

Reciclagem de Pás de Rotor de Aerogeradores Eólicos: Desafios e Oportunidades

Laura Maria Martins Leite

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia e Gestão Industrial
(2^o ciclo de estudos)

Orientadora: Prof.^a Doutora Tânia Felgueiras de Miranda Lima
Coorientador: Prof. Doutor Paulo Nobre Balbis dos Reis

setembro de 2020

Dedicatória

Ao que partiu sem avisar,

Sem uma última oportunidade para abraçar,

Ao meu anjo da guarda que me continue a iluminar,

Ao Meu Tio Manelinho

Agradecimentos

À Professora Doutora Tânia Lima devo-lhe tudo. Agradeço-lhe pela oportunidade, pelo profissionalismo, pela motivação, pela aprendizagem e pela dedicação. De um ser humano mais exigente e determinado. De um enorme coração. O trabalho é o seu lema de vida, fazer mais e melhor para alcançar os objetivos. Vejo nela um exemplo a seguir. Tenho em mim, que o Norte juntou-nos. Obrigada por tudo.

Ao Professor Doutor Paulo Reis agradeço-lhe pela oportunidade em elaborar a parte prática laboratorial da minha dissertação e por todo o auxílio prestado durante a execução da mesma. Obrigada.

À Eng.^a Ana Paula Gomes, à Doutora Joana Vieira, ao Sr. João Correia, ao Sr. Eduardo Jorge por todo o auxílio prestado, são a prova de que a UBI é feita de boa gente.

Aos meus colegas de laboratório, à Sara, ao João, ao Marco e, em especial, ao Paulo por todo o apoio prestado quanto à prática laboratorial. O Paulo recebeu-me de braços abertos, sempre disponível para me ajudar. Um ser humano incrível. Obrigada pela motivação e pela confiança.

De uma especial importância, aos meus grandes pilares, às melhores pessoas da minha vida, aos meus pais e ao meu irmão. O amor é a base para tudo na nossa família. Mesmo distantes, estamos sempre perto! Agradeço-vos pelo apoio, pela motivação e pela confiança que fez com que hoje chegasse até aqui. Obrigada por caminharem ao meu lado. Ficar-lhes-ei eternamente grata.

Aos meus avós, aos meus tios e aos meus primos por fazerem de mim a miúda mais feliz do mundo. Adoro-vos incondicionalmente.

Ao meu companheiro de todas as horas, o Rafael. Obrigada por estares sempre presente em todos os momentos da minha vida. Por brindar-mos juntos o alcançar de cada etapa. O que a Covilhã juntou, já nada nem ninguém separa. Obrigada meu amor.

À minha velha guarda, aos que são meus de verdade. Aos que estão comigo desde o início. Aos que mesmo longe, fazem esquecer toda a distância. Agradeço ao Bruno pela loucura.

À Kika pela autenticidade. Ao Martins pela humildade. Ao Nuno pela simpatia. Ao Pires pela atenção. À Vieira pela verdade.

Às minhas turbinadas, à Bé, à Débora, à Lima, à Graça e à Telma por nunca me deixarem esquecer o melhor que a Covilhã me deu. Obrigada pelas memórias, pelas loucuras e pela amizade. Vocês tornaram tudo isto mais fácil. Adoro-vos P****!

Aos meus afilhados, à Aliona, ao Ferrão, ao Henrique, ao Luís, ao Ricardo e ao Tiago. Pela família linda que construímos, por me deixarem fazer parte do vosso percurso académico. A vocês um muito obrigada.

À Bia e ao Padrão por serem os meus melhor amigos. Por estarem sempre presentes. Por tornarem simples as coisas complicadas. Eles sabem a importância que têm na minha vida. Obrigada malucos.

À Maria pela amizade, pela ajuda e pela honestidade. Surpreendeu-me muito. És uma miúda do caraças.

Não podia deixar de agradecer às minhas miúdas de Bioquímica. Às que iniciaram esta etapa comigo. À Ana Luísa pela amizade sincera e por ser a amiga mais louca. À Bárbara pelo exemplo a seguir, por ser tudo aquilo que eu quero ser, de uma força da natureza irreconhecível. À Maia pela presença, por pertencer ao Norte, tal como eu. Por vivenciarmos momentos de loucura que ficam para a vida. Tal com ela, que já ficou para a vida! À Mota por ter sido a minha companheira de praxe, pelo seu mau feitio e pela sua personalidade destemida. À Xana por ser o meu oito ou oitenta e por ser o meu abrigo. Obrigada miúdas.

Ao Joel, por passar do praxante mais odiado a um dos amigos que hoje faz parte da minha vida. Surpreendeu-me muito. Obrigada por me fazeres sorrir sempre. És um ser humano incrível.

Ao meu parceiro do NEUBI, o Venâncio. Obrigada pelo companheirismo, pelo trabalho de equipa, pela motivação e pela confiança. Um amigo para a vida. Obrigada.

Por fim, aos meus avós da Covilhã, ao Sr. João e à D.^a Margarida, pela generosidade e pela atenção com que sempre me trataram. Obrigada.

Resumo

Atualmente, têm-se assistido a um aumento da acumulação de resíduos resultantes das atividades industriais, com a utilização generalizada de materiais compósitos. O mercado da energia eólica tem demonstrado possuir graves problemas em relação aos equipamentos quando estes atingem o fim do seu ciclo de vida, especificamente, com a deposição em aterro dos resíduos resultantes das pás de rotor. Estas pás, são, geralmente, constituídas por fibras de vidro, em conjunto, com uma matriz polimérica, que quando depositadas em aterro, não sendo biodegradáveis, acumulam-se, provocando graves problemas às futuras gerações. O objetivo geral da presente dissertação é identificar os desafios e as oportunidades de um método de reciclagem das pás de rotor de aerogeradores eólicos. Com este objetivo em vista, ensaiou-se uma metodologia de reciclagem, nomeadamente, a reciclagem térmica, e posteriormente, recorreu-se a ensaios de tração, à avaliação microscópica e à avaliação EDX. Assim, o trabalho desenvolvido permitiu concluir que a melhor condição a adotar em ambiente industrial para a reciclagem das pás de rotor é a queima do material compósito a 600 °C por um período de 15 minutos, pois conduz apenas a uma perda de resistência mecânica de 15,3% face às fibras virgens. No entanto, revelaram-se como parâmetros inválidos, a queima do material compósito a 400 °C durante 15 minutos, 30 minutos e 60 minutos, uma vez que tanto a temperatura como o tempo de queima não foram os ideais, dado que as fibras ainda apresentaram resíduos de resina nas suas superfícies. Por sua vez, as amostras com menores quantidades de resina, revelaram uma menor resistência à tração, devido à degradação das fibras pela temperatura. Para as temperaturas mais altas e/ou tempos de queima mais longos, as fibras degradam-se ao ponto de se tornarem quebradiças (aparecimento de fibras partidas). Por fim, verificou-se ainda a presença de carvão na superfície das fibras para diferentes temperaturas, isto porque estas amostras exibiram uma elevada percentagem de carbono, através da avaliação EDX.

Palavras-chave

Pás de Rotor de Aerogeradores; Compósitos de Fibra de Vidro; Resíduos; Reciclagem

Abstract

Nowadays, with the frequent application of composite materials has been reported an increased accumulation of waste resulting from industrial activities. The wind energy market has shown to have serious problems in relation to equipment when it reaches the end of its life cycle, specifically, with the landfill of waste resulting from rotor blades. These blades are generally made of glass fibres combined with a polymeric matrix, which when deposited in landfill, since it is not biodegradable, accumulates, causing serious problems for future generations. The general objective of this dissertation is to identify the challenges and opportunities of a method of recycling the rotor blades of wind turbines. With this objective in mind, a recycling methodology was tested, namely, thermal recycling, and subsequently, tensile tests, microscopic evaluation and EDX evaluation were used. Thus, the work carried out allowed to conclude that the best condition to be adopted in an industrial environment for the recycling of rotor blades is burning the composite material at 600 °C for a period of 15 minutes, as it only leads to a loss of mechanical strength of 15.3% compared to virgin fibres. However, burning the composite material at 400 °C for 15 minutes, 30 minutes and 60 minutes proved to be invalid parameters, since both the temperature and the burning time were not ideal, since the fibres still showed resin residues on their surfaces. In turn, samples with lower amounts of resin, showed less tensile strength, due to the degradation of fibres by temperature. For higher temperatures and/or longer burning periods, the fibres degrade to the point of becoming brittle (appearance of broken fibres). Finally, there was also the presence of coal on the fibre surface for different temperatures, because these samples exhibited a high percentage of carbon, through the EDX evaluation.

Keywords

Wind Turbine Rotor Blades; Fiberglass Composites; Waste; Recycling

Índice

Capítulo 1

Introdução	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Motivações	3
1.3. Objetivos	3
1.4. Metodologia	4
1.5. Estrutura	6

Capítulo 2

Materiais Compósitos	9
2.1. Definição	9
2.2. Tipos de Compósitos	17
2.3. Exemplos de Aplicações Práticas	21

Capítulo 3

Gestão de Resíduos	23
3.1. Enquadramento Legal.....	23
3.2. Fluxo de Resíduos	30
3.3. Casos Práticos na Europa e no Mundo	35

Capítulo 4

Caracterização do Setor Eólico	41
4.1. Setor Eólico em Portugal	41

Capítulo 5

Problemática das Pás de Rotor dos Aerogeradores Eólicos no Fim de Ciclo de Vida	51
5.1. Aerogerador Eólico: Componentes e Materiais	51
5.2. Fluxo de Resíduos das Pás de Rotor.....	53
5.3. Exemplos Práticos do Reaproveitamento das Pás de Rotor	56

Capítulo 6

Reciclagem de Materiais Compósitos	61
6.1. Tipos de Reciclagem.....	61
6.1.1. Reciclagem Mecânica	62
6.1.2. Reciclagem Térmica	65
6.1.3. Reciclagem Química.....	68
6.2. Métodos Combinados.....	70
6.3. Comparação de Resultados Obtidos.....	71

Capítulo 7

Caso Prático.....	81
7.1. Material, Equipamento e Procedimento Experimental	81
7.1.1. Produção dos Laminados	81
7.1.2. Provetes	84
7.1.3. Equipamentos	86
7.1.4. Procedimento Experimental	89
7.2. Análise e Discussão de Resultados	91

Capítulo 8

Considerações Finais	115
8.1. Conclusões	115
8.2. Perspetivas Futuras.....	116

Bibliografia	117
---------------------------	-----

Apêndice A

Caracterização dos Parques Eólicos por Distrito e por Região Autónoma.....	127
--	-----

Lista de Figuras

Figura 1 – Etapas de um protocolo de investigação científica.....	5
Figura 2 – As diferentes classes de matrizes e alguns exemplos das mesmas	10
Figura 3 – Diferentes tipos de reforços de fibra	13
Figura 4 – Representação esquemática das características de ambas as fases que influenciam as propriedades dos materiais compósitos: (a) concentração; (b) tamanho; (c) forma; (d) distribuição; (e) orientação.....	17
Figura 5 – Classificação das diferentes classes de materiais compósitos	18
Figura 6 – Classificação dos diferentes materiais compósitos estruturais: (a) unidirecionais; (b) <i>cross-ply</i> ; (c) <i>angle-ply</i> ; (d) multidirecionais	19
Figura 7 – Representação esquemática de um painel “sanduíche” com uma estrutura em favo de mel.....	20
Figura 8 – Exemplos particulares de materiais compósitos com diferentes formas e distribuições da fase dispersa: (a) laminado com camadas unidirecionais e bidirecionais; (b) reforço irregular com fibras contínuas; (c) reforçado com partículas; (d) reforço com placa de partículas fixas; (e) orientação aleatória de fibras contínuas; (f) reforço irregular com fibras descontínuas; (g) reforço espacial; (h) reforço com tecidos de superfície	21
Figura 9 – Representação esquemática das percentagens de utilização dos PRF	21
Figura 10 – Possíveis remunerações para os parques eólicos em Portugal	28
Figura 11 – Regulação associada à ETV em alguns países europeus, nomeadamente, Portugal	30
Figura 12 – As diferentes classes de resíduos	32

Figura 13 – Os cinco níveis da hierarquia de resíduos.....	33
Figura 14 – Representação esquemática da potência total instalada de energias renováveis em Portugal.....	42
Figura 15 – Ilustração da distribuição dos diferentes parques eólicos nos distritos e nas regiões autónomas de Portugal	43
Figura 16 – Evolução da potência instalada em Portugal, desde 1991 até 2020	44
Figura 17 – Resumo da capacidade instalada por distrito e por região autónoma	45
Figura 18 – Potência instalada por fabricante em Portugal	47
Figura 19 – Quota de mercado dos diversos fabricantes em Portugal	47
Figura 20 – Potência instalada por promotor em Portugal	48
Figura 21 – Quota de mercado dos diversos promotores em Portugal	49
Figura 22 – Representação dos principais componentes de um aerogerador eólico	51
Figura 23 – Esquema representativo da estrutura da pá de rotor: (1) borda de ataque; (2) painel de concha; (3) rede de corte; (4) ligação das redes; (5) viga; (6) cabo de proteção contra descargas elétricas; (7) proteção da extremidade da pá de rotor; (8) borda de saída da pá; (9) superfície de revestimento.....	53
Figura 24 – Responsabilidade estendida do produtor na indústria eólica.....	56
Figura 25 – Exemplos práticos de reutilização das pás de rotor de aerogeradores eólicos: (a) abrigo para bicicletas em <i>Aalborg</i> , Dinamarca; (b) bancos públicos da empresa holandesa <i>Superuse Studios</i> instalados no município de <i>Rotterdam</i> , Holanda; (c) parque infantil da empresa holandesa <i>Superuse Studios</i> instalado em <i>Rotterdam</i> , Holanda; (c) design de uma ponte feita de lâminas para o tráfego lento	57

Figura 26a – Exemplos práticos de reciclagem das pás de rotor de aerogeradores eólicos: (a) ferramenta de suporte do capô da empresa <i>Maier</i> ; (b) mobiliário urbano moderno da empresa <i>DesignAustria</i> ; (c) móveis de casa de banho da empresa <i>Novellini</i> ; (d) Blocos de betão pré-fabricados, obtidos por reciclagem mecânica; (e) Caixas de inspeção de esgoto em betão pré-fabricado, obtidos por reciclagem mecânica.....	58
Figura 26b – Exemplos práticos de reciclagem das pás de rotor de aerogeradores eólicos: (f) barreiras de betão pré-fabricado, em <i>New Jersey</i> ; (g) barreiras de isolamento de ruído, (1) elemento de barreira de ruído; (2) material de absorção acústica de fibra de vidro reciclada; (3) têxtil poroso; (4) estrutura protetora aberta.....	59
Figura 27 – Processos de reciclagem de compósitos termoendurecíveis.....	62
Figura 28 – Mistura de materiais compósitos não classificada.	63
Figura 29 – Compósitos triturados classificados em quatro tipos de misturas de qualidade	64
Figura 30 – Representação esquemática do processo mecânico	65
Figura 31 – Processo térmico: (a) resíduos sólidos obtidos por pirólise; (b) fibra recuperada após separação.....	66
Figura 32 – Representação esquemática do processo térmico, nomeadamente, a pirólise	67
Figura 33 – Descrição do processo de leito fluidizado para a recuperação de fibras e energia	68
Figura 34 – Representação esquemática do processo químico, particularmente, a solvólise.....	69
Figura 35 – Fibra de vidro virgem.....	70
Figura 36 – Fibra de vidro recuperada pelos diferentes processos de reciclagem: (a) e (b) processo mecânico; (c) e (d) processo térmico, nomeadamente, a pirólise; (e) e (f) processo químico	70

Figura 37 – Aspetto final do laminado de 8 camadas de fibra de vidro E, com dimensões de 290×165 mm.	84
Figura 38 – Laminado obtido após um tempo de queima de 15 min a 400 °C.	85
Figura 39 – Provetes das placas de fibra de vidro para uma temperatura de 400 °C a 15 min: (a) representação esquemáticas; (b) representação real.	86
Figura 40 – Ilustração do forno de câmara, da empresa <i>TermoLab</i>	86
Figura 41 – (a) máquina de teste universal da marca <i>Adamel Lhormargy</i> , modelo DY 35; (b) dispositivo de fixação.	87
Figura 42 – (a) máquina de teste universal da marca <i>Shimadzu</i> , modelo AGS-X; (b) dispositivo de fixação.	88
Figura 43 – (a) SEM; (b) aparelho de revestimento de ouro Q150R ES, da marca <i>Quorum</i> ; (c) aspectos das amostras após revestidas a ouro.	89
Figura 44 – Gráfico da força (N) em função do deslocamento (mm), relativo à amostra a 400 °C, durante 120 min.	92
Figura 45 – Curvas representativas da força (N) em função do deslocamento (mm) das amostras sujeitas a uma temperatura de 400 °C e a um tempo de queima de 60 min, de 120 min, de 180 min, bem como, de 240 min.	93
Figura 46 – Curvas representativas da força (N) em função do deslocamento (mm) das amostras sujeitas a uma temperatura de 600 °C e a um tempo de queima de 15 min, de 30 min e de 60 min.	93
Figura 47 – Curvas representativas da força (N) em função do deslocamento (mm) das amostras sujeitas a uma temperatura de 400 °C e a um tempo de queima de 15 min, de 30 min, de 60 min, de 120 min, de 180 min, bem como, de 240 min.	96
Figura 48 – Curvas representativas da força (N) em função do deslocamento (mm) das amostras sujeitas a uma temperatura de 600 °C e a um tempo de queima de 15 min, de 30 min e de 60 min.	97

Figura 49 – Curvas representativas da força (N) em função do deslocamento (mm) das amostras sujeitas a uma temperatura de 800 °C e a um tempo de queima de 5 min, de 10 min e de 15 min.....	97
Figura 50 – Diâmetro das amostras de fibra de vidro: (a) controlo; (b) 400 °C/15 min; (c) 800 °C/15 min.....	107
Figura 51 – Espetro de energia dispersa, referente à amostra de controlo.....	108
Figura 52 – Espetro de energia dispersa, referente à amostra de 400 °C/15 min.....	108
Figura 53 – Espetro de energia dispersa, referente à amostra de 400 °C/240 min. ...	109
Figura 54 – Espetro de energia dispersa, referente à amostra de 600 °C/15 min.....	109
Figura 55 – Espetro de energia dispersa, referente à amostra de 600 °C/60 min.	110
Figura 56 – Espetro de energia dispersa, referente à amostra de 800 °C/15 min.....	110
Figura 57 – Espetro de energia dispersa, referente à amostra de 800 °C/15 min.....	111
Figura 58 – Evolução da potência instalada no distrito de Aveiro, desde 2003 até 2020	128
Figura 59 – Evolução da potência instalada no distrito de Braga, desde 2002 até 2020	130
Figura 60 – Evolução da potência instalada no distrito de Bragança, desde 2004 até 2020	131
Figura 61 – Evolução da potência instalada no distrito do Porto, desde 1998 até 2020	133
Figura 62 – Evolução da potência instalada no distrito de Viana do Castelo, desde 2003 até 2020	134

Figura 63 – Evolução da potência instalada no distrito de Vila Real, desde 1998 até 2020	137
Figura 64 – Evolução da potência instalada no distrito de Castelo Branco, desde 2000 até 2020	139
Figura 65 – Evolução da potência instalada no distrito de Coimbra, desde 2001 até 2020	141
Figura 66 – Evolução da potência instalada no distrito da Guarda, desde 2004 até 2020	143
Figura 67 – Evolução da potência instalada no distrito de Leiria, desde 2004 até 2020	145
Figura 68 – Evolução da potência instalada no distrito de Santarém, desde 1999 até 2020	146
Figura 69 – Evolução da potência instalada no distrito de Viseu, desde 1996 até 2020	148
Figura 70 – Evolução da potência instalada no distrito de Beja, desde 2008 até 2020	149
Figura 71 – Evolução da potência instalada no distrito de Faro, desde 1998 até 2020.	151
Figura 72 – Evolução da potência instalada no distrito de Lisboa, desde 1999 até 2020	153
Figura 73 – Evolução da potência instalada no distrito de Portalegre, desde 2014 até 2020	154
Figura 74 – Evolução da potência instalada no distrito de Setúbal, desde 1992 até 2020	155
Figura 75 – Evolução da potência instalada na região autónoma dos Açores, desde 1991 até 2020.....	157

Figura 76 – Evolução da potência instalada na região autónoma da Madeira, desde 1992 até 2020 158

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Exemplos das diferentes classes de matrizes e as suas propriedades	11
Tabela 2 – Composições dos diferentes tipos de fibra de vidro	15
Tabela 3 – Diferentes propriedades mecânicas e físicas das diferentes categorias de fibra de vidro	16
Tabela 4 – Políticas de apoio existentes em alguns países europeus	29
Tabela 5a – Empresas que prestam serviços comerciais de reciclagem de PRFV	35
Tabela 5b – Empresas que prestam serviços comerciais de reciclagem de PRFV	36
Tabela 5c – Empresas que prestam serviços comerciais de reciclagem de PRFV	37
Tabela 6a – Lista cronológica de projetos europeus relacionados com os resíduos resultantes das pás de rotor de aerogeradores eólicos	38
Tabela 6b – Lista cronológica de projetos europeus relacionados com os resíduos resultantes das pás de rotor de aerogeradores eólicos	39
Tabela 7 – Parques eólicos desativados em Portugal	46
Tabela 8 – Fluxo de resíduos nas diferentes fases de ciclo de vida das pás de rotor de aerogeradores eólicos	54
Tabela 9 – Parâmetros abordados na caracterização dos constituintes das pás de rotor na fase de produção	55
Tabela 10 – Propriedades mecânicas das fibras de vidro recuperadas através da reciclagem mecânica	72
Tabela 11 – Propriedades mecânicas das fibras de vidro recuperadas através da reciclagem mecânica e da reciclagem térmica, nomeadamente, a pirólise	73

Tabela 12 – Propriedades mecânicas das fibras de vidro recuperadas através da reciclagem térmica, mais concretamente, por pirólise	74
Tabela 13 – Propriedades mecânicas das fibras de vidro recuperadas através da reciclagem térmica por pirólise assistida por micro-ondas e por leito fluidizado.....	75
Tabela 14 – Propriedades mecânicas das fibras de vidro recuperadas através do processo de reciclagem térmica, leito fluidizado	76
Tabela 15 – Propriedades mecânicas das fibras de vidro recuperadas através do processo de reciclagem química, da solvólise e da hidrólise.....	77
Tabela 16 – Propriedades mecânicas das fibras de vidro recuperadas através da combinação de reciclagem térmica e mecânica	78
Tabela 17 – Propriedades mecânicas das fibras de vidro recuperadas através da combinação de reciclagem química e térmica	79
Tabela 18 – Diferentes propriedades do reforço das placas, nomeadamente, da fibra de vidro E.....	82
Tabela 19 – Diferentes propriedades da resina epóxi SR 8100 e do endurecedor SD 8824	83
Tabela 20 – Condições de ensaios referentes às temperaturas e aos tempos de queima.....	84
Tabela 21 – Número de amostras testadas para os diferentes ensaios realizados	90
Tabela 22 – Resultados obtidos das amostras de fio de fibra de vidro.....	94
Tabela 23 – Resultados obtidos das amostras dos provetes.....	98
Tabela 24 – Ilustração das amostras de controlo, de 400 °C/15 min, de 400 °C/30 min e de 400 °C/60 min, após observação no TSM e no SEM.	101

