagens apresentadas, a fibra de carbono tem um custo mais elevado do que a fibra de vidro do tipo E e menor resistência a esforços de compressão do que a fibra de vidro. A Siemens Gamesa, empresa com produção ativa em Portugal, utiliza fibra de carbono no fabrico das tampas estruturais das longarinas das suas pás eólicas. Esta empresa recorre a duas tecnologias diferentes para a produção de pás. A tecnologia mais utilizada consiste na produção de uma peça através moldação de uma mistura de fibra de vidro e resina epóxida, conducente à obtenção de uma única peça, e esta foi patenteada com a designação *“IntegralBlade”*. Neste processo, são utilizados dois moldes, um molde externo fixo e um molde interno em expansão, no qual a resina é injetada. Após a cura, obtém-se uma pá robusta e com um acabamento liso [107]. Os protótipos mais recentes da Siemens Gamesa são produzidos através de outra tecnologia. Estes apresentam uma estrutura reforçada com fibra de carbono, que tem como objetivo diminuir a massa dos componentes e minimizar as deflexões.

As turbinas eólicas são constituídas por três partes: a torre, o rotor e as pás. A torre é o elemento mais simples da estrutura e tem como função principal suportar e elevar toda a estrutura. Este componente tem uma configuração tubular oca, com escadas no seu interior para permitir o acesso à cabine onde se encontra o rotor para possíveis manutenções. O rotor é o elemento responsável pela transformação da energia do vento em energia mecânica através da transmissão de rotação de um veio. Os restantes componentes que funcionam em conjunto com o rotor encontram-se inseridos no interior de uma cabine localizada ao mesmo nível do rotor. Geralmente, as turbinas são constituídas por três pás eólicas e estes componentes são os que suscitam maior interesse relativamente aos materiais que os constituem. Deste modo, este subcapítulo irá focar-se nos materiais utilizados nas pás eólicas. As pás devem ser rígidas, resistentes e leves e ter um formato aerodinâmico, semelhante a uma asa de avião [108]. Os compósitos são os materiais prediletos para o fabrico das pás eólicas, enquanto os materiais metálicos são aqueles que habitualmente se utilizam na produção dos geradores e da torre [106]. As pás são constituídas por duas faces, uma no lado da sucção e outra no lado da pressão

e são unidas e reforçadas através de uma ou mais longarinas que servem de suporte e são resistentes a esforços de corte. Estas longarinas podem ser substituídas por um género de caixão formado por vigas de “formato em U” que ligam a parte superior e a parte inferior da pá. As pás estão sujeitas a cargas causadas pela ação do vento na aba superior e a cargas causadas pela ação da gravidade na aba inferior da mesma. Importa também destacar os esforços de flexão no sentido das abas a que as pás são sujeitas durante o seu funcionamento. Com o objetivo de anular ou minimizar a flexão das abas, são colocadas longarinas no interior das pás e almas internas. As bordas do perfil das pás são sujeitas a dobragem lateral e são unidas com recurso a adesivos estruturais. A constituição típica de uma pá eólica encontra-se ilustrada na Figura 54.

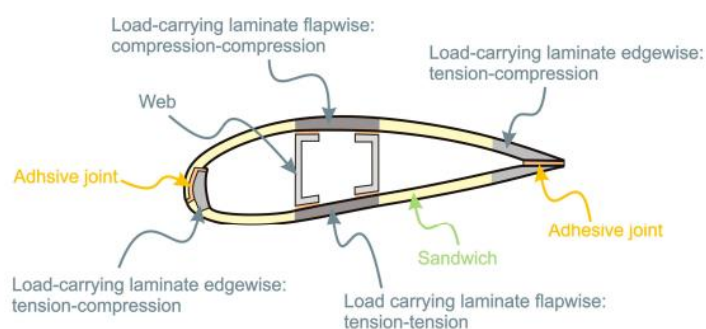


Figura 54- Seção reta e constituinte de uma pá eólica [106]

As primeiras pás eólicas foram produzidas a partir de processos em molde aberto, mais especificamente por moldação manual. Esta técnica, descrita na revisão bibliográfica, consiste na impregnação das fibras manualmente, com recurso a pincéis e rolos. Para a produção de pás de pequenas e médias dimensões, entre 35 m e 55 m de comprimento, o processo consiste na colagem da estrutura compósita da pá às longarinas e à alma das pás através de adesivos estruturais. O procedimento para a produção de pás eólicas de elevadas dimensões é idêntico, mas neste caso a alma é inserida e colada entre dois lados através de adesivos. Atualmente, a moldação manual foi substituída por outras técnicas, como por exemplo, enrolamento filamentar, uma vez que as técnicas de moldação com molde aberto produzem peças com pouca qualidade, são processos demorados, que acarretam elevados custos de mão de obra e libertam produtos perigosos para o meio ambiente. Mais tarde, foram introduzidas as tecnologias de moldação por vácuo e de *prepreg*. Atualmente, a moldação por injeção é a técnica de moldação mais utilizada para a produção de pás eólicas de grandes dimensões. Esta técnica consiste na injeção de resina sob pressão em moldes fechados, pelas cavidades dos moldes, nos quais são dispostas as fibras.

3.3.2. Propriedades dos materiais

No fabrico de pás eólicas, pretende utilizar-se materiais com boas propriedades de rigidez, densidade e resistência à fadiga. Com vista a um excelente desempenho das pás eólicas, é necessário que os materiais que constituem as mesmas tenham uma rigidez que permita manter uma excelente aerodinâmica, baixa densidade para reduzir as forças gravitacionais e

devem ter uma elevada resistência à fadiga para que a degradação dos materiais seja lenta e a substituição das pás seja realizada com o maior intervalo de tempo possível [108].

A fibra de vidro é o material utilizado em maior quantidade na produção de pás eólicas. As fibras de vidro constituem um material amorfo, com propriedades isotrópicas como a rigidez e a expansão térmica. Existem diversos tipos de fibra de vidro, sendo a fibra de vidro do tipo E a mais utilizada em pás eólicas. Este tipo de fibra apresenta baixo teor alcalino, excelente resistência, rigidez e ductilidade, boas propriedades de isolamento e ótima resistência ao calor e à humidade [109]. Consoante a composição química de cada tipo de fibra de vidro, as propriedades da mesma apresentam diferenças consideráveis. Estas fibras têm diâmetros compreendidos entre 10 e 20 μm e resultam de um processo de estiramento de vidro fundido através de fieiras. Após o estiramento, as fibras são revestidas com uma solução polimérica para proteção. Os tratamentos superficiais a que as fibras são sujeitas variam de acordo com a sua finalidade. As fibras de vidro destacam-se pela rigidez moderada, flexibilidade, baixo coeficiente de dilatação térmica, elevada resistência à corrosão e oxidação, bom acabamento superficial, elevada resistência à tração, compressão e impacto, e densidade moderada. Contudo, estas apresentam desvantagens como o baixo módulo de elasticidade, sensibilidade à abrasão e a temperaturas elevadas e baixa resistência à fadiga. As propriedades de vários tipos de fibra de vidro podem ser consultadas na Tabela 6.

Tabela 6- Propriedades de vários tipos de fibra de vidro (adaptado de [110])

Tipo de fibra de vidro	Dióxidos (SiO₂) (%)	Densidade (g/cm³)	Tensão (MPa)	Módulo (GPa)	Alongamento até à rotura (%)
Tipo A	63-72	2,44	3300	72	4,8
Tipo C	64-68	2,56	3300	69	4,8
Tipo D	72-75	2,11	2500	55	4,5
Tipo E	52-56	2,54	3448	72	4,7
Tipo R	56-60	2,52	4400	86	5,1
Tipo S	64-66	2,53	4600	89	5,2
Tipo ECR	54-62	2,72	3400	80	5,3

A matriz dos compósitos produzidos consiste numa resina epóxi com viscosidade extremamente baixa e adequada para o processo de infusão. A *SikaBiresin CR83* (Figura 55) é normalmente utilizada na produção de peças e moldes compósitos reforçados com fibras de elevado desempenho. Esta tem baixa tendência a cristalizar e possui boas propriedades térmicas até 80°C. Utilizando esta resina consegue-se uma rápida infusão e um bom preenchimento da resina nos tecidos e fibras devido à sua baixa viscosidade. Juntamente com esta resina utiliza-se um endurecedor. Neste caso, optou-se por utilizar o correspondente *SikaBiresin CH83-6* (Figura 56). O endurecedor é responsável pela transformação gradual da resina no estado líquido para resina no estado sólido. A mistura entre a resina e o endurecedor provoca o aquecimento da mistura e, por vezes, a libertação de gases em pequenas

quantidades. Relativamente às quantidades de cada componente, utilizou-se uma razão mássica de 100 para 30, ou seja, a cada 100 g de resina correspondem 30 g de endurecedor.

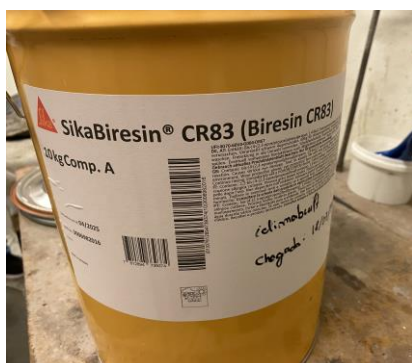


Figura 55- Resina SikaBiresin CR83



Figura 56- Endurecedor SikaBiresin CH83-6

3.3.3. Vantagens e desvantagens do uso dos materiais em pás eólicas

As madeiras e os compósitos são os materiais que melhor se adequam para produzir pás eólicas, de acordo com os critérios de exigência requeridos para esta aplicação. As madeiras são consideradas uma boa hipótese uma vez que possuem baixa densidade. Porém, a baixa rigidez compromete a sua utilização em pás eólicas de grandes dimensões devido às deflexões que surgem nestes componentes. Contudo, importa destacar a fraca reprodutibilidade e qualidade dos componentes obtidos com este material [108]. Por estas razões, os materiais compósitos são os prediletos na produção de pás eólicas.

Admite-se que a maior vantagem da utilização de matrizes termoplásticas na produção de pás eólicas é a sua reciclabilidade [106]. Outras vantagens das matrizes termoplásticas são o maior alongamento de rotura, a possibilidade de processamento automático e a vida útil ilimitada dos materiais. A tenacidade à fratura dos termoplásticos é superior à dos termoendurecíveis, enquanto o comportamento à fadiga dos termoplásticos não é tão eficaz como o dos termoendurecíveis. Por outro lado, as matrizes termoendurecíveis apresentam desvantagens como a necessidade de elevadas temperaturas, o que incrementa os custos associados ao processo de produção e influencia as propriedades das fibras de reforço. Devido à elevada viscosidade, as matrizes termoplásticas não são as mais apropriadas para fabricar pás eólicas de grandes comprimentos e elevadas espessuras.

Em comparação com as pás eólicas constituídas por materiais metálicos, as pás eólicas fabricadas com materiais compósitos apresentam várias vantagens [109]. A vantagem mais significativa da utilização de materiais compósitos em pás eólicas é o facto de as mesmas serem mais leves, para as mesmas dimensões, apresentarem maior resistência e rigidez. Para tal, as fibras devem ser orientadas de acordo com a direção principal da transmissão de esforços para tirar o maior proveito das propriedades mecânicas das mesmas. O processo de moldação torna-se simples para os materiais compósitos. O formato das pás é consideravelmente complexo e devem ser produzidas com rigor, de forma a maximizar a capacidade estrutural das mesmas. Para as pás eólicas metálicas de médias e grandes dimensões, o processo de produção é difícil de realizar e demorado. No entanto, o processo de moldação de pás eólicas compósitas pode

tornar-se simples, recorrendo a um molde que permita obter superfícies suaves e que detalhe os pormenores da pá. Outra vantagem que importa destacar é a possibilidade de produzir pás resistentes a vibrações provocadas pelo movimento das mesmas e por fatores externos. A resistência à corrosão e a condições climáticas adversas são fatores que também são cumpridos pelas pás eólicas fabricadas através de material compósito reforçado com fibras. Por último, importa referir que existe pouca probabilidade de ser necessário realizar manutenções a este tipo de pás e, quando necessário, estas são simples de realizar e na maioria das vezes consistem em pinturas uniformes na superfície externa.

3.4. Produção dos provetes de ensaio

3.4.1. Definição do tipo de ensaios a realizar

Com vista à caracterização dos vários provetes desenvolvidos, foram realizados quatro tipos de ensaios, sendo estes: ensaios de tração, ensaios de corte de *Block Shear Test Method* (BS), ensaios de fratura em modo I (DCB) e ensaios de fratura em modo II (ENF). Os ensaios de tração aplicam-se principalmente a compósitos unidirecionais nos quais as fibras se encontram orientadas a 0° e a 90°. Os principais objetivos deste ensaio são a obtenção do módulo de elasticidade longitudinal do compósito, assim como o coeficiente de Poisson e a tensão de cedência do mesmo. O ensaio ao corte BS visa obter o módulo de corte, G , do material em teste. Neste ensaio apenas é registada a força aplicada ao longo do tempo para que seja possível calcular a tensão de corte máxima e posteriormente o módulo de corte. O ensaio de fratura em modo I requer a utilização de provetes DCB e durante o mesmo são registados os valores de carga aplicada e do deslocamento. Neste ensaio, o principal objetivo foca-se na obtenção do G_{IC} . O ensaio de fratura em modo II exige a utilização de provetes ENF. Este teste tem como objetivo a caracterização da tenacidade à fratura de corte, através do cálculo do G_{IIC} .

3.4.2. Procedimentos para a reutilização do material triturado

O processo de reciclagem e posterior reutilização dos materiais constituintes das pás eólicas pode ser dividido em várias etapas [111]. A primeira etapa consiste na identificação dos materiais de que é feita a pá que se pretende reciclar. Posteriormente, de acordo com as propriedades dos materiais identificados, são criteriosamente selecionados os processos de reciclagem que melhor se adequam aos mesmos. Como referido anteriormente, os principais materiais utilizados no fabrico de pás eólicas são a fibra de vidro e a fibra de carbono e, deste modo, os processos mais viáveis para realizar o tratamento destes dividem-se em processos mecânicos, com particular destaque para a trituração, processos térmicos como a pirólise e a oxidação em leito fluidizado, e por fim processos químicos. A etapa seguinte centra-se na recuperação, preparação e planeamento dos produtos obtidos. De seguida, importa analisar o mercado destes materiais e efetuar uma estimativa de valor de acordo com o período temporal de venda dos materiais reciclados, de modo a verificar as oportunidades de negócio mais rentáveis. Por último, os materiais reciclados são incluídos no mercado e, de acordo com as propriedades dos mesmos, são utilizados para diversas aplicações de menor exigência do que

para os quais foram inicialmente desenvolvidos. A reciclagem mecânica é o método mais simples de reaproveitamento de material compósito triturado, com vista a utilizar os mesmos em aplicações secundárias [87]. Quando se trata de componentes de grandes dimensões, estes têm de ser divididos em volumes menores e esmagados para que posteriormente o processo de trituração seja facilitado. Existem dois processos distintos de reciclagem mecânica. A primeira técnica consiste em moer os resíduos até que estes assumam a forma de pequenas partículas ou pós. A outra técnica baseia-se na trituração dos resíduos para que os materiais reciclados obtidos sejam utilizados como cargas ou reforço para outros compósitos. Os materiais que constituem os provetes que se pretendem obter têm uma matriz termoplástica que, quando comparadas com matrizes termoendurecíveis, apresentam vantagens na reciclagem da matriz. Esta matriz trata-se de uma resina termoplástica e permite que os materiais que constituem as pás eólicas sejam mais facilmente reciclados, sendo utilizados processos como a dissolução, trituração e pirólise. O processo de dissolução da matriz reduz, teoricamente, a resistência à tração dos provetes em apenas 12% relativamente a provetes que são obtidos a partir dos mesmos materiais isolados e sujeitos a um processo de *roving* [111].

No âmbito da parte experimental da presente dissertação, optou-se por abordar a reutilização de compósitos desperdiçados durante o processo de fabrico de compósitos virgens e de compósitos triturados. Na Figura 57 apresenta-se a sequência de empilhamento para as placas 2, 3 e 4. A placa 1 consiste numa sobreposição simples de 12 camadas de fibra de vidro, totalizando 775,8 g de material (Figura 58). Uma das quatro placas produzidas, a placa 2, contém partículas cortadas aleatoriamente que advêm de sobras de fibra de vidro do processo de corte das camadas (Figura 59). A placa 3 contém quatro camadas de fibra de vidro, sendo que no meio destas são colocadas 600 g de partículas de PA reciclado de componentes automóveis obtido através de um duplo processo de trituração (Figura 60). A placa 4 é semelhante à placa 3 mas, em vez de PA reciclado, é utilizado PP reciclado obtido através do mesmo processo de trituração (Figura 61).

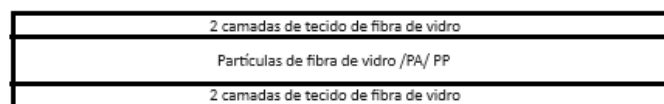


Figura 57- Sequência de empilhamento para as placas 2, 3 e 4



Figura 58- Camadas da placa 1 (apenas fibra de vidro)

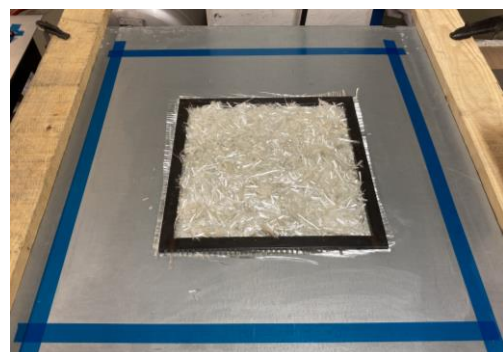


Figura 59- Deposição da fibra de vidro cortada aleatoriamente na placa 2



Figura 60- Deposição e nivelamento do PA na placa 3



Figura 61- PP disposto e nivelado na placa 4

No desenvolvimento da parte experimental da presente dissertação foi utilizada fibra de vidro como reforço do compósito. Para a produção das placas, o primeiro passo consiste no corte das camadas de fibra de vidro. Uma vez que se pretendia produzir placas quadradas com medidas $300 \times 300 \text{ mm}^2$ de área útil, optou-se por cortar as camadas de fibra de vidro com medidas de $350 \times 350 \text{ mm}^2$. Para tal, utilizaram-se réguas e um rolo de corte para realizar o processo de corte (Figura 62, Figura 63 e Figura 64). Todas as sobras foram aproveitadas com o objetivo de serem cortadas aleatoriamente e servirem de reforço numa das placas recicladas.

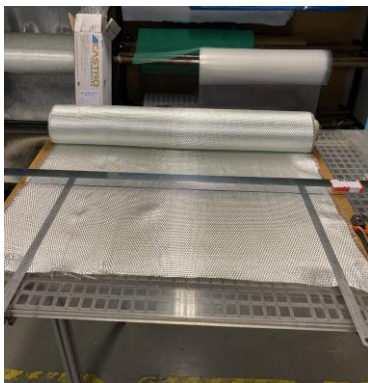


Figura 62- Medição das tiras de fibra de vidro



Figura 63- Corte das camadas de fibra de vidro



Figura 64- Camadas de fibra de vidro após corte

3.4.3. Processo de fabrico de provetes reciclados

Após o término do processo de trituração através de um moinho industrial, as partículas compósitas são sujeitas a um processo de infusão a vácuo, com vista à produção das placas que irão dar origem aos provetes. O processo de infusão por vácuo consiste na injeção de resina num molde fechado, sob pressão. Trata-se de um processo relativamente simples em que o material de reforço é colocado no interior do molde e posteriormente é introduzida a resina, por ação da pressão de vácuo criada (Figura 65). A pressão é causada pela retirada de ar do interior do molde com recurso a uma bomba. No processo de infusão de resina a vácuo, são

utilizados um molde inferior rígido e um saco de vácuo, que é utilizado para fechar o molde. É interessante realizar uma comparação entre este processo com o processo manual, sendo que, através das designações dos dois processos, facilmente se percebe de onde advém a principal diferença entre estes. Como referido anteriormente, no processo de infusão a vácuo, a resina é colocada no molde sob ação de vácuo, enquanto no processo manual a resina é impregnada manualmente com recurso a uma espátula ou pincel. A grande vantagem associada ao processo de infusão a vácuo é a redução do desperdício de resina.

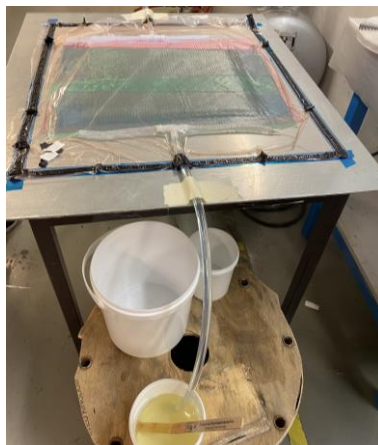


Figura 65- Processo de infusão a vácuo

Os passos de produção dos compósitos descritos neste capítulo são comuns às quatro placas, com a diferença da disposição e dos materiais utilizados no reforço. Com vista à preparação do molde, existem alguns passos imprescindíveis para que se obtenha um compósito de boa qualidade. Deste modo, primeiramente é realizada a limpeza do molde inferior com acetona ao qual, de seguida, é aplicado um desmoldante à base de cera (Figura 66). Este material facilita a retirada da placa do molde. Para delinear a área do molde utiliza-se a fita de vácuo azul e por cima desta aplica-se fita de papel para que, ao aplicar o desmoldante, a fita de vácuo não fique contaminada. Neste momento, é preciso garantir que o molde se encontra totalmente preenchido pelo desmoldante (Figura 67). O excesso de desmoldante deve ser removido com a passagem de um pano limpo, alguns minutos depois de aplicar o desmoldante. De seguida, remove-se a fita de papel e mantém-se a fita de vácuo. Esta garante que não entra ar durante o processo de infusão.



Figura 66- Desmoldante utilizado

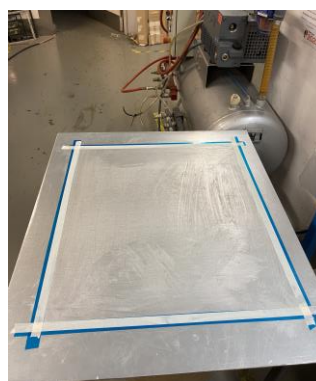


Figura 67- Aplicação do desmoldante no molde

Desenvolvimento

Posteriormente, são dispostas as camadas de reforço que são diferentes para as quatro placas. Resumidamente estas placas são constituídas por:

- Placa 1: reforço com empilhamento uniforme das camadas de tecido de fibra de vidro (12 camadas de 300x300 mm², equivalendo a 775,8 g de material);
- Placa 2: quatro camadas de fibra de vidro do mesmo material da placa 1, com reforço de partículas do mesmo, cortadas em pedaços não uniformes e dispostas aleatoriamente entre as quatro camadas;
- Placa 3: quatro camadas de fibra de vidro (duas em cada lado da placa) com reforço de partículas PA (600 g) entre estas;
- Placa 4: quatro camadas de fibra de vidro (duas em cada lado da placa) com reforço de partículas PP (600 g) entre estas.

No final do empilhamento, é colocada uma película denominada *peel-ply* que tem como objetivo facilitar a remoção dos acessórios utilizados na injeção da resina (Figura 68). Esta película torna o acabamento superficial das placas tenha um aspeto rugoso.



Figura 68- Deposição da *peel-ply* na placa 1

Posteriormente, por cima da *peel-ply*, é colocada uma folha plástica vermelha que contém pequenos orifícios (Figura 69). O objetivo desta camada é fazer com que a resina escoe com um caudal uniforme para o interior do material de reforço.



Figura 69- Deposição da folha picotada

De seguida, com vista a uma melhor impregnação da resina é aplicada uma malha de distribuição *flow mesh* (Figura 70). Esta malha permite um fluxo uniforme da resina e aumenta o escoamento desta sobre o material de reforço. Deste modo, o tempo necessário para a impregnação é reduzido.

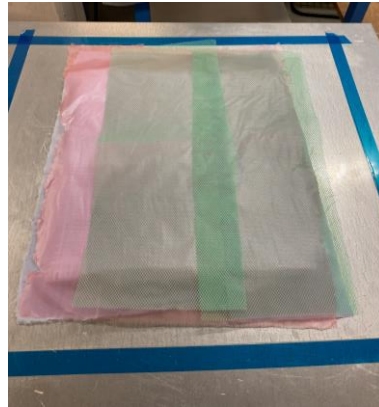


Figura 70- Aplicação da *flow-mesh* na placa 1

Um dos passos finais antes de fechar o molde consiste na inserção da linha de entrada da resina e da linha de saída de ar ou linha de vácuo (Figura 71 e Figura 72). Para tal são utilizados tubos espirais e “tês”, aos quais são ligados os tubos de entrada e saída de resina.

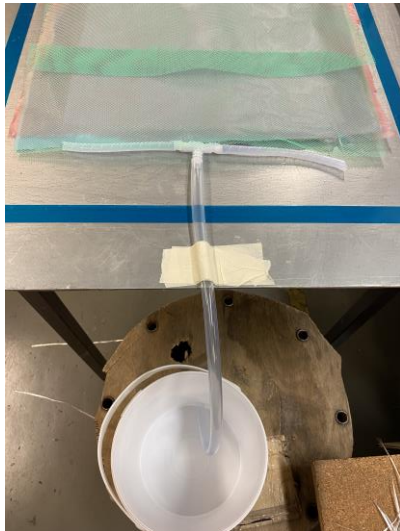


Figura 71- Linha de entrada da resina

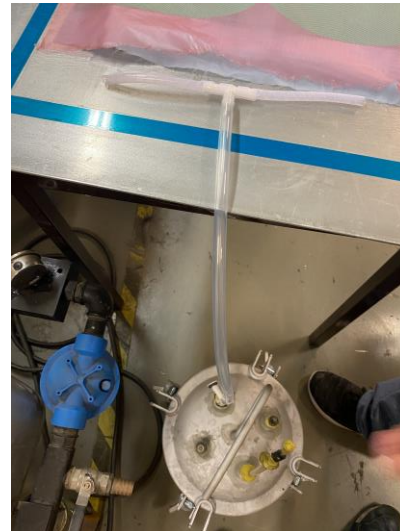


Figura 72- Linha de saída da resina

Finalmente, é colocado o saco de vácuo (Figura 73). Utiliza-se uma fita cola de dupla face preta que é responsável pela vedação entre o molde e o saco de vácuo. É necessário garantir que não existem fugas entre o saco de vácuo e o molde e, de modo a garantir uma melhor colagem, podem ser criadas pregas no saco (Figura 74).