Tabela 25 – Ilustração das amostras de controlo, de 400 °C/120 min, de 400 °C/180 min e de 400 °C/240 min, após observação no TSM e no SEM.....	102
Tabela 26 – Ilustração das amostras de 600 °C/15 min, 600 °C/30 min e de 600 °C/60 min, após observação no TSM e no SEM.....	103
Tabela 27 – Ilustração da amostra de 800 °C/5 min, de 800 °C/10 min e de 800 °C/15 min, após observação no TSM e no SEM.....	104
Tabela 28 – Quantificação dos elementos químicos das amostras.....	112
Tabela 29 – Parques eólicos no distrito de Aveiro	127
Tabela 30 – Parques eólicos no distrito de Braga	129
Tabela 31 – Parques eólicos no distrito de Bragança	130
Tabela 32a – Parques eólicos no distrito do Porto	131
Tabela 32b – Parques eólicos no distrito do Porto.....	132
Tabela 33a – Parques eólicos no distrito de Viana do Castelo	133
Tabela 33b – Parques eólicos no distrito de Viana do Castelo	134
Tabela 34a – Parques eólicos no distrito de Vila Real.....	135
Tabela 34b – Parques eólicos no distrito de Vila Real	136
Tabela 34c – Parques eólicos no distrito de Vila Real.....	137
Tabela 35 – Parques eólicos no distrito de Castelo Branco.....	138
Tabela 36a – Parques eólicos no distrito de Coimbra	139
Tabela 36b – Parques eólicos no distrito de Coimbra.....	140

Tabela 36c – Parques eólicos no distrito de Coimbra.....	141
Tabela 37 – Parques eólicos no distrito da Guarda	142
Tabela 38a – Parques eólicos no distrito de Leiria	143
Tabela 38b – Parques eólicos no distrito de Leiria.....	144
Tabela 39 – Parques eólicos no distrito de Santarém.....	145
Tabela 40a – Parques eólicos no distrito de Viseu	146
Tabela 40b – Parques eólicos no distrito de Viseu	147
Tabela 40c – Parques eólicos no distrito de Viseu.....	148
Tabela 41 – Parques eólicos no distrito de Beja.....	149
Tabela 42 – Parques eólicos no distrito de Faro	150
Tabela 43a – Parques eólicos no distrito de Lisboa.....	151
Tabela 43b – Parques eólicos no distrito de Lisboa.....	152
Tabela 43c – Parques eólicos no distrito de Lisboa	153
Tabela 44 – Parque eólico no distrito de Portalegre.....	154
Tabela 45 – Parques eólicos no distrito de Setúbal	155
Tabela 46 – Parques eólicos na região autónoma dos Açores	156
Tabela 47a – Parques eólicos na região autónoma da Madeira.....	157
Tabela 47b – Parques eólicos na região autónoma da Madeira.....	158

Lista de Acrónimos

APREN	Associação Portuguesa de Energias Renováveis
BMC	Bulk Molding Compound
CAGR	Compound Annual Growth Rate
CED	Cumulative Energy Demand
CSP	Contrated Solar Power
DGEBA	Éter Diglicídico de Bisfenol A
DGMM	Diethyleneglycol Monomethylethter
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
DNV-GL	Det Norske Veritas and Germanischer Lloyd
EDX	Energy Dispersive X-ray Detector
EHV	Extra-high Voltage
ERSE	Entidade Reguladora de Serviços Energéticos
EPR	Extended Producer Responsibility
ETV	Extensão do Tempo de Vida
FCV	Fim de Ciclo de Vida
FER	Fontes de Energias Renováveis
FIT	Feed-in Tariff
GHG	Greenhouse-Gas
IEC	International Electrotechnical Commission
IPP	Independent Power Producer
LPC	Lightning Protection Cable
MCR	Mixt Composites Recyclables
PNAER	Planos Nacional de Ações para as Energias Renováveis
PCH	Pequenas Centrais Hidrelétricas
PRF	Polímeros Reforçados com Fibra
PRFV	Polímeros Reforçados com Fibra de Vidro
RPS	Renewable Portfolio Standard
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SCEE	Sistema de Compensação de Energia Elétrica
SEM	Scanning Eletron Microscope
SMC	Sheet Molding Compound
SST	Segurança e Saúde no Trabalho
SEN	Sistema Nacional de Eletricidade

TSM Trinocular Stereoscopic Microscope
UE União Europeia

Capítulo 1

Introdução

Este primeiro capítulo apresenta a contextualização do presente trabalho, as motivações para a sua realização, o objetivo geral e os objetivos específicos, a metodologia utilizada, bem como, a estrutura desta dissertação.

1.1. Contextualização

As atividades industriais têm demonstrado uma grande inquietação quanto ao seu impacto no meio ambiente. Atualmente, os recursos naturais finitos estão a ser esgotados pelo consumo excessivo de recursos e pela produção de resíduos (Beauson, Lilholt & Brøndsted, 2014). Mais concretamente, o aumento da acumulação de resíduos deve-se, essencialmente, ao uso frequente de compósitos na indústria (Adams *et al.*, 2014). Estima-se um aumento significativo do mercado global dos compósitos de 74 milhares de milhões de dólares em 2020 para 112,8 milhares de milhões de dólares em 2025, nos Estados Unidos da América, com uma taxa de crescimento anual composta de 8,8%, do inglês *compound annual growth rate* (CAGR), salientando-se para o facto dos compósitos de fibra de vidro dominarem este mercado, quer em termos de valor como em termos de volume (MarketsandMarkets, 2020). Posto isto, é imperativo apelar a uma gestão eficiente e sustentável, assegurando a reciclagem de resíduos produzidos pela indústria dos compósitos (Rybicka *et al.*, 2015).

A energia eólica é uma das fontes de energia renovável com maior relevância quer a nível energético como industrial para a sociedade. Desde os anos 90, verificou-se um aumento de 30% na produção da energia proveniente dos parques eólicos (Pico, Seide & Gries, 2014). No entanto, quando o equipamento atinge o fim do seu ciclo de vida (FCV), emergem alguns problemas relacionados com a deposição final dos resíduos resultantes, em particular, com o destino das pás de rotor (Beauson, Lilholt & Brøndsted, 2014). Isto porque, os demais componentes estão regulamentados, nomeadamente, as torres de betão pela Diretiva 2008/98/CE (União Europeia, 2008) que regulamenta os resíduos de construção e demolição e, a *nacelle* pela Diretiva 2012/19/UE (União Europeia, 2012) que regulamenta os resíduos de componentes elétricos e eletrónicos. No que concerne às pás, estas são geralmente constituídas por fibras inorgânicas, na maioria dos casos de vidro tipo E, aglutinadas por uma matriz termoendurecível como por exemplo, resinas de epóxi, poliéster ou vinil éster (Beauson, Lilholt & Brøndsted, 2014).

Ao longo do tempo, tem-se verificado um aumento gradual da dimensão das pás de rotor das turbinas eólicas, desde o típico tamanho dos anos 80, cerca de 12 a 15 metros, até à lâmina mais comprida do mundo, com 107 metros (Cherrington *et al.*, 2012; Kellner, 2019). Considera-se esta evolução um acontecimento surpreendente, mas, ao mesmo tempo, preocupante, pois, com o conseqüente aumento do tamanho das pás aumenta o fluxo de resíduos (Cherrington *et al.*, 2012). Atualmente, as turbinas eólicas apresentam uma vida média entre os 20 a 25 anos, pelo que, a partir de 2040, estima-se que a cada ano sejam descartadas 380 000 toneladas de polímeros reforçados com fibra (PRF), acabando a maioria das vezes por atingir o seu FCV em aterros sanitários ou por processo de incineração (Åkesson *et al.*, 2013; Hagnell & Akermo, 2019). No entanto, se em 1996, no Reino Unido, o preço de deposição em aterro tinha um custo de 7 libras por tonelada, em 2013 aumentaram o preço para 72 libras por forma a desincentivar estas práticas e na Alemanha, por exemplo, já são consideradas ilícitas (Rybicka *et al.*, 2015).

De acordo com a Diretiva 2008/98/CE, os resíduos são hierarquizados em cinco níveis de tratamento, especificamente, a prevenção, a reutilização, a reciclagem, a recuperação e a eliminação. Esta última, considera-se como a pior situação, no entanto, a prevenção é considerada o panorama mais desejável (Rybicka *et al.*, 2015). Contudo, a reciclagem continua a ser um desafio, uma vez que as pás de rotor produzidas há uns anos eram constituídas, essencialmente, por polímeros reforçados com fibra de vidro (PRFV), apresentando custos de fabrico e custos de materiais extremamente baixos. Por este motivo, é importante realçar que deve existir um controlo severo neste processo, tornando-o economicamente rentável (Hao *et al.*, 2020).

A reciclagem compreende vários processos, um deles consiste na extração da fibra de vidro do material compósito. Igualmente, pode-se recorrer à trituração do compósito, com o intuito de reutilizar os resíduos sólidos (Beauson, Lilholt & Brøndsted, 2014). Existem três métodos de reciclagem, nomeadamente, os mecânicos, os químicos e, por último, os térmicos. Em relação à reciclagem mecânica, esta inicia-se com o corte seguido da trituração dos materiais, podendo-se obter partículas de enchimento ou partículas de fibra. Por outro lado, a reciclagem térmica abrange o processo de combustão, assim como, a combustão em leito fluidizado, a pirólise e a pirólise assistida por micro-ondas. Simplificando, a reciclagem térmica envolve a decomposição dos diferentes materiais através de um aquecimento externo. Para finalizar, a reciclagem química consiste na dissolução de um composto sólido, através do uso de diferentes solventes. Existem dois tipos de reciclagem química, a solvólise que faz uso de solventes orgânicos e a hidrólise

que utiliza a água como solvente (Asmatulu, Twomey & Overcash, 2014; Oliveux, Dandy and Leeke, 2015).

Em suma, os resíduos resultantes das pás de rotor das turbinas eólicas não são biodegradáveis, quando depositados em aterros, acumulam-se, provocando graves problemas às futuras gerações. De modo a colmatar este problema, é fundamental encontrar soluções viáveis, que permitam a reciclagem e posterior reutilização destes resíduos. Assim, o presente trabalho apresenta um enfoque mais direcionado para a reciclagem e posterior reutilização, com o intuito de obter materiais com propriedades mecânicas semelhantes aos originais.

1.2. Motivações

Por ser um tema impactante a nível mundial, torna-o num grande desafio. A motivação é um dos fatores que nos leva a fazer sempre mais e melhor, e claro que quando a temática é do nosso interesse, acaba-se por trabalhar com mais dedicação. Este tema, para além de ser da área de mestrado de Engenharia e Gestão Industrial, aborda um pouco a minha formação de base de licenciatura, a Bioquímica. Por este motivo, por conseguir conciliar ambos os cursos num só trabalho, que este se tornou numa das grandes conquistas do meu percurso académico.

1.3. Objetivos

O objetivo geral desta presente dissertação é identificar os desafios e oportunidades de um método de reciclagem das pás de rotor de aerogeradores eólicos.

Para concretizar este objetivo foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Identificar os diferentes tipos de materiais compósitos e apresentar alguns exemplos das suas aplicações práticas;
- Expor o enquadramento legal de resíduos e os respetivos casos na Europa e no Mundo;
- Expor a situação atual do setor eólico em Portugal;
- Identificar os componentes e os materiais de um aerogerador eólico, apresentando o fluxo de resíduos resultante;
- Apresentar os diferentes métodos de reciclagem de materiais compósitos, combinados ou isolados;
- Ensaiair uma metodologia de reciclagem e analisar os resultados obtidos.

1.4. Metodologia

A investigação científica é sustentada pelas teorias e pelas observações, conseguindo assim abordar dois níveis, o nível teórico e o nível empírico, havendo uma notória diferença entre os mesmos. O nível teórico foca-se, sobretudo, no desenvolvimento de conceitos teóricos, recorrendo a fenómenos e relações observadas pelos investigadores. Em contrapartida, o nível empírico é a visão da realidade, devido à aplicação dos próprios conceitos teóricos, com o intuito de atualizar e melhorar as teorias já existentes (Bhattacharjee, 2012). É de realçar, que nem todos os conhecimentos originam ciência, apenas o conhecimento científico que cumpre um conjunto de normas e técnicas, designado por método científico (Bhattacharjee, 2012; Santos *et al.*, 2016). Descreve-se como organizado, sistemático e preciso, o conhecimento científico fundamentado em estudos e testes científicos (Borges, Furtado & Oliveira, 2015; Pereira *et al.*, 2018).

O método científico integra um conjunto de conceitos e princípios com o objetivo de compreender os fundamentos da investigação científica, onde a escolha deste deve ter em consideração alguns fatores, nomeadamente, a natureza, o material auxiliar, a profundidade e a inspiração do investigador (Gil, 2008; Santos *et al.*, 2016). Este método deve possuir algumas características, tais como, ser coerente, válido, replicável e, por último, ser revisto por outros investigadores com o intuito de melhorar o conhecimento existente (Bhattacharjee, 2012).

As bases da investigação científica compreendem dois métodos, os dedutivos e os indutivos, com o intuito de clarificar os procedimentos lógicos (Gil, 2008). Os indutivos são obtidos através de deduções de padrões e conceitos retirados de dados observados. Por outro lado, os métodos de carácter dedutivo recorrem ao uso de novos dados empíricos, a partir de testes teóricos (Bhattacharjee, 2012). Associa-se o método dedutivo à investigação quantitativa e o método indutivo à investigação qualitativa. A investigação quantitativa recorre a diferentes variáveis e a possíveis alterações, que se possam fazer sentir numa determinada amostra. Enquanto, a investigação qualitativa recorre a padrões para desenvolver conceitos e ideias (Borges, Furtado & Oliveira, 2015). É de salientar que é bastante usual a aplicação dos dois métodos num só tema de investigação, auxiliando na recolha, no tratamento e aprovação de dados, complementando-se entre si (MacDonald & Headlam, 2010; Borges, Furtado & Oliveira, 2015).

O estudo do caso, a pesquisa bibliográfica, a pesquisa exploratória, a pesquisa descritiva, a pesquisa explicativa, a pesquisa documental, a pesquisa experimental, a pesquisa

participante, a pesquisa ação, a etnográfica e o método de *Delphi* são exemplos de investigação qualitativa e quantitativa (Botelho & Cruz, 2013). O presente trabalho recorreu a uma pesquisa bibliográfica, a uma pesquisa experimental e a uma pesquisa documental. A pesquisa bibliográfica define-se como a base de qualquer estudo, com o intuito de compreender o que já existe na literatura. Por outro lado, a pesquisa experimental requer a realização de estudos em laboratório. Por último, a pesquisa documental engloba relatórios e documentos oficiais, como por exemplo, documentos de entidades governamentais e setoriais (Botelho & Cruz, 2013).

Num projeto de investigação, existe um conjunto de etapas que se devem fazer cumprir para atingir o sucesso, nomeadamente, a definição do problema, a revisão da literatura, o modelo de análise, a recolha e tratamento de dados, a análise e interpretação de dados e, por último, as conclusões e propostas para trabalhos futuros, conforme ilustrado na figura 1 (Oliveira & Ferreira, 2014).

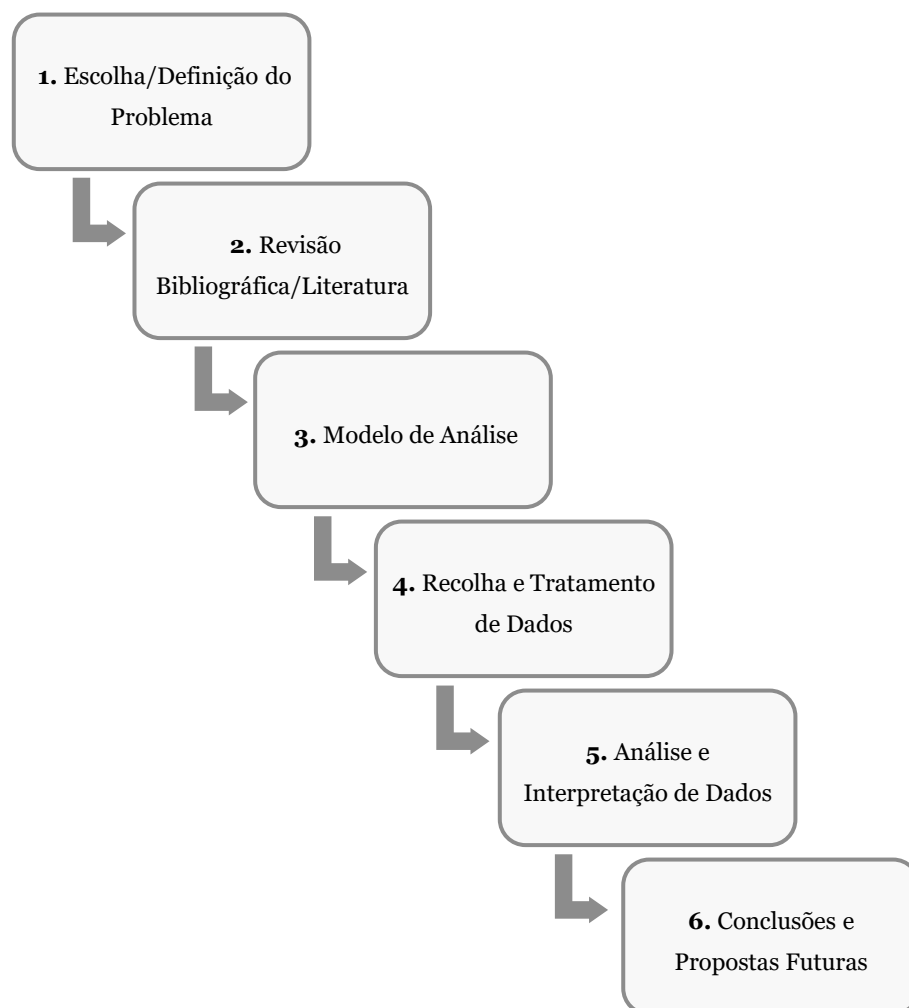


Figura 1 – Etapas de um protocolo de investigação científica (Adaptado de Oliveira & Ferreira, 2014).

Para a realização da revisão bibliográfica, foram utilizadas as bases de dados de publicações científicas e um programa de gestão de referências bibliográficas. No que se refere às bases de dados, estas auxiliam na pesquisa e recolha de publicações científicas, tendo sido utilizadas a *ScienceDirect*, a *Web of Science* e a *Scopus*. Em relação ao programa, foi utilizado o *Mendeley Desktop*, que serviu de auxílio na referenciação do trabalho, onde o estilo adotado foi o *Harvard Referencing Style*.

1.5. Estrutura

A presente dissertação encontra-se estruturada em oito capítulos, nomeadamente, a introdução, os materiais compósitos, a gestão de resíduos, a caracterização do setor eólico, a problemática das pás de rotor dos aerogeradores eólicos no fim de ciclo de vida, a reciclagem de materiais compósitos, o caso prático e as considerações finais.

No primeiro capítulo é apresentada a contextualização do trabalho desenvolvido, a motivação para a sua realização, os objetivos gerais e específicos, a metodologia aplicada e a estrutura desta dissertação.

Num segundo capítulo são abordados os conceitos principais de materiais compósitos, bem como, os diferentes tipos de materiais e, ainda, as diferentes aplicações práticas dos mesmos.

O terceiro capítulo engloba o enquadramento legal, o fluxo de resíduos e, por último, os casos práticos na Europa e no Mundo.

No quarto capítulo é caracterizado o setor eólico em Portugal, fazendo uma abordagem por distrito, mencionando os parques eólicos desativados. Também são apresentados os fabricantes e os promotores de energia.

É apresentado no quinto capítulo uma breve explicação sobre o que é um aerogerador, expondo os componentes e os materiais que o constituem. Apresenta-se o fluxo de materiais das pás do rotor, revelando exemplos práticos do reaproveitamento das pás de rotor.

No sexto capítulo são apresentados os métodos de reciclagem de materiais compósitos, isolados ou combinados, bem como, a comparação dos resultados obtidos através da aplicação dos vários métodos.

O caso prático está integrado no sétimo capítulo, fazendo referência aos materiais, aos equipamentos e ao procedimento experimental adotado. Também é apresentando a análise e discussão de resultados.

Por último, o oitavo capítulo, referente às considerações finais, apresenta as conclusões e as propostas de trabalho futuros.

Capítulo 2

Materiais Compósitos

O presente capítulo apresenta uma breve abordagem aos materiais compósitos, começando pelas principais definições e conceitos sobre esta temática, terminando com a apresentação das diferentes aplicações práticas dos mesmos.

2.1. Definição

Atualmente, talvez uma das classes mais importantes dos materiais de engenharia, por variadíssimas razões, são os materiais compósitos. Para tal, contribui o facto destes materiais apresentarem excelentes propriedades físicas e mecânicas, particularmente, a rigidez, a resistência, a tenacidade, a densidade e a resistência à corrosão. Uma outra razão, é a fácil adaptação às diversas condições de trabalho (Clyne & Hull, 2019). Define-se, assim, um material compósito como um material multifásico, na qual as fases constituintes, a matriz e o reforço, devem ser quimicamente diferentes e separadas por uma interface distinta, com o intuito de se complementarem e, assim, criarem um novo material de engenharia (Biron, 2013; Asmatulu, Twomey & Overcash, 2014; Callister & Rethwisch, 2014). É também importante realçar que, que as propriedades mecânicas dos materiais compósitos dependem da matriz, do reforço e da adesão do reforço à matriz (Biron, 2013).

A escolha da matriz é um fator a ter em consideração na determinação de certas propriedades, tais como, o comportamento térmico, a durabilidade, entre outros. A garantia da coesão do compósito é a sua principal função. Por outras palavras, esta tem a função de ser um ligante entre os filamentos de reforço, para que as solicitações mecânicas sejam transmitidas entre todos, mas também de os proteger da abrasão ou de possíveis reações químicas (Biron, 2013).

Clyne e Hull (2019), classificam as matrizes como poliméricas (termoendurecíveis ou termoplásticas), metálicas e cerâmicas. No entanto, dá-se um especial enfoque às termoendurecíveis, uma vez que representam a matriz do material compósito das pás de rotor de aerogeradores eólicos. Na figura 2, são apresentadas as diferentes classes de matrizes, mencionando alguns exemplos das mesmas.

Matrizes		
1. Matrizes Termoendurecíveis	a) Epóxi b) Poliéster Insaturado c) Vinil Éster	
2. Matrizes Termoplásticas	a) Poliéter Éter Cetona (PEEK) b) Policarbonato c) Poliuretano	
3. Matrizes Metálicas	a) Alumínio b) Magnésio c) Titânio	
4. Matrizes Cerâmicas	a) Borossilicato	

Figura 2 – As diferentes classes de matrizes e alguns exemplos das mesmas (Adaptado de Clyne & Hull, 2019).

Quanto aos polímeros termoendurecíveis e termoplásticos, estes são produzidos por reações de condensação e de adição, respetivamente. O início de uma reação de cura pode ser impulsionado pela adição de agentes químicos ou pela aplicação de pressão e calor, sendo esta reação uma particularidade dos polímeros termoendurecíveis. Para além disto, esta reação envolve o *crosslinking*¹ de cadeias poliméricas, que dificulta a movimentação das moléculas, convertendo-se a resina líquida num sólido resistente e rígido. Por sua vez, cria-se uma rede 3D fortemente ligada durante a formação do compósito. É importante realçar, que a densidade e o comprimento das ligações cruzadas, bem como, das unidades moleculares que constituem a rede influenciam as propriedades mecânicas deste polímero (Chawla, 2019; Clyne & Hull, 2019).

Por outro lado, os polímeros termoplásticos são os mais indicados para a formação de fluxos líquidos, pois quando submetidos a pressão e calor as moléculas destes fluem. Quer isto dizer, que os polímeros termoplásticos não criam uma rede durante o seu processo, acabando por amolecer ou derreter com o aquecimento (Chawla, 2019). Existe uma diferença notória entre as propriedades dos polímeros termoendurecíveis e dos termoplásticos. Os termoendurecíveis são considerados mais frágeis quando comparados com os termoplásticos, uma vez que estes sofrem uma deformação plástica, mas são considerados mais resistentes. No entanto, os termoendurecíveis, como por exemplo, os epóxis, os poliésteres insaturados e os vinil ésteres são os mais utilizados

¹ Este processo também é designado por ligação cruzada, onde as cadeias poliméricas estão interligadas por ligações covalentes.

pela sociedade devido ao seu baixo custo (Clyne & Hull, 2019). Na tabela 1, são apresentados alguns exemplos das diferentes classes de matrizes e as respectivas propriedades.

Tabela 1 – Exemplos das diferentes classes de matrizes e as suas propriedades (Adaptado de Clyne & Hull, 2019).

Matrizes		Propriedades					
		Densidade (g/cm ³)	Módulo de <i>Young</i> (GPa)	Módulo de Rigidez (GPa)	Coefficiente de <i>Poisson</i>	Resistência à Tração (GPa)	Coefficiente de Expansão Térmica (10 ⁻⁶ K ⁻¹)
Termoendurecíveis	Epóxi	1,25	3,5	1,27	0,38	0,04	58
	Poliéster	1,38	3	1,1	0,37	0,04	150
Termoplásticas	PEEK	1,3	4	1,4	0,37	0,07	45
	Policarbonato	1,15	2,4	0,9	0,33	0,06	70
	Poliuretano	1,20	0,01	0,003	0,46	0,02	200
Metálicas	Alumínio	2,71	70	26	0,33	0,1-0,3	24
	Magnésio	1,74	45	7,5	0,33	0,1-0,2	26
	Titânio	4,51	115	44	0,33	0,4-1,0	10
Cerâmicas	Borossilicato	2,23	64	28	0,21	0,05	3,2

As resinas epóxi são conhecidas por apresentarem uma baixa densidade. Atualmente, existe uma grande variedade de resinas epóxi, empregues para o fabrico de revestimentos, de materiais eletrónicos, de adesivos e, por último, de PRF (Varma & Gupta, 2000; Jin, Li & Park, 2015). É de salientar, que estas demonstram uma reduzida percentagem de contração no processo de cura e são consideradas resinas curadas e de fácil armazenamento, sendo estas duas das vantagens face às resinas de poliéster insaturado. Para além destas vantagens, também possuem boas propriedades mecânicas e térmicas, alta resistência química e à corrosão, boas propriedades elétricas e uma excelente aderência a um conjunto de substratos. No entanto, o alto tempo de cura, bem como, o baixo desempenho em ambientes “quentes” e húmidos são algumas das limitações das resinas epóxi. Um exemplo de resinas epóxi é o éter diglicidílico de bisfenol A (DGEBA), este foi o primeiro diepóxido líquido que surgiu no mercado, resultado da combinação de bisfenol A com excesso de epiclorigidrina como reagentes (Varma & Gupta, 2000).

Os poliésteres insaturados e os monómeros de vinil são exemplos de resinas de poliéster insaturado. Em 1941, surgiram estas resinas e devido às suas características ganharam uma enorme adesão. Primeiro, são conhecidas no mercado pelo seu baixo custo e, para além desta característica, o seu processo de cura pode ser realizado à temperatura ambiente. Contudo, tal como as resinas epóxi, apresentam desvantagens, sendo uma delas a elevada contração durante o processo de cura, superior a 7% (Varma & Gupta, 2000).

Os reforços são um dos principais componentes a ter em consideração nos materiais compósitos, uma vez que representam a principal força deste material, sendo preponderantes na definição das propriedades mecânicas (Biron, 2013; Yi, Du & Zhang, 2018). Estes surgem na forma de partículas, de *whiskers*², de fibras curtas, de fibras contínuas ou de tecido. No entanto, a fibra é a forma mais comum, uma vez que permitem obter materiais compósitos mais rígidos e mais resistentes (Chawla, 2019).

Segundo Chawla (2019), as principais categorias dos reforços de fibra são as fibras de vidro, as fibras de basalto, as fibras de boro, as fibras de carbono, as fibras orgânicas (polietileno ou aramida), as fibras cerâmicas (de óxido ou sem óxido) e, por último, as *whiskers* (outras fibras sem óxido ou carboneto de silício). Porém, neste trabalho o enfoque serão as fibras de vidro, uma vez que estas são utilizadas no reforço das pás de

² Fibras descontínuas.

rotor de aerogeradores eólicos. Na figura 3, são apresentados os diferentes tipos de reforços de fibra.

Reforços de Fibra	
1. Fibras de Vidro	
2. Fibras de Basalto	
3. Fibras de Boro	
4. Fibras de Carbono	
5. Fibras Orgânicas	a) Fibras de Polietileno b) Fibras de Aramida
6. Fibras Cerâmicas	a) Fibras de Óxido b) Fibras sem Óxido
7. <i>Wiskers</i>	a) Outras Fibras sem Óxido b) Carboneto de Silício

Figura 3 – Diferentes tipos de reforços de fibra (Chawla, 2019).

As fibras de vidro, na sua globalidade, apresentam na sua constituição sílica com suplementos de óxidos, tais como, cálcio, boro, sódio, ferro e, por último, alumínio (Clyne & Hull, 2019). Estas são conhecidas pelas suas propriedades mecânicas, nomeadamente, boa estabilidade química, boa resistência ao calor, alta resistência à tração, alto isolamento elétrico, baixa tensão de tração, baixo isolamento e baixo coeficiente de expansão térmica. É de realçar que foram os primeiros reforços a serem utilizados com uma matriz polimérica (Yi, Du & Zhang, 2018).

Para além das suas propriedades mecânicas, no mercado das fibras são as que apresentam um custo mais baixo. Normalmente, o diâmetro destas fibras varia entre 5 a 20 microm, resultando num melhor desempenho. É característico das fibras de vidro uma estrutura amorfa³ e, conseqüente, propriedades isotrópicas⁴ (Yi, Du & Zhang, 2018; Clyne & Hull, 2019).

³ Uma estrutura que não apresenta uma forma definida, ao contrário dos cristais que dispõe de uma estrutura cristalina.

⁴ Uma substância que possui as mesmas propriedades físicas independentes da direção considerada.

Existem diversas variedades e especificações de fibras de vidro disponíveis comercialmente, tais como, fibras de vidro A, C, D, E, M, S e AR. As fibras de vidro do tipo A são caracterizadas por apresentarem alto teor de óxidos de metais alcalinos. As do tipo C são resistentes a ácidos e, por isso, suportam a exposição a agentes químicos. A elevada propriedade dielétrica é característica das fibras de vidro do tipo D. As fibras de vidro E representam 90% do mercado das fibras de vidro e apresentam um elevado isolamento elétrico. As que são conhecidas por apresentarem um elevado módulo de *Young* são as do tipo M. As do tipo S, também são designadas por R, apresentam alta resistência à tração. Por último, mas não menos importante, as do tipo AR, também designadas por Z, possuem uma resistência alcalina (Biron, 2013; Yi, Du & Zhang, 2018; Chawla, 2019). Na tabela 2, são apresentados os constituintes de cada tipo de fibra mencionados anteriormente.

Tabela 2 – Composições dos diferentes tipos de fibra de vidro (Adaptado de Biron, 2013; Yi, Du & Zhang, 2018; Chawla, 2019).

Tipos	Composição (%)						
	Sílica (SiO ₂)	Óxido de Alumínio (Al ₂ O ₃)	Trióxido de Boro (B ₂ O ₃)	Óxido de Cálcio (CaO)	Óxido de Sódio (Na ₂ O)	Óxido de Magnésio (MgO)	Outros
A	72	0,6-1,5	-	10	14,2	2,5	0,7 SO ₃
C	65	4	5-6	14	8-8,5	3	-
D	72-75	0,3	22-23	0,5	1	-	0,5 LiO ₂
E	52-57	8-16	5-13	16-25	0-2	0,6-4,6	0-1,5 TiO ₂ ; 0,2 K ₂ O
M	53,7	-	-	12,9	-	9	2 ZrO ₂ ; 8 BeO ₂ ; 8 TiO ₂ ; 3 CeO ₂
S ou R	58-65	23-26	-	-	0-0,3	10	-
AR ou Z	71	-	-	-	11	-	16 ZrO ₂ ; 2 TiO ₂

(Legenda: Trióxido de Enxofre, SO₃; Superóxido de Lítio, LiO₂; Dióxido de Titânio, TiO₂; Óxido de Potássio, K₂O; Óxido de Zircônio, ZrO₂; Peróxido de Berílio, BeO₂; Óxido de Cério, CeO₂).

As fibras de vidro E são os reforços mais usuais nos compósitos de matriz polimérica. Estas apresentam uma excelente resistência à corrosão e uma elevada resistência à condutividade. No entanto, a sua limitada resistência à corrosão química em meios ácidos e alcalinos faz desta característica uma desvantagem, uma vez que não podem ser aplicadas como reforços em matriz de cimento.

No entanto, as fibras AR, que são adequadas como reforço para compósitos de matriz de cimento, são resistentes a meios alcalinos. Está comprovado que o cimento reforçado com fibra de vidro AR apresenta uma resistência à tração, uma resistência à flexão e uma dureza muito superior do que sem o reforço.

Por outro lado, as fibras de vidro S são consideradas as mais resistentes por apresentarem uma resistência à tração 35% superior às fibras de vidro E. Para finalizar, as fibras de vidro M exibem um módulo específico superior ao do aço, devido à sua densidade ser relativamente superior (Chawla, 2019). Na tabela 3, são apresentadas as diferentes propriedades mecânicas e físicas dos diferentes tipos de fibras de vidro.

Tabela 3 – Diferentes propriedades mecânicas e físicas das diferentes categorias de fibra de vidro (Adaptado de Biron, 2013; Yi, Du & Zhang, 2018; Chawla, 2019; Clyne & Hull, 2019; Hagnell & Akermo, 2019).

Propriedades	Tipos				
	D	E	M	S ou R	AR ou Z
Diâmetro (μm)	-	12	12	12	12
Densidade (g/cm^3)	2,14	2,54-2,6	2,89	2,48-2,5	2,68
Coefficiente de Expansão Térmica (10^{-6}K^{-1})	3,5	4,7-5	5,7	2,9-5	7,5
Módulo de <i>Young</i> (GPa)	55	70-76	110	85-86	70-80
Resistência à Tração (GPa)	2,5	1,75-3,6	3,5	4,4-4,6	3,6
Tensão de Tração (%)	-	2	-	-	2
Coefficiente de <i>Poisson</i>	-	0,18-0,22	-	-	0,22
Temperatura de Amolecimento ($^{\circ}\text{C}$)	-	845	-	968	-
Custo ($\text{€}/\text{kg}$)	-	2,5	-	20	-

2.2. Tipos de Compósitos

Os materiais compósitos são classificados consoante os materiais que os constituem, nomeadamente, a matriz considerada a fase contínua e o reforço designado por fase dispersa. As propriedades dos mesmos dependem das propriedades de ambas as fases, bem como, das suas quantidades relativas e, ainda, da geometria da fase dispersa. Quanto à geometria da fase dispersa, avalia-se a forma das partículas, o seu tamanho, a sua distribuição e, por último, a sua orientação, conforme ilustrado na figura 4 (Callister & Rethwisch, 2014).

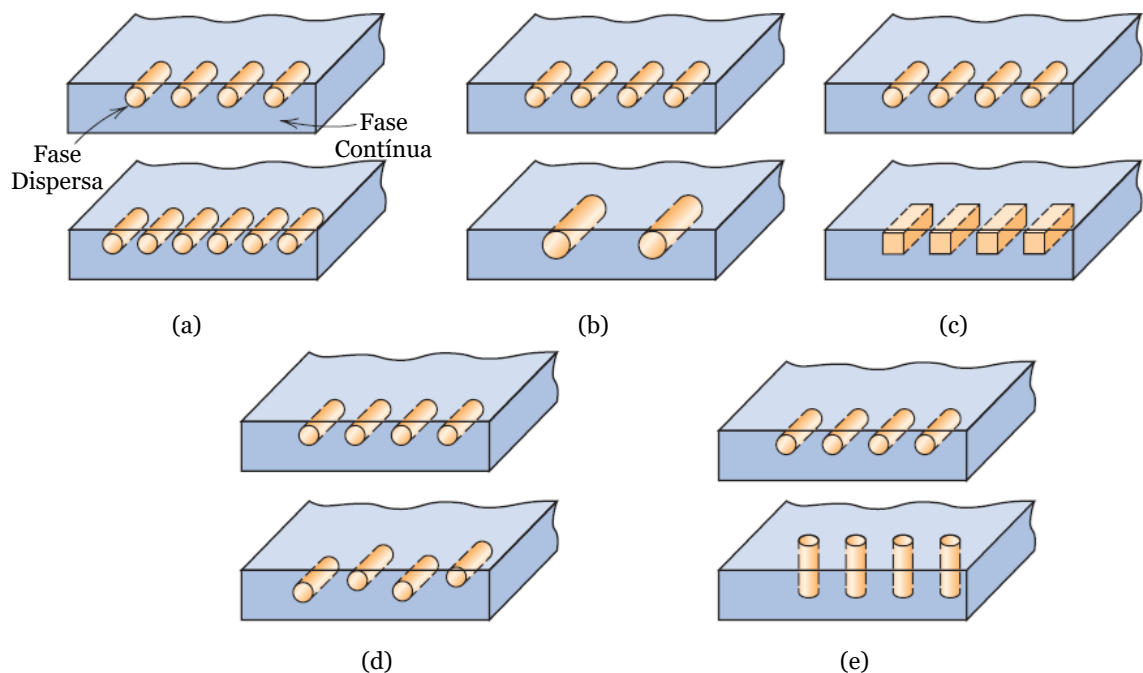


Figura 4 – Representação esquemática das características de ambas as fases que influenciam as propriedades dos materiais compósitos: (a) concentração; (b) tamanho; (c) forma; (d) distribuição; (e) orientação (Adaptado de Callister & Rethwisch, 2014).

Os materiais compósitos são classificados em compósitos reforçados com partículas, compósitos reforçados com fibras e compósitos estruturais (Callister & Rethwisch, 2014; Altenbach, Altenbach & Kissing, 2018). Os compósitos reforçados com partículas subdividem-se em reforços por dispersão ou em partículas grandes. Em relação aos compósitos reforçados com fibras, estes podem ser contínuos ou descontínuos. As fibras contínuas, também designadas por fibras longas, apresentam uma orientação unidirecional, bidirecional ou espacial. Por outro lado, as fibras descontínuas, também conhecidas por curtas, apresentam uma orientação aleatória ou alinhada. Por último, os painéis “sanduíche” ou os laminados são considerados compósitos estruturais. (Callister

& Rethwisch, 2014; Altenbach, Altenbach & Kissing, 2018). Na figura 5, encontra-se sintetizada a informação referente à classificação dos materiais compósitos.

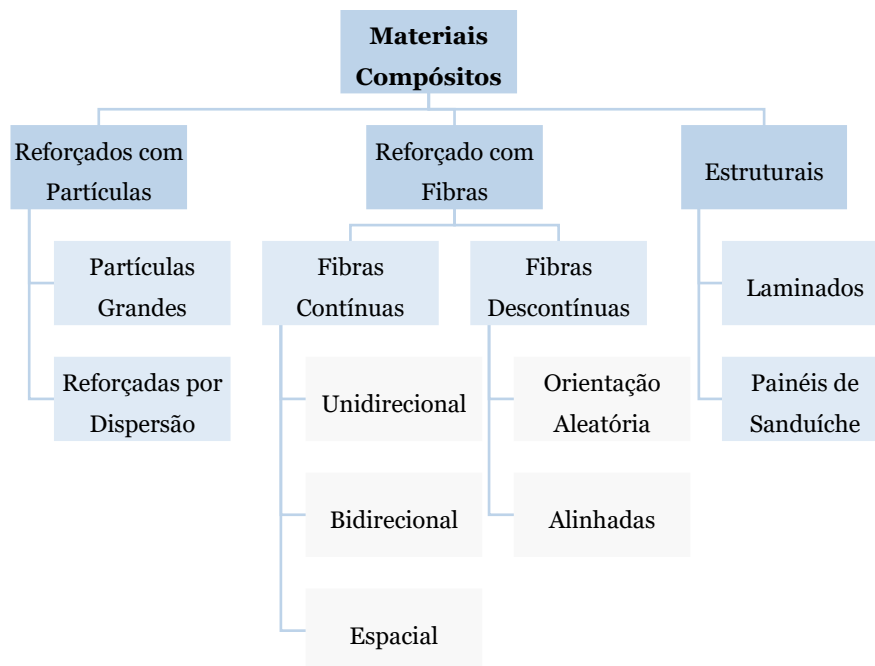


Figura 5 – Classificação das diferentes classes de materiais compósitos (Adaptado de Callister & Rethwisch, 2014; Altenbach, Altenbach & Kissing, 2018).

Em relação aos compósitos reforçados com partículas, a diferença entre as duas subclasses está no reforço e na resistência. As partículas grandes assumem esta dimensão, pois suportam uma fração da carga transferida pela própria matriz. Por outro lado, os compósitos com um aumento da resistência por dispersão apresentam diâmetros de partículas muito menores, compreendidos entre 0,01 e 0,1 microm. Na maioria dos casos, a matriz é responsável por suportar grande parte da carga que é aplicada, no entanto, no caso destas pequenas partículas dispersas o mesmo não acontece, uma vez que o movimento é dificultado. É importante salientar, que os materiais compósitos reforçados com partículas podem ser esféricos ou adotar uma geometria regular ou irregular. Para além disso, as suas propriedades mecânicas são conhecidas por serem homogêneas e isotrópicas (Callister & Rethwisch, 2014; Altenbach, Altenbach & Kissing, 2018).

Dois dos exemplos dos compósitos reforçados com partículas grandes são os enchimentos e o betão. Os enchimentos são conhecidos por melhorar as propriedades ou substituir parte do volume do material, enquanto o betão é constituído por uma matriz de cimento, onde as suas partículas são, essencialmente, areia e brita. Os metais e as ligas metálicas conseguem um aumento da resistência por dispersão. Mais concretamente,

alguns dos exemplos de compósitos reforçados com partículas por dispersão são o alumínio com óxido de alumínio e o níquel com óxido de tório disperso (Callister & Rethwisch, 2014).

Os compósitos reforçados com fibra são classificados consoante o seu comprimento, realçando que as fibras curtas, quando comparadas com as fibras longas, apresentam uma melhor resistência. Salienta-se ainda, que os reforços de fibra podem adotar um comportamento anisotrópico⁵ ou quase isotrópico (Callister & Rethwisch, 2014; Altenbach, Altenbach & Kissing, 2018).

Uma das propriedades a ter em consideração nos materiais compósitos estruturais é a geometria dos vários elementos que o constituem. Em relação aos compósitos estruturais laminados estes são constituídos por laminas ou painéis bidimensionais, onde cada uma das camadas possui uma direção pré-definida de alta resistência. Um exemplo destes são os PRF contínuos e alinhados. Classificam-se os materiais compósitos estruturais em unidirecionais, *cross-ply*⁶, *angle-ply*⁷ e multidirecionais. Os unidirecionais apresentam a mesma orientação da direção de alta resistência. O mesmo não acontece com as *cross-ply*, os quais apresentam orientações que variam entre os 0° e os 90° . Por outro lado, as *angle-ply* dispõem de consecutivas camadas alternadas entre $+\theta$ e $-\theta$ para altas resistências como, por exemplo $\pm 45^\circ$. Por último, os multidirecionais exibem variadíssimas orientações de alta resistência, tal como se pode observar na figura 6 (Callister & Rethwisch, 2014).

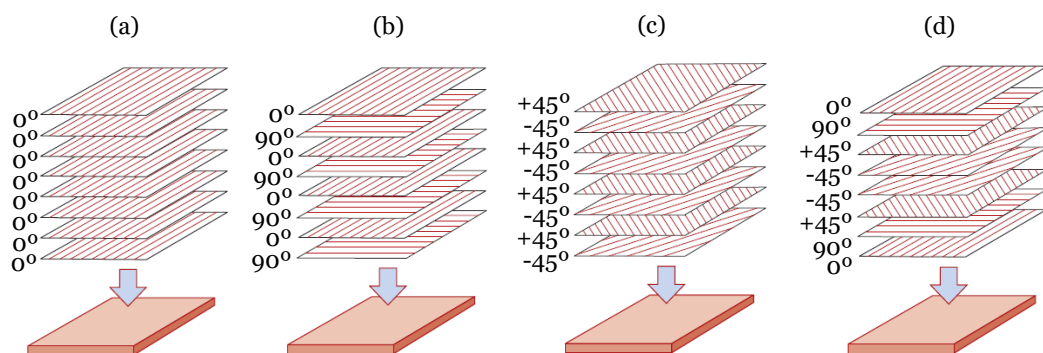


Figura 6 – Classificação dos diferentes materiais compósitos estruturais: (a) unidirecionais; (b) *cross-ply*; (c) *angle-ply*; (d) multidirecionais (Adaptado de Callister & Rethwisch, 2014).

Uma outra subclasse dos materiais compósitos estruturais são os painéis “sanduíche”, estes são constituídos por duas folhas externas separadas, também designadas por faces,

⁵ Uma substância que dispõe de uma propriedade física que varia com a direção.

⁶ Camadas cruzadas.

⁷ Camadas angulares.

ligadas fortemente a um núcleo espesso. As folhas externas podem ser, por exemplo, ligas de alumínio, ligas de aço, ligas de aço inoxidável, PRF ou contraplacados de madeira por serem considerados materiais rígidos e fortes. Por outro lado, o material do núcleo caracteriza-se por apresentar um baixo módulo de elasticidade, bem como, uma baixa densidade. O núcleo tem como função, fornecer um suporte contínuo para que as faces se mantenham unidas e, também, ser capaz de suportar tensões de corte. Quando o painel “sanduíche” é solicitado, uma das faces está sujeita a tensões de compressão e a outra de tração. Por último, é importante mencionar que as tensões de tração e compressão do núcleo são mais baixas do que nas faces (Callister & Rethwisch, 2014). Na figura 7, apresenta-se uma representação esquemática de um painel “sanduíche” com uma estrutura em favo de mel.

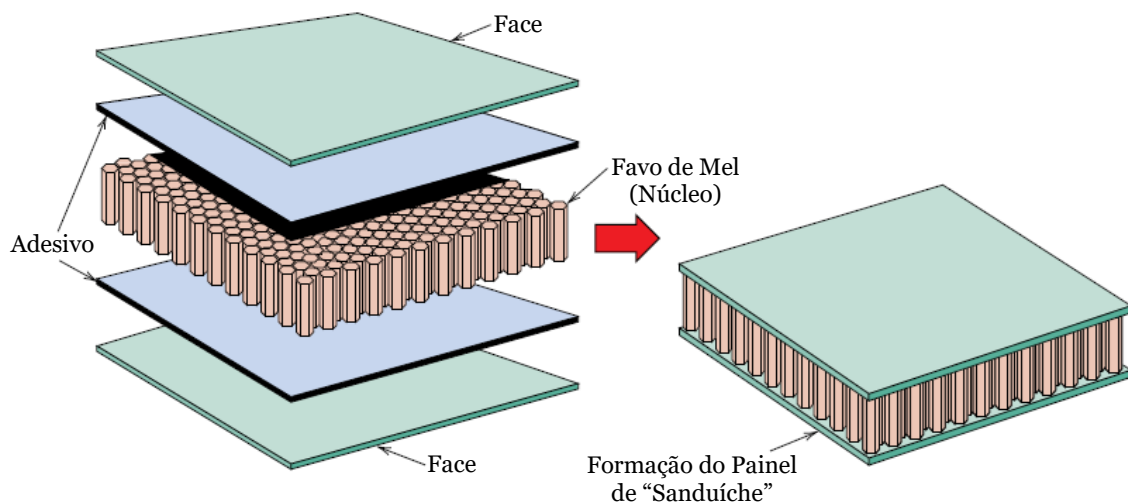


Figura 7 – Representação esquemática de um painel “sanduíche” com uma estrutura em favo de mel (Adaptado de Callister & Rethwisch, 2014).