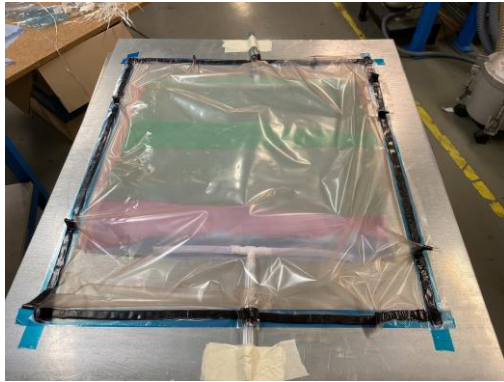


Figura 73- Colocação do saco de vácuo na placa 1



Figura 74- Pregas criadas no saco de vácuo

Uma vez finalizados todos os passos anteriores, dá-se o fecho do molde e procede-se à conexão dos tubos de injeção de resina e de extração da resina em excesso do molde, ligados ao reservatório de resina (Figura 75), o qual está ligado à bomba (Figura 76). Seguidamente, aplica-se a pressão de vácuo através do bloqueio da tubagem de injeção de resina e abre-se a tubagem de vácuo. Neste passo deve-se tomar atenção à existência de fugas de ar e garantir que exista uma boa adesão do saco de vácuo ao molde.



Figura 75- Reservatório de resina



Figura 76- Bomba de vácuo

Depois de se garantir a pressão de vácuo, segue-se a fase de injeção da resina (Figura 80). A matriz consiste na junção de dois componentes: a resina (Figura 77) e o catalisador/endurecedor (Figura 78). Após a abertura da tubagem do reservatório da resina, verifica-se uma rápida distribuição desta ao longo da malha de distribuição *flow mesh*. A quantidade de resina preparada deve ser adequada ao tamanho da placa que se pretende produzir e é necessário garantir uma boa mistura entre a resina e o endurecedor (Figura 79). Durante o processo de injeção, deve existir especial atenção ao desperdício de resina, uma vez que as tubagens e o depósito não podem conter nenhum deste desperdício, para evitar a cura da resina.

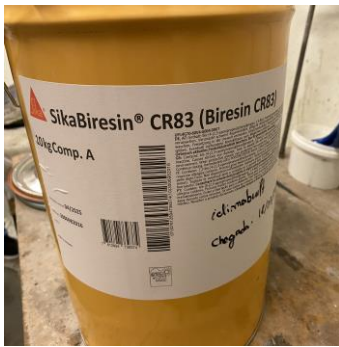


Figura 77- Resina

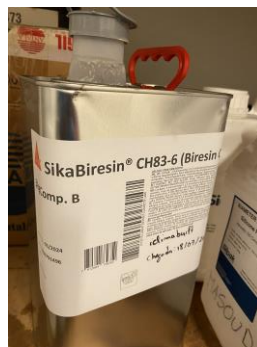


Figura 78- Endurecedor



Figura 79- Mistura da resina e do endurecedor

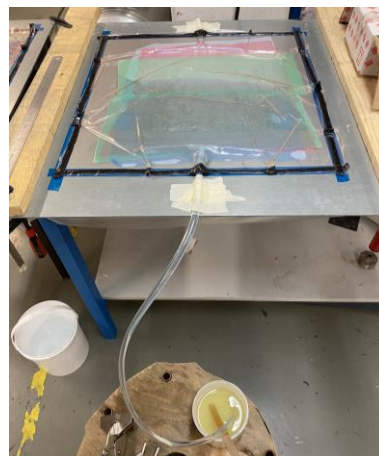


Figura 80- Início da injeção de resina na placa 3

Entrando na fase final do processo, dá-se início à cura do compósito. Deste modo, é terminada a injeção de resina e inicia-se a saída de vácuo (Figura 81), garantindo uma pressão constante de vácuo durante a cura e a obtenção de uma placa compósita com espessura homogênea. A bomba continua ligada durante o processo de cura e apenas é desligada quando este processo termina. O último passo é o desmolde da placa compósita. Para tal, os consumíveis devem ser removidos antes da cura total da placa para que o desmolde se torne mais simples.

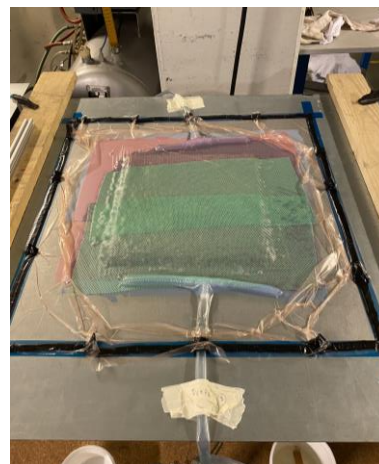


Figura 81- Fase final do processo de cura da placa 3

Desenvolvimento

Resumidamente, os consumíveis utilizados na produção das quatro placas compósitas foram:

- Resina *SikaBiresin CR83*;
- Endurecedor *SikaBiresin CH83-6*;
- Fibra de vidro;
- Fita de papel (amarela);
- Fita de temperatura (azul);
- Desmoldante;
- Fita de isolamento (preta) de dupla face;
- Potes de plástico para mistura e deposição da resina;
- Tubos de polietileno;
- Tubos em espiral;
- Tês;
- Acetona;
- *Peel-ply*;
- Folha picotada vermelha;
- *Flow mesh*;
- Saco de vácuo.

A última etapa para a obtenção dos provetes com as dimensões finais consiste no corte das quatro placas. Para tal, foi utilizada a serra de corte da Figura 82 presente nas instalações do INEGI.



Figura 82- Serra de corte do INEGI

Em cada placa foi realizada a marcação de uma esquadria quadrada com arestas de 280 mm de modo a obter a área útil que se encontra totalmente preenchida com o reforço. Posteriormente, foram marcadas tiras com 15 mm de largura na direção perpendicular à fita de Teflon®, como representado na Figura 83. Deve ter-se em conta uma margem de 3 mm que corresponde à largura do disco de corte.

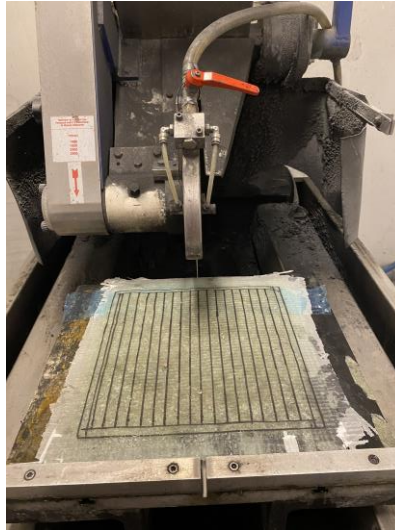


Figura 83- Marcação da esquadria e das tiras

Após terminar este processo, realizou-se a marcação das medidas de cada tipo de provete nas tiras. Em cada placa foram aproveitadas 15 tiras, sendo 7 destas utilizadas para obter provetes DCB e de tração e as outras 8 tiras utilizadas para obter provetes ENF e para ensaios *Block Shear*. A Figura 84 ilustra a divisão das placas nos quatro tipos de provetes que se pretendem obter, sendo que a parte superior da imagem contém a fita de Teflon® necessária para criar a pré-fenda dos provetes DCB e ENF.

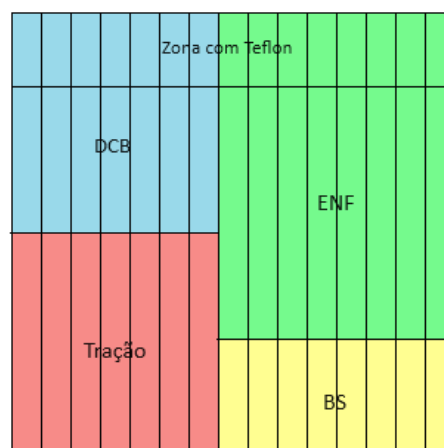


Figura 84- Ilustração da divisão das placas nos quatro tipos de provetes

No final do processo de corte obtêm-se os provetes com as medidas corretas para a realização dos vários ensaios, como se mostra na Figura 85.



Figura 85- Provete final obtidos das placas 1 e 2

3.4.4. Fabrico dos provetes de tração

Com vista à realização dos ensaios de tração, é necessária a conceção de provetes normalizados. Neste caso, optou-se por fabricar provetes retangulares, de acordo com a norma ASTM D3039 [52], devido ao facto da maquinação dos mesmos ser mais simples, permitindo assim uma maior uniformidade nas dimensões dos provetes. Contudo, também poderiam ter sido utilizados provetes do tipo osso feitos com materiais reciclados e reaproveitados de pás eólicas. Os provetes do tipo “osso de cão”, utilizados para ensaios de tração de provetes em compósito, encontram-se normalizados pela ASTM D3039 [52]. A geometria dos provetes e as dimensões dos mesmos encontram-se ilustradas na Figura 86.

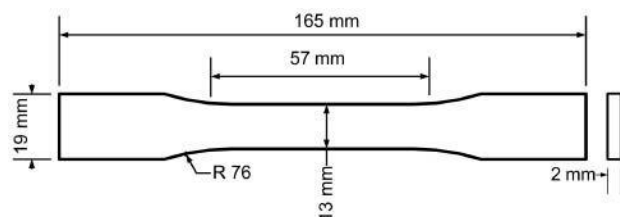


Figura 86- Esquema e dimensões dos provetes tipo "osso de cão"

Os provetes de tração foram obtidos através do corte das placas em tiras retangulares com 15 mm de largura e 140 mm de comprimento (Figura 87). A espessura dos provetes é diferente nas quatro placas, uma vez que os reforços interiores utilizados nestas são todos diferentes. Após o corte dos provetes nas dimensões pretendidas, os provetes para os ensaios de tração ficam prontos para serem testados.

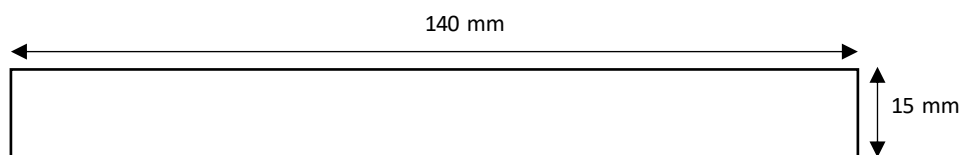


Figura 87- Dimensões dos provetes de tração

3.4.5. Fabrico dos provetes *Block Shear* (BS)

Os provetes BS são obtidos a partir do corte das mesmas tiras das placas em que são obtidos os provetes ENF, uma vez que as placas têm 280 mm de comprimento e foram reservados 230 mm para os provetes ENF. Deste modo, sobram 50 mm para o comprimento dos provetes BS e mantêm a largura de 15 mm (Figura 88), à semelhança dos restantes tipos de provetes.

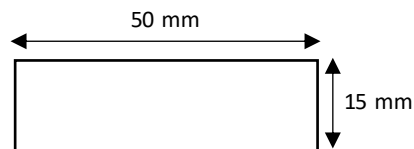


Figura 88- Dimensões dos provetes BS antes da maquinagem

Posteriormente, os provetes são maquinados de modo a garantir o formato e as dimensões necessárias para este tipo de ensaio. Os provetes BS que se pretendem obter podem ser visualizados na Figura 89.



Figura 89- Provetes BS finais

Para obter este tipo de provetes foi inicialmente garantida a espessura uniforme de cada pedaço através do facejamento da face superior de cada um destes que por vezes era irregular (Figura 90). Em todos os processos de maquinação foi utilizada uma fresa de 20 mm e uma velocidade de rotação de 1120 rpm.



Figura 90- Facejamento dos provetes BS

Desenvolvimento

Depois de garantida a espessura uniforme de cada provete, foi efetuada a medição da espessura de cada um dos mesmos, com o auxílio de um paquímetro digital. De acordo com a norma, pretende-se manter a espessura total do provete em 12,5 mm centrados no comprimento total de 50 mm dos provetes e efetuar a remoção de metade da espessura em lados opostos dos provetes. O procedimento de maquinação (Figura 91 e Figura 92) foi exatamente igual para ambos os lados dos provetes sendo que, ao mudar de lado, deve ter-se atenção em “zerar” novamente os eixos da máquina.



Figura 91- Maquinação de um lado do provete
BS



Figura 92- Maquinação do lado oposto do
provetes BS

3.4.6. Fabrico dos provetes DCB

Na preparação das quatro placas foi tida em conta a preparação para os provetes DCB e ENF, uma vez que foi colocada uma fita de *teflon* numa extremidade de cada placa com uma largura de aproximadamente 50 mm, como se pode verificar na Figura 93. Esta fita tem como função a criação da pré-fenda (a_0) dos provetes. Relativamente às dimensões, os provetes DCB foram produzidos com 140 mm de comprimento e 15 mm de largura (Figura 94), iguais aos provetes para ensaio de tração. No entanto, numa das extremidades destes provetes, consta a fita de Teflon® a meio das camadas, a cerca de 50 mm dessa extremidade.



Figura 93- Camada de Teflon® na placa 1

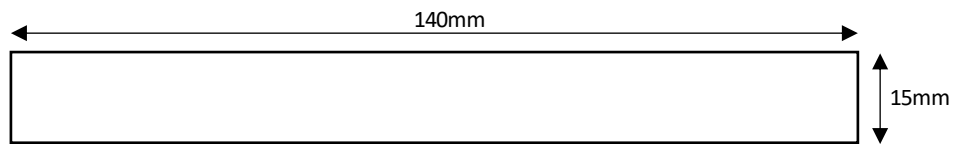


Figura 94- Dimensões dos provetes DCB

Com vista à preparação dos provetes DCB para o ensaio de fratura em modo I, foram cortadas dobradiças plano de aço inoxidável. Estes componentes são fornecidos em forma de tiras com o comprimento total de 1 m, mas apenas são aplicadas duas dobradiças com cerca de 25 mm de comprimento em cada provete. Para realizar o corte, inicialmente recorreu-se a uma serra manual (Figura 95). Contudo, o processo estava a ser demorado e as dobradiças não estavam com as dimensões próximas às pretendidas. Deste modo, foi utilizada uma rebarbadora para cortar as restantes dobradiças. No total, foi necessário cortar 56 dobradiças, uma vez que são utilizadas duas dobradiças para cada provete, uma de cada lado do mesmo e, no total das quatro placas, foram cortados 28 provetes DCB.



Figura 95- Corte das dobradiças com serra manual

No final do corte das dobradiças, é preciso realizar a passagem de uma lixa nas faces de fora de cada uma, assim como nas faces de ligação dos provetes, de modo a promover a adesão do adesivo. Após a passagem da lixa, ambas as faces, das dobradiças e dos provetes, são limpas com acetona para remover os resíduos provocados pelo processo.

As dobradiças são coladas aos dois lados dos provetes DCB através da aplicação de um adesivo adequado para compósitos com cura à temperatura ambiente. Neste caso, foi utilizada a *Araldite 2015-1* (Figura 96). Este adesivo é fornecido num recipiente com dupla tubagem e, para a utilização do mesmo, é colocado o recipiente numa pistola de aplicação que dirige os dois componentes para o tubo de mistura, onde os componentes são misturados e o adesivo resultante expelido pela extremidade de baixo para aplicação (Figura 97).

Desenvolvimento

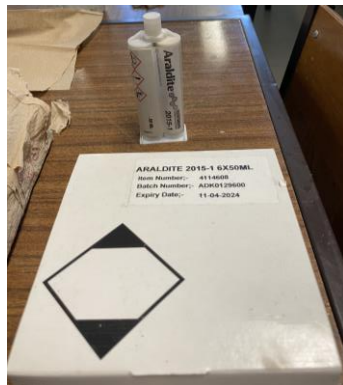


Figura 96- Araldite 2015-1



Figura 97- Pistola de aplicação do adesivo

Primeiramente, foi realizada a colagem das dobradiças nos provetes das quatro placas destinados a ensaios DCB, apenas num dos lados dos mesmos (Figura 98). No dia seguinte, após a cura do adesivo, foi aplicada outra dobradiça no outro lado dos provetes (Figura 99). Neste passo deve-se ter especial atenção no alinhamento das duas dobradiças para evitar desalinhamentos do provete no momento dos ensaios.



Figura 98- Colagem das dobradiças no primeiro lado dos provetes DCB



Figura 99- Colagem da segunda dobradiça nos provetes DCB

Depois de finalizada a cura do adesivo procedeu-se à remoção do excesso deste. Este processo torna-se imprescindível para que seja possível a abertura da pré-fenda nos provetes DCB. Deste modo, utilizou-se a fresadora da oficina do ISEP (Figura 100) com uma fresa de pequeno diâmetro (Figura 101) de maneira a remover o excesso de adesivo nas laterais e no topo.



Figura 100- Fresadora da oficina do ISEP



Figura 101- Fresa fina utilizada para remoção de excesso de adesivo

O passo final do fabrico dos provetes DCB consiste na abertura da pré-fenda inicial (a_0) em cada um dos provetes dos quatro tipos de placas. Deste modo, é realizada a pintura de uma das faces laterais com uma tinta corretora branca (Figura 102). Esta tinta tem como função facilitar a leitura do comprimento de fenda durante os ensaios. Posteriormente, através da utilização de uma chave de fendas, força-se com pouca intensidade a abertura da fenda na zona que contém a fita de Teflon®. Assim que se dá a abertura da fenda verifica-se o ponto onde esta termina e é colada uma régua milimétrica de papel no provete, com o zero da régua a coincidir nesse mesmo ponto.



Figura 102- Pintura da face lateral dos provetes DCB com tinta corretora branca

3.4.7. Fabrico dos provetes ENF

O fabrico dos provetes ENF para os ensaios de fratura em modo II segue a mesma metodologia de fabrico dos provetes DCB. A única diferença entre estes é o comprimento dos provetes ENF, que se estabelece em 230 mm ao invés de 140 mm dos provetes DCB (Figura 103). Estes também contêm a fita de Teflon® com vista à criação da pré-fenda.

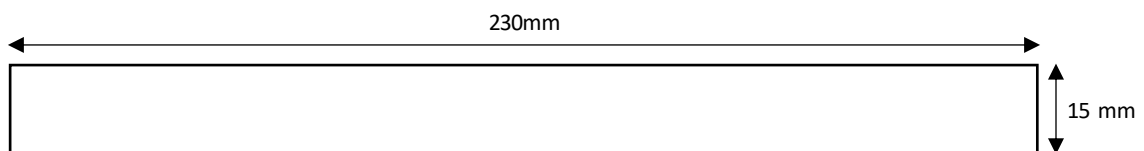


Figura 103- Dimensões dos provetes ENF

No caso dos provetes ENF não é necessário colar dobradiças e apenas é aplicada a tinta corretora branca numa das laterais e é colada uma escala milimétrica (Figura 105) para permitir a medição de abertura da fenda. A metodologia de abertura da pré-fenda é idêntica à descrita no fabrico dos provetes DCB e pode ser visualizada na Figura 104.

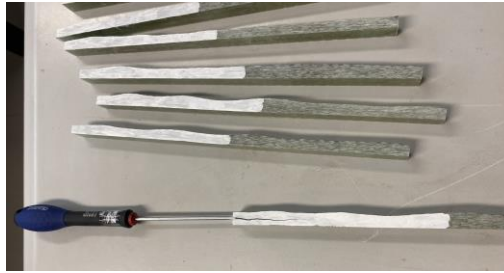


Figura 104- Abertura da pré-fenda nos provetes ENF

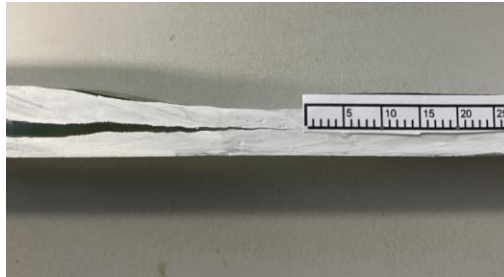


Figura 105-Colagem da escala milimétrica nos provetes ENF

3.5. Ensaios dos provetes

Neste subcapítulo pretende-se abordar os quatro tipos de ensaios experimentais realizados, descrevendo os procedimentos, as normas associadas e os *setups* de ensaio específico para cada ensaio. No final da descrição de cada ensaio são apresentados e discutidos os resultados obtidos. Para a realização de todos os ensaios foi utilizada a máquina de ensaios Shimadzu AG-X 100 representada na Figura 106, instalada no Laboratório de Ensaio Tecnológicos do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP.

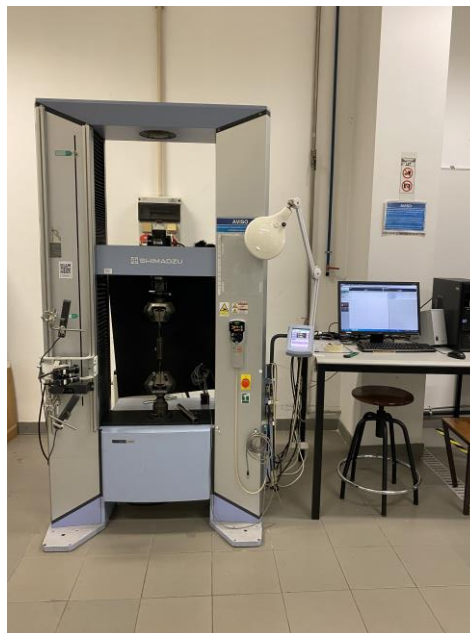


Figura 106- Máquina de ensaios Shimadzu AG-X 100 do LET do ISEP

Esta máquina contém duas amarras que são responsáveis pela fixação dos provetes de ensaio, sendo que a amarra inferior se mantém sempre na mesma posição enquanto a amarra superior executa um movimento de subida constante e a baixa velocidade, levando à tração do provete. A máquina de ensaios de tração está equipada com uma célula de carga de 100 kN e com um sistema de aquisição de dados que regista sistematicamente o tempo decorrido, a força (P) e o deslocamento (δ) a cada instante.

3.5.1. Ensaio de tração

Caraterização do ensaio de tração e normas associadas

Um ensaio de tração consiste em solicitar um corpo de prova ou provete através de uma força unidirecional com vista a alongar o mesmo até que ocorra a rutura. O provete tem de ter as suas dimensões bem definidas de modo a ser possível realizar um posterior estudo sobre a tensão exercida sobre o provete, conhecendo a área do mesmo e a força de tração aplicada. Deste modo, os provetes utilizados respeitam a norma ASTM D 3039/D 3039M [52]. Trata-se de um ensaio de simples e rápida execução e, deste modo, é o ensaio de tração mais utilizado na caraterização de compósitos. Alguns fatores devem ser tidos em conta para garantir a veracidade dos resultados. Deste modo, as condições ambientais devem ser constantes ao longo dos ensaios, as dimensões e caraterísticas dos provetes, velocidade de ensaio, entre outros. Para a realização dos ensaios de tração dos vários provetes utilizou-se a máquina de ensaios descrita anteriormente. O fim de cada ensaio de tração dá-se quando ocorre a rotura total do provete. Na montagem do provete à tração, este é colocado no centro das duas amarras. Deve garantir-se que as áreas de fixação do provete são semelhantes na duas cabeças de amarração. Deste modo, é previamente realizada uma marcação nos provetes em que é reservado um comprimento de 25 mm de cada extremidade dos mesmos para a amarração. Sendo assim, no caso dos provetes produzidos para este estudo, a distância entre as extremidades das duas cabeças de amarração é de 90 mm. A definição do zero da máquina é feita antes de começar os ensaios e tem de ser dado o *return* ao zero inicial antes de fixar qualquer provete nas amarras, através de um comando da máquina de ensaios (Figura 107).



Figura 107- Comando da máquina de ensaios

Desenvolvimento

Antes dos ensaios, foi realizada a identificação de todos os provetes de tração, assim como a medição de três medidas de espessura e de largura de cada um destes, de modo a calcular um valor médio de cada parâmetro e utilizar o mesmo no cálculo da área de secção (S_0).



Figura 108- Marcação das áreas de amarração e identificação dos provetes de tração

Iniciando o ensaio, uma das cabeças de amarração, a superior, afasta-se em relação à cabeça inferior a uma velocidade constante. No caso dos ensaios realizados para este estudo, a velocidade de ensaio utilizada foi de 2 mm/min. O valor de força de reação exercida aumenta linearmente com o tempo decorrido. Nos ensaios deve ter-se em atenção que os calços têm de estar completamente inseridos no interior das amarras. A máquina de ensaios utilizada tem uma célula de carga de 100 kN e foi utilizado um extensómetro de pinças. O extensómetro é um aparelho que mede o deslocamento sofrido pelo material durante o regime elástico. Este é colocado antes do início de cada ensaio e o valor de registo tem de ser zerado após a fixação deste a cada provete. Foi definido no *software* associado à máquina de ensaios que a remoção do extensómetro fosse feita assim que fosse atingido o deslocamento de 1 mm. Deste modo, assim que surgia o aviso no monitor, o extensómetro foi retirado manualmente e foi dada a continuação de cada ensaio.