Resumidamente, existe um conjunto de aspetos a ter em consideração nos materiais compósitos. Primeiro, todos os seus constituintes devem apresentar-se nas quantidades ideais. Para além deste aspeto, também é importante que os materiais constituintes tenham propriedades diferentes das propriedades dos materiais compósitos (Altenbach, Altenbach & Kissing, 2018). Na figura 8, apresentam-se alguns exemplos particulares de materiais compósitos.

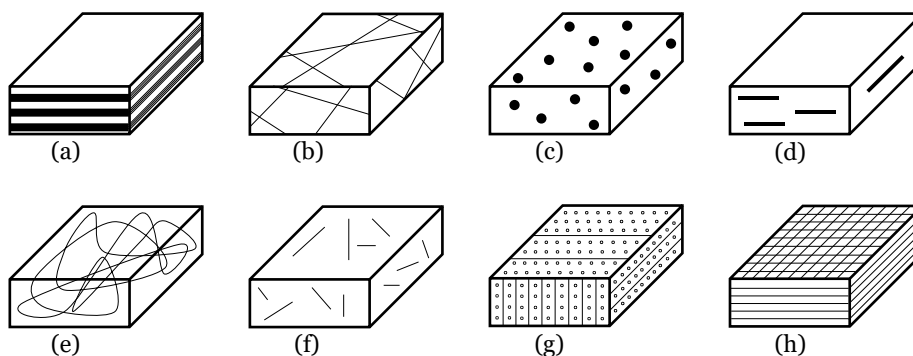


Figura 8 – Exemplos particulares de materiais compósitos com diferentes formas e distribuições da fase dispersa: (a) laminado com camadas unidirecionais e bidirecionais; (b) reforço irregular com fibras contínuas; (c) reforçado com partículas; (d) reforço com placa de partículas fixas; (e) orientação aleatória de fibras contínuas; (f) reforço irregular com fibras descontínuas; (g) reforço espacial; (h) reforço com tecidos de superfície (Adaptado de Altenbach, Altenbach & Kissing, 2018).

2.3. Exemplos de Aplicações Práticas

Inicialmente, os PRF eram concebidos, essencialmente, para a indústria aeroespacial (Duflou *et al.*, 2012). Mais tarde, com o crescente desenvolvimento dos PRF, surgiram novas áreas de aplicação em indústrias com aplicações em constante desenvolvimento, nomeadamente, construção civil, aeronáutica, aeroespacial, militar e defesa, biomedicina, da petroquímica, desporto, eletrónica, construção naval, automóvel e, de realçar, da geração de energia (Duflou *et al.*, 2012; Asmatulu, Twomey & Overcash, 2014; Ma *et al.*, 2016). A figura 9 apresenta as percentagens de utilização nas diversas indústrias.

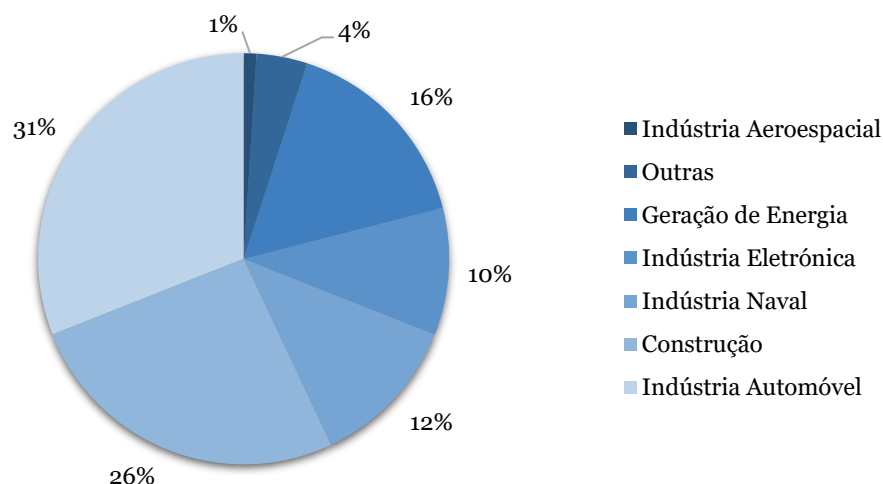


Figura 9 – Representação esquemática das percentagens de utilização dos PRF (Adaptado de Duflou *et al.*, 2012).

Em relação aos PRFV, estes possuem uma ampla gama de aplicações, nomeadamente, em placas de circuito, em tanques e tubulações, em painéis de carroçaria e, de realçar, nas pás de rotor das turbinas eólicas (Duflou *et al.*, 2012). Especificando, as fibras de

vidro do tipo E são usualmente utilizadas em produtos de borracha ou filtros usados na indústria do cimento, na indústria energética, na indústria metalúrgica e, por último, nas indústrias que utilizam o negro⁸ de carbono. Por outro lado, as do tipo M são aplicadas na indústria aeroespacial, como é o caso dos materiais estruturais, e em produtos civis, como por exemplo, os postes de extra-alta tensão, do inglês *extra-high voltage (EHV)*, com uma resistência até 500 000 volt, os postes de salto em altura, as pranchas de mergulho e os trampolins. Os componentes de armas, os projéteis, os coletes à prova de bala, as caixas de munições, bem como, as aplicações civis são algumas das aplicações das fibras de vidro do tipo S. Quanto às aplicações civis, destacam-se os contentores de alta pressão, tais como, cilindros de ar, cilindros sanitários, entre outros. Por último, as fibras de vidro do tipo AR são aplicadas na fabricação de painéis de grandes dimensões, de telhas onduladas, de lajes de varanda ou de telhado e, ainda, no fabrico de todos os tipos de tubos (Yi, Du & Zhang, 2018).

⁸ São cargas pretas, constituídas por carbono elementar sob a forma de partículas esféricas, apresentando na sua constituição sílica.

Capítulo 3

Gestão de Resíduos

Neste capítulo é apresentado o enquadramento legal dos resíduos, em seguida, enquadra-se a questão ambiental, com uma abordagem à escassez de materiais, ao seu consumo e à sustentabilidade, apresentando-se casos práticos na Europa e no Mundo.

3.1. Enquadramento Legal

Um dos principais objetivos da política energética nacional é a promoção de energia renovável, destacando-se a tecnologia eólica em Portugal. No entanto, deve-se realçar que os objetivos da política energética nacional são determinados em função dos objetivos da política energética da União Europeia (UE), assegurando uma energia segura, sustentável, competitiva e, acima de tudo, que auxilie no crescimento económico (Duarte, 2019).

Para uma melhor compreensão do setor em estudo, é importante abordar a política global da promoção das energias renováveis, bem como, os compromissos estabelecidos para 2020 e para os próximos anos. Não obstante, deve-se salientar que não existe qualquer tipo de legislação direcionada apenas para o setor eólico a nível nacional (Duarte, 2019).

Em 1988, foi criada a tarifa *feed-in*, do inglês *feed-in tariff* (FIT), que representa o preço de garantia da eletricidade proveniente de fontes de energias renováveis (FER). Esta tarifa entrou em vigor quando se iniciou a atividade do primeiro parque eólico em Portugal. A sua fórmula encontra-se estipulada no Decreto-Lei n.º 189/88 (Decreto-Lei n.º 189/88, 1988), de 27 de maio, sendo responsabilidade da Entidade Reguladora de Serviços Energéticos (ERSE) apresentar, mensalmente, o cálculo desta tarifa a cada produtor de energia independente, do inglês *Independent Power Producer* (IPP) (Peña, Azevedo & Ferreira, 2014).

Face às exigências de uma maior utilização de fontes endógenas de energia surgiu o Decreto-Lei n.º 168/1999 de 18 de maio. Este também visa uma maior aproximação das políticas energéticas e ambientais. Para além disto, estabeleceu um novo período de remuneração, aumentado para 12 anos (Durães, 2016).

No dia 27 de setembro de 2001, a Comissão Europeia publicou a Diretiva 2001/77/CE (União Europeia, 2001) relativa à promoção da eletricidade produzida a partir de FER. Esta diretiva definiu um limite de 12% para o consumo nacional bruto e de 22,1% para o consumo elétrico total proveniente de FER. É de realçar, que Portugal, em 1997, já apresentava um consumo elétrico proveniente de FER de 38,5%. No entanto, estabeleceu-se para 2010 uma meta de 39% do consumo elétrico proveniente de FER (Duarte, 2019). No mesmo ano, no dia 10 de dezembro, o Decreto-Lei n.º 312/2001 surgiu com o objetivo de promover a igualdade na atribuição das capacidades de receção da rede, de modo a que os promotores de energia conseguissem usufruir de uma informação atualizada para preferências de investimento. Mais tarde, no dia 29 de dezembro, estabeleceram no Decreto-Lei n.º 339-C/2001 que os IPPs eólicos passavam a ser obrigados a pagar, aos municípios envolvidos, 2,5% do valor total da receita obtida com a geração de energia (Peña, Azevedo & Ferreira, 2014; Durães, 2016).

A estratégia nacional adotada para a energia, em 2005, levou Portugal a rever os objetivos estabelecidos em 2003, com especial atenção na energia eólica. Neste sentido, definiu-se uma nova meta que consistia no aumento da potência instalada de 1950 megawatt para 5100 megawatt, até 2012 (Duarte, 2019). Também em 2005, o Decreto-Lei n.º 33-A/2005, de 16 de fevereiro, estabeleceu um novo período para a FIT por mais 15 anos ou até ser alcançado 33 gigawatt-hora por megawatt de potência instalada. No entanto, quando o período FIT estiver a terminar e, por algum motivo, os certificados verdes não se apresentarem disponíveis, o período FIT é prorrogado por mais 5 anos (Peña, Azevedo & Ferreira, 2014; Durães, 2016; APREN, 2017).

O Decreto-Lei n.º 225/2007, de 31 de maio, surgiu com o intuito de estabelecer alterações ao Decreto-Lei n.º 33-A/2005, simplificando o aumento da capacidade instalada das unidades de geração de energias renováveis. Salienta-se que para o setor eólico, foi permitido um aumento de 20% da capacidade total instalada (Durães, 2016). Como resultado das exigências face à descarbonização da economia europeia e dos compromissos estabelecidos para 2020, surgiu a Diretiva 2009/28/CE (União Europeia, 2009), no dia 23 de abril, relativa à promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis. Esta diretiva revogou a Diretiva 2001/77/CE, assim como, a Diretiva 2003/30/CE. É de realçar, que de acordo com esta diretiva, cada Estado-Membro deve cumprir 20% dos objetivos individuais, tais como, uma melhoria da eficácia energética de 20%, uma quota de 20% respetiva de FER no consumo comunitário global, uma quota de 10% de energia de fontes renováveis no setor dos transportes e, por último, promover os sistemas de aquecimento ou arrefecimento urbano a partir de FER. Para além destes

objetivos, ficou definido a elaboração de Planos Nacionais de Ações para as Energias Renováveis (PNAER). Salienta-se que a meta definida para Portugal foi de 31% do consumo final bruto de energia proveniente de FER, apresentando Portugal uma quota de 20,5% já em 2005 (Durães, 2016; Duarte, 2019).

A Diretiva 2009/28/CE (União Europeia, 2009) foi transposta para o direito nacional através da publicação de diversos decretos-lei, dos quais se destacam o Decreto-Lei n.º 215-B/2012, de 8 de outubro, o Decreto-Lei n.º 35/2013, de 28 de fevereiro, o Decreto-Lei n.º 39/2013, de 18 de março, o Decreto-Lei n.º 94/2014, de 24 de junho e o Decreto-Lei n.º 153/2014, de 20 de outubro. O Decreto-Lei n.º 215-B/2012 de 8 de outubro, teve como finalidade o fortalecimento do regime jurídico aplicado à produção de energia elétrica, com especial enfoque na produção de eletricidade proveniente de FER. No dia 28 de fevereiro de 2013, foi publicado o Decreto-Lei n.º 35/2013 que visa a possibilidade de doação de um período suplementar de aplicação de uma tarifa aos centros eletroprodutores eólicos. Por outras palavras, significa que os titulares podem sugerir uma redução da tarifa. Por outro lado, o Decreto-Lei n.º 39/2013, de 18 de março, estabeleceu objetivos nacionais de utilização de energias renováveis no consumo final bruto de energia, bem como, para a quota de FER associada aos transportes. Por sua vez, o Decreto-Lei n.º 94/2014, de 24 de junho, fez uma alteração no quadro legal aplicado à instalação de novos aerogeradores eólicos. Este decreto definiu a potência e a energia adicional, garantido uma remuneração de 60 euros por megawatt-hora. Define ainda que, a energia adicional como a energia ativa fornecida, correspondendo ao valor máximo de energia adicional. Deve-se salientar que a energia produzida é entregue à rede elétrica, somente quando forem cumpridas todas as condições que tenham sido estipuladas pelo operador. Por último, o Decreto-Lei n.º 153/2014, de 20 de outubro, é dedicado à procura de novas soluções de produção de energia, com base na inovação (Duarte, 2019).

Em 2010, o Decreto-Lei n.º 51/2010, de 20 de maio, definiu a obrigação que todos os aerogeradores conseguissem suportar cavas de tensão, com o intuito de melhorar a qualidade de serviço. Por cada aumento de 1% na potência total instalada, é oferecido um desconto de 0,12% sobre a tarifa. No entanto, para os aerogeradores que não apresentam estas condições é exigido um valor adicional sobre a tarifa aplicável de 1,6 euros por megawatt-hora (Durães, 2016).

A partir de 2012, os IPPs eólico, representados pela Associação Portuguesa de Energias Renováveis (APREN), negociaram com a ERSE com o intuito de conseguirem um novo

regime de remuneração para os anos seguintes, de modo a diminuir o Sistema Elétrico Nacional (SEN). Em 2013, após as negociações entre os grupos reguladores e as partes interessadas, surgiu uma nova legislação que consistia na redução do défice do SEN. Para atingir essa redução, era necessário um pagamento anual ao regulador e, em troca, assegurar a oportunidade de aumentar o seu período de pagamentos da FIT, podendo-se efetuar esse pagamento de duas formas. O primeiro pagamento poderia ser estendido até 5 anos, acabando por se pagar 5672 euros por megawatt instalado. Por outro lado, resultando num maior prazo de pagamento, até 7 anos, seria pagar 6349 euros por megawatt instalado. É de realçar, que este período de extensão só entra em vigor em 2020 para parques antigos, ou seja, onde o seu período de atividade tenha sido iniciado antes de 2005 ou em 2005. Pois, os parques instalados após 2005 vão continuar a beneficiar da FIT atual de 88,89 euros por megawatt-hora, por 20 anos ou até atingir 44 gigawatt-hora por megawatt de potência instalada. Destaca-se ainda, que a prolongação do período FIT por 5 ou 7 anos, está em vigor para novos parques eólicos, a partir de 2026 até 2029. Na figura 10, encontra-se detalhadamente as possíveis remunerações existentes atualmente para parques eólicos instalados em Portugal (Peña, Azevedo & Ferreira, 2014).

Para uma melhor compreensão da FIT, é necessário enunciar alguns exemplos práticos. Um parque que iniciou a sua atividade em 1992, supostamente, só deveria usufruir da FIT passado 12 anos, isto é, em 2004. Porém, com o Decreto-Lei n.º 33-A/2005, publicado em 2005, este incentivo poderá ser alargado até 2012. Um outro exemplo é referente aos parques instalados em 2006, os quais irão usufruir da FIT por 15 anos, ou seja, até 2021, segundo o Decreto-Lei n.º 33-A/2005 de 2005. Em contrapartida, tendo em conta o Decreto-Lei n.º 35/2013 de 2013, é possível prorrogar o recebimento da FIT até 2026, por mais 20 anos. Além disso, ainda é possível alargar por mais 5 ou 7 anos, conforme os pagamentos que os produtores decidam efetuar ao SEN, até 2031 ou 2033, respetivamente (Peña, Azevedo & Ferreira, 2014).

A implementação e a usabilidade da FIT, fez com que Portugal atingisse a maior percentagem de geração de energia renovável. Contudo, está a ser difícil para Portugal assegurar a sua posição de liderança como produtor de energias renováveis, em simultâneo, com os objetivos que tem de alcançar, uma vez que, Portugal apresenta os preços mais elevados de eletricidade quando comparado com os restantes países membros da UE (Durães, 2016).

Conforme mencionado anteriormente, a UE é responsável por estabelecer objetivos globais para cada Estado-Membro. No entanto, cada um desses Estados deve definir as suas estratégias e ferramentas para conseguir alcançar esses mesmos objetivos, tais como, a combinação de tecnologias, as FER e os mecanismos políticos adequados a cada situação (Durães, 2016).

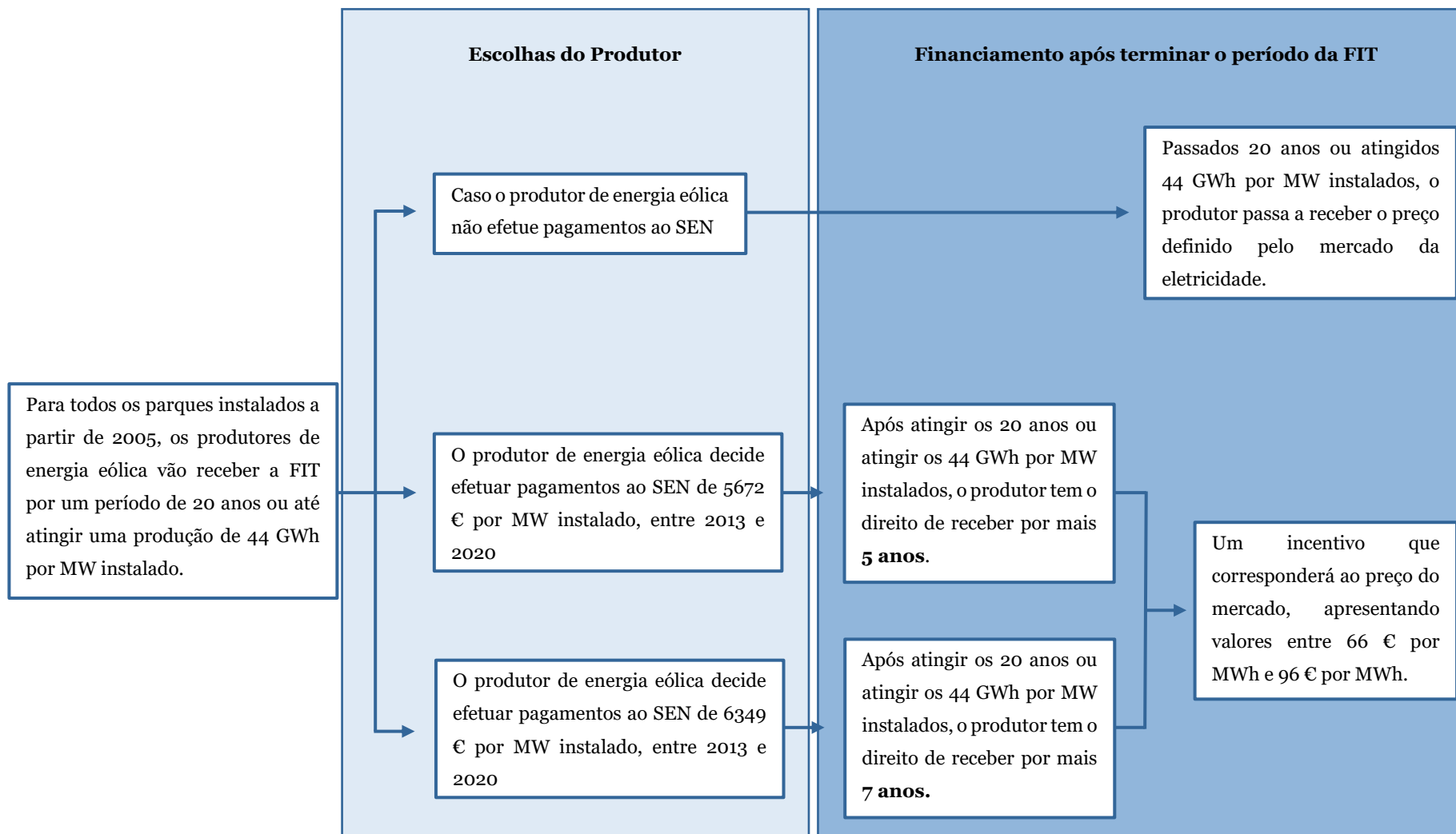


Figura 10 – Possíveis remunerações para os parques eólicos em Portugal (Adaptado de Peña, Azevedo & Ferreira, 2014).

A promoção de energia renovável através da FIT é uma característica da Europa, existente, por exemplo, na Alemanha, na Dinamarca, na França, em Itália e em Portugal. No entanto, esta tarifa difere muito de país para país, em relação ao período e ao valor da remuneração. Portugal, tal como Itália, são conhecidos por apresentarem uma quota obrigatória renovável, do inglês *Renewable Portfolio Standard* (RPS). Esta quota obriga a que exista uma determinada produção proveniente de FER. Uma outra política de apoio é o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE), existente na Dinamarca, em Itália e em Portugal. Os certificados verdes apenas estão disponíveis na Dinamarca, em França e em Itália. Por último, uma outra política de apoio são os concursos existentes em alguns países europeus, como é o caso da Dinamarca, da França, de Itália e de Portugal. Na tabela 4, apresenta-se uma síntese das políticas de apoio existentes em alguns países europeus, nomeadamente, em Portugal (Figueiras, 2013; Durães, 2016; APREN, 2017).

Tabela 4 – Políticas de apoio existentes em alguns países europeus (Adaptado de Durães, 2016).

Países Europeus	Políticas de Apoio				
	FIT	RPS	SCEE	Certificados Verdes	Concursos
Alemanha	✓				
Dinamarca	✓		✓	✓	✓
França	✓			✓	✓
Itália	✓	✓	✓	✓	✓
Portugal	✓	✓	✓		✓

Relativamente à regulação da extensão do tempo de vida (ETV) dos parques eólicos, Portugal, tal como, a Itália, a Espanha e o Reino Unido não apresentam qualquer tipo de regulação, apenas dispõem de uma regulação geral, no caso de Portugal, é a regulação de Segurança e Saúde no Trabalho (SST) (APREN, 2017). Esta regulação encontra-se estabelecida na Lei n.º 79/2019 (Lei n.º 79/2019, 2019), de 2 de setembro, que estabelece

as formas de aplicação do regime de SST previsto no código de trabalho aos órgãos e serviços da Administração Pública. Por outro lado, a Alemanha e a Dinamarca já se encontram mais desenvolvidas nesse assunto. A Dinamarca realiza inspeções por empresas certificadas, sendo estas realizadas anualmente aos componentes e de três em três anos às pás de rotor. Por outro lado, na Alemanha a inspeção à estrutura é realizada pelo *Deutsches Institut für Bautechnik* (DIBt), onde o especialista define o período de ETV por 2 ou 4 anos, tal como se pode observar na figura 11 (APREN, 2017).