Figura 109- Setup de ensaio com extensómetro utilizado nos ensaios de tração

Resultados obtidos

Os dados de saída dos ensaios de tração são o deslocamento sofrido pelo material (δ), a força de reação do material ao esforço a que está sujeito (F) e a resistência ao deslocamento imposto ao mesmo. Os dados são registados pelo *software* TRAPEZIUM X, conectado à máquina de ensaios. Através destes dados é possível calcular a tensão (σ), a deformação (ε) e o módulo de elasticidade do material (E), através das equações:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (10)$$

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L_0} \quad (11)$$

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (12)$$

Sendo que A corresponde à área média da secção transversal do provete e L_0 é o comprimento inicial do extensómetro. Ao longo dos ensaios, todos os dados são fornecidos em função do tempo decorrido e posteriormente são realizados os gráficos que relacionam a tensão e a deformação, de modo a obter as curvas necessárias para avaliar o módulo de elasticidade do material. O principal objetivo dos ensaios de tração é analisar propriedades mecânicas como a tensão de rotura, a deformação de rotura e o módulo de elasticidade do material que constitui os provetes. A tensão de rotura corresponde ao ponto máximo de tensão antes da rotura do material, obtido na curva do gráfico tensão-deformação. A deformação de rotura é a deformação medida pelo extensómetro no ponto de rotura do material na curva tensão-deformação. De acordo com a norma ASTM D 3039/D3039M [52], o módulo de elasticidade do material obtém-se através da inclinação curva do gráfico tensão-deformação entre os pontos 0,1 % e 0,3 % de deformação, ou seja, entre os pontos em que existe um comportamento linear da curva. Segundo a norma ISO 527-1, o intervalo situa-se entre os pontos 0,05 % e 0,25 % de deformação.

$$E_1 = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (13)$$

Para tal, cria-se uma linha de tendência do tipo $y=mx+b$, sobre a curva do gráfico anteriormente referido e, através do declive da equação, obtém-se o valor do módulo de elasticidade experimental (E) de cada provete. Após a realização de todos os ensaios de tração procedeu-se ao tratamento de dados. Para tal, recorreu-se ao *Microsoft Excel* para obter os gráficos que relacionam a deformação com a tensão (gráficos σ - ε).

De modo a calcular a área da secção transversal dos provetes, realizou-se a medição de três medidas de espessura e largura e posteriormente foi calculado o valor médio de cada um destes dados. A área consiste na multiplicação do valor médio da espessura de valor médio da largura de cada provete. Na Tabela 27 do Apêndice A, encontram-se condensados os valores medidos através de um paquímetro digital, assim como as áreas obtidas.

Desenvolvimento

Após a realização dos ensaios de tração, deve realizar-se uma primeira inspeção visual e analisar o tipo de rotura e o comportamento do provete quando solicitado a este tipo de solicitação. De um modo geral, é possível verificar que a rotura nos provetes correspondentes à placa 1 ocorreu sempre na extremidade superior do provete, considerando a posição vertical na qual este é colocado no *setup* de ensaio. Inicialmente, quando isto se verificou nos primeiros provetes ensaiados deduziu-se que tal se podia dever a um aperto demasiado forte dos provetes às amarras. Contudo, no ensaio dos restantes provetes desta placa reduziu-se a força de aperto das amarras e voltou a acontecer o mesmo tipo de rotura. A Figura 110 mostra a uniformização da rotura ocorrida em todos os provetes da placa 1 e a Figura 111 pormenoriza a área em que ocorreu a rotura.



Figura 110- Provetes de tração da placa 1 após ensaios

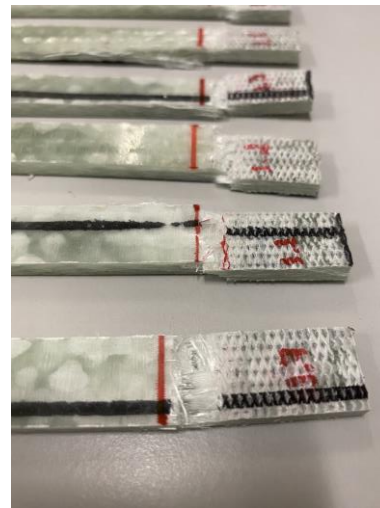


Figura 111- Pormenorização da rotura ocorrida nos provetes de tração da placa 1

Nos provetes de tração correspondentes à placa 2 verifica-se exatamente o mesmo tipo de rotura ocorrido anteriormente nos provetes de tração da placa 1, como se pode visualizar na Figura 112 e na Figura 113. O mesmo se verificou nos provetes de tração correspondentes à placa 3, como se mostra na Figura 114 e na Figura 115.



Figura 112- Provetes de tração da placa 2 após ensaios



Figura 113- Pormenorização da rotura ocorrida nos provetes de tração da placa 2



Figura 114- Provetes de tração da placa 3 após ensaios



Figura 115- Pormenorização da rotura ocorrida nos provetes de tração da placa 3

Após o ensaio dos provetes de tração correspondentes à placa 4, o comportamento da rotura destes segue o mesmo princípio dos provetes das placas anteriores (Figura 116). Contudo, verificou-se uma exceção no comportamento de rotura de um provete (Figura 117). Neste provete, a rotura ocorreu principalmente na zona de fratura, apesar de ter começado na extremidade superior, à semelhança dos restantes. Importa lembrar que os provetes da placa 4 são constituídos por duas camadas de fibra de vidro no topo do empilhamento e por mais duas camadas iguais na base, sendo preenchidos no interior com partículas de PP. Na deposição das partículas houve o cuidado de pressionar as mesmas de modo a acomodar estas da melhor forma. No entanto, existem espaços vazios entre estas partículas que são preenchidos com a resina aplicada no processo de infusão a vácuo. Este tipo de procedimento tem tendência a gerar microfissuras, uma vez que a resina pode não ser capaz de preencher todos os espaços que se estabelecem entre as partículas. Deste modo, quando os provetes são solicitados a esforços de tração, a zona que contém as partículas de PP tende a ser uma zona crítica. No caso do provete da Figura 117, nota-se que a rotura se propagou principalmente ao longo desta zona começando na extremidade superior do provete e acabando a propagação na zona inferior do mesmo.



Figura 116- Provetes de tração da placa 4 após ensaios



Figura 117- Pormenorização da rotura ocorrida num provete de tração da placa 4

Discussão de resultados

Assim como foi referido anteriormente, após a realização dos ensaios de tração segue-se a fase de tratamento dos dados fornecidos pelo *software* TRAPEZIUM X associado à máquina de ensaios utilizada. O principal objetivo trata-se de obter os gráficos com as curvas $P-\delta$ e os gráficos com as curvas $\sigma-\varepsilon$ para os provetes dos quatro tipos de placa testados.

Primeiramente, são apresentadas as curvas $P-\delta$ referentes aos provetes de cada placa. Importa referir que apenas foram tios em conta os provetes com resultados mais válidos, ou seja, foram retirados os provetes *outliers* do estudo dos ensaios de tração. Um aspeto comum aos quatro gráficos (Figura 118, Figura 119, Figura 120 e Figura 121) é a uniformidade os resultados relativamente à rigidez dos provetes de cada placa. Nota-se uma clara diferença de resistência à tração da placa 1 em comparação com as restantes três placas. Esse resultado era o esperado, uma vez que a placa 1 é formada por fibra de vidro nova e o empilhamento de camadas uniforme permite a redução de pontos críticos de rotura. A força máxima obtida na placa 1 é cerca do dobro do obtido na placa 2 e o triplo das placas 3 e 4. O deslocamento máximo também foi ligeiramente superior nos provetes ensaiados da placa 1 em relação aos das outras placas.

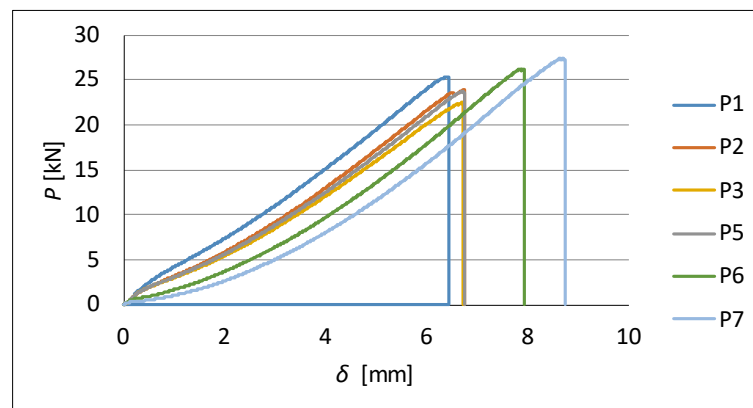


Figura 118- Curvas $P-\delta$ dos provetes da placa 1

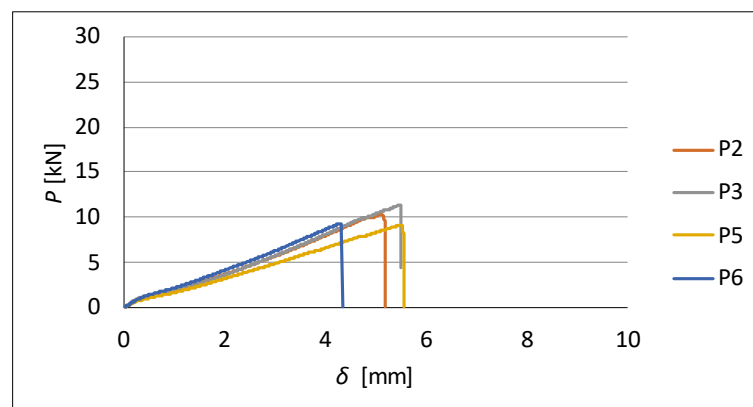
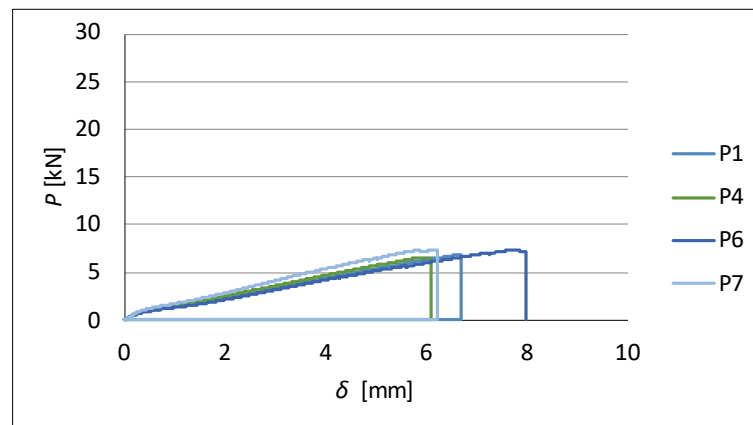
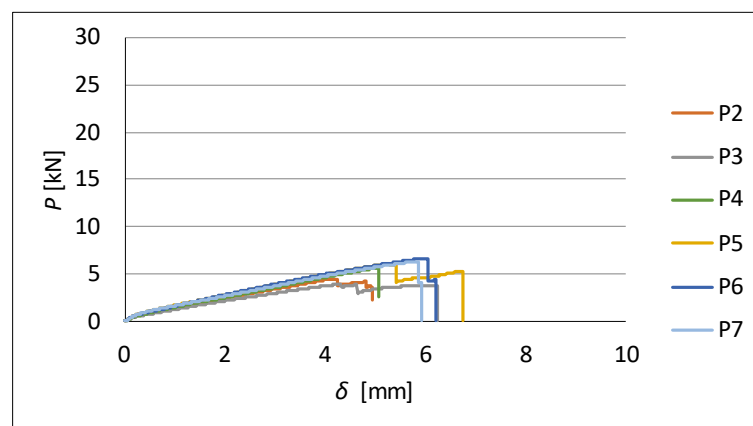


Figura 119- Curvas $P-\delta$ dos provetes da placa 2

Figura 120- Curvas P - δ dos provetes da placa 3Figura 121- Curvas P - δ dos provetes da placa 4

A partir dos dados obtidos dos ensaios (P e δ) e do tratamento desses mesmos dados, é possível caracterizar mecanicamente os provetes dos quatro tipos de placas. Deste modo, aplicaram-se as fórmulas apresentadas no capítulo 3.5.1 de forma a obter a tensão máxima ($\sigma_{máx}$), a tensão de rotura (σ_{rot}) e o módulo de elasticidade (E). Nas Tabela 7, Tabela 8, Tabela 9 e Tabela 10 são apresentados os resultados das propriedades mecânicas experimentais.

Visualmente, é mais perceptível perceber os resultados através dos gráficos com as curvas σ - ϵ na Figura 122, Figura 123, Figura 124 e Figura 125. Assim como foi referido anteriormente, a grande diferença concentra-se entre os provetes da placa 1 e das restantes placas. Nos provetes da placa 1, o módulo de elasticidade é cerca de 23 GPa enquanto nos provetes da placa 2 esse valor cai para 14 GPa. Através destes resultados, pode concluir-se uma grande diferença à tração entre os dois compósitos. Estas diferenças estão apenas relacionadas com a morfologia de produção das placas. A placa 2 contém um reforço de partículas de fibra de vidro aproveitadas do corte deste material. Contudo, mesmo com esta diferença de cerca de 9 GPa, o módulo de elasticidade médio obtido nos provetes da placa 2 é bastante razoável e indica que se pode utilizar este tipo de compósitos para aplicações que exijam uma resistência à tração moderada. As placas 3 e 4 revelam ser menos interessantes para estarem sujeitas a esforços de tração, apresentando apenas valores de módulo de elasticidade médios de 3,8 e 2,6 GPa, respetivamente.

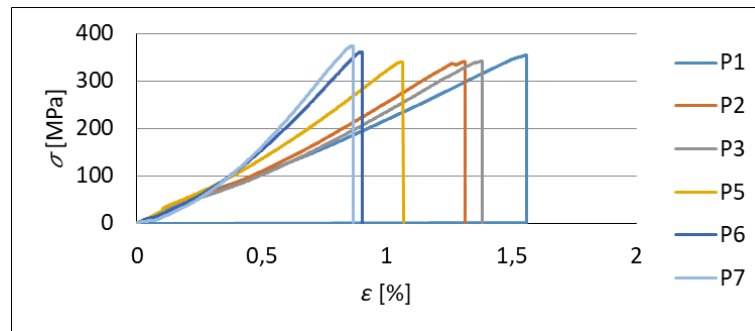
Figura 122- Gráfico σ - ϵ dos provetes da placa 1

Tabela 7- Propriedades à tração dos provetes da placa 1

Proвете	$P_{\text{máx}}$ [N]	$\delta_{\text{máx}}$ [mm]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	σ_{rot} [MPa]	E [MPa]
P1	25421,13	6,44	353,47	349,16	24553,51
P2	23930,12	6,77	341,03	335,90	23724,97
P3	22491,74	0,00	341,55	338,65	21414,39
P5	23698,06	6,77	339,25	337,40	26340,14
P6	26247,50	7,95	360,97	351,29	23696,75
P7	27396,14	0,00	374,47	373,06	23648,19
Média	24864,12	6,98	351,79	347,58	23896,33
Desvio Padrão	1816,34	0,66	14,00	14,04	1593,42
CV (%)	7,31	9,51	3,98	4,04	6,67

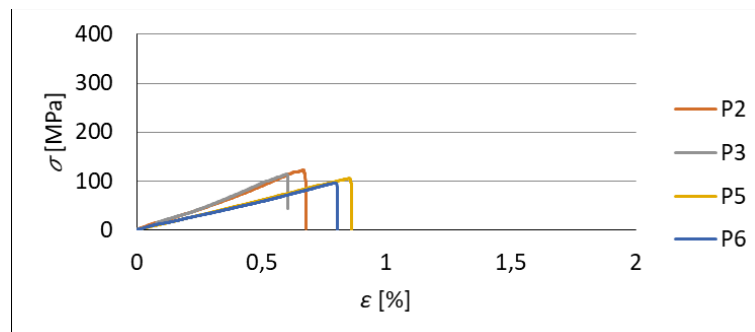
Figura 123- Gráfico σ - ϵ dos provetes da placa 2

Tabela 8- Propriedades à tração dos provetes da placa 2

Proвете	$P_{\text{máx}}$ [N]	$\delta_{\text{máx}}$ [mm]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	σ_{rot} [MPa]	E [MPa]
P2	10288,73	0,00	121,32	115,17	15848,43
P3	11416,53	5,51	114,26	111,74	17647,63
P5	9093,97	0,00	104,70	96,63	11894,23
P6	9277,77	4,33	95,70	95,63	11011,02
Média	10073,15	5,01	111,46	106,87	14449,95
Desvio Padrão	933,95	0,61	11,14	9,91	2850,20
CV (%)	9,27%	12,21%	9,99%	9,27%	19,72%

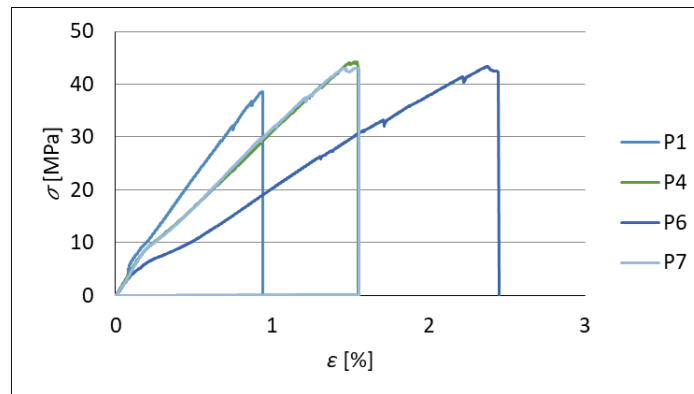
Figura 124- Gráfico σ - ϵ dos provetes da placa 3

Tabela 9- Propriedades à tração dos provetes da placa 3

Proвете	$P_{\text{máx}}$ [N]	$\delta_{\text{máx}}$ [mm]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	σ_{rot} [MPa]	E [MPa]
P1	6839,98	6,70	38,65	38,60	3822,97
P4	6562,22	6,09	44,21	42,42	3952,29
P6	7369,41	7,99	43,36	42,37	3576,57
P7	7309,01	0,00	43,02	41,76	4034,01
Média	4682,23	7,96	41,71	27,80	3846,46
Desvio Padrão	386,26	0,97	2,49	1,82	199,81
CV (%)	8,25%	12,16%	5,97%	6,53%	5,19%

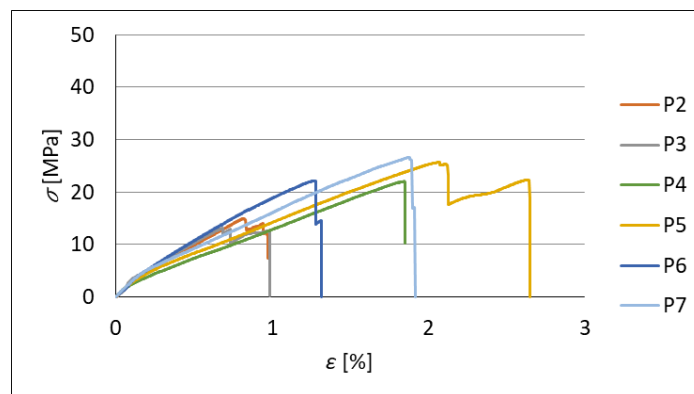
Figura 125- Gráfico σ - ϵ dos provetes da placa 4

Tabela 10- Propriedades à tração dos provetes da placa 4

Proвете	$P_{\text{máx}}$ [N]	$\delta_{\text{máx}}$ [mm]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	σ_{rot} [MPa]	E [MPa]
P2	4497,93	6,75	14,99	16,12	2162,72
P3	3925,88	5,08	13,09	19,56	1903,29
P4	5629,65	5,08	22,02	21,98	2975,78
P5	6077,54	6,75	25,69	18,67	3062,30
P6	6657,01	6,22	22,19	18,70	2387,55
P7	6339,50	5,08	26,65	17,00	2907,54
Média	5638,15	4,99	21,61	18,43	2615,25
Desvio Padrão	1036,58	2,33	5,54	1,98	459,02
CV (%)	18,39%	46,71%	25,65%	10,72%	17,55%

De forma a resumir os resultados das propriedades mecânicas, foram desenvolvidos gráficos que comparam os valores médios de cada propriedade entre os provetes das quatro placas (Figura 126, Figura 127, Figura 128 e Figura 129). Nestes gráficos podemos comprovar a tendência de perda das propriedades mecânicas à tração a partir das placas que utilizam materiais reciclados e reaproveitados, ou seja, das placas 2, 3 e 4.

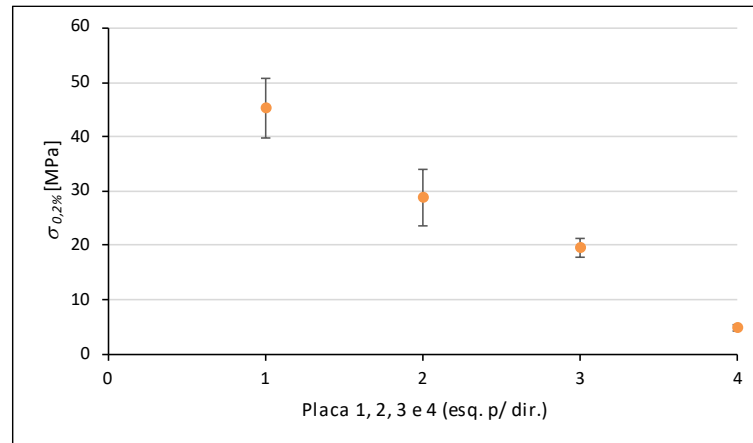


Figura 126- Comparação da $\sigma_{0,2\%}$ das quatro placas

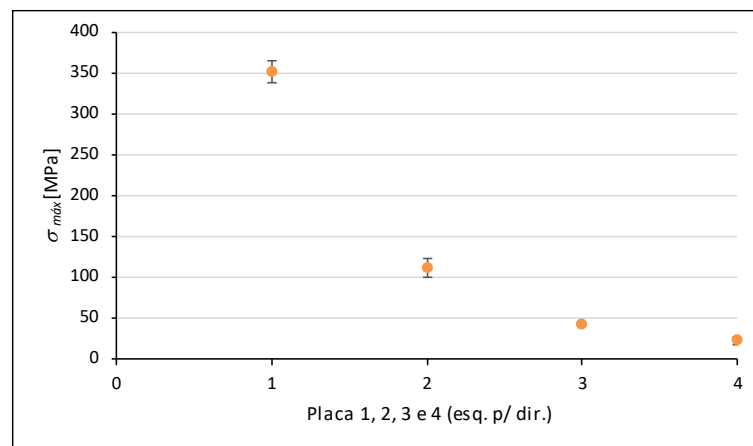


Figura 127- Comparação da $\sigma_{máx}$ das quatro placas

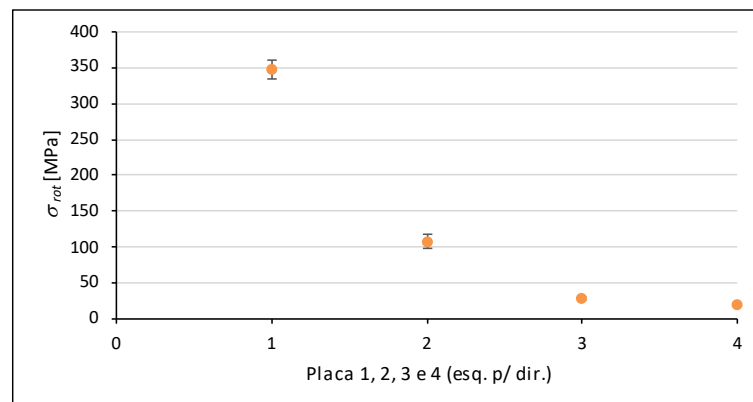
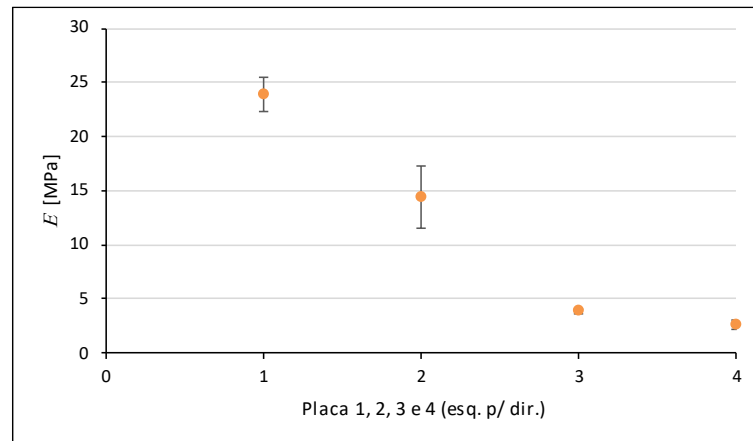


Figura 128- Comparação da σ_{rot} das quatro placas

Figura 129- Comparação de E das quatro placas

3.5.2. Ensaios ao corte de *Block Shear* (BS)

Caraterização do ensaio ao corte de BS

O principal objetivo deste ensaio é a obtenção do módulo de corte, G , do compósito em estudo. No caso da presente dissertação, tendo em conta os equipamentos disponíveis nos laboratórios do ISEP, os ensaios ao corte seguem a metodologia da norma ASTM D4501-01 [112]. Esta norma é direcionada para adesivos, mas também pode ser aplicada a provetes compósitos sólidos unidos por adesivos e é utilizada quando existe a sobreposição de provetes com as mesmas dimensões de comprimento e largura, podendo ser provetes constituídos pelo mesmo material ou por materiais diferentes um do outro. A espessura dos provetes pode ou não ser a mesma. O ensaio ao corte através do método BS apresenta alguns problemas que devem ser minimizados, uma vez que é necessário utilizar provetes com volume considerável e a fixação dos provetes ao equipamento deve ser realizada de modo que apenas sejam aplicadas forças de corte. As forças de corte têm de ser aplicadas paralelamente ao plano de corte. Após a realização dos ensaios é verificado o valor de força máxima, $P_{máx}$, registado durante o ensaio e, sabendo a área da secção do plano de corte, obtém-se a tensão de corte máxima através da equação (14).

$$\tau_{máx} = \frac{P_{máx}}{S_0} \quad (14)$$

Posteriormente, através da equação 15, determina-se o módulo de corte, G , através da relação entre a tensão de corte, T , e a deformação angular de corte, γ .

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (15)$$

O ensaio dos provetes ao corte de BS foi realizado na mesma máquina de ensaios do LET do ISEP, a Shimadzu AG-X 100. Neste teste é necessário adaptar um adaptador às cabeças de amarração. Uma das principais funções deste adaptador é a fixação do provete, sendo que este é preso na zona de sobreposição, situada a meio do provete (Figura 130 e Figura 131). A outra

função do adaptador instalado é garantir que a única força aplicada durante a realização do ensaio é aquela que irá gerar o corte. Esta força, na configuração do equipamento, deve ser aplicada paralelamente ao plano de corte.



Figura 130- Imagem frontal do *setup* de ensaio BS
Figura 131- Imagem lateral do *setup* de ensaio BS

Como demonstrado na Figura 131, o provete é inserido manualmente na área quadrada do aparelho e o aperto do mesmo dá-se no lado oposto ao visualizado na Figura 130, através de um sistema de parafuso. Importa notar que a força de aperto deve ser apenas a necessária para que o provete fique fixo, para que não sejam induzidas tensões antes do início dos ensaios. A posição de referência inicial deve ser guardada na máquina logo a seguir ao posicionamento do primeiro provete de ensaio. O ensaio de todos os provetes foi realizado com a mesma velocidade, a 2 mm/min. Depois de configurar o equipamento e colocar devidamente os provetes na máquina de ensaios são registados os valores de força aplicada (F) e deslocamento (δ) ao longo do tempo de ensaio.

Resultados obtidos

Para realizar o tratamento dos dados obtidos, é necessário conhecer as medidas do *overlap* e da largura para calcular a área de sobreposição de cada provete. Para tal, foi feita a medição de três medidas de cada parâmetro em todos os provetes das quatro placas e utilizou-se a média dos valores para realizar os cálculos. Deste modo, a Tabela 28 do Apêndice A contém a informação das medidas de todos os provetes ensaiados.

Assim como é expectável, a rotura deste tipo de provete dá-se na zona de sobreposição, ou seja, na zona central do provete. Este comportamento verifica-se em todos os provetes das quatro diferentes tipos de placas. Nos ensaios dos provetes correspondentes às placas 3 e 4, a duração dos ensaios é inferior à duração dos ensaios das placas 1 e 2. Este facto deve-se à maior fragilidade das placas 3 e 4, uma vez que contêm partículas de PA e PP no seu interior, respetivamente.



Figura 132- Provetes BS da placa 1 após ensaios



Figura 133- Provetes BS da placa 2 após ensaios



Figura 134- Provetes BS da placa 3 após ensaios



Figura 135- Provetes BS da placa 4 após ensaios

Discussão de resultados

Seguindo a mesma metodologia de apresentação de resultados dos ensaios de tração, primeiramente foram realizadas as curvas $P-\delta$ dos ensaios ao corte. Estas são apresentadas na Figura 136, Figura 137, Figura 138 e Figura 139. Os dados da carga (P) e do deslocamento (δ) são dados pelo *software* associado à máquina de ensaios. Através dos gráficos das quatro placas, percebe-se que os valores de carga máxima obtidos são muito próximos nas três primeiras placas e existe uma diferença considerável relativamente aos valores de carga máxima obtidos no ensaio dos provetes da placa 4, constituída por partículas de PP. Nas curvas referentes às placas 1, 2 e 3 percebe-se que existiram roturas parciais devido às pontes de fibra que se criaram nestes compósitos. Já nos provetes referentes à placa 4, nota-se que ocorreram roturas repentinas, devido à descida abrupta do valor de carga num curto intervalo de deslocamento.

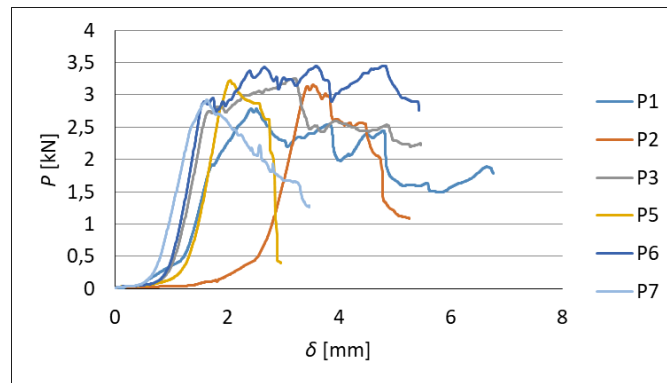


Figura 136- Curva P - δ dos provetes da placa 1 à fratura em modo I

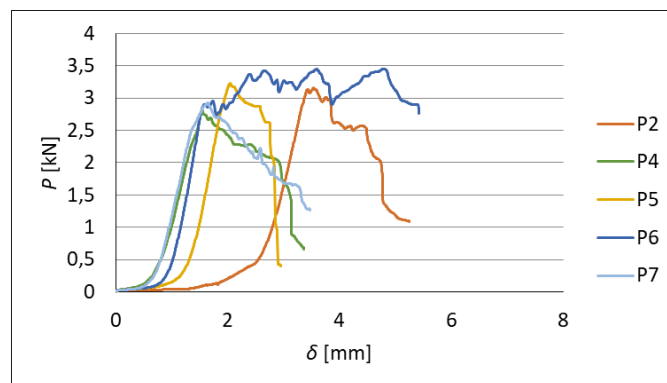


Figura 137- Curva P - δ dos provetes da placa 2 à fratura em modo I

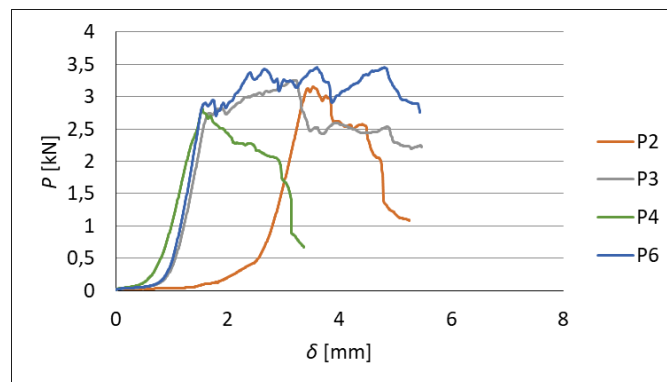


Figura 138- Curva P - δ dos provetes da placa 3 à fratura em modo I

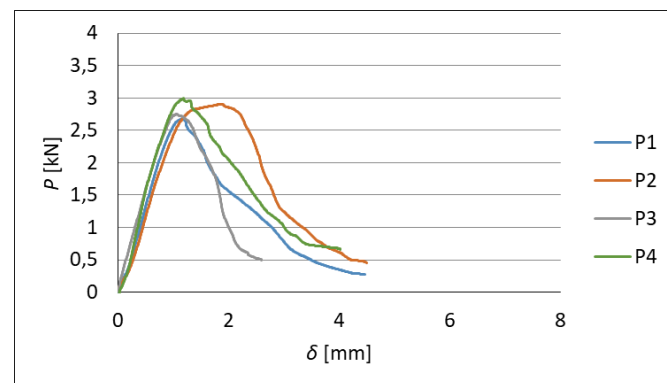


Figura 139- Curva P - δ dos provetes da placa 4 à fratura em modo I

De seguida são apresentados os gráficos com as curvas T - γ (Figura 140, Figura 141, Figura 142 e Figura 143), assim como as tabelas com os resultados obtidos através do tratamento de dados (Tabela 11, Tabela 12, Tabela 13 e Tabela 14). A primeira observação que interessa relatar é a proximidade dos valores médios de tensão de corte máxima ($\tau_{m\acute{a}x}$) entre as placas 1, 2 e 3 (cerca de 18 MPa). Contudo, este valor decresce nos provetes da placa 4, tendo um valor médio de 14 MPa. O mesmo não acontece nos valores médios do módulo ao corte (G), registando cerca de 2,4 GPa nos provetes da placa 1, aproximadamente 0,8 GPa nos provetes das placas 2 e 3 e apenas 0,2 GPa nos provetes da placa 4. Existe um claro decréscimo nas propriedades ao corte quando se utilizam materiais reciclados como reforço destes compósitos.

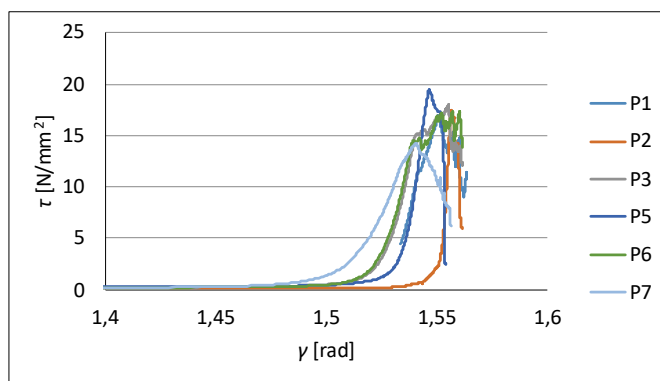


Figura 140- Curvas T - γ dos provetes da placa 1 ao corte

Tabela 11- Resultados experimentais dos provetes da placa 1 ao corte

Proвете	$P_{m\acute{a}x}$ [N]	$\tau_{m\acute{a}x}$ [MPa]	G [MPa]
1	2786,89	16,92	2473,43
2	3154,28	17,53	2830,41
3	3251,92	17,98	2383,83
5	3222,56	19,46	2016,74
6	3449,68	17,28	2964,77
7	2922,31	14,26	1930,22
Média	3131,27	17,24	2433,23
Desvio-padrão	239,61	1,70	417,33
CV (%)	7,65	9,89	17,15

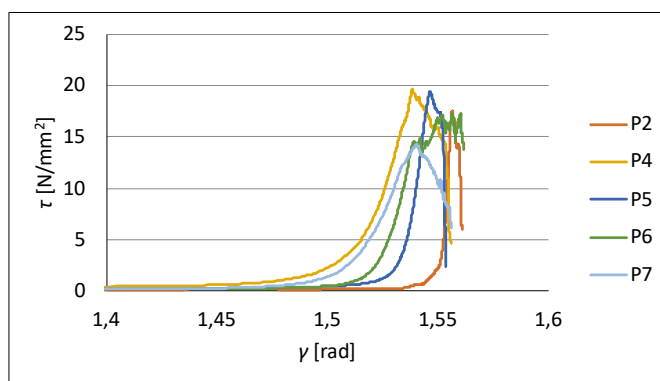


Figura 141- Curvas T - γ dos provetes da placa 2 ao corte

Tabela 12- Resultados experimentais dos provetes da placa 2 ao corte

Proвете	$P_{\text{máx}}$ [N]	$\tau_{\text{máx}}$ [MPa]	G [MPa]
2	1703,25	21,77	850,87
4	2002,46	15,15	847,38
5	1641,07	18,58	815,32
6	1630,58	16,87	745,16
7	1411,61	16,24	647,75
Média	1677,79	17,72	781,30
Desvio-padrão	212,42	2,58	85,89
CV (%)	12,66	14,57	10,99

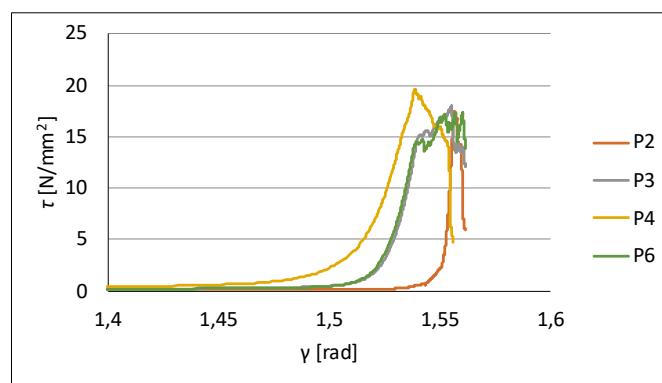
Figura 142- Curvas T - γ dos provetes da placa 3 ao corte

Tabela 13- Resultados experimentais dos provetes da placa 3 ao corte

Proвете	$P_{\text{máx}}$ [N]	$\tau_{\text{máx}}$ [MPa]	G [MPa]
2	2584,93	17,15	940,84
3	3170,01	15,35	753,72
4	2785,25	22,39	999,27
6	2151,27	17,22	882,03
Média	2672,87	18,03	893,97
Desvio Padrão	424,10	3,03	105,03
CV (%)	15,87	16,83	11,75

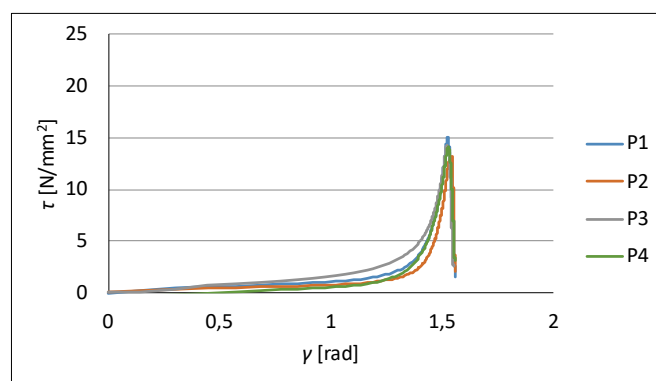
Figura 143- Curvas T - γ dos provetes da placa 4 ao corte

Tabela 14- Resultados experimentais dos provetes da placa 4 ao corte

Proвете	$P_{\text{máx}}$ [N]	$\tau_{\text{máx}}$ [MPa]	G [MPa]
1	2668,11	15,11	210,46
2	2895,77	13,18	232,47
3	2748,06	14,26	175,61
4	2988,86	14,11	178,59
Média	2825,20	14,16	199,28
Desvio Padrão	144,21	0,79	27,17
CV (%)	5,10	5,57	13,63

3.5.3. Ensaios de fratura em modo I (DCB)

Caraterização do ensaio DCB e normas associadas

O ensaio DCB é o ensaio mais utilizado para determinar a resistência à fratura em modo I. O principal objetivo deste tipo de ensaio é obter o valor de G_{Ic} . O *setup* de ensaio pode ser visualizado na Figura 144.



Figura 144 - Setup do ensaio DCB

Este ensaio consiste na aplicação de uma força de tração pelas dobradiças, na extremidade do provete que contém a fenda. Consequentemente, existe a propagação da fenda (a) e esta é medida de acordo com uma escala colocada nas laterais do provete. Simultaneamente, a carga aplicada (P) e o deslocamento da abertura (δ) também são registados. De modo a registar a abertura da fenda (a) ao longo do tempo, utilizou-se uma máquina fotográfica com lente macro e uma resolução de 20 megapixéis (Figura 145). Deste modo, considerou-se uma fotografia de 5 em 5 segundos desde o início de cada ensaio até à rotura.

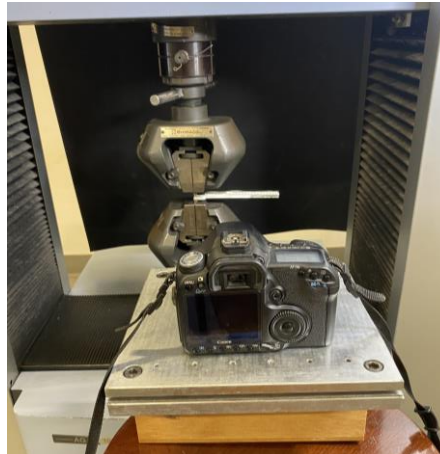


Figura 145 - Câmera utilizada para registo da abertura da fenda no ensaio DCB

De acordo com a norma ASTM D5525-13 [73], os provetes devem ser compostos por placas com comprimento superior a 125 mm, 25 mm de largura e ter entre 3 e 5 mm de espessura. Numa das extremidades é realizada uma fenda no plano intermédio da espessura do provete, com 50 mm de comprimento. Esta é denominada de pré-fenda e identifica-se por a_0 . No caso dos provetes testados, estes têm 140 mm de comprimento, aproximadamente 15 mm de largura e a espessura varia de acordo com o tipo de placa. O processo de fabrico dos provetes DCB encontra-se descrito no capítulo 3.4.6. Antes de iniciar os ensaios dos provetes DCB, é necessário efetuar a medição da pré-fenda (Figura 146). Através de um paquímetro digital, esta foi medida e registada para todos os provetes correspondentes às quatro placas.



Figura 146- Medição da pré-fenda nos provetes DCB

A velocidade dos ensaios foi alterada de acordo com a placa a que correspondiam os provetes. Deste modo, para os provetes da placa 1 utilizou-se uma velocidade de ensaio de 10 mm/min, os provetes da placa 2 foram ensaiados a uma velocidade de 8 mm/min, enquanto para os provetes das placas 3 e 4 utilizou-se uma velocidade de 6 mm/min, uma vez que estes últimos dois tipos de provetes apresentam maior deformação e necessitam de maior deslocamento da máquina. Após a realização dos ensaios, são extraídos os dados da carga aplicada, deslocamento e comprimento da fenda com o objetivo de obter a curva de resistência (curva R). A curva R representa a evolução de G_{Ic} em função de a (Figura 147). Geralmente, a curva R de um compósito apresenta uma subida acentuada da taxa de libertação de energia no início do ensaio devido à pré-fenda e posteriormente tende a estabilizar num patamar que corresponde a G_{Ic} .

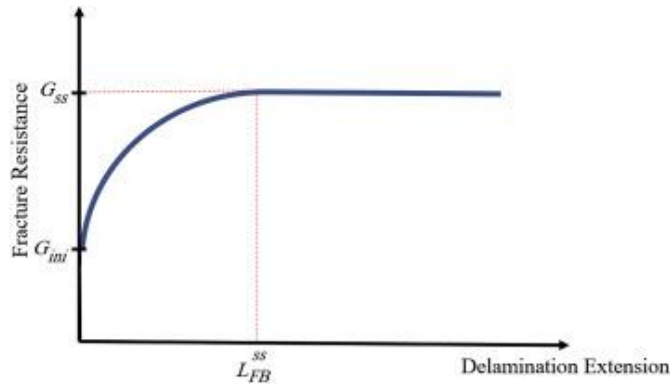


Figura 147- Curva R típica de um compósito [113]

Após obter os dados dos ensaios dos provetes DCB, é realizado o tratamento de dados através de folha de cálculo. O principal objetivo consiste no cálculo da taxa de libertação de energia em modo I (G_{Ic}). Para tal, são utilizados três métodos:

- *Compliance Based Beam Method* (CBBM);
- *Compliance Calibration Method* (CCM);
- *Corrected Beam Theory* (CBT).

O primeiro método, o CBBM, tem como base o comprimento de fenda equivalente, a_{eq} . Esta variável pode ser calculada pela equação:

$$G_{Ic} = \frac{6P^2}{B^2t} \left(\frac{2a_{eq}^2}{t^2E_f} + \frac{1}{5G} \right) \quad (16)$$

Sendo E_f o módulo de flexão equivalente, que pode ser calculado por:

$$E_f = \left(C_0 - \frac{12(a_0 + |\Delta|)}{5B \times t \times G} \right)^{-1} \times \frac{8(a_0 + |\Delta|)}{B \times t^3} \quad (17)$$

Em que C_0 corresponde à flexibilidade inicial. O comprimento de fenda equivalente, a_{eq} , é obtido através de:

$$a_{eq} = a + |\Delta| + \Delta_{aZPF} \quad (18)$$

O parâmetro Δ_{aZPF} corresponde à medição de a na zona de processo de fratura (ZPF) que corresponde à zona de extremidade da fenda. No cálculo de G_{Ic} substitui-se a pelo a_{eq} . Através do método CCM, obtém-se a taxa de libertação de energia em modo I a partir da equação:

$$G_I = \frac{P^2}{2B} \times \frac{d(C)}{d(a)} \quad (19)$$

sendo que C corresponde à flexibilidade do material e é dado pela equação:

$$C = \frac{\delta}{P} \quad (20)$$

Desenvolvimento

em que δ é o deslocamento e P corresponde à carga. A equação pode ser desenvolvida até obter a equação final:

$$G_I = \frac{P^2}{2B} \times (C_3 a^3 + C_2 a^2 + C_1 a + C_0) \quad (21)$$

Os coeficientes são obtidos através de uma regressão polinomial de grau 3 resultante do gráfico que relaciona C com a .

No método CBT, a equação que permite obter o G_{Ic} é dada por:

$$G_I = \frac{3P\delta}{2B(a + |\Delta|)} \quad (22)$$

em que Δ corresponde a um fator de correção de rotação e deslocamentos que ocorrem na frente da abertura da fenda. Este é obtido através da regressão linear da curva que relaciona C com a . A flexibilidade é calculada através de

$$C = \frac{\delta}{P} = \frac{2a^3}{3EI} \quad (23)$$

Como a área de secção dos provetes DCB é retangular, então C pode ser calculado pela fórmula:

$$C = \frac{8a^3}{BEh^3} \quad (24)$$

Resultados obtidos

De acordo com a morfologia dos provetes DCB e com o procedimento de ensaio seguido, é esperado que a rotura dos provetes se dê através do afastamento das duas faces dos provetes. Uma vez que a constituição das quatro placas é diferente, o tipo de rotura ocorrido nos provetes correspondentes a cada uma destas também se verificou ser. Nos provetes da placa 1, é possível visualizar, através da Figura 148 e da Figura 149, que ocorreu uma perfeita separação dos provetes em duas partes, em que a rotura seguiu a direção estabelecida pela pré-fenda.



Figura 148- Provete DCB da placa 1 após ensaio



Figura 149- Demonstração da uniformidade de rotura dos provetes DCB da placa 1

Nos provetes da placa 2, a rotura não se propagou no comprimento total do provete e apenas avançou alguns milímetros em relação à pré-fenda, como se mostra na Figura 150 e Figura 151.



Figura 150- Provette DCB da placa 2 após ensaio



Figura 151- Visão geral dos provetes DCB da placa 2 após os ensaios

Nos provetes das placas 3 e 4, o comportamento nos ensaios de fratura em modo I foi muito semelhante. Assim como já foi referenciado anteriormente, estes provetes são reforçados com partículas poliméricas que posteriormente são interligadas através de uma matriz (resina). Deste modo, existe probabilidade de existirem microfissuras nos provetes. Estes tornam-se pontos de fácil rotura e propícios para a propagação da fenda. Na Figura 152 e na Figura 153 é possível verificar que a fenda se dirigiu para uma das laterais dos provetes e não seguiu uma trajetória uniforme, ou seja, houve uma reduzida propagação de fenda. O mesmo fenómeno aconteceu nos provetes da placa 4, como demonstrado na Figura 154.



Figura 152- Pormenorização da rotura de um provete DCB da placa 3



Figura 153- Visão geral dos provetes DCB da placa 3 após ensaios



Figura 154- Provete DCB da placa 4 após ensaio

Discussão de resultados

Assim como foi referido anteriormente, os valores de P e δ são obtidos diretamente do *software* da máquina de ensaios. A partir destes valores foram realizados os gráficos que relacionam estes dois parâmetros, surgindo assim as curvas P - δ dos provetes das quatro placas em estudo. Estas curvas podem ser vistas nas Figura 155, Figura 156, Figura 157 e Figura 158.

Apesar de terem sido fabricados sete provetes a partir de cada uma das quatro placas, alguns destes provetes foram considerados estar fora do padrão e, deste modo, não foram considerados para a análise de dados final. Através de uma análise geral das curvas P - δ verifica-se uma grande diferença entre os valores de força máximos das placas 1 e 2, comparativamente aos das placas 3 e 4. Estes eram resultados já esperados dadas as características distintas derivadas da morfologia das placas. Na placa 1, o comportamento dos provetes considera-se normal, apesar de existirem variações do valor de P num efeito de escada. Este facto está relacionado com as pontes de fibras, durante a propagação de fenda, cuja rotura conduz a um alívio das tensões momentâneo com um posterior aumento da resistência do material. Na placa 2, o comportamento dos provetes assemelha-se aos da placa 1 numa primeira fase. Já nos provetes relativos às placas 3 e 4, nota-se claramente a existência de uma rotura repentina e a variação da força exercida é mais linear até ao momento de rotura dos provetes.