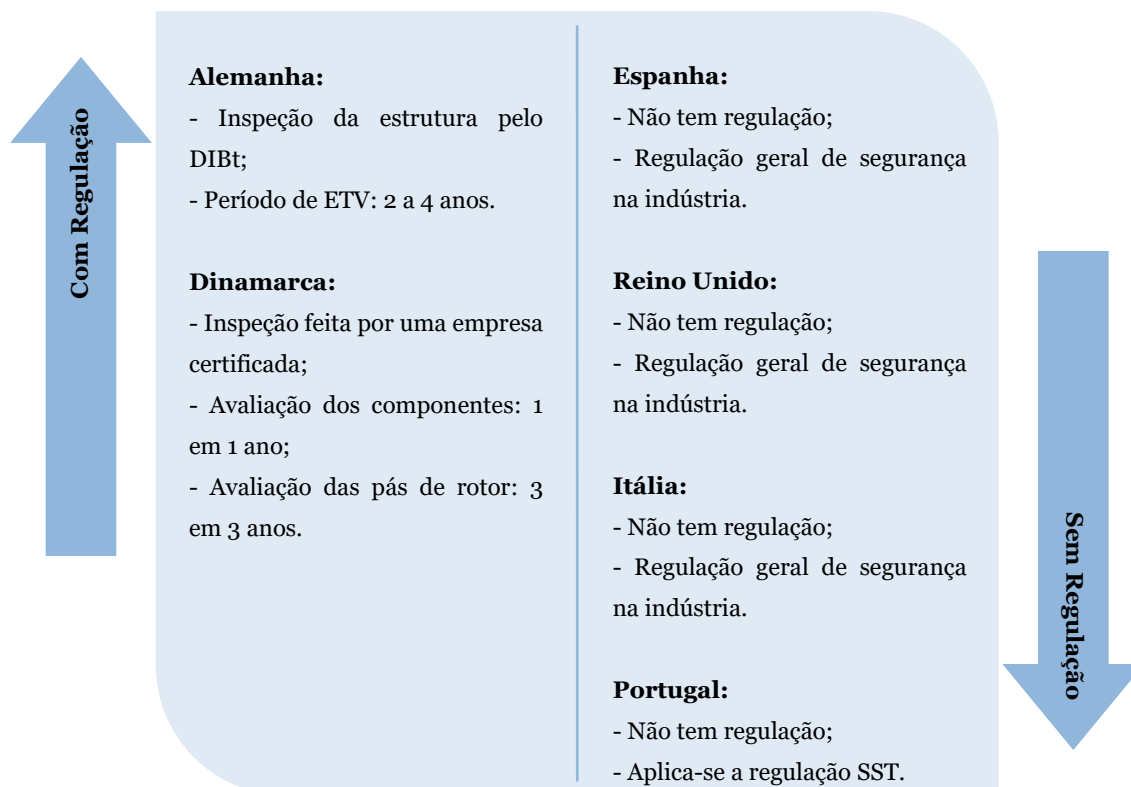


Figura 11 – Regulacão associada à ETV em alguns países europeus, nomeadamente, Portugal (Adaptado de APREN, 2017).

3.2. Fluxo de Resíduos

A produçã de resíduos é uma consequência da atividade humana e da sua respetiva gestão, apresentando um impacte direto na saúde dos seres humanos e no próprio ambiente. Pois, uma incorreta gestão dos mesmos pode afetar o meio ambiente em diversas dimensões (Vergara & Tchobanoglous, 2012).

A publicaçã do Decreto-Lei n.º 73/2011 (Decreto-Lei n.º 73/2011, 2011), de 17 de junho, introduziu alteraçõs ao Regime Geral de Gestã de Resíduos (RGGR) aprovado pelo Decreto-Lei n.º 178/2006, de 5 de setembro, e transpõs para a ordem jurídica interna a Diretiva n.º 2008/98/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de novembro,

relativa à gestão de resíduos. Este priorizou o reforço pela prevenção de resíduos e incentivou a sua reutilização e reciclagem. A promoção do pleno aproveitamento do novo mercado organizado de resíduos é também um ponto importante deste Decreto-Lei, de forma a consolidar a valorização de resíduos. Para além destes fatores importantes, este Decreto-Lei acabou por clarificar alguns conceitos-chaves, como por exemplo, as definições de resíduo, de prevenção, de reutilização, de preparação para a reutilização, de tratamento, de reciclagem, entre outros. No mesmo Decreto-Lei, foi dado um especial enfoque à hierarquia de resíduos, intitulado-a como o principal princípio da política ambiental. Prevendo também a aprovação de programas de prevenção e, ainda, estabelecendo metas de valorização material de resíduos até 2020. O incentivo à reciclagem é claro, impondo a utilização de 5% de materiais reciclados em obras públicas. Este Decreto-Lei, também definiu requisitos para as substâncias ou objetos provenientes de processos produtivos, para que fossem designados por subprodutos e não por resíduos. Definiu, igualmente, um conjunto de critérios para que determinados materiais deixassem de ser designados por resíduos. Por último, mas não menos importante, foi estipulado um mecanismo de responsabilidade alargada ao produtor, não apenas direcionado para a fase do FCV dos produtos e materiais, mas sim para todo o ciclo de vida (APA, 2020a).

É fundamental definir dois conceitos-chaves, sendo eles a gestão de resíduos e o fluxo específico de resíduos. Primeiramente, começando pelo conceito mais geral, define-se gestão de resíduos como um conjunto de operações, desde a recolha até à própria eliminação dos resíduos. É fundamental que este tipo de atividades seja assegurado por agentes competentes, de modo a evitar o abandono de resíduos, a incineração de resíduos, a contaminação dos solos, as queimas a céu aberto, bem como, a descarga dos mesmos em locais ilícitos. É de realçar, que este tipo de operações associadas à gestão de resíduos só apresenta vantagens, tais como, a prevenção e redução da produção de resíduos e dos impactes adversos da sua produção e gestão, assim como, a diminuição dos impactes inerentes à sua utilização, com o principal intuito de melhorar a proteção do ambiente e da saúde humana, mas, acima de tudo, aperfeiçoar a eficiência da sua utilização (Decreto-Lei n.º 73/2011, 2011; APA, 2020b). Por outro lado, existe uma classe de resíduos que é submetida a uma gestão específica, onde a sua origem é transversal às diferentes origens ou setores de atividade, conhecida por fluxo específico de resíduos (Decreto-Lei n.º 73/2011, 2011).

Antes de categorizar as diferentes classes de resíduos, é essencial abordar o conceito em si. Designa-se como resíduos “quaisquer substâncias ou objetos de que o detentor se

desfaz ou tem a intenção ou a obrigação de desfazer” (Decreto-Lei n.º 73/2011, 2011). Os quais podem ser classificados segundo a sua área específica de proveniência, particularmente, a área industrial, hospitalar, agrícola ou urbana. No entanto, é bastante recorrente serem classificados segundo os processos produtivos que os originam. Para além deste tipo de classificações, alguns resíduos são classificados como resíduos perigosos. É de realçar que um resíduo pode conter substâncias consideradas perigosas, mas pode não lhe ser atribuído o título de perigoso. Quer isto dizer que a atribuição de perigosidade a um resíduo depende, somente, dos seus constituintes e da sua concentração (APA, 2020c). Na figura 12, são apresentadas as diferentes classes de resíduos.

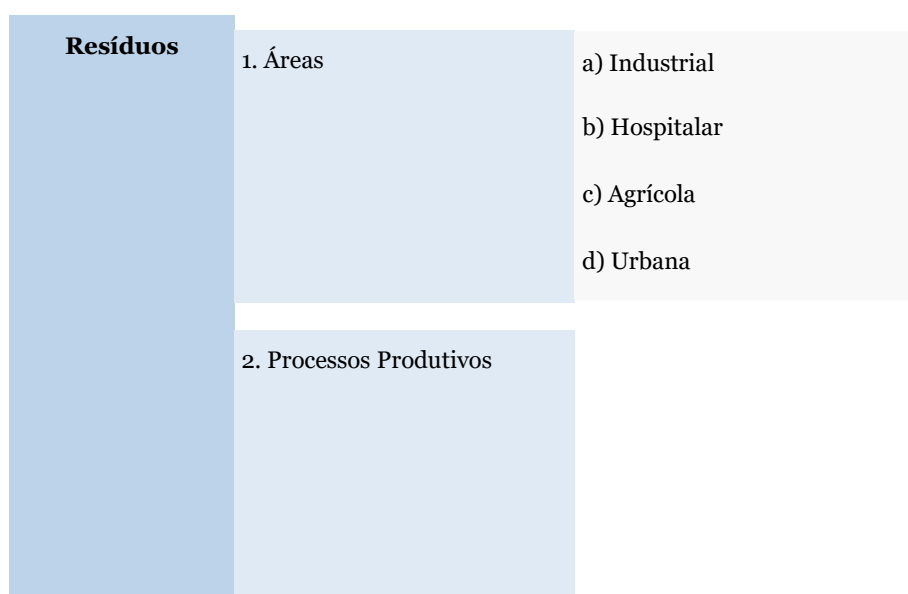


Figura 12 – As diferentes classes de resíduos (APA, 2020c).

Entende-se por resíduos industriais aqueles que são provenientes de processos produtivos, como por exemplo, os que são oriundos de atividades de produção ou associados à distribuição de eletricidade, de gás e de água. Por sua vez, os resíduos cujas atividades se concentram na prestação de cuidados de saúde a seres humanos e a animais são designados por resíduos hospitalares. Estes também são caracterizados por serem envolvidos em procedimentos invasivos. Tal como o próprio nome indica, os resíduos agrícolas resultam de explorações agrícolas ou pecuárias (APA, 2020d). Por último, os resíduos urbanos são conhecidos como resíduos domésticos, isto é, todos aqueles resíduos provenientes de habitações (APA, 2020e). Sabe-se que os resíduos perigosos apresentam uma maior enfoque na área industrial, no entanto, também são encontrados na área hospitalar, agrícola, urbana, bem como, nos serviços e no comércio (APA, 2020f).

Nos primórdios dos anos 90, a hierarquia de resíduos estava associada à política de gestão de resíduos, com o intuito de esclarecer quais as tecnologias de gestão de resíduos mais adequadas. Inicialmente, a hierarquia de resíduos foi alvo de críticas, uma vez que, apresentava um défice em relação à sua base científica, sendo notória uma grande dificuldade na sua implementação, bem como, no insucesso para situações específicas. Mais tarde, após a retificação dos seus pontos fracos, a hierarquia de resíduos surgiu associada a uma gestão integrada de resíduos, isto é, capaz de gerir os resíduos de forma ambiental e economicamente sustentável e, também, socialmente aceitável. Designa-se como um tipo de gestão integrada por compreender todos os fluxos de resíduos da sociedade (Vergara & Tchobanoglous, 2012). De acordo com o Decreto-Lei n.º 73/2011 (Decreto-Lei n.º 73/2011o, 2011), esta hierarquia prioriza os métodos de tratamento de resíduos em cinco níveis de sustentabilidade, nomeadamente, a prevenção, a preparação para a reutilização, a reciclagem, outros tipos de valorização e, por último, a eliminação, tal como se pode observar na figura 13.

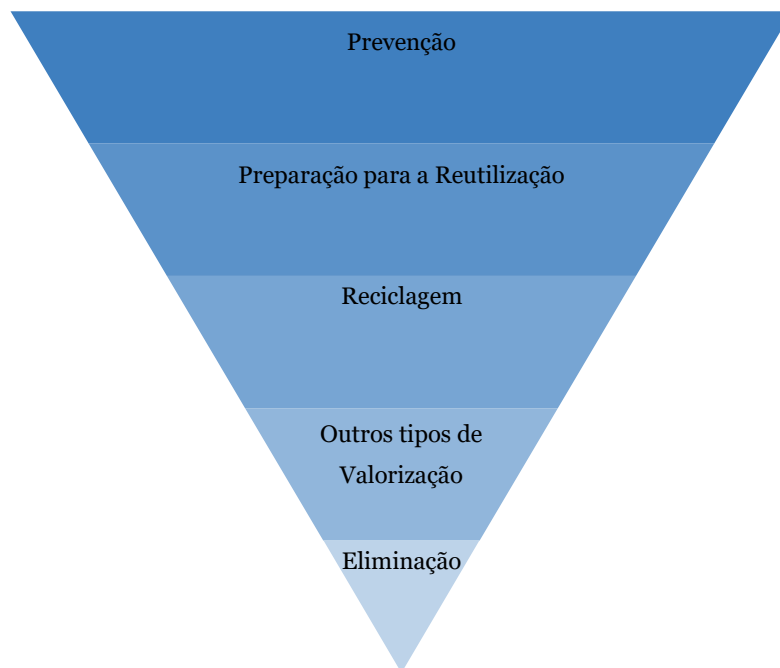


Figura 13 – Os cinco níveis da hierarquia de resíduos (Adaptado de Rybicka *et al.*, 2015; Skelton, 2017).

A prevenção é a opção prioritária da hierarquia de resíduos, através de esforços de redução e substituição no design, como por exemplo, através da redução em massa da matéria-prima, resultando numa menor quantidade de material para reciclar. Um outro exemplo centra-se na extensão da vida útil do projeto e, conseqüente, diminuição da taxa de falhas, apresentando a fase de testes e a certificação um papel fundamental neste exemplo, conseguindo, assim, um melhor design. O último exemplo associado à

prevenção faz referência à simples atualização da lâmina, isto é, à criação de lâminas segmentadas e modulares (Joeman, 2019; Cefic, EuCia & Wind Europe, 2020).

Um dos objetivos principais da prevenção consiste na diminuição dos impactos diretos no ambiente e na saúde humana provenientes da produção de resíduos e no controle direto dos materiais e dos produtos, de modo a diminuir o teor nocivo das substâncias que os constituem (Skelton, 2017).

Designa-se por preparação para a reutilização, os produtos ou os componentes dos produtos que assumem o papel de resíduos e, deste modo, são preparados para serem utilizados novamente (Decreto-Lei n.º 73/2011, 2011). Aqui as lâminas devem ser usadas e reutilizadas pelo maior período de tempo possível, antes que seja necessária a sua substituição. Para isso, deve-se avaliar a vida útil restante do projeto da lâmina, através, por exemplo, de uma análise de carga de fadiga, em simultâneo, com inspeções no local e com a revisão das ações de manutenção, resultando em ações de reparação e reforço de certas zonas das turbinas eólicas. É de salientar, que a empresa DNV-GL (*Det Norske Veritas and Germanischer Lloyd*), na Noruega, desenvolveu a norma DNVGL-ST-0262, capaz de certificar a extensão da vida útil das turbinas eólicas. Igualmente, a *Internacional Electrotechinal Commission* (IEC) criou a norma IEC TS 61400-28, que apela à gestão e extensão da vida útil de ativos de energia eólica (Cefic, EuCia & Wind Europe, 2020).

Quanto à reciclagem, deve-se realçar que é a etapa da hierarquia de resíduos mais difícil de se alcançar, uma vez que, a fibra de vidro e a resina epóxi são difíceis de reciclar (Joeman, 2019). Designa-se por reciclagem, qualquer operação de valorização, na qual os materiais constituintes dos resíduos são transformados em novos produtos, materiais ou substâncias capazes de executar as mesmas ou novas funções. A reciclagem requer energia e outros recursos para se conseguir converter os resíduos das lâminas em novos produtos (Decreto-Lei n.º 73/2011, 2011; Cefic, EuCia & Wind Europe, 2020).

A recuperação é considerada uma das outras formas de valorização, que consta na hierarquia de resíduos. Esta consiste na transformação de resíduos em combustível ou em energia térmica, após a remoção dos componentes individuais que podem ser usados novamente. Uma das aplicações associada à recuperação é a possibilidade de serem aplicados como material de enchimento (Joeman, 2019; Cefic, EuCia & Wind Europe, 2020).

Por último, o panorama menos desejável é a eliminação. Este tipo de tratamento não envolve qualquer tipo de valorização dos materiais. Um exemplo muito comum deste tipo de tratamento é a disposição em aterros ou a incineração dos materiais, não existindo a recuperação de energia nem de materiais (Decreto-Lei n.º 73/2011, 2011; Skelton, 2017).

3.3. Casos Práticos na Europa e no Mundo

Atualmente, existe um leque de empresas a prestarem serviços comerciais de reciclagem de PRFV na Europa e no Mundo. Estas empresas têm como área de negócio a valorização dos resíduos resultantes da indústria, reciclando-os e transformando-os em produtos comercializáveis. Um desses exemplos é a empresa *Reprocover*, na Bélgica. A qual recicla PRFV, obtendo diversos produtos, nomeadamente, caixas utilitárias, produtos de infraestruturas ferroviárias, caixas de flores, cinzeiros, caixotes do lixo e caixas de correio (Job, 2014; Oliveux, Dandy & Leeke, 2015). Na tabela 5, apresentam-se exemplos de empresas que prestam serviços comerciais de reciclagem de PRFV.

Tabela 5a – Empresas que prestam serviços comerciais de reciclagem de PRFV (Adaptado de Job, 2014; Oliveux, Dandy & Leeke, 2015).

Empresas	Materiais Reciclad	Processo/Capacidade	Produtos Reciclad Comercializáveis
<i>Reprocover</i> (Bélgica)	Termoendurecíveis, nomeadamente, PRFV ou resíduos de fibra de vidro seco	Resíduos termoendurecíveis com no máximo 6 mm. O processo consiste na mistura de 30% de flocos de fibra de vidro com 70% de grânulos de termoendurecíveis, adicionando resina, sendo moldados a frio com alta pressão	Caixas utilitárias, produtos de infraestruturas ferroviárias, caixas de flores, cinzeiros, caixotes do lixo e caixas de correio
<i>Zajons Logistik</i> (Alemanha)	PRFV curados, por reciclagem térmica	Caracterizado por ser um processo em ciclo. Desfiam e misturam com combustível derivado do lixo para ser utilizado em fornos de cimento. Possuem uma capacidade de 60 000 toneladas por ano	Fornos de cimento na empresa <i>Holcim</i>

Tabela 5b – Empresas que prestam serviços comerciais de reciclagem de PRFV (Adaptado de Job, 2014; Oliveux, Dandy & Leeke, 2015).

Empresas	Materiais Reciclad	Processo/Capacidade	Produtos Reciclad
	Reciclad		Comercializáveis
<i>Mixt Composites Recyclables (MCR) – Group Plastic Omnium</i> (França)	Fibra de vidro, por reciclagem mecânica	Do processo resulta um pó micronizado	Componentes para a moldagem de chapas, do inglês <i>sheet molding compound</i> (SMC), e componentes para a moldagem em bruto, do inglês <i>bulk molding compound</i> (BMC)
<i>Phoenix Fibreglass Inc.</i> (Canadá)	Fibra de vidro	Fio de fibra de vidro fresado e cortado com 12,7 mm de comprimento	Reforço parcial de BMC
<i>Hambleside Danelaw</i> (Reino Unido)	PRFV curados	É adotado o método mecânico com o intuito de reter o comprimento da fibra.	Reforços para melhorar as propriedades do betão e da borracha
<i>Hadeg Recycling Ltd.</i> (Alemanha)	PRF	A reciclagem térmica é o processo adotado, nomeadamente, a pirólise. O comprimento médio da fibra é de 200 µm	-
<i>Formoso Technologies Group</i> (Espanha)	Fibra de vidro	É através da reciclagem térmica, em particular, a pirólise que se consegue minimizar o desperdício da produção, por exemplo, nos tecidos de fibra de vidro	-

Tabela 5c – Empresas que prestam serviços comerciais de reciclagem de PRFV (Adaptado de Job, 2014; Conenor, 2020; Reciclaia, 2020).

Empresas	Materiais Reciclad	Processo/Capacidade	Produtos Reciclad
			Comercializáveis
<i>Extreme EcoSolutions</i> (Holanda)	PRFV curados, incluindo produtos inteiros, como por exemplo barcos	A recolha de resíduos é desde a fase de produção até ao FCV, através de parcerias direcionadas para o setor de transporte e desmontagem. O processo consiste na obtenção de um pó, através da trituração de PRFV, onde posteriormente será transportado para a Noruega	Uso do pó como aditivo para produtos de filmes de polietileno
<i>Global Composites Recycling Solutions</i> (Reino Unido)	PRFV curados e fibra de vidro	É adicionado ao <i>Ecopolycrete</i> ⁹ os PRFV curados e a fibra de vidro, de modo a que se consiga obter um material de alta resistência à compressão e ao fogo	Uma mistura para aplicações com betão, como por exemplo, em travessas de caminho de ferro, em batentes para parques de estacionamento, entre outros produtos de construção.
<i>Conenor</i> (Finlândia)	PRF	Processo termomecânico simples e de baixo custo, com o intuito de obter um material reforçado homogéneo, através dos resíduos de PRF. Não envolve a etapa de moagem para obtenção de um pó	Aplicações em tábuas de deck de madeira
<i>Reciclaia</i> (Espanha)	PRFV	É adotado o processo mecânico que envolve a trituração dos resíduos de PRFV	

⁹ Um material de construção.

A partir dos anos 80, iniciaram-se investigações relacionadas com possíveis métodos de tratamento de resíduos para materiais compósitos. Na tabela 6, apresentam-se alguns projetos europeus de investigação relacionadas com os resíduos resultantes das pás de turbinas eólicas (Skelton, 2017; Jensen & Skelton, 2018).

Tabela 6a – Lista cronológica de projetos europeus relacionados com os resíduos resultantes das pás de rotor de aerogeradores eólicos (Adaptado de Skelton, 2017; Jensen & Skelton, 2018).

Projetos	Duração	Descrição
REACT (Reutilização de PRFV por trituração seletiva e reativação do reciclado)	2003 – 2005	Reciclagem mecânica de PRF
EURECOMP (Reciclagem de compósitos termoendurecíveis de transporte de superfície sustentável)	2010 – 2012	Reciclagem química, nomeadamente, solvólise de PRF
Reciclagem de PRFV com pirólise por micro-ondas	2011 – 2012	Reciclagem térmica, nomeadamente, pirólise por micro-ondas de PRF
<i>GENVIND Innovation Consortium</i>	2012 – 2016	Demonstrou-se que um resíduo compósito pode ser aplicado em diferentes produtos, componentes ou estruturas
<i>LIFE BRIO Project</i>	2014 – 2017	Otimização dos procedimentos para o desmantelamento de parques eólicos, tendo em consideração a gestão adequada de resíduos, bem como, o desenvolvimento de políticas e recomendações legislativas para a Comissão Europeia

Tabela 6b – Lista cronológica de projetos europeus relacionados com os resíduos resultantes das pás de rotor de aerogeradores eólicos (Adaptado de Skelton, 2017; Jensen & Skelton, 2018).

Projetos	Duração	Descrição
<i>Dreamwind</i>	2016 – 2020	Investigação de novos métodos de reciclagem e de novas técnicas de fabricação de materiais compósitos reutilizáveis para as pás de turbinas eólicas, a partir de recursos biológicos e de materiais com resposta a estímulos
<i>FiberEUse</i>	2017 – 2021	Demonstração, em larga escala, de novas cadeias de valor da economia circular, com base na reutilização de PRF em FCV

Capítulo 4

Caracterização do Setor Eólico

Neste capítulo apresenta-se uma breve caracterização do setor eólico europeu, e em mais pormenor o setor eólico em Portugal caracterizado por distritos. São ainda identificados os parques eólicos desativados e a quantificação das toneladas de resíduos de fibra de vidro resultantes da sua desativação. Por fim, são apresentados os fabricantes e os promotores de energia a operar em Portugal.

4.1. Setor Eólico em Portugal

A nível europeu, prevê-se um aumento da capacidade instalada de energia eólica de 90 gigawatt nos próximos três anos, se os governos adotarem os planos necessários para solucionar os problemas referentes aos parques eólicos. Assim, estimava-se que a capacidade instalada de energia eólica, em 2023, ultrapassasse os 277 gigawatt. Contudo, se não forem adotadas as soluções para colmatar estes problemas, prevê-se apenas um aumento da capacidade instalada de 67 gigawatt, equivalente a um decréscimo de 26% da capacidade de energia eólica. Deste modo, existe uma grande incerteza quanto à capacidade de energia eólica instalada nos próximos três anos, oscilando entre os 13 e os 22 gigawatt por ano (Wind Europe, 2019).

Atualmente, a Espanha, a Suécia e a Noruega são os líderes europeus de parques eólicos *onshore*¹⁰. Deve-se salientar que, a Alemanha está a diminuir, drasticamente, o número de instalações em comparação com os anos transatos quanto ao regime *onshore*. Por outro lado, a França evidencia um crescimento estável quanto a este tipo de parques eólicos. Quanto ao regime *offshore*¹¹, o país que será responsável pelo crescimento de 35% nos próximos três anos é o Reino Unido. No entanto, prevê-se que a Holanda e a Alemanha apostem neste tipo de parques eólicos. No entanto, a Alemanha vai continuar a dominar o mercado eólico a nível europeu, com cerca de 72 gigawatt, seguido da Espanha, com 32 gigawatt e, por último, o Reino Unido com 29 gigawatt (Wind Europe, 2019).

É de extrema importância referir que, até 2023, 22 gigawatt da capacidade eólica instalada atinga o seu FCV. Porém, cerca de 2 gigawatt dessa capacidade eólica será

¹⁰ A instalação dos aerogeradores é efetuada em terra.

¹¹ A instalação dos aerogeradores é efetuada em mar.

desativada e uma mesma quantidade será repotenciada. Quanto à capacidade eólica instalada, que será repotenciada, espera-se que esta seja convertida em 4 a 5 gigawatt para novas instalações (Wind Europe, 2019).

Em virtude da sua ótima localização, Portugal apresenta diversos recursos renováveis para a produção de eletricidade. Porém, apesar de ser dependente de vários países estrangeiros para obtenção de combustíveis fósseis, está a evoluir no sentido de alcançar uma geração sustentável de eletricidade proveniente de FER (Simões, Madeira & Estanqueiro, 2009).

Após anos de investimento, o setor eólico em Portugal representa 39,3% das energias renováveis, tornando-se no segundo setor mais rentável em relação à produção elétrica de FER, perdendo apenas para o setor hídrico, tal como se pode verificar na figura 14. Dos países que mais contribuem para o desenvolvimento deste setor encontra-se a China, os Estados Unidos da América e a Alemanha. No entanto, Portugal é considerado um dos principais impulsionadores do setor eólico a nível europeu (IEP, 2019; E2P, 2020a).

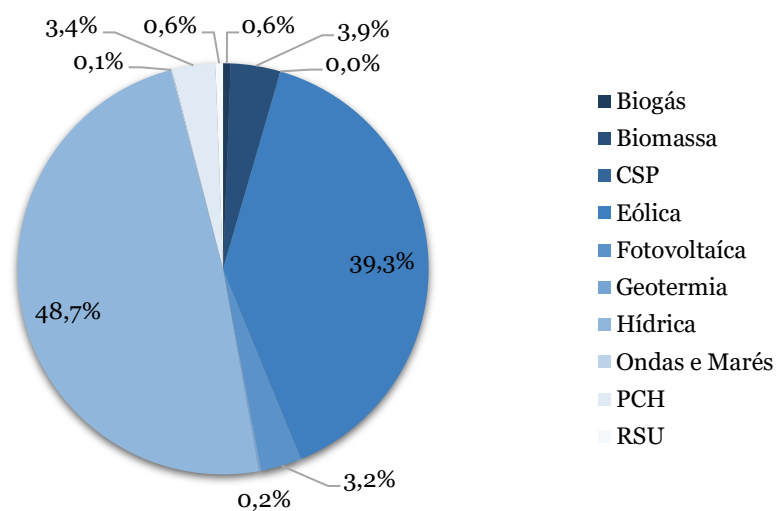


Figura 14 – Representação esquemática da potência total instalada de energias renováveis em Portugal (Adaptado de E2P, 2020a).

Atualmente, em Portugal, existem 259 parques eólicos, dos quais 6 encontram-se desativados e os restantes 253 em funcionamento. O seguinte mapa, figura 15, ilustra a distribuição dos diferentes parques eólicos nos distritos e nas regiões autónomas de Portugal (E2P, 2020b).

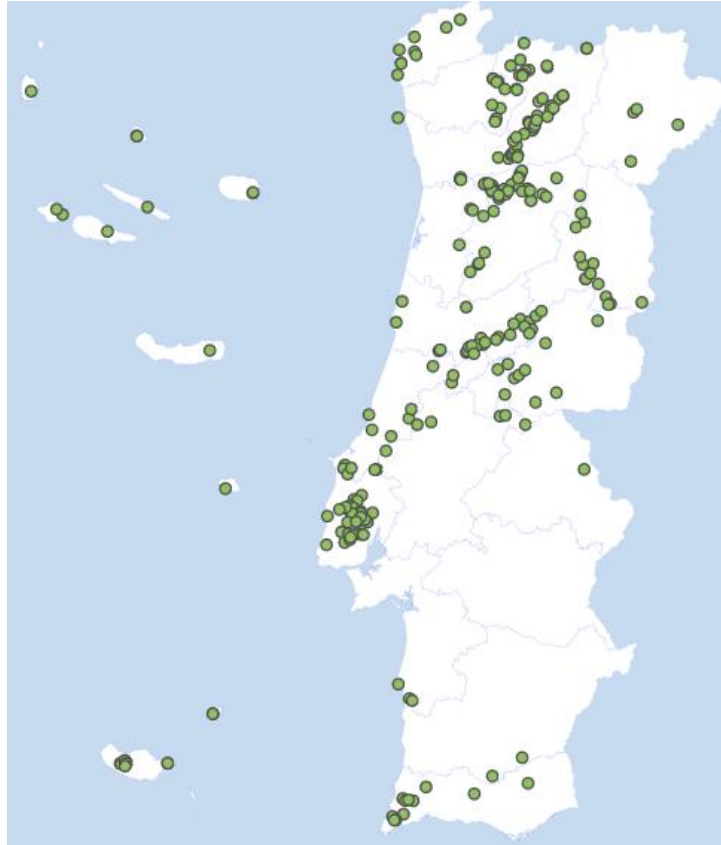


Figura 15 – Ilustração da distribuição dos diferentes parques eólicos nos distritos e nas regiões autónomas de Portugal (Adaptado de E2P, 2020b).

Em 1991, Portugal iniciou-se neste setor com o primeiro parque eólico. Este apresenta uma potência instalada de 1,8 megawatt, localizado na região autónoma dos Açores. Atualmente, com o desenvolvimento do setor, Portugal apresenta 5449,38 megawatt de potência instalada. No entanto, é de realçar que não houve um aumento da capacidade instalada do ano transato para o atual. Na figura 16, observa-se a evolução da potência instalada em Portugal (E2P, 2020b; E2P, 2020c).

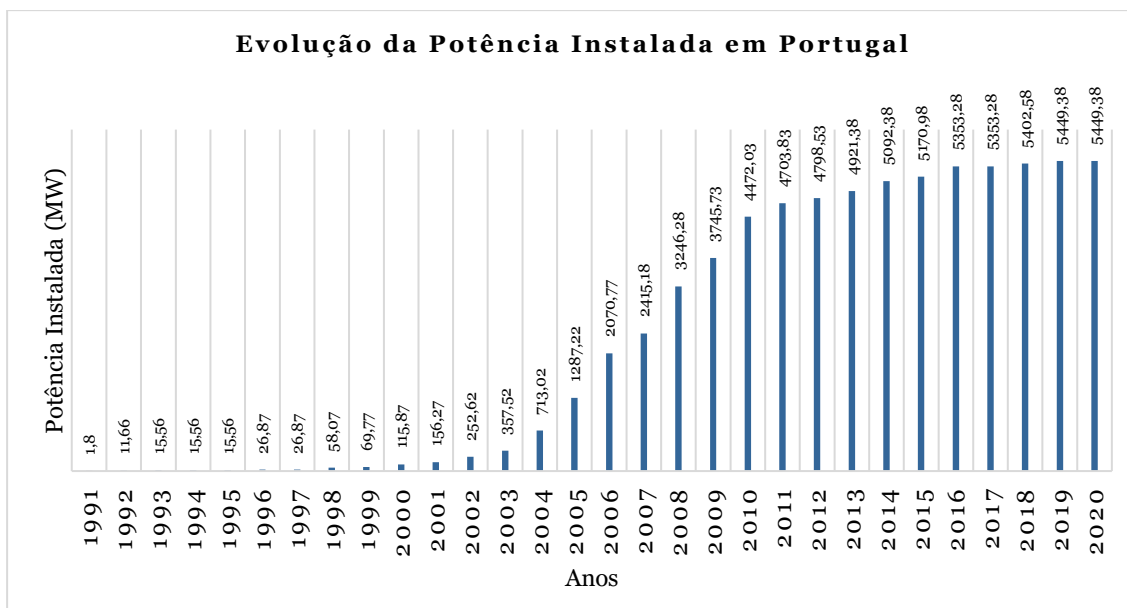


Figura 16 – Evolução da potência instalada em Portugal, desde 1991 até 2020 (Adaptado de E2P, 2020c).

Portugal apresenta-se dividido por dezoito distritos e por duas regiões autónomas. Dos distritos da zona norte engloba-se Aveiro, Braga, Bragança, Porto, Viana do Castelo e Vila Real com uma potência instalada no setor eólico de 70,80 megawatt, 148,30 megawatt, 84 megawatt, 65,14 megawatt, 370,80 megawatt e 681,10 megawatt, respetivamente. É notório que o distrito da zona norte com o maior número de potência instalada é Vila Real. Em relação aos distritos da zona centro, encontram-se Castelo Branco, Coimbra, Guarda, Leiria, Santarém e Viseu. Estes apresentam uma potência instalada de 517 megawatt, 752,01 megawatt, 453,90 megawatt, 233,91 megawatt, 168,90 megawatt e 1130,40 megawatt, na devida ordem. O distrito de Viseu é o que apresenta uma maior potência instalada da zona centro. Relativamente à zona sul de Portugal, esta abrange os distritos de Beja, Évora, Faro, Lisboa, Portalegre e Setúbal, apresentando uma potência instalada de 74,40 megawatt, 0 megawatt, 224,50 megawatt, 364,45 megawatt, 8,20 megawatt e 18,70 megawatt, respetivamente. É evidente que a capital de Portugal é a mais afluyente em relação à potência instalada. Por último, falta referir que a região autónoma dos Açores apresenta uma potência instalada de 36,65 megawatt e a região autónoma da Madeira uma potência instalada de 46,22 megawatt, sendo a mais rica neste setor. Posto isto, a percentagem da potência instalada é de 26,06% na zona norte, 59,75% na zona centro, 12,67% na zona sul e 1,52% nas regiões autónomas. Conclui-se assim, que a zona centro de Portugal é a mais procurada para a instalação de parques eólicos (E2P, 2020a).

Para uma melhor compreensão da capacidade total instalada pelos distritos e pelas regiões autónomas, apresenta-se a figura 17. Tal como se pode observar, o distrito de

Viseu é o que apresenta uma maior potência instalada, no entanto, o distrito de Évora não apresenta nenhuma potência instalada para este setor (E2P, 2020d). No Apêndice A, apresenta-me em pormenor, a caracterização dos parques eólicos em Portugal por distrito e por região autónoma.

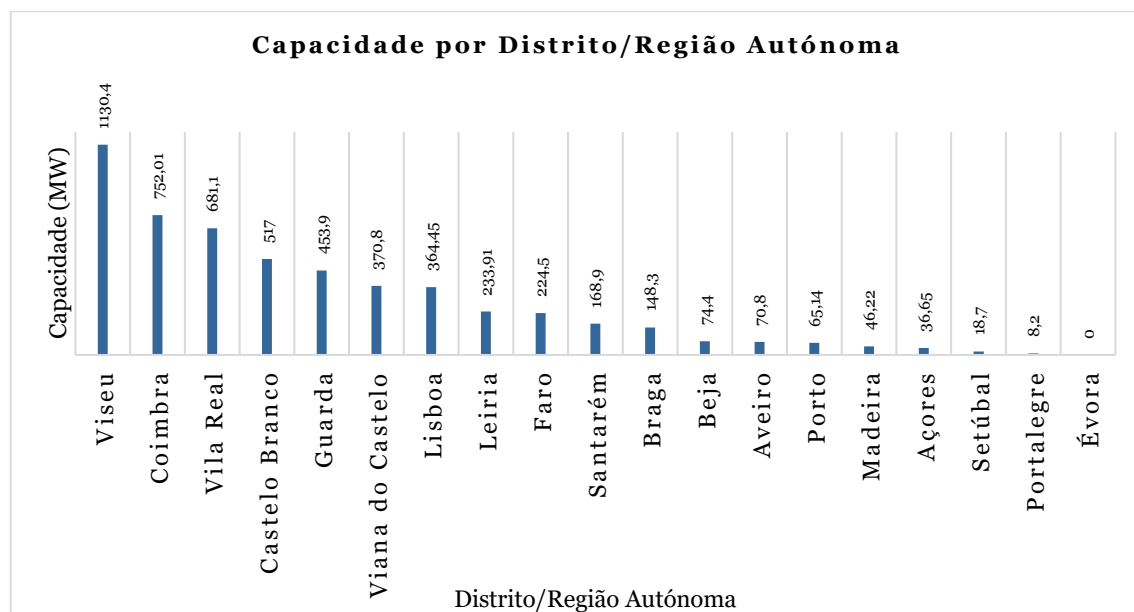


Figura 17 – Resumo da capacidade instalada por distrito e por região autónoma (Adaptado de E2P, 2020d).

Atualmente, em Portugal, existem 6 parques eólicos em FCV, dos quais o primeiro a ser instalado foi em 1992, na região autónoma dos Açores com uma capacidade instalada de 0,2 megawatt. Em seguida, na região autónoma da Madeira, existe um outro que iniciou a sua atividade em 2001, com uma capacidade instalada de 3,3 megawatt. Um outro parque que já se encontra em FCV, está localizado na região autónoma dos Açores, com início de atividade em 2002, apresentando uma potência de 1,8 megawatt. Por outro lado, o mais recente a ficar desativado, entrou em funcionamento em 2011, no distrito do Porto com uma potência instalada de 2 megawatt. É de realçar que dos 6 parques desativados, existem 2 dos quais não existe informação à cerca do ano de entrada de funcionamento, no entanto, estes encontram-se localizados no distrito de Lisboa e na região autónoma da Madeira com uma potência instalada de 0,02 megawatt e 0,27 megawatt, respetivamente. Os parques que se encontram desativados tinham uma potência total instalada de 7,59 megawatt. Sabendo que 1 megawatt equivale a 10 toneladas de fibra de vidro, significa que existem 75,9 toneladas de resíduos de fibra de vidro, sobre os quais não se executou qualquer ação de reciclagem e, posterior, reutilização das pás de rotor de aerogeradores eólicos, concluindo-se que muito provavelmente foram dispostos em aterro sanitário (Larsen, 2009; E2P, 2020b). Na tabela 7, apresenta-se a informação referente aos parques eólicos desativados.

Tabela 7 – Parques eólicos desativados em Portugal (Adaptado de E2P, 2020b).

Nome	Ano de Entrada em Funcionamento	Distrito/Região Autónoma	Potência Instalada (MW)
Serra Branca	1992	Açores	0,2
Caniçal	2001	Madeira	3,3
Lomba de Frades	2002	Açores	1,8
<i>Windplus</i>	2011	Porto	2
Lourel	-	Lisboa	0,02
Porto Santo	-	Madeira	0,27

Existem inúmeras empresas multinacionais fabricantes de turbinas eólicas a operar para Portugal, salientando-se empresas alemãs, dinamarquesas, espanholas, indianas, entre outras. Das empresas alemãs englobam-se a *Enercon*, a *Nordex*, a *Senvion*, a *Repower Systems AG* e a *GE Wind Energy*. Em relação às empresas dinamarquesas, apresentam-se a *Vestas* e a *Siemens Wind Power A/S*. Quanto às empresas espanholas, segue como exemplo a *Gamesa* e a *Ecotècnia*. Por último, uma das empresas indianas é a *Sulzon* (E2P, 2020e).

A potência instalada, em Portugal, pela *Enercon* é de 2863,70 megawatt, pela *Vestas* é de 673,15 megawatt, pela *Gamesa* é de 494 megawatt, pela *Nordex* é de 422,90 megawatt, pela *Senvion* é de 372,15 megawatt, pela *Repower Systems AG* é de 182,60 megawatt, pela *GE Wind Energy* é de 107 megawatt, pela *Ecotècnia* é de 106,88 megawatt, pela *Sulzon* é de 102,90 megawatt e pela *Siemens Wind Power A/S* é de 75,40 megawatt. Ainda assim, existe uma potência instalada de 44,76 megawatt para outras empresas não mencionadas, tal como se pode observar na figura 18 (E2P, 2020e).

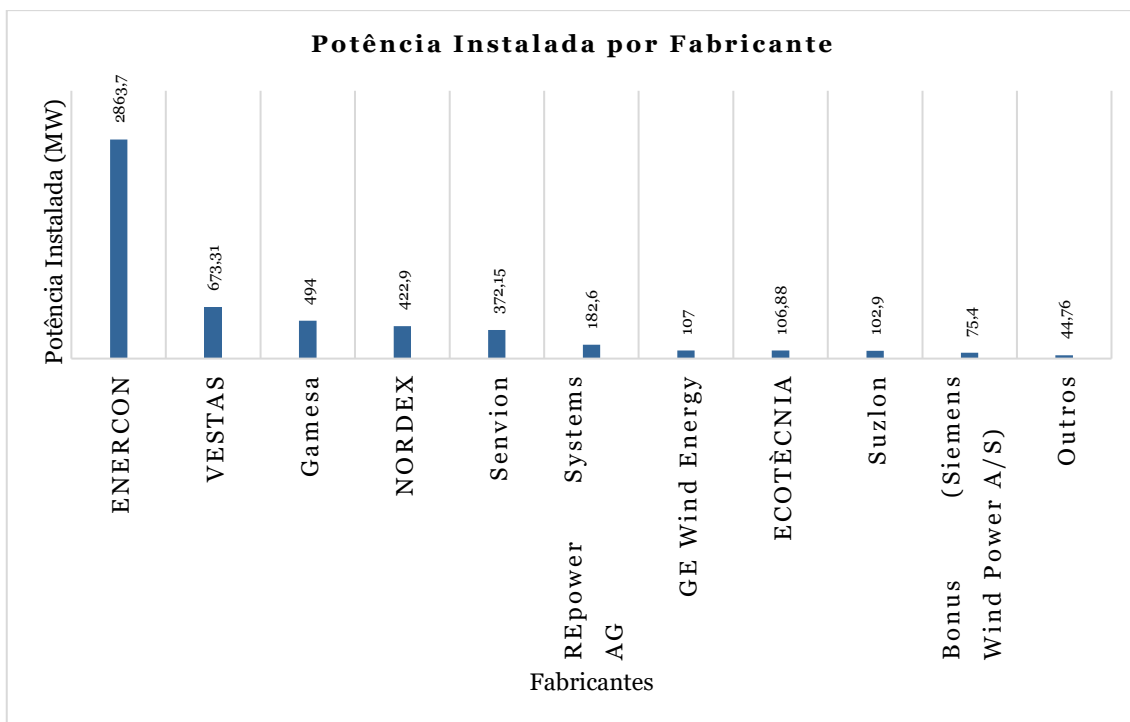


Figura 18 – Potência instalada por fabricante em Portugal (Adaptado de E2P, 2020e).

Quanto à distribuição das quotas de mercado pelos fabricantes, a *Enercon* detém 52,6%, a *Vestas* 12,4%, a *Gamesa* 9,1%, a *Nordex* 7,8%, a *Senvion* 6,8%, a *Repower Systems AG* 3,4%, a *GE Wind Energy* 2%, a *Ecotècnia* 2%, a *Suzlon* 1,9%, a *Siemens Wind Power A/S* 1,4% e, por último, as outras empresas apenas representam 0,8% do setor eólico em Portugal, tal como está ilustrado na figura 19 (E2P, 2020f).

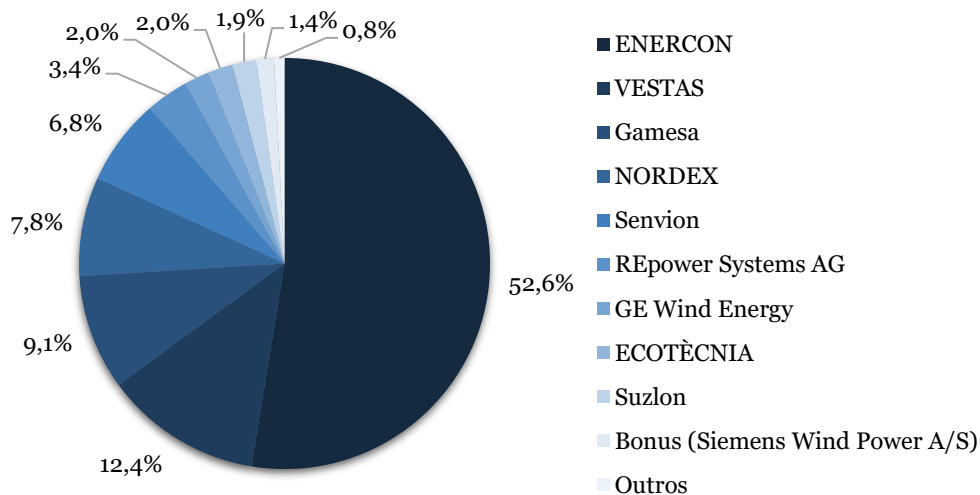


Figura 19 – Quota de mercado dos diversos fabricantes em Portugal (Adaptado de E2P, 2020f).

Em Portugal, existem, pelo menos, 10 empresas a operar como promotores de energia eólica, tais como, a EDP Renováveis, a *Iberwind*, a *Finerge*, a *Trustenergy*, a *Generg*, a EEVM, a *JP Morgan*, a EDF EN, a Lesteenergia e a *Brookfield Renewable* que gerem uma potência instalada de 1158,16 megawatt, 725,75 megawatt, 722,6 megawatt, 488,5 megawatt, 448,4 megawatt, 320,2 megawatt, 190,9 megawatt, 186,8 megawatt, 143,8 megawatt, 123,1 megawatt, respetivamente. No entanto, os outros promotores não mencionados apresentam uma potência de 941,71 megawatt, tal como se pode observar na figura 20 (E2P, 2020g).

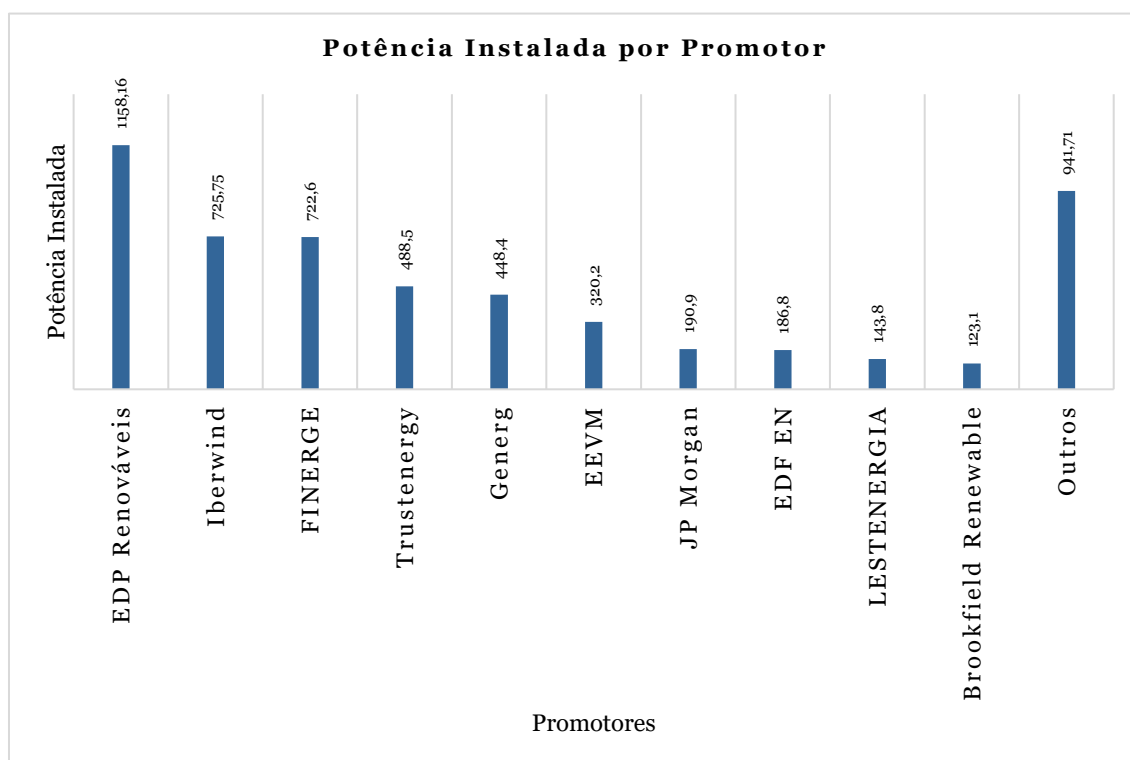


Figura 20 – Potência instalada por promotor em Portugal (Adaptado de E2P, 2020g).