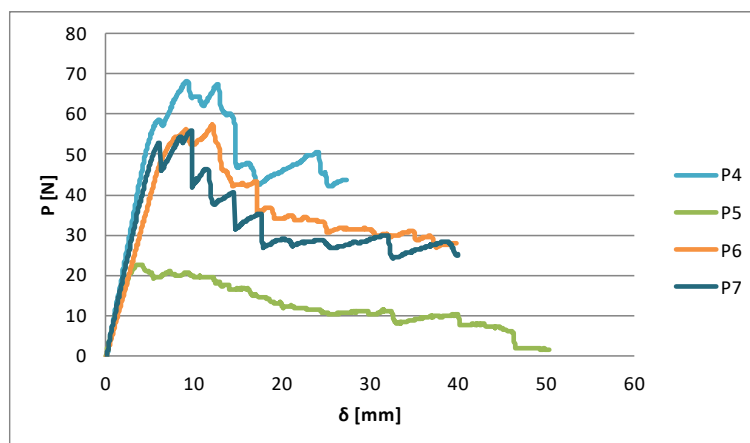


Figura 155- Curvas P - δ dos provetes da placa 1

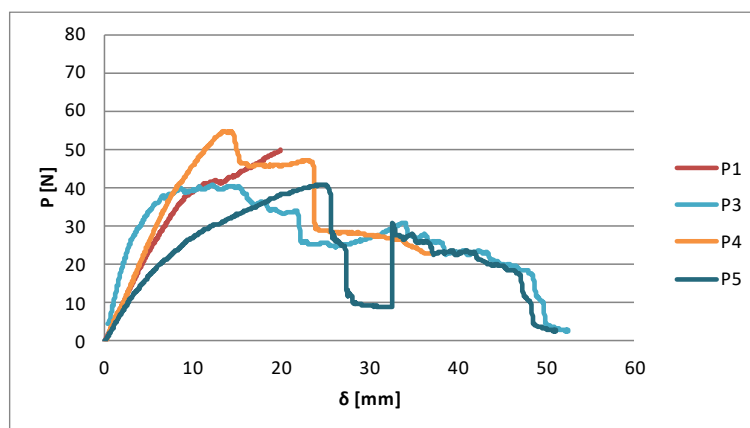
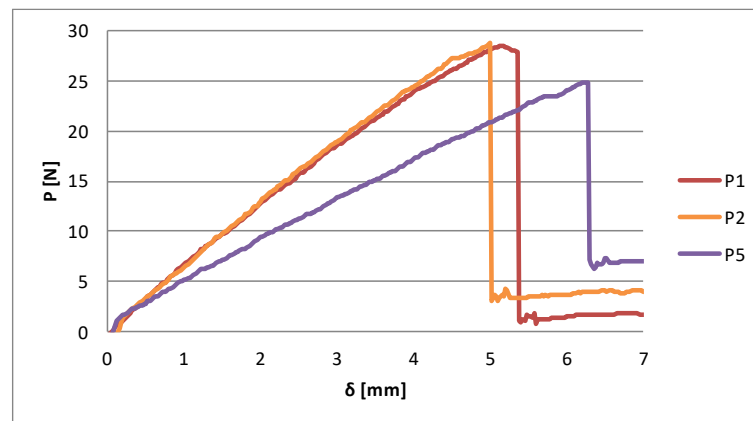
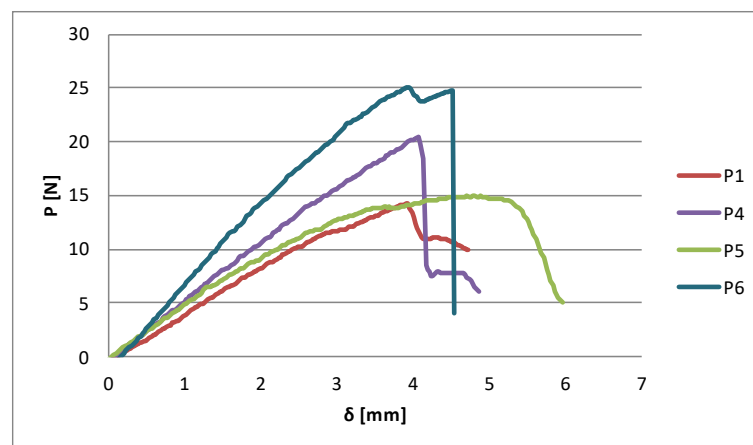


Figura 156- Curvas P - δ dos provetes da placa 2

Figura 157- Curvas $P-\delta$ dos provetes da placa 3Figura 158- Curvas $P-\delta$ dos provetes da placa 4

Para determinar as propriedades à fratura, nomeadamente o G_{Ic} , foram utilizados os métodos CBBM, CCM e CBT. Para tal, são obtidas as curvas R de cada provete. As curvas R relacionam a taxa de libertação de energia com a . Para determinar o valor de G_{Ic} é feita a média dos valores de estabilização da curva R, ou seja, quando se verifica visualmente no gráfico que existe um patamar de estabilização dos valores de G_{Ic} num certo intervalo de a . As curvas R obtidas através dos três métodos de caracterização à fratura foram sobrepostas no mesmo gráfico. Num cenário ideal, espera-se que o comportamento das curvas seja idêntico, assim como se pode visualizar na Figura 159, correspondente à placa 1. Neste gráfico é fácil identificar o patamar de estabilização da curva R, a partir de a ou a_{eq} de 55 mm, ao qual corresponde um G_{Ic} de cerca de 1,3 N/mm.

Nos provetes das placas 2, 3 e 4, não existe uma semelhança das curvas R tão evidente através dos três métodos. Isto deve-se ao facto de ocorrer uma rotura mais precoce e repentina dos provetes que apresentam menor resistência à fratura, dadas as características do compósito. Na Figura 160, correspondente ao provete 1 da placa 2, verifica-se uma disparidade dos valores obtidos pelo método CBBM relativamente aos outros dois métodos.

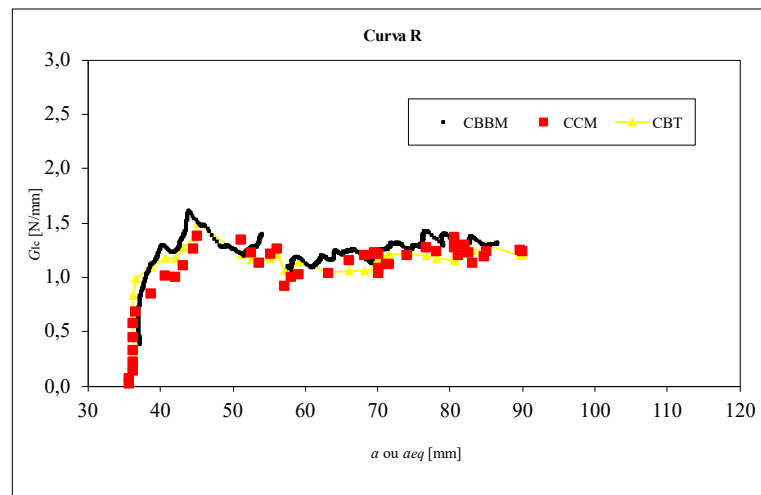


Figura 159- Curva R do provete 6 da placa 1

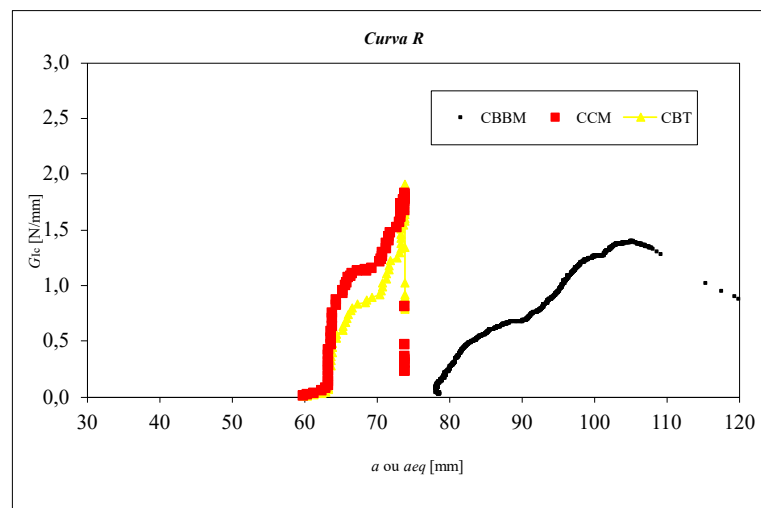


Figura 160- Curva R do provete 1 da placa 2

Na Tabela 15 encontram-se resumidos os valores de G_{IC} obtidos através dos três métodos (CCM, CBT e CBBM) dos provetes da placa 1. Nesta tabela é também apresentada a média, o desvio-padrão e o coeficiente de variação, que são elementos importantes na análise dos dados. No caso da placa 1, percebe-se que os valores obtidos para cada provete são bastante próximos nos três métodos.

Tabela 15- G_{IC} dos provetes da placa 1

G_{IC} [N/mm]			
Proвете	CCM	CBT	CBBM
P4	1,5477	1,3828	1,3909
P5	1,3932	1,4230	1,3028
P6	1,2049	1,2307	1,3355
P7	1,1383	1,1125	1,1252
Média	1,3210	1,2873	1,2886
Desvio-padrão	0,16086	0,12380	0,09947
CV (%)	12,18	9,62	7,72

Para os provetes das placas 2, 3 e 4 foi utilizada a mesma metodologia para a apresentação dos resultados obtidos e estes encontram-se expostos nas Tabela 16, Tabela 17 e Tabela 18, respetivamente.

Tabela 16- G_{Ic} dos provetes da placa 2

G_{Ic} [N/mm]			
Provete	CCM	CBT	CBBM
P1	1,2794	1,2689	1,3218
P3	1,4724	1,0549	1,1011
P4	1,3905	1,3181	1,3062
P5	1,1774	1,1713	1,1670
Média	1,3299	1,2033	1,2240
Desvio-padrão	0,11155	0,10067	0,09309
CV (%)	8,39	8,37	7,61

Tabela 17- G_{Ic} dos provetes da placa 3

G_{Ic} [N/mm]			
Provete	CCM	CBT	CBBM
P1	0,1767	0,1680	0,1939
P2	0,1547	0,1531	0,1747
P5	0,1975	0,1894	0,2179
Média	0,1322	0,1702	0,1955
Desvio-padrão	0,01748	0,01491	0,01768
CV (%)	13,22	8,76	9,04

Tabela 18- G_{Ic} dos provetes da placa 4

G_{Ic} [N/mm]			
Provete	CCM	CBT	CBBM
P1	0,0903	0,0795	0,0873
P4	0,0917	0,0783	0,0985
P5	0,1178	0,0950	0,0784
P6	0,1153	0,1122	0,1270
Média	0,1038	0,0912	0,0978
Desvio-padrão	0,01282	0,01377	0,01829
CV (%)	12,35	15,09	18,70

Com vista a uma análise mais detalhada por tipo de placa e por método de caracterização à fratura utilizado, apresentam-se os gráficos comparativos na Figura 161, Figura 162 e Figura 163, que representam os valores médios de G_{Ic} das quatro placas, obtidos através dos três métodos. É desde logo perceptível que existe uma grande semelhança nos valores obtidos através dos diferentes métodos. Outra observação que importa realçar é a decadência de propriedades desde a placa 1 até à placa 4, assim como era esperada uma vez que a placa 1 e 2 apenas são constituídas por fibra de vidro e pela matriz termoplástica enquanto as placas 3 e 4 são reforçadas com partículas de PA e PP, respetivamente. Nota-se que existe uma pequena

perda de resistência à fratura em modo I da placa 1 para a placa 2. Este facto associa-se à diferente morfologia das placas. A placa 1 dispõe de um empilhamento uniforme de camadas enquanto a placa 2 apresenta fibras de vidro cortadas aleatoriamente como reforço intermédio do compósito. Contudo, uma vez que as diferenças não são muito exageradas, pode concluir-se que existem bons indicadores para o aproveitamento das fibras que são normalmente desperdiçadas.

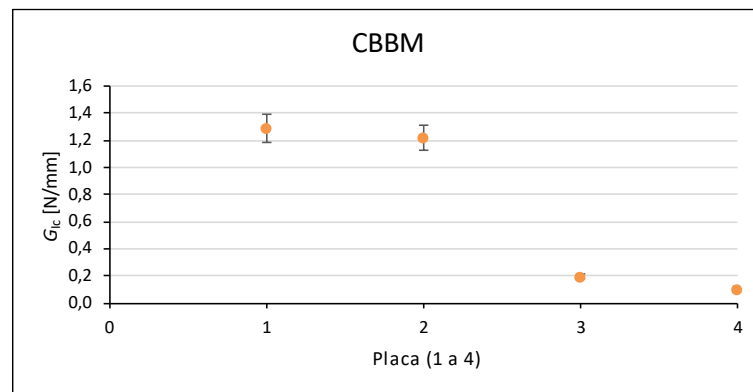


Figura 161- Médias de G_{Ic} obtidas pelo método CBBM

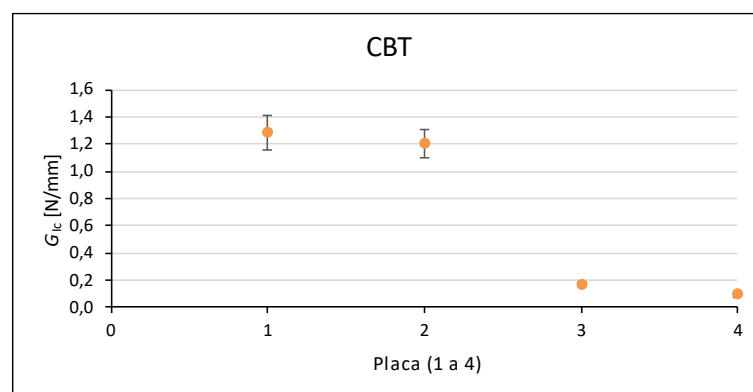


Figura 162- Médias de G_{Ic} obtidas pelo método CBT

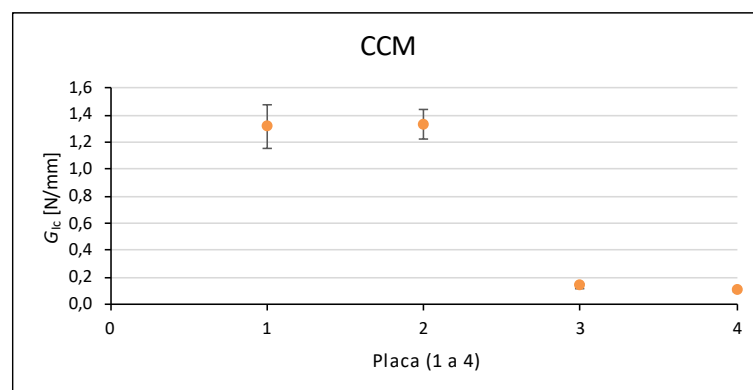


Figura 163- Médias de G_{Ic} obtidas pelo método CCM

3.5.4. Ensaios de fratura em modo II (ENF)

Caraterização do ensaio ENF e normas associadas

Assim como foi referido na revisão bibliográfica, o ensaio ENF é o ensaio mais utilizado para caraterizar provetes compósitos em modo II, devido à simplicidade do ensaio. Nestes testes pretende-se obter o valor de G_{IIc} através de diferentes modelos analíticos. O ensaio ENF assemelha-se a um ensaio de flexão em três pontos, mas neste ensaio a fratura inicia-se na extremidade do provete que contém a pré-fenda criada no processo de produção das placas para os provetes DCB e ENF. A carga é aplicada exatamente a meio do provete, que se encontra apoiado em dois pontos equidistantes do centro e próximos às duas extremidades do mesmo. Assim como se pode visualizar na Figura 164, o provete deve ser colocado no centro dos dois apoios e, para tal, foram realizadas marcações a 15 mm de cada extremidade dos provetes de maneira a facilitar este alinhamento (Figura 165).

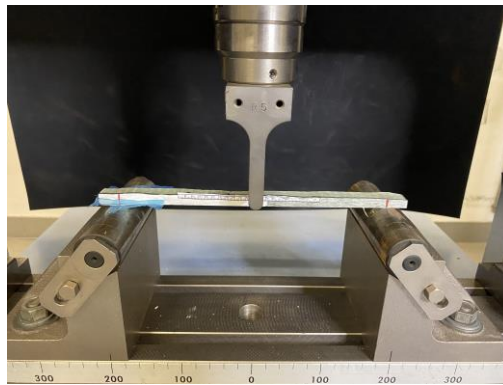


Figura 164 - Colocação do provete ENF nos apoios



Figura 165 - Marcação das linhas auxiliares de alinhamento dos provetes ENF no *setup*

Nos ensaios ENF, a propagação da fenda tende a ser instável e torna-se por vezes difícil acompanhar a evolução da mesma. Para tal, podem ser utilizados microscópios ou, através da colagem de uma escala milimétrica no provete e da utilização de uma câmara fotográfica, é possível acompanhar a propagação da fenda. O registo fotográfico deve ser efetuado em

Desenvolvimento

intervalos de tempo constantes. Estes ensaios foram realizados na mesma máquina que se utilizou para os últimos dois tipos de ensaios. Contudo, o *setup* de ensaio (Figura 166), assim como os componentes necessários para a montagem deste, são diferentes.



Figura 166 - *Setup* de ensaio ENF

É utilizada uma máquina fotográfica com elevada resolução para realizar a leitura de a durante o ensaio, a cada 5 segundos (Figura 167). Os restantes parâmetros, P e δ , são registados automaticamente pelo sistema da máquina de ensaios.

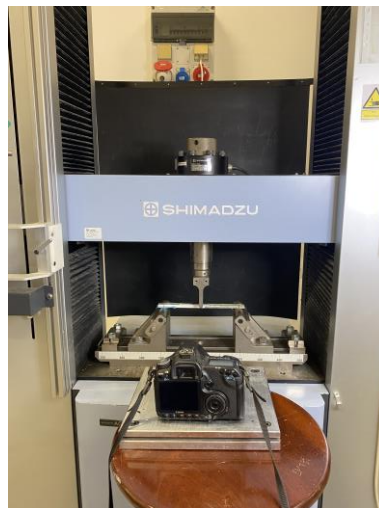


Figura 167 - Câmara fotográfica utilizada nos ensaios ENF

Para o tratamento dos dados obtidos nos ensaios e posteriores cálculos foram abordadas as seguintes metodologias:

- *Compliance Based Beam Method* (CBBM);
- *Compliance Calibration Method* (CCM);
- *Direct Beam Theory* (DBT);
- *Modified Beam Theory* (CBT).

O primeiro método, CBBM, baseia-se na flexibilidade do compósito. A taxa de libertação de energia, G_{IIc} , é obtido pela equação:

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

O comprimento equivalente de fenda, a_{eq} , é calculado por:

$$a_{eq} = a + \Delta_{aZPF} = \left[\frac{C_{corr} a_0^3}{C_{0corr}} + \frac{2}{3} \left(\frac{C_{corr}}{C_{0corr}} - 1 \right) L^3 \right]^{1/3} \quad (26)$$

A flexibilidade do material inicial, C_{0ocorr} , é obtida pela equação:

$$C_{0ocorr} = C_0 - \frac{3L}{10GBh} \quad (27)$$

A flexibilidade do material é dada por:

$$C = \frac{3a^3 + 2L^3}{8E_1 Bh} + \frac{3L}{10GBh} \quad (28)$$

em que:

$$E_f = \frac{3a_0^3 + 2L^3}{8Bh^3 C_{0ocorr}} \quad (29)$$

No método CCM, G_{IIc} é dado pela equação de Irwin-Kies:

$$G_{IIc} = \frac{P^2}{2B} \times \frac{d(C)}{d(a)} = \frac{3P^2 C_1 a^2}{2B} \quad (30)$$

Através do método DBT, G_{IIc} obtém-se pela equação:

$$G_{IIc} = \frac{9P^2 \delta a^2}{2B(2L^3 + 3a^3)} \quad (31)$$

sendo L metade do comprimento do provete ENF.

O último método utilizado para calcular G_{IIc} , o CBT, define o cálculo de G_{IIc} pela equação:

$$G_{IIc} = \frac{9(a + 0.42\Delta_I)^2 P^2}{16B^2 h^3 E} \quad (32)$$

em que Δ_I corresponde ao fator de correção do comprimento da fenda e pode ser obtido através de:

$$\Delta_I = h \sqrt{\frac{E}{11G_{II}} \left[3 - 2 \left(\frac{\Gamma}{1+\Gamma} \right)^2 \right]} \quad (33)$$

$$\Gamma = 1,18 \frac{\sqrt{E_x E_y}}{G} \quad (34)$$

Resultados obtidos

Depois de realizar os ensaios, foi feita uma análise visual aos provetes que permitiu uma avaliação qualitativa sobre o comportamento dos quatro tipos de provetes testados. Deste modo, observou-se que existem semelhanças entre o comportamento dos provetes DCB e dos provetes ENF nos dois tipos de ensaios de fratura. Como se pode verificar através da Figura 168 e da Figura 169, durante os ensaios de fratura em modo II nos provetes correspondentes às placas 1 e 2, a rotura dos mesmos seguiu a trajetória definida pela pré-fenda. Tal comportamento já se havia verificado nos ensaios de fratura em modo I para os provetes destas duas placas.

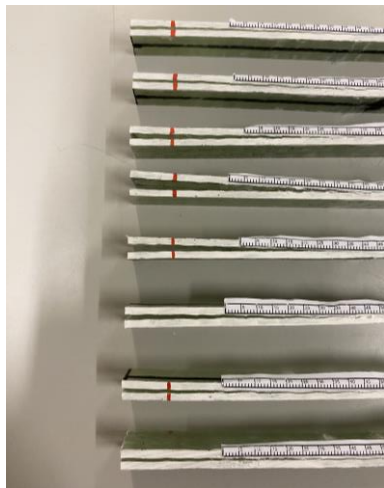


Figura 168- Provete ENF da placa 1 após ensaios Figura 169- Provete ENF da placa 2 após ensaios

Nos provetes ENF correspondentes às placas 3 e 4, voltou a verificar-se a fuga da fenda do meio dos provetes que contém as partículas de PA ou PP para uma das laterais dos provetes, até a mesma estabilizar na zona que contém as duas camadas de fibra de vidro. Tal efeito é perceptível através da Figura 170 e da Figura 171. Contudo, existe um pequeno comprimento que permite estimar G_{IIC} .

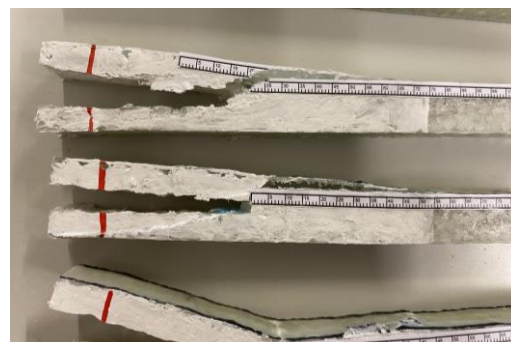
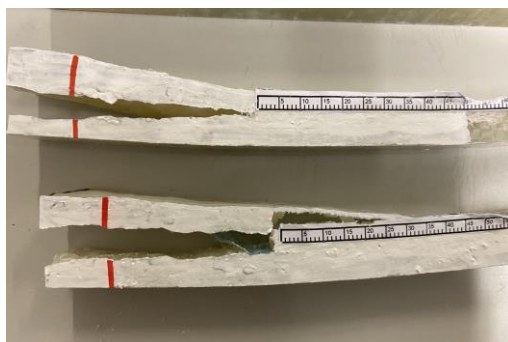


Figura 170- Provete ENF da placa 3 após ensaios Figura 171- Provete ENF da placa 4 após ensaios

Discussão de resultados

À semelhança do procedimento seguido para os provetes DCB, para os provetes ENF também foram obtidas as curvas $P-\delta$. A Figura 172, Figura 173, Figura 174 e Figura 175 correspondem às curvas da placa 1, 2 3 e 4, respetivamente. Estas curvas mostram que o deslocamento é superior nos provetes das placas 1 e 2 ensaiados relativamente aos provetes das placas 3 e 4. Verifica-se novamente uma proximidade nos valores finais de deslocamento nos provetes das placas 1 e 2 e entre os provetes das placas 3 e 4.

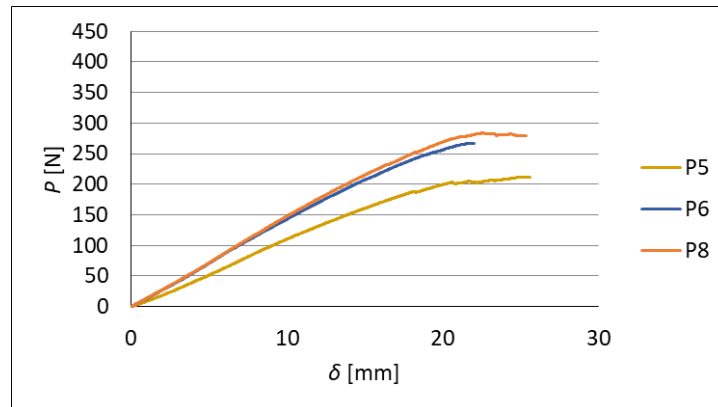


Figura 172- Curvas $P-\delta$ dos provetes da placa 1 à fratura em modo II

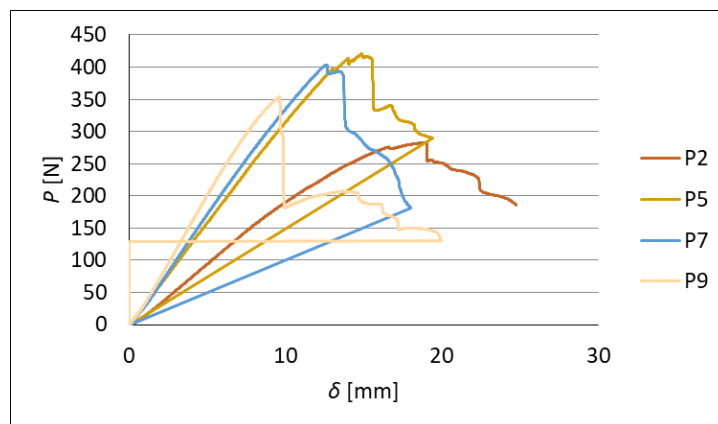


Figura 173- Curvas $P-\delta$ dos provetes da placa 2 à fratura em modo II

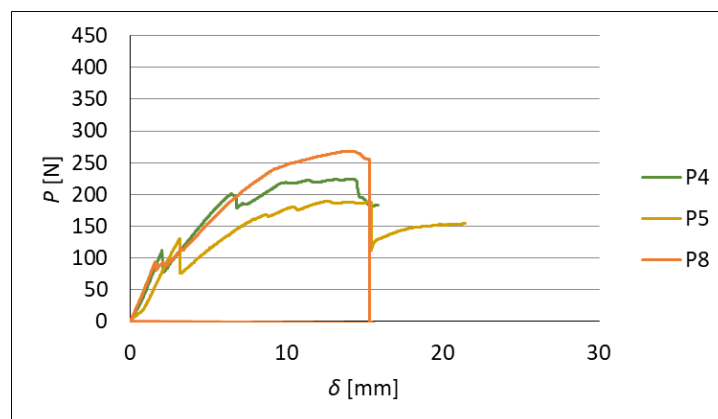


Figura 174- Curvas $P-\delta$ dos provetes da placa 3 à fratura em modo II

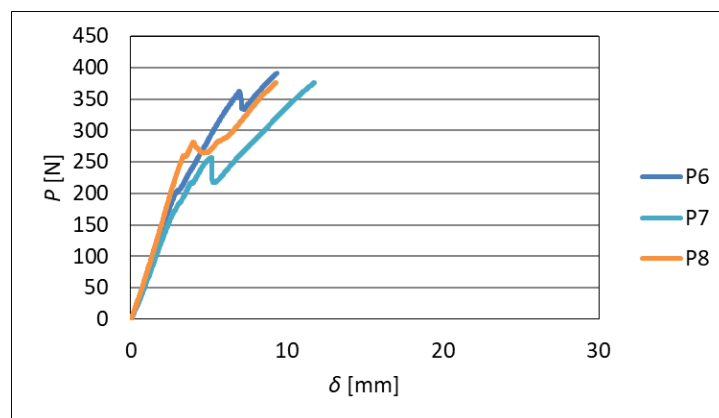


Figura 175- Curvas $P-\delta$ dos provetes da placa 4 à fratura em modo II

No tratamento de dados dos ensaios de fratura em modo II, foram utilizados quatro métodos diferentes – CCBM, CCM, CBT e DBT. A obtenção das curvas R segue a mesma metodologia utilizada para os provetes DCB. De seguida, são apresentados em tabelas separadas por placa, os resultados de G_{IIC} . Foram selecionados os provetes que apresentaram os resultados mais consistentes. Através da análise da Tabela 19, Tabela 20, Tabela 21 e Tabela 22, pode verificar-se uniformidade nos resultados para cada placa e estes estão de acordo com o que era esperado. Constata-se uma redução notória de G_{IIC} nas placas 3 e 4, em relação às placas 1 e 2. Contudo, em modo II nota-se uma maior diferença entre os provetes testados da placa 3 e da placa 4, tendo em conta as diferenças verificadas em modo I. Na placa 1, obteve-se um G_{IIC} de aproximadamente 3 N/mm. Na placa 2, o G_{IIC} é cerca de 2,6 N/mm, e nas placas 3 e 4 os valores de G_{IIC} descem para a ordem de 1,3 N/mm e 0,5 N/mm, respetivamente.

Tabela 19- G_{IIC} dos provetes da placa 1

G_{IIC} [N/mm]				
Proвете	CCM	CBT	DBT	CCBM
5	2,2633	2,9142	3,1739	2,8056
6	2,4439	2,7966	3,5723	3,2049
8	2,5768	3,1694	3,4117	3,6300
Média	2,9136	2,9601	3,3860	3,2135
Desvio-padrão	0,1285	0,1556	0,1637	0,3366
CV (%)	4,41	5,26	4,83	10,48

Tabela 20- G_{IIC} dos provetes da placa 2

G_{IIC} [N/mm]				
Proвете	CCM	CBT	DBT	CCBM
2	2,7491	2,3462	2,7084	2,9314
5	3,2600	2,4099	3,0261	3,3132
7	2,4819	2,4790	2,2830	2,4902
9	2,4039	2,4078	2,3841	2,4564
Média	2,7237	2,4107	2,6004	2,7978
Desvio-padrão	0,3351	0,0470	0,2917	0,3517
CV (%)	12,30	1,95	11,22	12,57

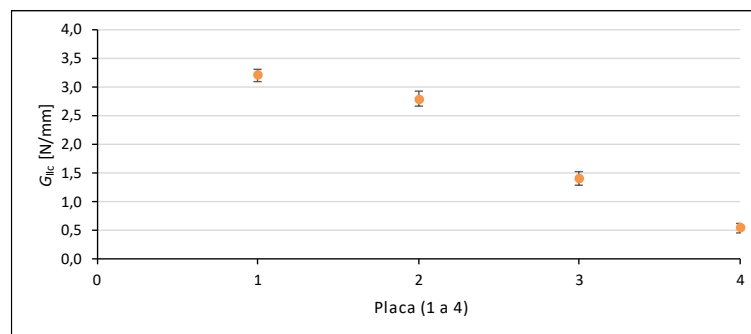
Tabela 21- G_{IIc} dos provetes da placa 3

G_{IIc} [N/mm]				
Provete	CCM	CBT	DBT	CBBM
4	1,3868	1,3862	1,4611	1,4655
5	1,1536	0,9918	1,0326	1,1912
8	1,5831	1,4644	1,5072	1,5763
Média	1,3745	1,2808	1,3337	1,4110
Desvio-padrão	0,1755	0,2068	0,2137	0,1619
CV (%)	12,77	16,15	16,02	11,47

Tabela 22- G_{IIc} dos provetes da placa 4

G_{IIc} [N/mm]				
Provete	CCM	CBT	DBT	CBBM
6	0,5096	0,4749	0,4567	0,4841
7	0,5641	0,5361	0,5478	0,5799
8	0,5867	0,5759	0,5759	0,5784
Média	0,5535	0,5290	0,5268	0,5475
Desvio-padrão	0,0324	0,0415	0,0509	0,0448
CV (%)	5,85	7,85	9,66	8,19

Seguindo a mesma forma de apresentação de resultados dos ensaios de fratura em modo I, foi realizada uma análise mais detalhada por tipo de placa e por método de caracterização à fratura utilizado, através dos gráficos da Figura 176, Figura 177, Figura 178 e Figura 179. Verifica-se novamente uma descida acentuada de G_{IIc} entre os provetes testados das placas 1 e 2 e das placas 3 e 4. Importa referir novamente a proximidade das propriedades entre a placa 1 e 2, que constitui um bom indicador para a reutilização das partículas que advêm da reciclagem da fibra de vidro. Relativamente às partículas de PA e PP, constata-se que não são bons reforços para aplicações com a mesma exigência em que é normalmente utilizada a fibra de vidro.

Figura 176- Médias de G_{IIc} obtidas pelo método CBBM

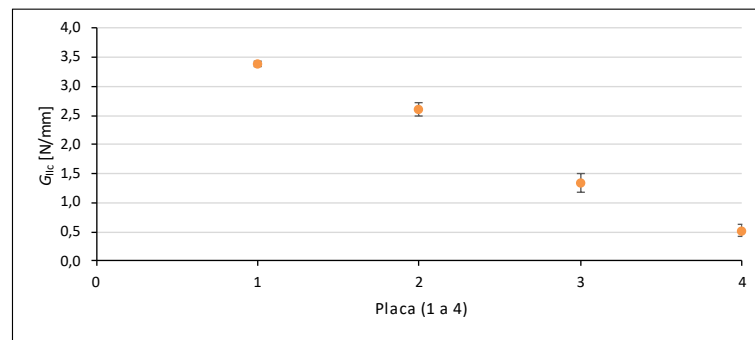


Figura 177- Médias de G_{IIc} obtidas pelo método DBT

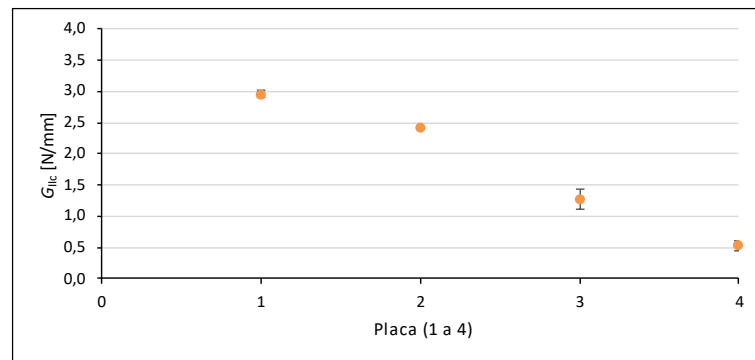


Figura 178- Médias de G_{IIc} obtidas pelo método CBT

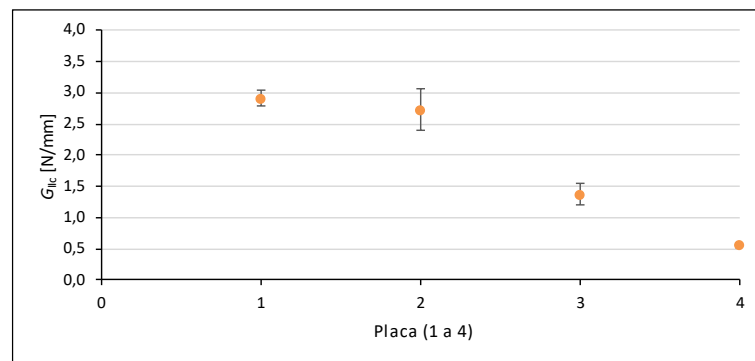


Figura 179- Médias de G_{IIc} obtidas pelo método CCM

3.6. Estudo de viabilidade

O objetivo deste capítulo é a realização de um estudo sobre a viabilidade do processo de reciclagem e reutilização dos compósitos reforçados com fibra de vidro, ao invés de utilizar compósitos novos, a nível económico e de características mecânicas

O tecido de fibra de vidro *roving* do tipo E biaxial utilizado para a produção das placas tem uma gramagem de aproximadamente 700 g/m², tendo em conta as medições realizadas na produção das mesmas. De acordo com alguns sites consultados, os tecidos de fibra de vidro com estas características apresentam um custo aproximado de 10€/m². Deste modo, a Tabela 23 relaciona a quantidade de tecido de fibra de vidro utilizada em cada placa com o custo o mesmo.

Tabela 23- Apresentação dos custos em FV das quatro placas

Placa	Nº camadas de FV	Área total de FV [m ²]	Custo total em FV (€)
1	12	1,08	10,80
2	4	0,36	3,60
3	4	0,36	3,60
4	4	0,36	3,60

Por outro lado, as quantidades de resina e endurecedor utilizadas foram as mesmas para o fabrico das quatro placas. O custo da resina *SikaBiresin CR83* é de 16,95 €/kg e o endurecedor *SikaBiresin CH83-6* tem um custo de 22,60 €/kg. Contudo, estes valores não são relevantes para a comparação de custos de fabrico entre as quatro placas, uma vez que as quantidades utilizadas foram as mesmas em todas. As restantes camadas que foram utilizadas para a infusão a vácuo, assim como os restantes consumíveis como desmoldante ou fitas, são desprezáveis neste estudo porque a quantidade destes utilizada para o fabrico das quatro placas foi exatamente a mesma. Deste modo, os custos das quatro placas diferenciam-se na quantidade de tecido de fibra de vidro utilizada e no custo dos materiais que foram utilizados para reforçar os compósitos. De acordo com a Tabela 24, que relaciona o custo em tecido de fibra de vidro de cada placa compósita com as propriedades obtidas, pode concluir-se que a placa 4 é a menos eficiente economicamente relativamente às propriedades mecânicas que possui. A placa 2, pelos cálculos finais efetuados, é a placa compósita mais rentável. Lembra-se que esta é composta por partículas de fibra de vidro que são aproveitadas do fabrico e do corte dos materiais novos. Ou seja, este material, que normalmente é desperdiçado, tem imensa utilidade para aplicações que solicitem esforços de tração e corte e resistência à fratura.

Tabela 24- Relação custo-propriedades das quatro placas

Placa	Tração	BS	ENF modo I	ENFmodo II	Custo total em FV
Nº	E [MPa]	G [MPa]	G _{Ic} [N/mm]	G _{IIc} [N/mm]	(€)
1	23896,33	2433,23	1,289	3,214	10,80
2	14449,95	781,30	1,224	2,798	3,60
3	3846,46	893,97	0,196	1,411	3,60
4	2615,25	199,28	0,098	0,548	3,60
Relação custo/propriedades					
1	0,000452	0,004439	8,378588	3,360822	11,74
2	0,000249	0,004608	2,941176	0,777161	3,72
3	0,000936	0,004027	18,367347	2,551382	20,92
4	0,001377	0,018065	36,734694	6,575342	43,33

O tamanho e o peso das pás das turbinas eólicas podem variar bastante, dependendo dos materiais utilizados e do seu *design*. Neste estudo de viabilidade, é analisada uma pá da turbina eólica do modelo E82, produzida pela *Enercom*. A massa total desta turbina eólica é aproximadamente 300 toneladas e tem 110 m de altura. As pás deste modelo têm aproximadamente 40 m de comprimento e uma massa de 7 toneladas. Considera-se que aproximadamente 50% da massa de uma pá eólica corresponde à massa de fibra de vidro [96]. os dados para o estudo do custo de uma pá eólica com estas características são:

Desenvolvimento

- Quantidade de fibra de vidro: 3500 kg;
- Espessura do tecido de fibra de vidro: 1 mm;
- Densidade da fibra de vidro do tipo E: $2,54 \text{ g/cm}^3 = 2540 \text{ kg/m}^3$;
- Massa de 1 m^2 de tecido: 2,54 kg;
- Custo do tecido de fibra de vidro/ m^2 : 10 €/m²;
- Custo do tecido de fibra de vidro/kg da placa 1: 25,40 €.
- Custo do tecido de fibra de vidro/kg da placa 2: 6,35 €.

Através dos dados apresentados, é possível estimar os custos em fibra de vidro para a produção de uma pá eólica em que o compósito de fibra de vidro utilizado tivesse a morfologia das placas 1 e 2, que são as mais relevantes nesta fase final do estudo.

Considerando que para a placa 1 a massa total de fibra de vidro corresponde a 3500 kg, uma vez que este compósito é constituído apenas por fibra de vidro nova, então o custo total em fibra de vidro da placa 1 é: $3500 \text{ kg} \times 25,40 \text{ €}$, que perfaz um total de 88900 €.

Na placa 2, considerando que esta apenas necessita de um quarto da área e consequentemente de massa do total de fibra que é utilizada na placa 1, então uma pá eólica com as características mencionadas, utilizando partículas recicladas de tecido de fibra de vidro como reforço, tem um custo total de 22225 €, ou seja, $3500 \text{ kg} \times 6,35 \text{ €}$. Trata-se de uma poupança significativa e que tem um papel importante no desenvolvimento sustentável na área da energia eólica.

4. Conclusão

Neste último capítulo pretende-se apresentar as conclusões referentes ao desenvolvimento da presente dissertação, referir as limitações associadas ao mesmo e sugerir trabalhos futuros que possam complementar o tema deste estudo

4.1. Conclusões finais

O principal objetivo da presente dissertação consiste na avaliação da resistência mecânica e à fratura de materiais compósitos reciclados através de ensaios de tração, corte e fratura, e o estudo da viabilidade da reciclagem e reutilização dos materiais que os constituem.

Nos ensaios de tração, os provetes da placa 1 diferenciam-se dos provetes das outras três placas, quando se analisam os valores de módulo de elasticidade (E) obtidos. Os provetes da placa 1 apresentam um E médio 40 % superior à média de E dos provetes da placa 2, 83 % superior ao E médio da placa 3 e 89 % superior ao da placa 4. Conclui-se que, à tração, os provetes da placa 2 têm um comportamento bastante aceitável, considerando que são utilizadas as partículas do tecido de fibra de vidro recicladas.

Nos ensaios ao corte, os provetes da placa 2 voltam a destacar-se, uma vez que o valor de tensão ao corte máxima ($T_{\text{máx}}$) destes provetes apresenta um valor médio muito próximo, inclusive 3 % superior, ao valor médio dos provetes da placa 1. Contudo, os provetes da placa 3 apresentam uma tensão de corte máxima média ligeiramente superior aos provetes das placas 1 e 2. Relativamente ao módulo ao corte (G), nos provetes da placa 1 é bastante superior aos restantes, principalmente quando comparado com o dos provetes das placas 4 (12,2 vezes inferior ao da placa 1).

Os ensaios de fratura em modo I revelaram existir uma proximidade das propriedades de resistência à fratura entre os provetes das placas 1 e 2 (G_{Ic} médio da placa 1 apenas 5 % superior ao da placa 2). Já os provetes das placas 3 e 4 apresentaram na sua generalidade, um comportamento frágil através das roturas repentinas dos provetes. Foi possível perceber que a abertura de fenda é mais rápida numa fase inicial em que esta segue um percurso na camada de PA ou PP. Quando a fenda se propaga para a parte superior ou inferior dos provetes, zonas que contêm duas camadas de tecido de fibra de vidro, a velocidade de propagação desta diminui. Ou seja, é possível atribuir a resistência à fratura à fibra de vidro e concluir que a utilização das partículas de PA ou PP não é indicada para aplicações que requerem esforços de fratura em modo I.

Conclusão

Nos ensaios de fratura em modo II, os resultados seguem a mesma lógica dos resultados obtidos nos ensaios de fratura em modo II. O G_{IIc} médio dos provetes da placa 1 é 13 %, 56 % e 83 % superior aos valores médios de G_{IIc} das placas 2, 3 e 4, respetivamente. Ou seja, o reforço dos compósitos com partículas de PA e PP não é uma boa opção quando se pretendem obter compósitos com resistência à fratura.

Tendo em conta um desenvolvimento sustentável de compósitos e os resultados experimentais obtidos, pode concluir-se que a placa 2 reforçada com uma camada intermédia de partículas recicladas de fibra de vidro foi a que apresentou um maior equilíbrio entre as propriedades mecânicas que apresenta e os custos em material da mesma, uma vez que o custo em fibra de vidro para produzir uma placa com as características mencionadas com compósito da placa 2 é aproximadamente um quarto do custo da pá no caso desta ser constituída pelo compósito da placa 1.

4.2. Trabalhos futuros

De modo a complementar o estudo das propriedades mecânicas dos quatro tipos de placas compósitas fabricadas, seria pertinente realizar ensaios de fadiga para perceber o comportamento destes materiais em esforços mais dinâmicos. Outra sugestão de trabalho futuro passa por modelar numericamente os provetes dos quatro tipos de ensaios e comparar as propriedades mecânicas obtidas experimentalmente com as obtidas numericamente. Para além destas, o estudo poderia ser complementado com o desenvolvimento de um protótipo de uma pá eólica, incluindo o dimensionamento de ligações e a normalização do processo.

Referências

1. Marcelo F.S.F. de Moura, A.B.d.M., António G. de Magalhães, *Materiais Compósitos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*. 2 ed., Porto, Portugal: Publindústria. 369.
2. Zanatta, R. *Materiais Compósitos na Aviação*. Os materiais que prometem reduzir o peso e o consumo das aeronaves modernas 2012 [cited 2023 24 de maio de 2012]; Available from: <http://www.aviacao.org/article/materiais-compositos/>.
3. Motorpasión. *El mundo premium de BMW también a pedales*. 2020 20 de maio de 2020 [cited 2023; Available from: <https://www.motorpasion.com/bmw/bicicleta-bmw-3t-2021>.
4. 33, B.H. *A era dos compósitos na fabricação das aeronaves*. 2015 11 de fevereiro de 2015 [cited 2023; Available from: <http://blog.hangar33.com.br/a-era-dos-compositos-na-fabricacao-das-aeronaves/>.
5. Shishir Sinha, G.L.D., *Natural Fiber Composites_ Processing, Characterization, Applications, and Advancements*. 2022, Boca Raton, Florida, United States: CRC Press. 388.
6. World, C.C. www.compositesworld.com/articles/natural-fiber-composites-gaining-traction-in-automotive. 2016.
7. Group, B. *Pressclub Portugal article*. BMW i Ventures invests in high-performance composites made from natural fibres 2022 05 de abril de 2022 [cited 2022; Available from: <https://www.press.bmwgroup.com/portugal/article/detail/T0379114PT/bmw-i-ventures-invests-in-high-performance-composites-made-from-natural-fibres?language=pt>.
8. Geeks, G.f. *Tipos de Fibras Sintéticas*. 2021 14 de julho de 2021 [cited 2022; Available from: <https://www.geeksforgeeks.org/types-of-synthetic-fibers/>.
9. Sanjay Mavinkere Rangappa, D.K.R., Suchart Siengchin, *Natural and Synthetic Fiber Reinforced Composites_ Synthesis, Properties and Applications*. 2022, Weinheim, Germany: Wiley - VCH. 363.
10. World, C. *A fabricação de fibra de vidro*. A velha arte por trás do primeiro reforço de fibra desta indústria é explicada, com insights sobre a nova ciência da fibra e desenvolvimentos futuros. 2020 30 de junho de 2020 [cited 2023; Available from: <https://www.compositesworld.com/articles/the-making-of-glass-fiber>.
11. Kiron, M.I. *Fibra de Vidro: Tipos, Propriedades, Processo de Fabricação e Usos*. 2012 [cited 2024; Available from: <https://textilelearner.net/glass-fiber-types-properties/>.
12. <https://www.thematerialsworld.com/2021/03/03/what-is-glass-fiber-and-its-applications/>.
13. International, B.S. *Benetti constrói primeiro barco combinando fibra de vidro e alumínio*. 2015 03 de junho de 2015; Available from: <https://www.boatshopping.com.br/boat/boat-international/benetti-fibra-de-vidro-e-aluminio/>.
14. Lebrão, G.W., *Fibra de Carbono*. Revista Plástico Sul, 2008.
15. Hamann, R. *Fibra de Carbono*. Como é feito e como funciona este material incrível 2017 31 de março de 2017 [cited 2023; Available from: <https://www.tecmundo.com.br/quimica/76017-fibra-carbono-feito-funciona-material-incrivel.htm>.

Referências

16. *Grafite fiado aramida fibra embalagem*. SUNWELL P303 [cited 2023; Available from: <https://www.sunwellseals.com/aramid-fiber-packing/graphite-spun-aramid-fiber-packing.html>].
17. Laboratory, O.R.N. *Instalação de Tecnologia de Fibra de Carbono*. [cited 2023; Available from: <https://www.ornl.gov/facility/cftf>].
18. Lemond, G. *LeMond Composites licenses ORNL low-cost carbon fiber manufacturing process; transportation, renewable energy, & infrastructure*. 2016; Available from: <https://www.greencarcongress.com/2016/08/20160830-lemond.html>.
19. Web, K. *O Processo de Fabricação do Kevlar*. 2016 outubro de 2016; Available from: <https://kevlarweb.wordpress.com/the-manufacturing-process-of-kevlar/>.
20. Naik, S., R.D. Dandagwhal, and P. Kumar Loharkar, *A review on various aspects of Kevlar composites used in ballistic applications*. Materials Today: Proceedings, 2020. **21**: p. 1366-1374.
21. Lopes, V., *Estudo numérico e experimental da adesão de SMC e prepreg*. 2018, Vitor Lopes: Instituto Superior de Engenharia do Porto.
22. Composites, C. *Tecido de aramida*. [cited 2023; Available from: <https://www.castrocompositesshop.com/pt/fibras-de-refor%C3%A7o/1227-215-g-m2-tecido-de-aramida-carbono-sarja-2-2.html>].
23. Uline. *Kevlar® PVC Dot Knit Luvas Resistentes ao Corte*. [cited 2023; Available from: <https://www.uline.com/Product/Detail/S-9866X/Cut-Resistant-Gloves/Kevlar-PVC-Dot-Knit-Cut-Resistant-Gloves-XL>].
24. Store, S. *Colete Balístico Nível II KEVLAR XP*. Available from: <https://safestore.com.br/produto/colete-balistico-nivel-ii-kevlar-xp/>.
25. Milani, C., *Influência da incorporação de resíduos de policarbonato em compósitos de fibra de vidro/poliéster*. 2015, Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Porto Alegre, Brasil.
26. Solutions, D.B. *Policarbonato na Construção Civil*. [cited 2023; Available from: <https://www.buildingwithchemistry.org/building-future/materials-science/polycarbonate/>].
27. *Novas Tendências No Consumo De Plásticos Na Indústria Automotiva Quais Materiais Serão Os Vencedores E Perdedores?* [cited 2023 28-04-2023]; Available from: <http://adapt.mx/plastics-in-the-automotive-industry-which-materials-will-be-the-winners-and-losers/>.
28. Giessen, A. *Resina de Poliéster*. O que é Resina de Poli ou Resina de Fibra de Vidro? 2021 [cited 2023 19/12/2022]; Available from: <https://acrylgiessen.com/en/polyester-resin/>.
29. M. Davallo, H.P., M. Mohseni, *Mechanical Properties of Unsaturated Polyester Resin*. International Journal of ChemTech Research, 2010: p. 6.
30. *Resina de Poliéster*. Resinas de poliéster insaturado são uma família de produtos baseados na reação (esterificação) de ácidos dicarboxílicos insaturados e saturados (ou seus anidridos) com vários dióis (glicóis) 2016 [cited 2023; Available from: <https://www.sciencedirect.com/topics/chemical-engineering/polyester-resin>].
31. G. Pires, D.S.P., N.L. Dias Filho, G.D. Vecchia, *Caracterização Físico-Química e Mecânica do Sistema Éster de Silsexquioxano/ Resina Epóxi Dgeba/ Dietilenotriamina* Revista Matéria, 2005. **10**: p. 14.
32. Devante. *Para que serve a resina epóxi?* [cited 2023; Available from: <https://kellystthoughtsonthings.com/what-is-epoxy-resin-used-for/>].
33. Bond, M. *O que é um adesivo epóxi?* [cited 2023; Available from: <https://www.masterbond.com/techtips/what-epoxy-adhesive>].