Em relação à quota de mercado dos promotores de energia, a EDP Renováveis detém 21,3%, a *Iberwind* 13,3%, a *Finerge* 13,3%, a *Trustenergy* 9%, a *Generg* 8,2%, a EEVM 5,9%, a *JP Morgan* 3,5%, a EDF EN 3,4%, a Lesteenergia 2,6%, a *Brookfield Renewable* 2,3% e para os outros promotores de energia eólica resta uma percentagem de 17,3%, conforme ilustrado na figura 21 (E2P, 2020h).

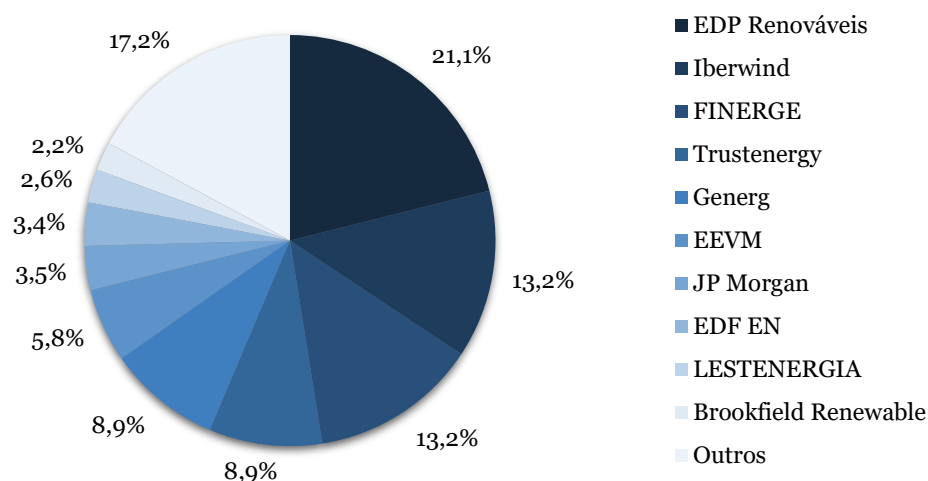


Figura 21 – Quota de mercado dos diversos promotores em Portugal (Adaptado de E2P, 2020h).

Atualmente, Portugal está a enfrentar uma época crítica no que diz respeito à energia eólica. Uma verdade inegável é que, os parques eólicos nacionais estão a ficar envelhecidos. Visto que, esta tendência é irreversível, a única forma de colmatar este problema será prolongar o período de vida útil dos aerogeradores eólicos, impondo um limite mínimo de 20 anos para os mais antigos. Porém, não existindo qualquer tipo de legislação que permita delimitar o período mínimo de vida útil dos mesmos, muito dificilmente se conseguirá garantir a manutenção dos parques eólicos (IEP, 2019).

É por isso fundamental ter em consideração o futuro do setor eólico em Portugal. Pois, em 2023, prevê-se que 72% dos parques eólicos estejam em operação há mais de 15 anos. Porém, uma situação mais preocupante será no ano 2028, para o qual se estima que 95% dos parques tenham ultrapassados os 15 anos de vida útil, correspondente a 92% da potência instalada em Portugal, cerca de 4901 megawatt (IEP, 2019).

Capítulo 5

Problemática das Pás de Rotor dos Aerogeradores Eólicos no Fim de Ciclo de Vida

Neste capítulo apresenta-se uma breve explicação sobre os componentes e os materiais que constituem um aerogerador eólico. Também é abordado o fluxo de resíduos nas diferentes fases do ciclo de vida das pás de rotor, fazendo referência à responsabilidade alargada do produtor. Por último, são apresentados exemplos práticos do reaproveitamento das pás de rotor.

5.1. Aerogerador Eólico: Componentes e Materiais

Um aerogerador eólico pode apresentar mais de 8 000 peças, no entanto, de modo a compreender o seu funcionamento, resumem-se os seus componentes a três seções principais, nomeadamente, o rotor, que engloba as pás e o cubo, o sistema de transmissão, constituído pela caixa de velocidades, pelo gerador e pelo eixo, e o sistema de controlo, tal como se pode observar na figura 22 (Busby, 2012).

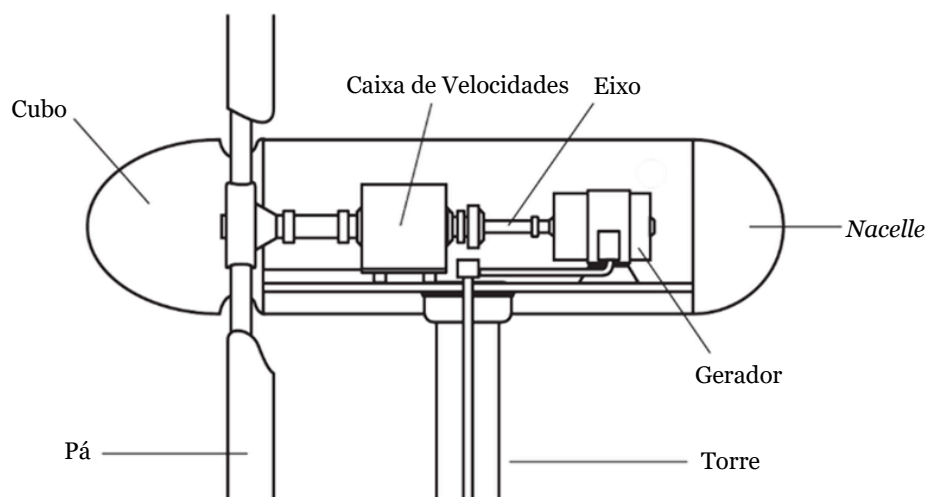


Figura 22 – Representação dos principais componentes de um aerogerador eólico (Adaptado de Busby, 2012).

O rotor é constituído pelo conjunto das pás, incluindo o cubo, sendo as pás de rotor um dos componentes principais dos aerogeradores eólicos, uma vez que, convertem a energia cinética do movimento do vento em energia mecânica, através da rotação do eixo de transmissão. Por sua vez, as pás de rotor, em conjunto, com o cubo e o restante sistema são montados numa torre, geralmente, construída em betão ou com seções anelares de

aço, apresentando um diâmetro mais estreito no topo. Nos últimos anos, as torres apresentam-se cada vez mais altas para permitir às pás funcionarem com a captação de ventos com maiores velocidades (Busby, 2012).

O sistema de transmissão, engloba o eixo de transmissão principal, a caixa de velocidades e o gerador, protegidos pela *nacelle*. O eixo de transmissão gira pelas pás de rotor e, por sua vez, transfere energia mecânica para a caixa de velocidades, acelerando a rotação e, assim, transfere essa energia para o gerador, produzindo eletricidade (Busby, 2012).

Quanto ao sistema de controlo, este é responsável por avaliar os parâmetros da turbina eólica, tais como, a velocidade do rotor, o passo da lâmina, a potência, a posição da *nacelle*, entre outros (Busby, 2012).

Visto que, as pás de rotor são o foco deste trabalho, é fundamental expor a sua estrutura e composição. Primeiramente, deve-se salientar que as composições dos materiais das pás variam consoante o tipo de pá e os fabricantes (Cefic, EuCia & Wind Europe, 2020). Por exemplo, as pás da empresa *Vestas* apresentam, principalmente, na sua constituição fibra de carbono, fibra de vidro, resina epóxi e adesivo de poliuretano (Joeman, 2019).

Um dos componentes das pás de rotor são as vigas, estas são constituídas por fibras de vidro ou carbono unidireccionais, suportadas por uma matriz de epóxi, poliéster, vinil éster ou poliuretano. Salienta-se que, o reforço primário das pás de rotor é de fibra de vidro, uma vez que, a fibra de carbono é usada em menor quantidade, na longarina. Outros dois componentes são as longarinas e as conchas, estes são laminados em “sanduíche” multiaxiais de PRFV, que usam madeira de balsa ou espumas, tais como, cloreto de polivinilo ou terftalato de polietileno, como material do núcleo e, ainda, um sistema de matriz de epóxi, poliéster, vinil éster ou poliuretano. A borda de saída da pá, a borda de ataque, bem como, as ligações de rede são constituídas por um adesivo estrutural à base de epóxi ou poliuretano. Por sua vez, os cabos de proteção contra descargas elétricas apresentam na sua constituição alumínio, cobre e parafusos de aço. Como revestimento da superfície é aplicada uma laca à base de poliuretano. Por último, a proteção da extremidade da pá de rotor pode ser uma laca ou uma fita de poliuretano, conforme ilustrado na figura 23 (Cefic, EuCia & Wind Europe, 2020).

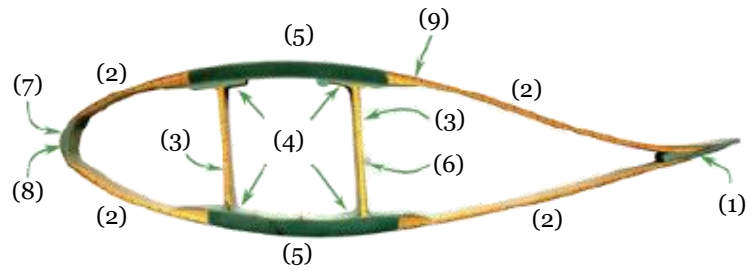


Figura 23 – Esquema representativo da estrutura da pá de rotor: (1) borda de ataque; (2) painel de concha; (3) rede de corte; (4) ligação das redes; (5) viga; (6) cabo de proteção contra descargas elétricas; (7) proteção da extremidade da pá de rotor; (8) borda de saída da pá; (9) superfície de revestimento (Adaptado de Cefic, EuCia & Wind Europe, 2020).

5.2. Fluxo de Resíduos das Pás de Rotor

Estima-se, entre 2029 e 2033, existam 400 000 toneladas de resíduos resultantes das pás de rotor em FCV. Ainda mais preocupante, somente na China, espera-se atingir 1 500 000 toneladas de material de resíduos das pás de rotor até 2050. Um fluxo de resíduos tão significativo como este não pode ser negligenciado (Hao *et al.*, 2020).

Os resíduos de materiais compósitos não surgem apenas no FCV, mas também durante o processo de fabricação, de operação e de atualização das pás, como por exemplo, no corte de fibras secas, no corte das bordas e das extremidades das lâminas, no processo de acabamento das lâminas, nos testes das lâminas, nos danos acidentais no local da instalação, bem como, nos defeitos após a instalação. Revela-se uma maior percentagem estimada de resíduos na fase de fabricação das pás, cerca de 10 a 18% do peso total da lâmina, tal como se pode observar na tabela 8. Para além disso, esta tabela também estima a percentagem de resíduos das restantes fases do ciclo de vida das pás das eólicas (Jensen & Skelton, 2018).

Tabela 8 – Fluxo de resíduos nas diferentes fases de ciclo de vida das pás de rotor de aerogeradores eólicos (Adaptado de Jensen & Skelton, 2018).

Fases do Ciclo de Vida	Fabricação	Operação	Atualização	FCV
Causas Contribuintes	<ul style="list-style-type: none"> - Processo dos resíduos; - Teste de lâminas; - Defeitos nas lâminas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Serviço de rotina; - Danos acidentais. 	<ul style="list-style-type: none"> - Troca de lâminas, devido a falhas ou atualizações para o diâmetro do rotor. 	<ul style="list-style-type: none"> - Desativação das lâminas.
Percentagem Estimada de Resíduos	≈ 10 a 18% do peso total da lâmina	≈ 3% do peso total da lâmina	≈ 5% do peso total da lâmina	≈ 5% do peso total da lâmina

Para além de mencionar a percentagem estimada de resíduos nas diversas fases do ciclo de vida, é importante abordar a procura acumulada de energia, do inglês *cumulative energy demand* (CED), as emissões de gases de efeito de estufa, do inglês *greenhouse-gas* (GHG), bem como, os ecopontos¹² associados à fase de produção. Das matrizes mencionadas, a resina epóxi é aquela que apresenta valores mais elevados de CED, de GHG, bem como, de ecopontos, tal como se pode observar na tabela 9 (Duflou *et al.*, 2012).

¹² São pontuações associadas ao impacte ambiental, sendo expressas em miliecopontos.

Tabela 9 – Parâmetros abordados na caracterização dos constituintes das pás de rotor na fase de produção (Adaptado de Duflou *et al.*, 2012).

Materiais Constituintes		CED (MJ/kg)	GHG ((kg CO ₂ e)/kg)	Ecopontos (mPT/kg)
Matrizes	Epóxi Líquido	76-137	4,7-8,1	734
	Poliéster Insaturado	62,8-78	2,3	644
Reforço	Fibra de Vidro	45	2,6	264

A responsabilidade alargada do produtor, do inglês *extended producer responsibility* (EPR), é apresentada no Artigo 10.º-A, do Decreto-Lei n.º 73/2011 (Decreto-Lei n.º 73/2011, 2011). Esta política surgiu no setor eólico para impulsionar a mudança nas práticas industriais, alcançando uma produção mais limpa. Define-se EPR como uma política ambiental, onde a responsabilidade, total ou parcial, física ou financeira é atribuída ao produtor do produto. Este é responsável pelos impactes ambientais, pela produção de resíduos no decorrer do processo de fabrico, pela posterior utilização dos resíduos e pela gestão do produto quando atinge o FCV. Simplificando, a EPR inclui todo o seu ciclo de vida, desde a própria escolha dos materiais para a conceção do produto até ao final da sua vida útil, com o intuito de melhorar as condições do produto numa economia circular. Conforme ilustrado na figura 24, a aplicação da EPR envolve vários estados do ciclo de vida no setor eólico, nomeadamente, a escolha dos materiais, a manufatura, a instalação, a operação e manutenção e, por último, desmantelamento e o fim de vida (Jensen & Skelton, 2018).

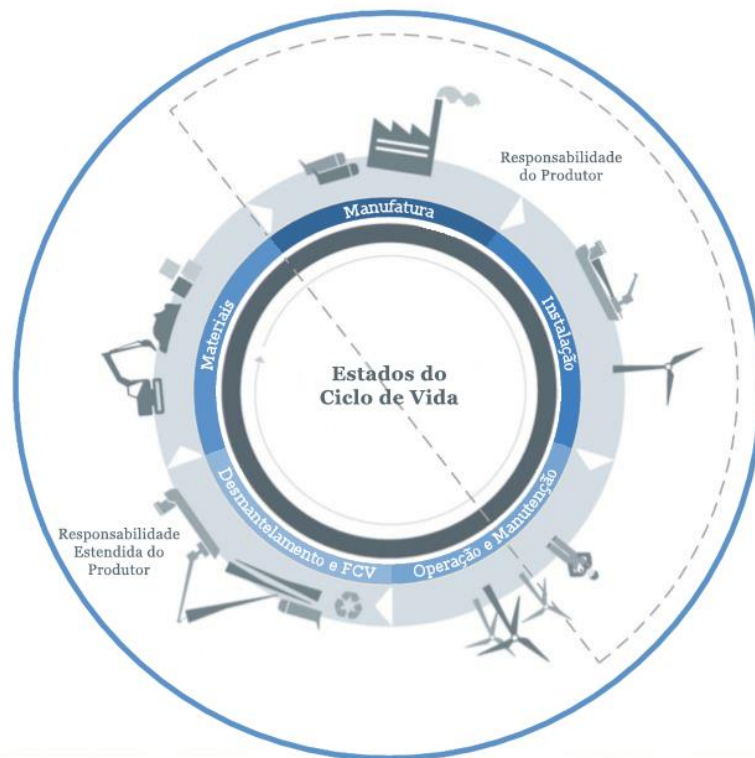


Figura 24 – Responsabilidade estendida do produtor na indústria eólica (Adaptado de Jensen & Skelton, 2018).

Por vezes, o produtor é obrigado a promover alterações na conceção do produto, de modo a garantir uma menor geração de resíduos na fase de produção e posterior utilização, bem como, no tratamento dos produtos que tenham assumido o papel de resíduos. Este envolvimento em toda a cadeia de valor faz com que a EPR seja transferida, apenas, para o setor em si, através da apresentação de soluções alternativas e sustentáveis (Decreto-Lei n.º 73/2011, 2011; Jensen & Skelton, 2018).

5.3. Exemplos Práticos do Reaproveitamento das Pás de Rotor

A prevenção é aplicada no ciclo de vida das pás de rotor, através de uma rotina de manutenção constante, conseguindo-se prolongar a sua vida útil. Também se pode recorrer a procedimentos de restauro das pás, por inspeções visuais, ultrassónicas ou, mesmo, por medições de frequência natural. Para além do mais, as pás podem ser repintadas e ajustadas (Skelton, 2017).

Um exemplo de reutilização consiste na reparação de uma lâmina e, posteriormente, instalá-la numa turbina já existente ou, até mesmo, numa nova turbina. Também, um outro exemplo consiste na transformação de uma lâmina num novo produto, com uma nova função. Atualmente, existem diversas empresas, tais como, a *Green-Ener-Tech*, a

Repowering Solutions, a *Enerpower*, a *Spare in Motion*, que fazem da venda de turbinas ou de componentes, o seu negócio (Skelton, 2017). Por vezes, a reutilização das pás de rotor para uma certa aplicação, pode agregar um valor inferior quando comparada à aplicação original, como por exemplo, a reutilização de lâminas para parques infantis, mobiliário urbano, construção de estruturas, tais como, abrigo para bicicletas, passeios, entre outros, conforme ilustrado na figura 25 (Cefic, EuCia & Wind Europe, 2020). Este tipo de tratamento, designado também por reciclagem primária, consiste em alterações mínimas na estrutura da lâmina, onde o novo produto apresenta propriedades equivalentes ou semelhantes ao original (Skelton, 2017). Porém, estes exemplos mencionados anteriormente não são a melhor solução para os volumes futuros esperados no setor eólico (Cefic, EuCia & Wind Europe, 2020).

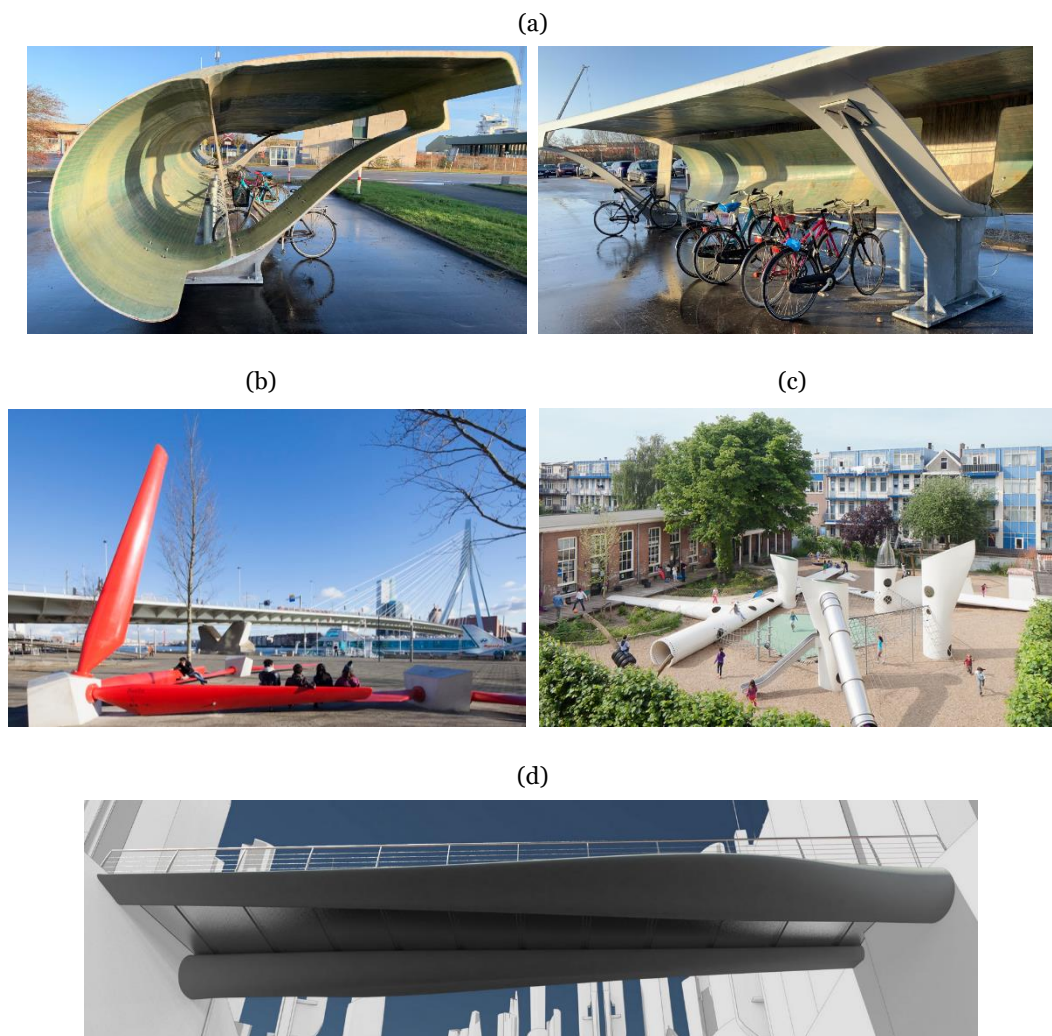


Figura 25 – Exemplos práticos de reutilização das pás de rotor de aerogeradores eólicos: (a) abrigo para bicicletas em *Aalborg*, Dinamarca; (b) bancos públicos da empresa holandesa *Superuse Studios* instalados no município de *Rotterdam*, Holanda; (c) parque infantil da empresa holandesa *Superuse Studios* instalado em *Rotterdam*, Holanda; (d) design de uma ponte feita de lâminas para o tráfego lento (Adaptado de Joye, 2015; Speksnijder, 2019; Cefic, EuCia & Wind Europe, 2020).

Aplica-se o termo reciclagem quando, por exemplo, uma pá de rotor é submetida a um novo produto ou material com funcionalidades diferentes, havendo uma notória melhoria na qualidade ou na funcionalidade do produto, tal como se pode observar na figura 26 (Skelton, 2017).