34. Made-in-China. *Resina fenol formaldeído CAS 9003-35-4 Resina fenólica alquil*. [cited 2023; Available from: <https://shuanghechemical.en.made-in-china.com/product/udzALivUqYrE/China-Phenol-Formaldehyde-Resin-CAS-9003-35-4-Alkyl-Phenolic-Resin-Spot-Selling.html>.
35. Raaj, S. *Tudo O Que Você Precisa Saber Sobre Materiais Compósitos*. 2022 12 de janeiro de 2022; Available from: <https://midwestcomposites.com.my/all-you-need-to-know-about-composites/>.
36. Industries, R. *Processo de moldagem por compressão de borracha: do início ao fim*. 2017 29 de maio de 2017 [cited 2023; Available from: <https://rpmindinc.com/rubber-compression-molding-process-from-start-to-finish/>.
37. Kopeliovich, D.D. *Moldagem por injeção de polímeros*. 2023 13 de dezembro de 2023 [cited 2023; Available from: https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=injection_molding_of_polymers.
38. Nagavally, R.R., *Composite materials-history, types, fabrication techniques, advantages, and applications*. Int. J. Mech. Prod. Eng, 2017. **5**(9): p. 82-87.
39. Buragohain, M.K., *Composite Structures-Design, Mechanics, Analysis, Manufacturing, and Testing-Taylor & Francis_CRC Press*. 2018, Oxfordshire, England: CRC Press.
40. Mathuw, R., et al., *Flow front measurements and model validation in the vacuum assisted resin transfer molding process*. Polymer composites, 2001. **22**(4): p. 477-490.
41. Rosato, D.V. and M.G. Rosato, *Injection molding handbook*. 2012: Springer Science & Business Media.
42. Wannasin, J. and M.C. Flemings, *Fabrication of metal matrix composites by a high-pressure centrifugal infiltration process*. Journal of Materials Processing Technology, 2005. **169**(2): p. 143-149.
43. B. Van Voorn, H.H.G.S., R.J. Sinke, B. de Klerk, *Natural Fibre Reinforced Sheet Moulding Compound*. Composites, 2001: p. 9.
44. Internacional, I.C. *Compostos de moldagem de chapas (SMC)*. Composto de moldagem de chapa oferece resistência superior e isolamento; Available from: <https://www.idicomposites.com/smc-bmc-overview.php>.
45. Materials, A.S.f.T.a., *ASTM D792 - 20, in Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement*. 2020, American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, United States. p. 6.
46. Korea Engineering Plastics Co, L., *ASTM Test Method*.
47. Instruments, G. https://www.gibitre.it/page_sin.php?ProdottoN=DensPc.
48. Materials, A.S.f.T.a., *ASTM D3171-22, in Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials*. 2022, American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, United States. p. 11.
49. Materials, A.S.f.T.a., *ASTM D2584 - 18, in Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins*. 2018, American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, United States. p. 3.
50. Group, P. <https://medium.com/@prestogroup/astm-d2584-and-astm-d5630-standard-test-methods-for-evaluating-the-inorganic-residues-16000bc8c5f6>. 2016.
51. Biopdi. <https://biopdi.com.br/artigos/ensaio-de-tracao/>.
52. Materials, A.S.f.T.a., *ASTM D3039/D3039M-08, in Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. 2014, American Society for Testing and Materials West Conshohocken, United States. p. 13.
53. Standards, B., *BS 2782-6, in Methods 620A to 620D: Determination of density and relative density of non-cellular plastics*. 2003, British Standards. p. 16.

Referências

54. Standardization, I.O.f., *ISO 527-1*, in *Plastics - Determination of tensile properties*. 2019, International Organization for Standardization. p. 26.
55. Materials, A.S.f.T.a., *ASTM D695-15*, in *Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics*. 2015, American Society for Thesting and Materials: West Conshohocken, United States. p. 8.
56. Materials, A.S.f.T.a., *ASTM D3410/ D3410M-16*, in *Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading*. 2016, American Society for Thesting and Materials: West Conshohocken, United States. p. 17.
57. Instron. *ASTM D3410 - Measuring the Compressive Strength of Polymer Matrix Composites*. [cited 2023; Available from: <https://www.instron.com/pt-br/testing-solutions/astm-standards/astm-d3410>].
58. FEUP, P.C.-. *Ensaaios mecânicos em materiais compósitos*. [cited 2023; Available from: <https://web.fe.up.pt/~stpinho/teaching/feup/y0506/Capitulo7.pdf>].
59. Materials, A.S.f.T.a., *ASTM D5379/D5379M-19*, in *Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method*. 2019, American Society for Thesting and Materials: West Conshohocken, United States. p. 14.
60. David E. Walrath, D.F.A., *Verification and Application of the Iosipescu Shear Thest Method*. 1984, University of Wyoming: NASA- Langley Research Center, Hampton, Virginia, United States.
61. Zhang, S., *Further Study on the Modified Twist-Plate Shear Method Based on Comparison Data From Experiments and Finite Elements*. 2019, University of Minnesota.
62. Materials, A.S.f.T.a., *ASTM D4255/ D4255-20*, in *In-Plane Shear Properties of Polymer Matrix Composite Materials by the Rail Shear Method*. 2020, American Society for Thesting and Materials: West Conshohocken, United States. p. 14.
63. Jung, W. and J.-S. Hwang, *An Investigation on the Nonlinear Shear Behavior of FRP Composites Considering Temperature Variation and Fabricating Parameters*. Journal of The Korean Society of Civil Engineers, 2013. **33**.
64. Materials, A.S.f.T.a., *ASTM D 7078/D 7078M - 05*, in *Standard Thest Method for Shear Properties of Composite Materials by V-Notched Rail Shear Method*. 2005, American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, United States. p. 15.
65. Karny, M., *Determination of In-Plane Shear Properties of Laminate with V-Notch Rail Shear Test and Digital Image Correlation*. Transactions on Aerospace Research, 2019. **2019(3)**: p. 57-65.
66. Materials, A.S.f.T.a., *ASTM D790-17*, in *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*. 2017, American Society for Thesting and Materials: West Conshohocken, United States. p. 12.
67. Tec-Science. *Ensaio de flexão*. 2018 13 de julho de 2018 [cited 2023; Available from: <https://www.tec-science.com/material-science/material-testing/bending-flexural-test/>].
68. MTS. *Luminárias de curva de 3 pontos*. [cited 2023; Available from: <https://www.mts.com/en/products/materials/fixtures/3-point-bend-fixtures>].
69. Materials, A.S.f.T.a., *ASTM D6272*, in *Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials by Four-Point Bending*. 2020, American Society for Testing and Materials: Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials by Four-Point Bending.
70. Measurement, C.F. <https://cscforce.com/product/mark-10-3-point-4-point-bend-fixtures-q1095-q1096-q1097/>.

71. Baharvand, A. *FEM analysis of a Mode III fracture mechanics test specimens for cohesive law determination of fibre composite*. 2018.
72. Floros, I.S., K.I. Tserpes, and T. Löbel, *Mode-I, mode-II and mixed-mode I+II fracture behavior of composite bonded joints: Experimental characterization and numerical simulation*. Composites Part B: Engineering, 2015. **78**: p. 459-468.
73. Materials, A.S.f.T.a., *ASTM D5528-13, in Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites*. 2022. p. 13.
74. Sankar, B.V. <https://www.researchgate.net/figure/The-standard-DCB-test-method-fig8-238413306>. 2001 julho de 2021 15/12/2022]; Available from: <https://www.researchgate.net/figure/The-standard-DCB-test-method-fig8-238413306>.
75. Madras, I.I.o.T. <https://publications.iitm.ac.in/publication/influence-of-fibre-orientation-and-stacking-sequence-on-petalling>. 2007 15/12/2022].
76. R. Martin, M.E.R.L., *Fatigue in Composites*. Composites Science and Engineering, 2014: p. 15.
77. Reeder, J.R. and J.H. Crews Jr, *Mixed-mode bending method for delamination testing*. AIAA Journal, 1990. **28**(7): p. 1270-1276.
78. Wang, B., et al., *Non-destructive testing and evaluation of composite materials/structures: A state-of-the-art review*. Advances in mechanical engineering, 2020. **12**(4): p. 1687814020913761.
79. Gupta, M., et al., *Advances in applications of Non-Destructive Testing (NDT): A review*. Advances in Materials and Processing Technologies, 2022. **8**(2): p. 2286-2307.
80. de Moura, M.F.S.F., J.P.M. Gonçalves, and M.V. Fernandez, *Fatigue/fracture characterization of composite bonded joints under mode I, mode II and mixed-mode I+II*. Composite Structures, 2016. **139**: p. 62-67.
81. Keerthi vasan, T., S.M. Shibi, and C.K. Tamilselvan, *Fabrication and testing of composite leaf spring using carbon, glass and aramid fiber*. Materials Today: Proceedings, 2020. **21**: p. 45-51.
82. Nunes, J.P., A.S. Pouzada, and C.A. Bernardo, *The use of a three-point support flexural test to predict the stiffness of anisotropic composite plates in bending*. Polymer Testing, 2002. **21**(1): p. 27-33.
83. Abdalla, F., et al., *Determination of volume fraction values of filament wound glass and carbon fiber reinforced composites*. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2008. **3**(4): p. 7-11.
84. Yang, Y., et al., *Recycling of composite materials*. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2012. **51**: p. 53-68.
85. Ribeiro, M., et al., *Recycling Approach towards Sustainability Advance of Composite Materials' Industry*. Recycling, 2016. **1**(1): p. 178-193.
86. Zhang, J., et al., *Current status of carbon fibre and carbon fibre composites recycling*. Composites Part B: Engineering, 2020. **193**: p. 108053.
87. Chen, J., J. Wang, and A. Ni, *Recycling and reuse of composite materials for wind turbine blades: An overview*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2019. **38**(12): p. 567-577.
88. Telub. *Turbinas eólicas*. 2022 12 de janeiro de 2022 16/12/2022]; Available from: <https://www.telub.com.br/blog/artigos-tecnicos/turbinas-eolicas>.
89. Pinna, M. *Mudam-se os ventos, mudam-se as vontades. Parques eólicos geram controvérsia na Europa*. 25 de junho de 2021 [cited 2023 16/12/2022]; Available from: <https://pt.euronews.com/my-europe/2021/06/25/mudam-se-os-ventos-mudam-se-as-vontades-parques-eolicos-geram-controversia-na-europa>.

Referências

90. Szpieg, M., M. Wysocki, and L.E. Asp, *Reuse of polymer materials and carbon fibres in novel engineering composite materials*. *Plastics, Rubber and Composites*, 2013. **38**(9-10): p. 419-425.
91. Pakdel, E., et al., *Recent progress in recycling carbon fibre reinforced composites and dry carbon fibre wastes*. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021. **166**: p. 105340.
92. Feraboli, P., et al., *Recyclability and reutilization of carbon fiber fabric/epoxy composites*. *Journal of Composite Materials*, 2011. **46**(12): p. 1459-1473.
93. Larsen, K., *Recycling wind turbine blades*. *Reinforced Plastics*, 2009: p. 4.
94. Euronews. *A reciclagem dos materiais compósitos na UE*. 2019 20/04/2023]; Available from: <https://pt.euronews.com/my-europe/2021/06/25/mudam-se-os-ventos-mudam-se-as-vontades-parques-eolicos-geram-controversia-na-europa>.
95. Lammer, H., et al., *Use Case 1: Mechanical Recycling of Short Fibers*, in *Systemic Circular Economy Solutions for Fiber Reinforced Composites*. 2023, Springer International Publishing Cham. p. 303-322.
96. Cousins, D.S., et al., *Recycling glass fiber thermoplastic composites from wind turbine blades*. *Journal of Cleaner Production*, 2019. **209**: p. 1252-1263.
97. Cai, G., et al., *Influence of treatment with superheated steam on tensile properties of carbon fiber*. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018. **107**: p. 555-560.
98. ams_jamesbakewell. *Rota de reciclagem para fibra de carbono*. 2016 05 de outubro de 2016 03/12/2022]; Available from: <https://www.automotivemanufacturingsolutions.com/rota-de-reciclagem-para-fibra-de-carbono/35346.article>.
99. World, C. <https://www.compositesworld.com/articles/thermoformable-composite-panels-part-1>. New water-borne, wet-application acrylic resin enables new opportunities in car interiors. 2006 23 de agosto de 2016 [cited 2022; Available from: <https://www.compositesworld.com/articles/thermoformable-composite-panels-part-1>.
100. Hockenos, P. *Waste to Energy – Polêmica geração de energia por incineração*. 2021 26 de maio de 2021 [cited 2023 03/12/2022]; Available from: <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/waste-energy-controversial-power-generation-incineration>.
101. Asmatulu E. , T.J., Overcash M., *Recycling of fiber-reinforced composites and direct structural composite recycling concept*. *Journal of Composite Materials*, 2014: p. 15.
102. Krauklis, A.E., et al., *Composite Material Recycling Technology—State-of-the-Art and Sustainable Development for the 2020s*. *Journal of Composites Science*, 2021. **5**(1): p. 28.
103. Pegoretti, A., *Towards sustainable structural composites: A review on the recycling of continuous-fiber-reinforced thermoplastics*. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 2021. **4**(2): p. 105-115.
104. Mamanpush, S.H., et al., *Recycled wind turbine blades as a feedstock for second generation composites*. *Waste Management*, 2018. **76**: p. 708-714.
105. Ikenaga, K., et al., *A new recycling process for recycled plastic production from glass fiber reinforced plastics*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018. **458**(1): p. 012034.
106. Mishnaevsky, L., et al., *Materials for Wind Turbine Blades: An Overview*. *Materials*, 2017. **10**(11): p. 1285.
107. Fonte, R. and G. Xydis, *Wind turbine blade recycling: An evaluation of the European market potential for recycled composite materials*. *Journal of Environmental Management*, 2021. **287**: p. 112269.

108. Brøndsted, P., H. Lilholt, and A. Lystrup, *COMPOSITE MATERIALS FOR WIND POWER TURBINE BLADES*. Annual Review of Materials Research, 2005. **35**(1): p. 505-538.
109. Xu, J. and Z. Lu. *Application of fiber-reinforced composites in wind turbine blades*. in *2010 World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference*. 2010.
110. Kiron, M.I. *Glass Fiber: Types, Properties, Manufacturing Process and Uses*. 2012 19 de setembro de 2022 [cited 2024; Available from: <https://textilelearner.net/glass-fiber-types-properties/>].
111. Jani, H.K., et al., *A brief review on recycling and reuse of wind turbine blade materials*. Materials Today: Proceedings, 2022.
112. Materials, A.S.f.T.a., *ASTM D4501-01*, in *Standard Test Method for Shear Strength of Adhesive Bonds Between Rigid Substrates by the Block-Shear Method*. 2014, American Society for Testing and Materials.
113. Ghadirdokht, A. and M. Heidari-Rarani, *Delamination R-curve behavior of curved composite laminates*. Composites Part B: Engineering, 2019. **175**: p. 107139.
114. Haynes, R., et al., *On plane stress and plane strain in classical lamination theory*. Composites Science and Technology, 2016. **127**: p. 20-27.
115. Campilho, R.D.S.G., *Método de Elementos Finitos: Ferramentas para Análise Estrutural*. 2012.
116. Curiel Sosa, J.L. and N. Karapurath, *Delamination modelling of GLARE using the extended finite element method*. Composites Science and Technology, 2012. **72**(7): p. 788-791.
117. Mohammadi, S., *Extended finite element method: for fracture analysis of structures*. 2008: John Wiley & Sons.
118. Belytschko, T. and T. Black, *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. International journal for numerical methods in engineering, 1999. **45**(5): p. 601-620.
119. Fernandes, R. and R. Campilho, *Testing different cohesive law shapes to predict damage growth in bonded joints loaded in pure tension*. The Journal of Adhesion, 2017. **93**(1-2): p. 57-76.
120. Pinho, S.T., *Crítérios de Rotura em Materiais Compósitos*. 2005. p. 24.
121. Hashin, Z., *Fatigue Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites*. 1980, Pennsylvania Univ Philadelphia Dept of Materials Science and Engineering.
122. Puck, A. and H. Schürmann, *Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models*. Composites science and technology, 2002. **62**(12-13): p. 1633-1662.
123. Orifici, A.C., I. Herszberg, and R.S. Thomson, *Review of methodologies for composite material modelling incorporating failure*. Composite structures, 2008. **86**(1-3): p. 194-210.
124. Hunt, C.J., et al., *A review of composite lattice structures*. Composite Structures, 2022. **284**: p. 115120.
125. Roeseler, W.G., et al. *Composite structures: the first 100 years*. in *16th International Conference on Composite Materials*. 2007. Japan Society for Composite Materials Kyoto, Japan.
126. Vassilopoulos, A.P., *Fatigue life prediction of composites and composite structures*. 2019.
127. Maio, L. and P. Fromme, *On ultrasound propagation in composite laminates: advances in numerical simulation*. Progress in Aerospace Sciences, 2022. **129**: p. 100791.
128. Bahl, S., *Numerical simulation of the debonding behavior of fiber reinforced metal matrix composites*. Materials Today: Proceedings, 2020. **28**: p. 1328-1334.

Referências

129. Ali, A., et al., *Experimental and numerical characterization of mechanical properties of carbon/jute fabric reinforced epoxy hybrid composites*. Journal of Mechanical Science and Technology, 2019. **33**(9): p. 4217-4226.
130. Meng, M., et al., *3D FEA modelling of laminated composites in bending and their failure mechanisms*. Composite Structures, 2015. **119**: p. 693-708.

Declaração de Integridade

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração.

Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim.

Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO.

João Miguel Alves Picado

ISEP, Porto, 13 de junho de 2024

Apêndice A

Técnicas de modelação

No último subcapítulo pretende-se abordar as duas diferentes técnicas de modelação, analítica e numérica, destacando alguns aspetos relevantes para a aplicação das mesmas. Também é feita uma demonstração dos critérios de rotura associados às técnicas de modelação, e é apresentada uma série de procedimentos necessários para realizar um projeto de estruturas compósitas.

Modelação analítica

Com vista à análise da deformação de componentes ou estruturas, pode recorrer-se à modelação analítica dos mesmos. O principal objetivo consiste em obter as tensões e deformações sofridas pelos elementos da estrutura em análise, que se deve encontrar em equilíbrio. O processo consiste na resolução de equações diferenciais ou integrais através de funções descontínuas em subdomínios.

A principal análise efetuada através da modelação analítica consiste na verificação dos deslocamentos dos nós das estruturas sujeitas a solicitações causadas por ações externas, sendo assim os deslocamentos as variáveis de campo desconhecidas. Um dos métodos mais viável e utilizado para a resolução de problemas estruturais que assumem os deslocamentos como variáveis de campo denomina-se de Método dos Deslocamentos. Através do recurso a este método, é necessário garantir a continuidade da ligação dos elementos em nós comuns, mesmo após a solicitação. A análise e consequente obtenção dos deslocamentos depende da geometria, propriedades dos materiais definidos, intensidade das cargas aplicadas, entre outros. Deste modo, as variáveis de campo têm de respeitar as equações de equilíbrio em todo o seu domínio e ainda satisfazer as condições fronteira. Através das equações resultantes das condições de equilíbrio é possível deduzir as equações expressas em funções dos deslocamentos nodais. Apesar de ser muito útil e interessante a utilização de uma modelação analítica para analisar o desempenho de um componente a certas solicitações, a maior limitação associada a este processo prende-se no facto que esta técnica de modelação apenas é viável para geometrias muito simples e que muito dificilmente se trata de problemas em contexto real. Deste modo, a modelação analítica pode ser aplicada a apenas simplificações de geometrias, o que leva a uma análise sem a exatidão pretendida.

Teoria Clássica dos Laminados

A Teoria Clássica dos Laminados (TCL) é um modelo analítico aplicado à modelação de placas compósitas e que pode ser generalizada para elementos de casca. Esta teoria foi desenvolvida por vários investigadores e baseia-se na Teoria de Placas de Kirchhoff para materiais isotrópicos e admite que o laminado é uma placa retangular relativamente fina, de espessura constante, sob estado plano de tensão (EPT). A TCL admite que as secções planas e normais ao plano médio da estrutura permanecem planas e normais ao plano médio após sofrer uma deformação [114]. A Teoria de Placas de Kirchhoff, na qual se baseia a TCL, estabelece relações entre as curvaturas da placa e os momentos fletores e torsores internos da mesma [1]. Estes momentos são gerados

por cargas transversais concentradas ou distribuídas e prevalecem sobre os esforços de corte transversal. Esta teoria admite que as tensões σ_z , T_{xz} , T_{yz} são desprezáveis relativamente às tensões σ_x , σ_y , T_{xy} . Consequentemente, as deformações ϵ_z , γ_{xz} e γ_{yz} também se podem desprezar em relação às deformações ϵ_x , ϵ_y e γ_{xy} . Deste modo, obtém-se o seguinte campo de deslocamentos:

$$u(x, y, z) = u_0 - z \frac{w}{x} \quad (35)$$

$$v(x, y, z) = v_0 - z \frac{w}{y} \quad (36)$$

$$w(x, y, z) = w_0 \quad (37)$$

sendo que u e v representam os deslocamentos no plano xy e w corresponde ao deslocamento na direção da espessura. Através das expressões, verifica-se que os deslocamentos variam linearmente ao longo da espessura da placa.

Teorias avançadas dos laminados

A TCL é o modelo mais utilizado, dada a sua simplicidade. Como referido anteriormente, esta teoria aplica-se apenas a placas finas. Deste modo, os custos associados ao modelo podem ser considerados relativamente baixos dada a espessura fina das placas, uma vez que estas requerem uma baixa quantidade de material compósito. Contudo, com o avanço das investigações na modelação analítica de compósitos, tem existido um aumento na utilização de placas laminadas espessas. Tendo em conta esta condição, a TCL deixa de ser aplicável a este tipo de laminados e torna-se importante recorrer a outras teorias mais elaboradas [1]. Uma vez que a espessura das placas é superior, a variação dos deslocamentos na direção do eixo z tem de ser considerada, ao contrário do caso de placas finas em que esta variação é considerada linear.

Modelação numérica

Método de elementos finitos

A modelação numérica através do recurso ao método de elementos finitos (MEF) é utilizada para inúmeras situações que envolvem diversas áreas de engenharia. A análise através de elementos consiste na utilização de *softwares* que se baseiam em operações matemáticas para realizar a análise, cálculo e o projeto de estruturas ou componentes. Para tal, foram desenvolvidos vários softwares de modelação numérica, entre os quais se podem destacar o *Solidworks*, *Ansys*, *Abaqus*, *Inventor*, entre outros. Tratam-se de programas com ótimas capacidades e por isso são utilizados diariamente por empresas ou em contexto académico em que é possível realizar o desenho e montagem de componentes, atribuir os materiais correspondentes a esses componentes de acordo com as propriedades mecânicas reais, definir o tipo de contacto entre os componentes, atribuir esforços de origem mecânica, térmica, deslocamentos ou esforços concentrados e visualizar resultados quando os componentes são sujeitos a esforços normais, flexão, torção, a cargas térmicas, entre outros. O MEF permite a

resolução de problemas que são demasiado complexos para serem resolvidos por via analítica [115].

Tendo como base o Método dos Deslocamentos, a análise de uma estrutura pelo MEF divide-se em três etapas principais que se denominam pré-processamento, processamento e pós-processamento. Na primeira etapa, o pré-processamento, a estrutura é dividida numa malha de elementos finitos. Um elemento finito consiste num subdomínio de dimensão inferior ao domínio de uma estrutura, sendo esse constituído por vários elementos finitos conectados entre si através dos nós comuns. Deste modo, importa definir o tipo de elemento que mais se adequa à estrutura em análise e tendo em conta o nível de exatidão com que se pretende obter os resultados. Outro parâmetro definido nesta etapa é o tamanho da malha, sendo que uma malha mais fina com maior número de elementos, em que os elementos são de menores dimensões, permite uma melhor caracterização da estrutura. Relativamente ao tipo de elementos, estes podem classificar-se em elementos unidimensionais, bidimensionais, tridimensionais, axisimétricos, de placa e casca. A Tabela 25 resume algumas especificações de cada tipo de elemento.

Tabela 25 - Tipos de elementos

Tipo de elemento	Especificações
Unidimensionais	Podem ser elementos de barra, viga ou estrutura; Área de secção bem definida; Usados para modelação de estruturas reticuladas articuladas ou contínuas.
Bidimensionais	Forma retangular ou triangular; Apenas considera carregamentos no seu plano (estado plano de tensão e estado plano de deformação);
Tridimensionais	Os mais comuns são elemento de quatro faces (tetraedro) ou de seis faces (hexaedro); Usados para análises tridimensionais de tensão;
Axisimétricos	Obtidos através da revolução em 360° de elementos bidimensionais sobre um eixo; Indicados para análise de estruturas simétricas em relação ao eixo de rotação.
Placa e casca	As placas têm espessura fina e apresentam flexão, deflexão transversa e rotação segundo dois eixos; As cascas são elementos com curvatura num ou dois eixos e de baixa espessura. Suportam esforços de membrana e esforços transversos de flexão.

Considera-se que a etapa do pré-processamento é a etapa mais importante na análise através do Método dos Deslocamentos, uma vez que é nessa fase que se definem os parâmetros que

influenciam todo o processo seguinte. Deste modo, é definida a geometria do problema assim como o tipo de elemento que se pretende usar, as suas propriedades geométricas e materiais. Posteriormente, ainda é necessário estabelecer o tipo de ligação entre os elementos, definir as condições fronteira e os carregamentos aplicados. Primeiramente, são definidas as variáveis nodais. Cada nó é identificado pelas forças e deslocamentos aplicados ao mesmo. Os deslocamentos de um elemento, constituído por dois ou mais nós, é definido pelo vetor de deslocamentos nodais, a_e . A partir deste, é obtido o vetor de deslocamentos no interior do elemento u_e , tendo em consideração as funções de interpolação N , definidas para cada nó.

$$u_e = Na_e \quad (38)$$

O vetor de deformações ε é definido em função da matriz de deformação B e das variáveis nodais a_e .

$$\varepsilon = Ba_e \quad (39)$$

Posteriormente, define-se o vetor de tensões σ em função do vetor de deformações ε e da matriz D que traduz as relações de tensão-deformação da Teoria da Elasticidade.

$$\sigma = D\varepsilon \quad (40)$$

A matriz de rigidez do elemento k_e , na sua forma simplificada, é definida pela expressão

$$k_e = \int_V B^T DB dV \quad (41)$$

A partir da matriz de rigidez do elemento k_e e do vetor de deslocamentos nodais a_e , obtém-se o vetor de forças nodais f_e .

$$f_e = k_e a_e \quad (42)$$

A segunda etapa, obtenção da solução, permite obter os deslocamentos dos nós através da resolução do sistema de equações global que engloba as matrizes de cada elemento. Habitualmente, recorre-se a *softwares* para executar os cálculos matriciais dada a complexidade dos sistemas. Deste modo, o *software* forma as equações algébricas a partir das matrizes de cada elemento. Através da resolução destas equações, obtêm-se os valores das variáveis de campo dos nós através da expressão

$$f_e = k_e u_e \quad (43)$$

ou, após a transformação de coordenadas

$$F_e = K_e A_e \quad (44)$$

Para obter o sistema global de equações de todo o elemento, contemplando todos os elementos finitos, utiliza-se a relação

$$R + F = KA \quad (45)$$

considerando que R corresponde ao vetor global das reações na estrutura, F representa o vetor das forças nodais, K é a matriz de rigidez global da estrutura e A consiste no vetor global das variáveis de campo.

Por último, no pós-processamento é realizada a análise dos resultados da simulação pelo MEF e feita uma avaliação crítica dos mesmos, de acordo com os critérios estabelecidos para cada projeto.

O MEF também pode ser combinado com técnicas da mecânica de fratura para a previsão da resistência, quer pelo fator de intensidade das tensões quer por abordagens energéticas como a técnica do fecho da fenda virtual (TFFV). Porém, estas técnicas de modelação dificultam o processo de avaliação do crescimento da fenda devido à necessidade de voltar a criar a malha na eventualidade da propagação da fenda, o que tem repercussão ao nível do esforço computacional [116]. Ao longo das últimas décadas a modelação numérica foi alvo de grandes avanços, sendo um deles a modelação de dano por MDC. Esta técnica acopla a modelação convencional por MEF para as regiões em que não é previsto dano com a mecânica de fratura, através da utilização de elementos coesivos para promover a propagação de fendas. Mais recentemente, começou-se a usar outra técnica para modelar o crescimento de fendas com uma tensão, o Método de Elementos Finitos eXtendido (MEFX), que utiliza funções de forma enriquecidas para representar um campo de deslocamento contínuo.

O MEFX é uma evolução recente do MEF, que permite a análise e modelação do crescimento do dano para previsão da fratura em estruturas. No MEFX, comparativamente com os MDC, deixa de ser necessário que a fenda siga um caminho pré-definido, o que constitui uma vantagem significativa. Assim, a fenda passa a poder propagar livremente no interior da estrutura sem que seja necessário que a malha coincida com a geometria das descontinuidades e sem a necessidade de refazer a malha na proximidade da fenda [117]. Belytschko e Black [118], no final dos anos 90, apresentaram as características fundamentais deste método, baseadas no conceito de partição de unidade, e que pode ser implementado no MEF pela introdução de funções de enriquecimento local para os deslocamentos perto extremidade da fenda, para permitir o crescimento e separação entre as faces da fenda [56]. Devido ao crescimento da fenda, a extremidade desta muda a sua posição e orientação continuamente, dependendo das condições de carga e da geometria da estrutura, e em simultâneo são criadas funções de enriquecimento necessárias para os pontos nodais dos elementos finitos na proximidade da extremidade da fenda. O MEFX considera inicialmente um comportamento linear elástico dos materiais, que é representado por uma matriz constitutiva elástica que relaciona tensões com as separações normais e de corte. O dano e a rotura são simulados pelo MEFX por critérios de iniciação de dano e leis de dano entre nós fantasmas e reais de elementos fraturados. Os critérios de iniciação de dano podem depender por exemplo das tensões principais máximas ou das deformações principais máximas, enquanto as leis tração-separação que simulam a degradação dos materiais até à fratura podem ser lineares ou exponenciais [119].

Critérios de rotura

O objetivo dos critérios de rotura é relacionar a resistência do material com o estado genérico da tensão-deformação devido a um carregamento multiaxial. Estes critérios são demonstrados

na forma de expressões matemáticas que se denominam funções do critério de rotura. Os critérios de rotura mais utilizados na indústria encontram-se divididos em duas classes [120]. A primeira classe engloba os critérios de rotura que consideram a natureza heterogênea do material e assumem a possibilidade de ocorrência dos modos de rotura individualmente. Deste modo, os critérios desta classe denominam-se critérios de rotura associados aos modos de rotura, nos quais se destacam o critério da tensão máxima e o critério da deformação máxima. A segunda classe caracteriza os critérios de rotura que não estão associados aos modos de rotura e aplicam-se quando o critério de rotura apenas pretende prever se existe ou não rotura e não especifica qual o modo de rotura associado à mesma, não permitindo desse modo a previsão dos efeitos de rotura nas propriedades mecânicas. Os critérios que mais se destacam e com maior aplicação são o critério de Tsai-Hill, o critério de Tsai-Wu, o critério de Hashin-Rotem e o critério de Puck-Schürmann.

Critério da tensão máxima

No critério de tensão máxima podem ser distinguidos cinco modos de falha que resultam da tensão excessiva a que os materiais são submetidos. Estes modos diferem entre si no tipo de esforço aplicado e na direção em que a tensão se desenvolve [39]. Os modos de falha são:

- Falha devido a tensão excessiva na direção 1;
- Falha devido a tensão de compressão excessiva na direção 1;
- Falha devido a tensão excessiva na direção 2;
- Falha devido a tensão de compressão excessiva na direção 2;
- Falha devido a tensão de corte excessiva no plano 1-2.

O critério considera que o provete em análise falha quando um dos modos de falha se verifica, ou seja, quando qualquer uma das tensões ultrapassa a resistência correspondente à mesma.

Critério da deformação máxima

O critério da deformação máxima é idêntico ao critério da tensão máxima. Para este critério são também identificados cinco modos de falha, também diferentes entre si no tipo de carregamento e na direção de desenvolvimento da tensão ao longo do provete em análise. Contudo, neste critério são comparadas as deformações com a resistência do provete à deformação. Os cinco modos de falha que são necessários analisar para verificar a segurança do material são:

- Falha devido a deformação excessiva na direção 1;
- Falha devido a deformação causada por compressão excessiva na direção 1;
- Falha devido a deformação excessiva na direção 2;
- Falha devido a deformação causada por compressão excessiva na direção 2;
- Falha devido a tensão de corte excessiva no plano 1-2.

Cr terio de Tsai-Hill

Ao contrário dos cr terios anteriores, o cr terio de Tsai-Hill considera a interação entre os diferentes modos de falha. Deste modo, este cr terio não trata as tensões ou as deformações de modo isolado mas tem em conta a soma das contribuições de cada modo de falha pode provocar nos materiais analisados [39].   considerado um cr terio de rotura interativo quadrático, uma vez que   um cr terio que se exprime em função das tensões sob a forma de polin mios de 2  grau [1]. O cr terio de Tsai-Hill baseia-se no cr terio de cedência de Von Mises para materiais isotrópicos. De acordo com o cr terio de Von Mises, um corpo falha quando a energia de distorção atinge um nível crítico ou quando esta atinge a energia de distorção de falha associada. Primeiramente, Hill baseou-se no cr terio de cedência de Von Mises para formular um cr terio de cedência plástica dos metais, adaptando este cr terio a materiais ortotrópicos. Posteriormente, Tsai complementou o cr terio de Hill com o objetivo de prever a falha de uma lâmina unidirecional e de modo a descrever a anisotropia resultante do encruamento. O cr terio de Tsai-Hill   expresso pela fórmula:

$$A(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + B(\sigma_3 - \sigma_1)^2 + C(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + 2D\tau_{23}^2 + 2E\tau_{13}^2 + 2F\tau_{12}^2 = 1 \quad (46)$$

sendo que as constantes A , B , C , D , E e F são determinadas através das tensões de cedência medidas em ensaios sob sollicitações uniaxiais.

Em situações de estado plano de tensão, o cr terio de Tsai-Hill pode ser adaptado, admitindo que $\sigma_{33} = 0$, $\tau_{31} = 0$, $\tau_{23} = 0$. Deste modo, para um estado plano de tensão, a expressão resume-se a:

$$\frac{\sigma_1^2}{\sigma_{u1}^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{\sigma_{u1}^2} + \frac{\sigma_2^2}{\sigma_{u2}^2} + \frac{\tau_{12}^2}{\tau_{u12}^2} = 1 \quad (47)$$

Contudo, através do cr terio de Tsai-Hill não   possível determinar o modo de falha associado   falha global da estrutura que se pretende analisar.

Cr terio de Tsai-Wu

O cr terio de Tsai-Wu compreende as limitações associadas ao cr terio de Tsai-Hill. Nos materiais metálicos, os estados de tensão hidrostáticos não provocam cedência plástica e, deste modo, são utilizados apenas termos quadráticos. Já os materiais compósitos unidirecionais podem sofrer rotura sob estados hidrostáticos. O cr terio de Tsai-Hill   apenas adequado para materiais metálicos e adaptado para materiais compósitos, enquanto o cr terio de Tsai-Wu engloba os materiais compósitos unidirecionais. Deste modo, a superfície de fratura   caracterizada pela expressão:

$$F_i\sigma_i + F_{ij}\sigma_i\sigma_j = 1 \quad (48)$$

Sendo que F_i e F_{ij} representam tensores da resistência a determinar experimentalmente. Considerando um estado plano de tensão, obt m-se a expressão seguinte do cr terio de Tsai-Wu, sendo possível verificar que neste cr terio são tidas em conta as diferentes resistências   tração e   compressão através da introdução dos termos σ_1 e σ_2 , ao contrário do que se verifica no cr terio Tsai-Hill, no qual não existe esta distinção,

$$F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 = 1 \quad (49)$$

Critério de Hashin-Rotem

O critério de Hashin-Rotem [121] foi desenvolvido com base na mesma equação polinomial de segundo grau que deu origem ao critério de Tsai-Wu:

$$F_i\sigma_i + F_{ij}\sigma_i\sigma_j = 1 \quad (50)$$

sendo que F_i e F_{ij} representam tensores da resistência a determinar experimentalmente.

Diferente do que acontece no critério de Tsai-Wu, o critério de Hashin-Rotem distingue quatro modos de rotura e, conseqüentemente, modifica a expressão geral de modo a adaptar a mesma a cada modo de rotura. Assim, distinguem-se expressões para a rotura das fibras em tração e compressão e rotura da matriz em tração e compressão. Importa destacar que, para a rotura das fibras em tração, são tidas em conta as contribuições de σ_1 , τ_{12} e τ_{13} , enquanto para a rotura das fibras em compressão apenas é considerado o efeito de σ_1 . Relativamente às expressões que caracterizam a rotura da matriz, tanto em tração como em compressão, σ_1 e σ_2 não são considerados. Deste modo, admitindo um estado plano de tensão, o critério de Hashin-Rotem resume-se às seguintes expressões:

$$\frac{\sigma_1^2}{\sigma_{ut1}^2} + \frac{\tau_{12}^2}{\tau_{u12}^2} = 1 \text{ (rotura das fibras em tração)} \quad (51)$$

$$\frac{\sigma_1^2}{\sigma_{uc1}^2} = 1 \text{ (rotura das fibras em compressão)} \quad (52)$$

$$\frac{\sigma_2^2}{\sigma_{ut2}^2} + \frac{\tau_{12}^2}{\tau_{u12}^2} = 1 \text{ (rotura da matriz em tração)} \quad (53)$$

$$\frac{\sigma_2^2}{\sigma_{uc2}^2} + \frac{\tau_{12}^2}{\tau_{u12}^2} = 1 \text{ (rotura da matriz em compressão)} \quad (54)$$

Critério de Puck-Schürmann

No seguimento do critério de Hashin-Rotem, Puck e Schürmann [122] desenvolveram com mais detalhe os modos de rotura das fibras à tração e compressão e a rotura da matriz à tração e compressão. Neste critério, as expressões para os quatro modos de rotura são expressas em função das deformações em virtude das tensões, acrescentando ainda coeficientes empíricos. As expressões para os quatro modos de rotura, de acordo com o critério de Puck-Schürmann, são as seguintes:

$$\frac{1}{\varepsilon_{ult}} + \left(\varepsilon_1 + \frac{\nu_{f12}}{E_{f1}} m_{\sigma_f} \sigma_2 \right) = 1 \text{ (rotura das fibras à tração)} \quad (55)$$

$$\frac{1}{\varepsilon_{u1c}} + \left[\left(\varepsilon_1 + \frac{\nu_{f12}}{E_{f1}} m_{\sigma f} \sigma_2 \right) \right] = 1 - (10\gamma_{12})^2 \text{ (rotura das fibras à compressão)} \quad (56)$$

sendo: ε_1 – Deformação de rotura na direção das fibras;

E_{f1} – Módulo de elasticidade longitudinal das fibras;

ν_{f12} – Coeficiente de Poisson das fibras.

$m_{\sigma f}$ – Coeficiente relacionado às diferenças entre os módulos de elasticidade de fibra e da matriz;

$(10\gamma_{12})^2$ – Correção empírica relativa à capacidade de o material resistir a tensões compressivas após a iniciação de fendas devido a tensões de corte.

Para as expressões dos modos de rotura da matriz apresentadas de seguida, este critério é expresso em função do estado de tensão do plano com inclinação α , no qual se desenvolve a superfície de fratura. Os coeficientes p e c são determinados experimentalmente. Os parâmetros R_n , R_{nt} , R_{nl} representam a resistência do material nas direções normal e tangenciais ao plano de fratura

$$c_2 \left(\frac{\sigma_n}{R_n} \right)^2 + c_1 \frac{\sigma_n}{R_n} + \left(\frac{\tau_{nt}}{R_{nt}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{nl}}{R_{nl}} \right)^2 = 1 \text{ (rotura da matriz à tração)} \quad (57)$$

$$\left(\frac{\tau_{nt}}{R_{nt} - p_{nt} \sigma_n} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{nl}}{R_{nl} - p_{nl} \sigma_n} \right)^2 = 1 \text{ (rotura da matriz à compressão)} \quad (58)$$

sendo que:

$$\sigma_n = \sigma_2 \cos(\alpha) \quad (59)$$

$$\tau_{nl} = -\sigma_2 \cos(\alpha) \sin(\alpha) \quad (60)$$

$$\tau_{nt} = \tau_{12} \cos(\alpha) \quad (61)$$

Projeto de estruturas compósitas

A utilização de materiais compósitos nas indústrias aeroespacial, aeronáutica, automóvel, entre outras, tem vindo a sofrer um grande desenvolvimento nas últimas décadas. Contudo, apesar de muitos anos de investigação sobre este tipo de materiais, não existe uma metodologia completa para prever o comportamento de estruturas compósitas, tendo em conta os efeitos de dano. No desenvolvimento de uma estrutura compósita existe uma série de parâmetros que têm de ser considerados para garantir o bom desempenho e a segurança da estrutura. Os parâmetros são a geometria da estrutura e das peças que constituem a mesma, os materiais de reforço e de matriz utilizados e as suas propriedades, as condições de carga que irão ser aplicadas na estrutura, o histórico de falhas baseadas em outras estruturas compósitas já produzidas e os modos de falha dos materiais compósitos [123]. Os materiais compósitos avançados são normalmente os materiais escolhidos quando se pretende construir uma

estrutura eficiente. A principal característica dos compósitos que permite maximizar a eficiência estrutural é o seu comportamento anisotrópico, que permite obter o máximo proveito das propriedades do compósito numa determinada direção [124]. A produção dos materiais compósitos avançados baseia-se no princípio básico da combinação de um material fibroso de elevada rigidez e elevada resistência a esforços de tração ou compressão, com uma matriz que tem a função de suportar as fibras e que é resistente à flexão [125]. Deste modo, dependendo dos materiais que são utilizados, existe uma grande flexibilidade no design e na produção dos compósitos. Através da combinação de um material em forma de fibras e da matriz sob a forma de pasta, é possível obter peças de formatos variados, mesmo que complexas, com a utilização das ferramentas adequadas para cada processo.

Os materiais compósitos e as respetivas estruturas compósitas sujeitos a carregamentos podem falhar devido à ação de cargas elevadas, mas resistir a cargas de baixa intensidade se os carregamentos forem de curta ou média duração. Por outro lado, a mesma estrutura compósita pode não resistir a cargas de baixa intensidade com elevada duração, ou seja, com um elevado número de ciclos [126]. Este fenómeno é denominado de fadiga e consiste na falha de um componente ou estrutura devido à aplicação de cargas cíclicas durante um longo período. A falha por fadiga tem início em descontinuidades geométricas ou materiais, e é causada por uma sequência de eventos cíclicos. A falha por fadiga divide-se em três fases: início de falha, propagação da falha e rotura final.

No projeto de uma estrutura compósita, a seleção do método de fabrico é o passo mais importante. Os principais aspetos que devem ser tidos em conta para realizar uma escolha adequada do processo de fabrico de uma estrutura compósita são [39]:

- Configuração da estrutura;
- Tamanho da estrutura;
- Requisitos estruturais pretendidos;
- Nível de acabamento das superfícies;
- Segurança da estrutura;
- Requisitos de produção;
- Repetibilidade do processo de produção;
- Ferramentas e equipamentos necessários;
- Mão de obra e qualificação da mesma;
- Automatização do processo;
- Tempo de produção da estrutura;
- Custo final da estrutura.

A configuração de uma estrutura compósita pode ser sólida ou oca, de paredes finas ou de paredes grossas, plana ou curva, axisimétrica ou não axisimétrica, entre outras configurações. De acordo com a configuração pretendida, realiza-se a escolha entre processos de molde aberto

ou processos de molde fechado. Para produzir peças com pequena ou média dimensão, são habitualmente usados os processos de moldação por compressão ou moldação por injeção. A pultrusão é um processo adequado para produzir peças com uma pequena área transversal constante. Pode optar-se pelo enrolamento filamentar para produzir peças desde pequena até grande dimensão, no qual o tamanho do mandril e o design do mesmo são parâmetros que se têm de adequar ao tamanho da peça pretendido.

Estado-da-arte

Neste capítulo pretende-se apresentar alguns estudos científicos relevantes sobre a utilização de técnicas de modelação (Tabela 26). Para cada trabalho científico, é realizado um resumo que contém o objetivo, os métodos de análise e as conclusões associadas aos mesmos.

Tabela 26 – Estado da arte de técnicas de modelação

Maio et al, [127]	Neste estudo, os autores focaram-se na necessidade de utilizar métodos para analisar laminados de compósitos. Deste modo, é abordada a utilização de ondas guiadas por ultrassom para efetuar uma avaliação não destrutiva e monitorização da integridade estrutural com particular destaque para laminados de compósitos reforçados com fibra de carbono. Os testes baseados em ultrassom são normalmente usados na indústria aeroespacial. Contudo, o comportamento anisotrópico dos compósitos de fibra de carbono, geometrias complexas e defeitos de geometria podem influenciar a propagação das ondas ultrassónicas. Neste estudo são identificados como defeitos mais comuns que ocorrem em compósitos de aplicação aeroespacial a delaminação, porosidade e microfissuração. Este artigo apresenta uma revisão de várias metodologias de simulação de ultrassons em compósitos reforçados com fibras, resumindo os estudos relevantes até ao ano em que o mesmo foi escrito, apresentando diferentes métodos e as respetivas aplicações.
Bahl, [128]	Neste estudo são construídos modelos de elementos finitos sólidos assimétricos e tridimensionais cilíndricos. Estes modelos consistem em fio de aço inoxidável como fibra de reforço e uma liga de alumínio como matriz. A simulação numérica é realizada com dois tipos de indentadores, esféricos e cilíndricos. Após os ensaios experimentais, os seus resultados são comparados os resultados da simulação numérica. Ao analisar as curvas de carga em função do deslocamento, conclui-se que a curva do indentador cilíndrico é linear, enquanto a curva correspondente ao indentador esférico apresenta um comportamento não linear. Esta diferença deve-se exclusivamente ao formato dos indentadores. De acordo com o autor, a modelação dos modelos e o coeficiente de atrito não afetam os resultados obtidos nas curvas. Nota-se uma grande lacuna entre as curvas experimentais e as de simulação numérica na região elástica das mesmas, devido à rigidez do <i>setup</i> dos ensaios experimentais. Relativamente à curva da simulação numérica, esta apresenta um aumento contínuo do valor da carga que se deve à ausência da definição do critério de falha.

Ali et al, [129]	Este estudo tem como principal objetivo investigar o comportamento à flexão de compósitos de epóxi reforçados com fibra de carbono e juta. Para tal, foram realizados ensaios experimentais e simulações numéricas das amostras. Através do método da queda de peso, a resposta ao impacto do compósito é caracterizada. Com a realização deste estudo, conclui-se que a resistência à flexão diminui consoante se aumenta a percentagem de fibra de juta. Comparando a simulação numérica com os ensaios experimentais percebe-se que os resultados da simulação numérica do comportamento à flexão divergem mais de 10% dos resultados experimentais. Isto deve-se à ondulação das fibras que provocam uma distribuição não homogênea das propriedades dos compósitos. Os testes da queda de peso mostraram que a severidade dos danos aumenta com o aumento percentual de fibra de juta.
Meng et al, [130]	Este artigo pretende investigar o efeito da disposição das fibras no início da falha em laminados compósitos quando sujeitos a flexão, através de uma análise tridimensional de elementos finitos. De modo a identificar as áreas de falha crítica utilizou-se o critério de Tsai-Hill. Foram testados três tipos de amostras: laminados unidirecionais [0,90]4s, laminados cruzados [0/90]4s, laminados com fibras orientadas a 45° [+45]4s. Os materiais utilizados foram compósitos pré-impregnados de fibra de carbono (CFRP). Os autores optaram por realizar ensaios de flexão em três pontos. Os princípios da TCL foram estendidos para três dimensões e a solução analítica foi comparada com os resultados da simulação numérica. Os resultados da modelação 3D revelaram que as tensões normais nos laminados cruzados [0,90]4s e as tensões de corte nos laminados com fibras orientadas a 45° são desprezadas pelo modelo nas regiões próximas de bordas livres. Através de análises microscópicas, provou-se que os efeitos de borda livre foram a principal razão para a redução da rigidez registada nos ensaios de flexão. Os autores sugerem o melhoramento do design dos laminados compósitos, uma vez que a orientação das fibras é um parâmetro determinante na resistência dos mesmos quando sujeitos a flexão.

Apêndice B

Tabela 27- Medidas dos provetes de tração

Provete	Larg. Méd.[mm]	Esp. Méd. [mm]	Área [mm ²]
1_1	15,40	4,67	71,92
1_2	14,87	4,72	70,17
1_3	13,87	4,75	65,85
1_4	15,47	4,68	72,45
1_5	15,26	4,58	69,86
1_6	15,46	4,70	72,71
1_7	15,33	4,77	73,16
2_1	13,35	6,70	89,47
2_2	13,21	6,42	84,81
2_3	13,31	7,51	99,91
2_4	12,55	6,62	83,02
2_5	13,21	6,58	86,86
2_6	13,40	7,23	96,95
2_7	13,43	7,07	94,93
3_1	15,74	11,2	176,96
3_2	15,18	10,6	160,16
3_3	15,01	10,8	161,42
3_4	15,69	9,5	148,43
3_5	15,63	11,1	173,72
3_6	15,24	11,2	169,94
3_7	15,40	11,0	169,90
4_1	17,46	14,06	245,50
4_2	16,73	13,34	223,23
4_3	14,19	13,54	192,04
4_4	18,02	14,19	255,64
4_5	17,29	13,68	236,57
4_6	17,32	13,49	233,63
4_7	17,15	13,87	237,92

Tabela 28- Medidas dos provetes BS

Provete	Overlap [mm]	Larg. méd. [mm]	Esp. Méd.[mm]	Área Sobreposição [mm ²]
1_1	11,55	14,26	3,10	164,70
1_2	11,54	15,59	3,09	179,91
1_3	11,25	16,07	3,12	180,83
1_4	9,23	15,45	3,17	142,60
1_5	10,88	15,22	3,14	165,59
1_6	13,02	15,33	3,08	199,60
1_7	12,50	16,39	3,16	204,88
1_8	13,06	15,55	2,99	203,04
2_1	8,37	12,01	3,58	100,55
2_2	6,52	12,00	3,18	78,24
2_3	8,04	13,49	3,36	108,43
2_4	10,08	13,12	3,19	132,22
2_5	8,22	10,74	2,96	88,31
2_6	7,26	13,31	3,29	96,63
2_7	6,56	13,25	3,15	86,90
2_8	6,38	13,33	2,97	85,05
3_1	12,47	14,63	6,96	182,48
3_2	9,80	15,38	6,94	150,69
3_3	13,50	15,30	7,57	206,55
3_4	8,36	14,88	7,59	124,40
3_5	8,83	15,68	6,60	138,45
3_6	8,58	14,56	7,22	124,92
4_1	11,01	16,04	7,69	176,60
4_2	13,40	16,39	7,99	219,67
4_3	11,30	17,06	8,18	192,74
4_4	12,50	16,95	7,60	211,83
4_5	7,02	12,24	7,79	85,90
4_6	9,72	14,76	7,21	143,43