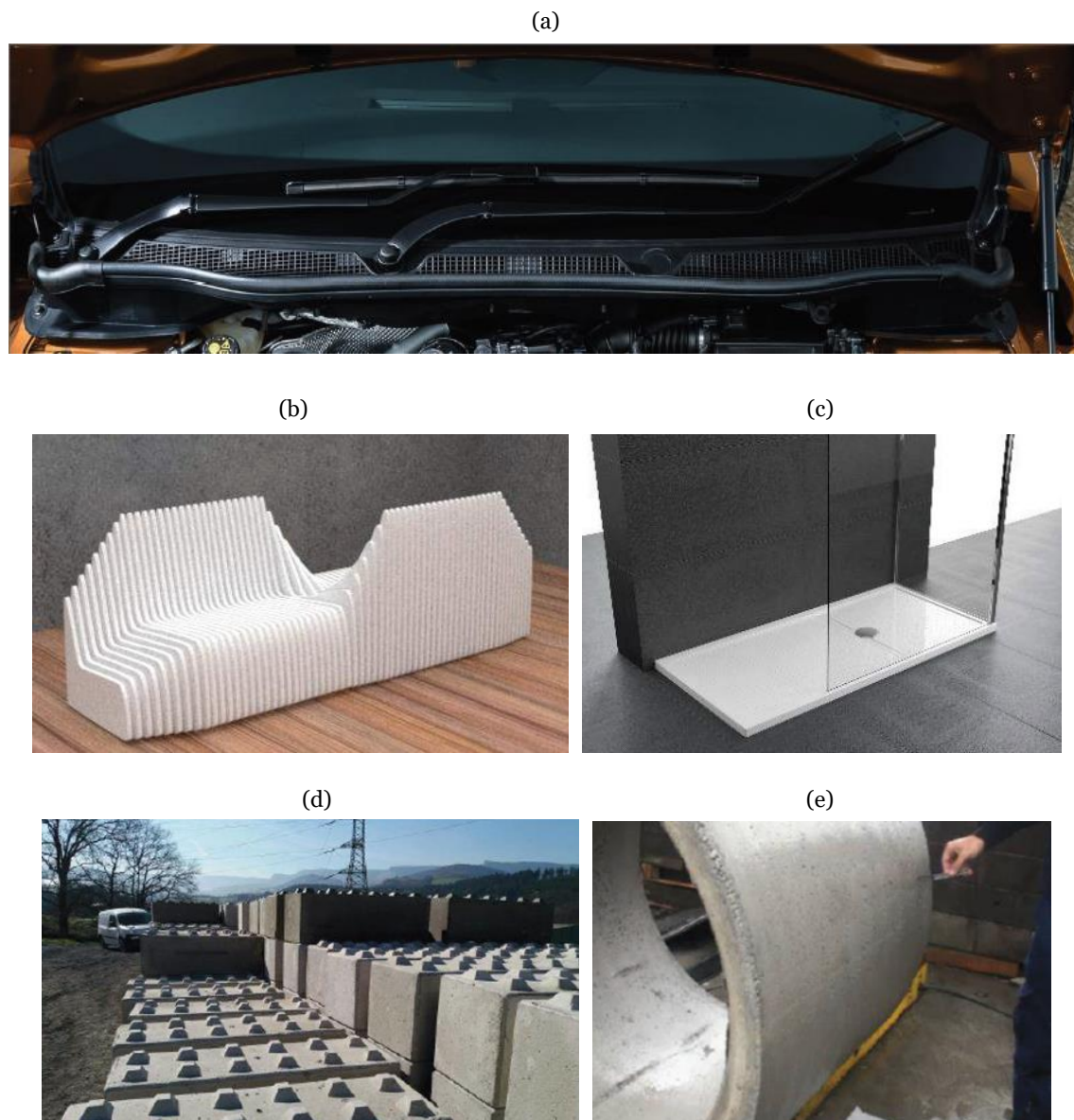


Figura 26a – Exemplos práticos de reciclagem das pás de rotor de aerogeradores eólicos: (a) ferramenta de suporte do capô da empresa *Maier*; (b) mobiliário urbano moderno da empresa *DesignAustria*; (c) móveis de casa de banho da empresa *Novellini*; (d) Blocos de betão pré-fabricados, obtidos por reciclagem mecânica; (e) Caixas de inspeção de esgoto em betão pré-fabricado, obtidos por reciclagem mecânica (Adaptado de Cefic, EuCia & Wind Europe, 2020).

(f)



(g)

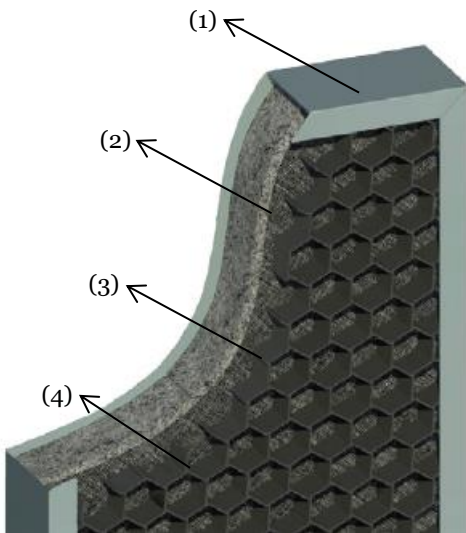


Figura 26b – Exemplos práticos de reciclagem das pás de rotor de aerogeradores eólicos: (f) barreiras de betão pré-fabricado, em *New Jersey*; (g) barreiras de isolamento de ruído, (1) elemento de barreira de ruído; (2) material de absorção acústica de fibra de vidro reciclada; (3) têxtil poroso; (4) estrutura protetora aberta (Adaptado de Cefic, EuCia & Wind Europe, 2020)

Capítulo 6

Reciclagem de Materiais Compósitos

Neste capítulo serão descritos os diferentes tipos de reciclagem, tais como, a reciclagem mecânica, térmica e química. Assim como, métodos de reciclagem que combinam técnicas. Por fim, apresenta-se uma comparação dos resultados obtidos na aplicação dos diferentes métodos.

6.1. Tipos de Reciclagem

Existem diversos processos de reciclagem para compósitos termoendurecíveis, nomeadamente, os processos mecânicos, os processos térmicos e os processos químicos. Estes encontram-se categorizados consoante a recuperação dos materiais após a reciclagem, compreendendo um alto ou baixo nível de recuperação.

Dos processos térmicos destacam-se a combustão, a pirólise, a pirólise assistida por micro-ondas e, por último, o processo em leito fluidizado. Quanto aos processos químicos, estes incluem a solvólise e a hidrólise. Na figura 27, são esquematizados os vários processos de reciclagem de compósitos termoendurecíveis (Asmatulu, Twomey & Overcash, 2014; Hagnell & Åkermo, 2019).

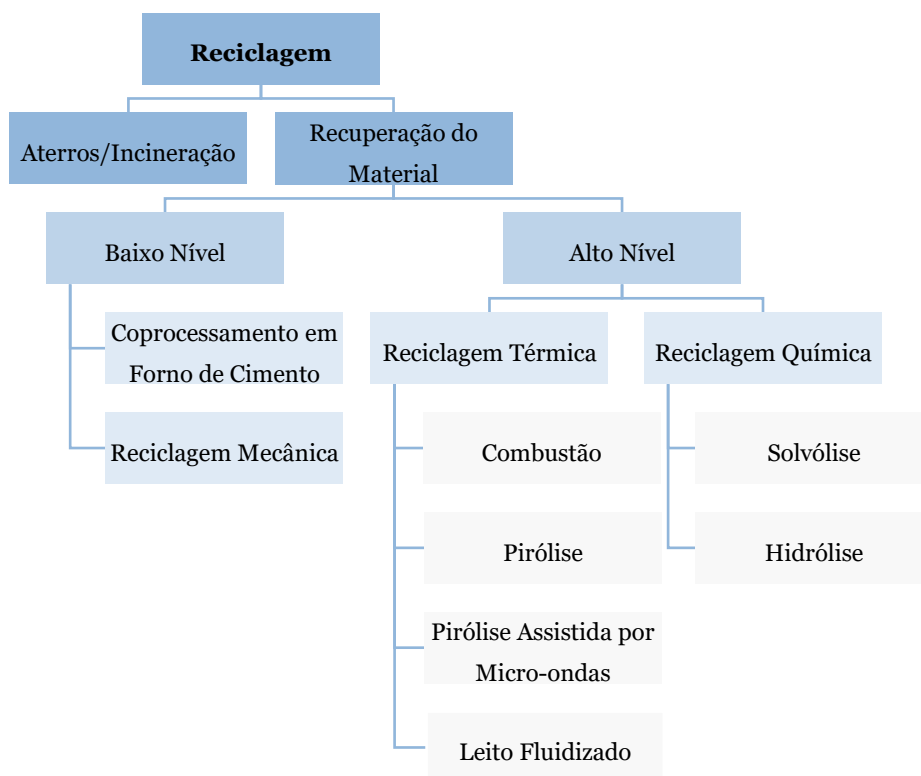


Figura 27 – Processos de reciclagem de compósitos termoendurecíveis (Adaptado de Asmatulu, Twomey & Overcash, 2014; Hagnell & Akermo, 2019).

6.1.1. Reciclagem Mecânica

A reciclagem mecânica, também designada por reciclagem física, de um modo geral, consiste na redução gradual do tamanho do material compósito (Hamad, Kaseem & Deri, 2013). A primeira etapa deste processo integra o corte ou a trituração a baixa velocidade, onde o tamanho é reduzido aproximadamente a 100 milímetros. Em seguida, remove-se os fragmentos de metal, recorrendo ao uso de campos magnéticos. A segunda etapa envolve o dimensionamento dos diferentes fragmentos, recorrendo à fresagem de alta velocidade com o intuito de se conseguir uma retificação fina, apresentando frações de 10 a 50 milímetros. Assim, através de um tamanho menor consegue-se separar as fibras das partículas de resina, normalmente, resinas termoendurecíveis (Asmatulu, Twomey & Overcash, 2014; Kalkanis *et al.*, 2019). Imediatamente, recorre-se à classificação das partículas dos compósitos através de ciclones e peneiras, sendo que as partículas mais grossas são conhecidas por serem ricas em fibras e as partículas mais finas são conhecidas por serem ricas em resinas. É importante realçar que esta separação também é diferenciada consoante a qualidade das partículas. No entanto, existem compósitos triturados que não são classificados, sendo apenas uma mistura de fibras, de fragmentos de compósitos e de pó, tal como se pode observar na figura 28 (Beauson, Lilholt & Brøndsted, 2014; Kalkanis *et al.*, 2019).



Figura 28 – Mistura de materiais compósitos não classificada (Adaptado de Beauson, Lilholt & Brøndsted, 2014).

Quanto à classificação dos compósitos triturados resultantes de processos mecânicos, pode-se observar, na figura 29, quatro diferentes misturas. As que apresentam uma maior percentagem de vidro é a figura 29 (a) e (b), apresentando tamanhos de partículas compreendidos entre 10 microm e 20 milímetros. Por outro lado, a figura 29 (c) é aquela que apresenta fragmentos mais grossos, enquanto que, a figura 29 (d) é uma mistura de um pó, com tamanhos de partículas na ordem dos microm, sendo este pó rico em resina (Beauson, Lilholt & Brøndsted, 2014).

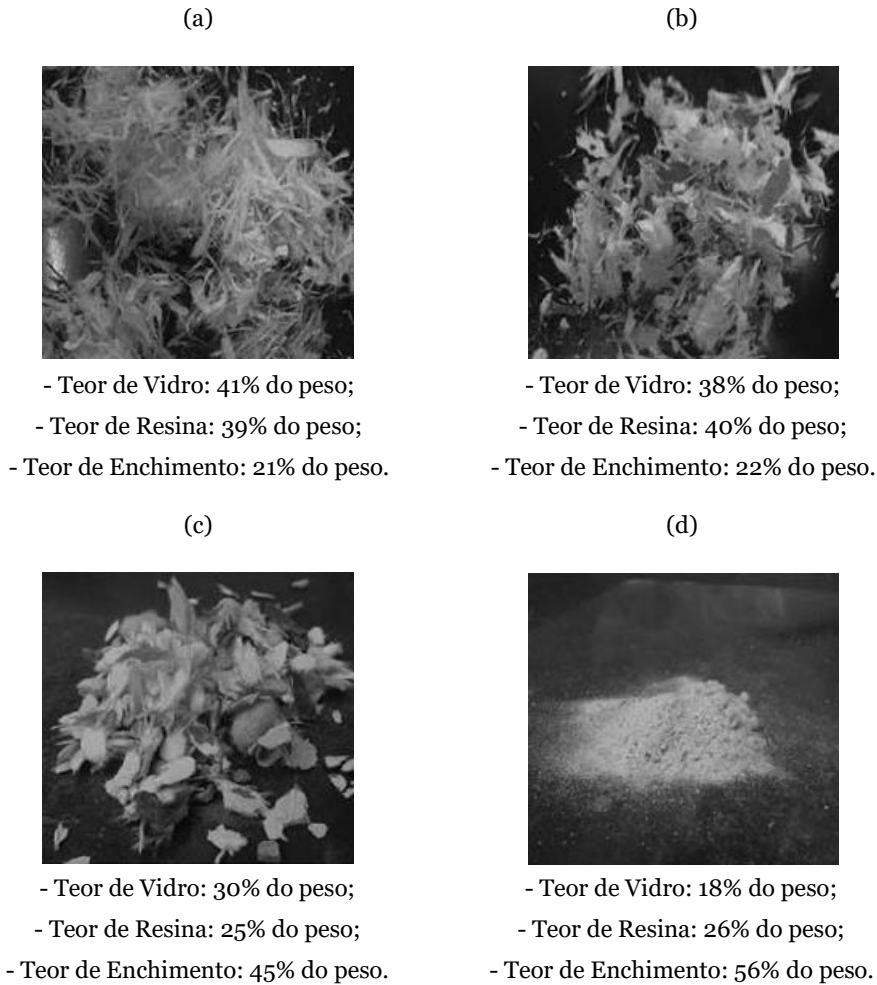


Figura 29 – Compósitos triturados classificados em quatro tipos de misturas de qualidade (Adaptado de Beauson, Lilholt & Brøndsted, 2014).

É de salientar que o método de reciclagem mecânico foi desenvolvido para ser aplicado nos compósitos reforçados com fibra de vidro e nos compósitos reforçados com fibra de carbono, no entanto, é mais recorrente a sua aplicabilidade nos PRFV. Deve-se também mencionar que os produtos reciclados dos processos mecânicos podem ser matérias-primas para um conjunto de aplicações, nomeadamente, para materiais de enchimento e de reforço na fabricação de novos materiais compósitos (Beauson, Lilholt & Brøndsted, 2014). Para além das diferentes aplicações, este método é caracterizado por ser economicamente viável e por ser um processo rápido e competente no que toca à diminuição de tamanhos e à recuperação das fibras (Rahimizadeh *et al.*, 2020). Para uma melhor compreensão, está ilustrado na figura 30 o esquema referente ao processo mecânico.

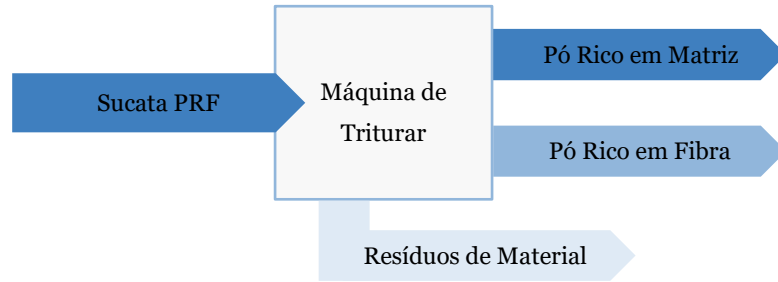


Figura 30 – Representação esquemática do processo mecânico (Adaptado de Cefic, EuCia & Wind Europe, 2020).

6.1.2. Reciclagem Térmica

Os processos térmicos, como mencionado anteriormente, englobam a combustão, a pirólise, a pirólise assistida por micro-ondas e, por último, o processo em leito fluidizado. A reciclagem térmica é caracterizada por requerer um aquecimento externo para decompor os materiais compósitos em diferentes produtos, sejam eles sólidos, líquidos ou gases. Deve-se realçar que esta técnica permite a recuperação das fibras, das cargas e das inserções, mas, nem sempre se consegue a recuperação das resinas, uma vez que, a resina é volatilizada em moléculas de menor tamanho, produzindo gases, tais como, dióxido de carbono (CO_2), hidrogénio (H_2) e metano (CH_4), produzindo também algumas frações de óleos. Estes processos são realizados utilizando gamas de temperatura entre os 450 a 700 °C, dependendo da resina, isto é, as resinas de poliéster são caracterizadas por se adaptarem a temperaturas mais baixas, enquanto que, as resinas de epóxi adaptam-se facilmente a temperaturas mais altas. Pois, uma temperatura inadequada leva à presença de carvão na superfície da fibra ou, até mesmo, à redução do diâmetro das fibras recuperadas. Para além disto, os resíduos compósitos podem ser convertidos em calor para produzir eletricidade, visto que, apresentam um alto valor calorífico (Asmatulu, Twomey & Overcash, 2014; Oliveux, Dandy & Leeke, 2015; Gopalraj & Kärki, 2020).

Começando pela combustão, este processo é muito característico por ser aplicado a fibras ou a partículas inorgânicas curtas, uma vez que, é bastante complicada a recuperação da resina dos resíduos dos materiais compósitos. De um modo geral, este processo requer a recuperação de energia em fornos de cimento. Numa primeira fase, os PRFV são queimados num forno de cimento, com o intuito de adicionar a sílica de vidro ao cimento, enquanto que a parte orgânica fornece uma fonte de calor. Simplificando, os resíduos dos materiais compósitos são convertidos em matéria-prima para o cimento e em energia. Para além disso, apresenta como vantagem o custo de produção do cimento. Este é considerado insignificante, uma vez que, o principal custo deste processo é o calor (Asmatulu, Twomey & Overcash, 2014; Oliveux, Dandy & Leeke, 2015).

A pirólise é um dos processos térmicos mais frequentemente utilizado, sendo conhecida por operar num ambiente com deficit de oxigénio, com o intuito de degradar a parte orgânica do compósito por calor externo em moléculas mais simples (Asmatulu, Twomey & Overcash, 2014). A despolimerização da matriz a altas temperaturas dá-se, normalmente, entre os 300 a 1000 °C, sendo a primeira etapa deste processo. Desta primeira etapa resulta um óleo, gases e resíduos sólidos, tais como, fibras, cargas e carvão. No entanto, existe a possibilidade das fibras serem contaminadas pelo carvão, exigindo um pós-tratamento com o intuito de queimá-lo, tal como se pode observar na figura 31 (Oliveux, Dandy & Leeke, 2015; Kalkanis *et al.*, 2019).

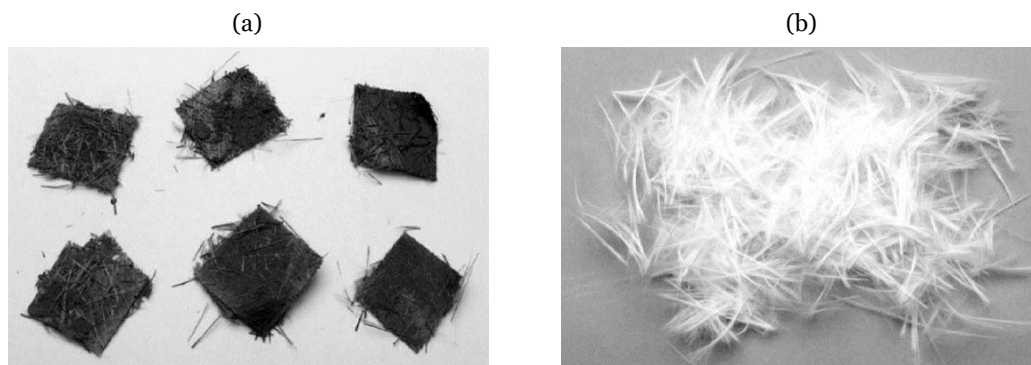


Figura 31 – Processo térmico: (a) resíduos sólidos obtidos por pirólise; (b) fibra recuperada após separação (Adaptado de Oliveux, Dandy & Leeke, 2015).

É importante mencionar que a etapa de pós-tratamento resulta numa maior degradação das fibras e, subsequentemente, as temperaturas mais elevadas afetam significativamente a qualidade das fibras. Por último, destaca-se uma das vantagens da pirólise que consiste no aproveitamento de todos os subprodutos, sendo um método já usado em escala industrial. Na figura 32 está representado um esquema ilustrativo referente ao processo da pirólise (Oliveux, Dandy & Leeke, 2015; Kalkanis *et al.*, 2019; Cefic, EuCia & Wind Europe, 2020)

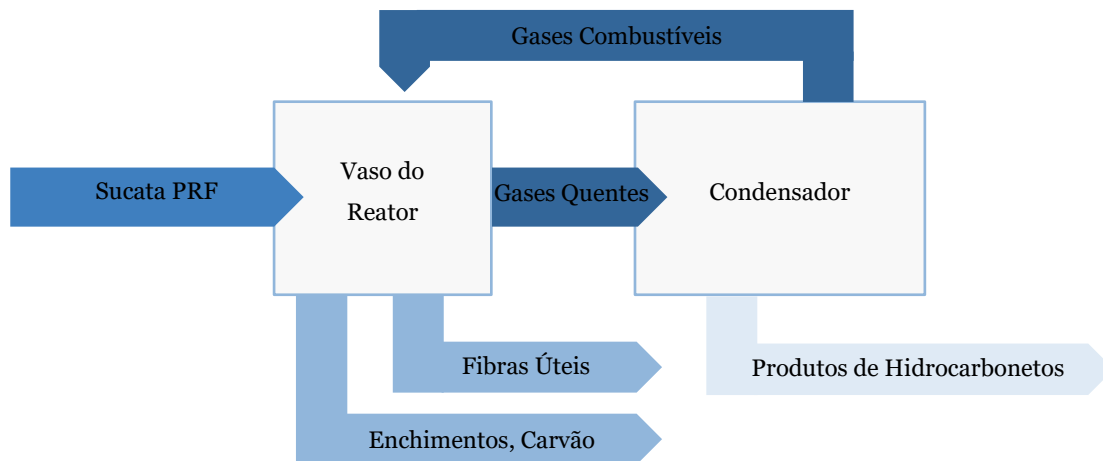


Figura 32 – Representação esquemática do processo térmico, nomeadamente, a pirólise (Adaptado de Cefic, EuCia & Wind Europe, 2020).

Quanto à pirólise assistida por micro-ondas, a sua principal vantagem centra-se no aquecimento do material no seu próprio núcleo, isto é, a fonte de aquecimento convencional neste processo é substituída por radiação micro-ondas, com o intuito de acelerar a transferência térmica e, assim, existe a possibilidade de se poupar energia. Esta técnica consiste no aquecimento dos resíduos compósitos numa atmosfera inerte, resultando óleos e gases da degradação da matriz (Oliveux, Dandy & Leeke, 2015; Gopalraj & Kärki, 2020).

Por fim, o processo em leito fluidizado. O qual é caracterizado por atuar no tratamento de materiais misturados e contaminados, sendo uma das vantagens associadas a este método (Oliveux, Dandy & Leeke, 2015). Também é conhecido por operar a temperaturas elevadas, onde o processo em si consiste na recuperação das fibras e na queima da matriz de resina (Asmatulu, Twomey & Overcash, 2014; Kalkanis *et al.*, 2019). Inicialmente, os materiais em FCV, particularmente, os PRF são distribuídos em *pellets* de pequenos tamanhos, compreendidos entre 20 a 30 milímetros. Em seguida, estes materiais entram num reator de leito de areia de sílica, sendo este aquecido termicamente, atingindo temperaturas de 550 °C, e fluidizado por ar quente para que se consiga obter condições oxidantes. Assim, existe um rápido aquecimento dos materiais, onde a parte orgânica do material compósito é volatilizada por ar quente. Imediatamente, é transportada para uma corrente de ar com partículas de sílica antes da separação e da recolha das frações sólida, tais como, cargas, fibras e partículas de areia. Deve-se salientar, tal como na pirólise, que existe a obrigatoriedade de uma pequena quantidade de oxigénio, de modo a minimizar a formação de carvão (Asmatulu, Twomey & Overcash, 2014; Oliveux, Dandy & Leeke, 2015; Kalkanis *et al.*, 2019). Para finalizar, uma das desvantagens deste método está relacionada com o tamanho dos compósitos, sendo necessária a redução de

tamanho antes do processo de tratamento (Asmatulu, Twomey & Overcash, 2014). Na figura 33, está representando detalhadamente o processo de leito fluidizado.

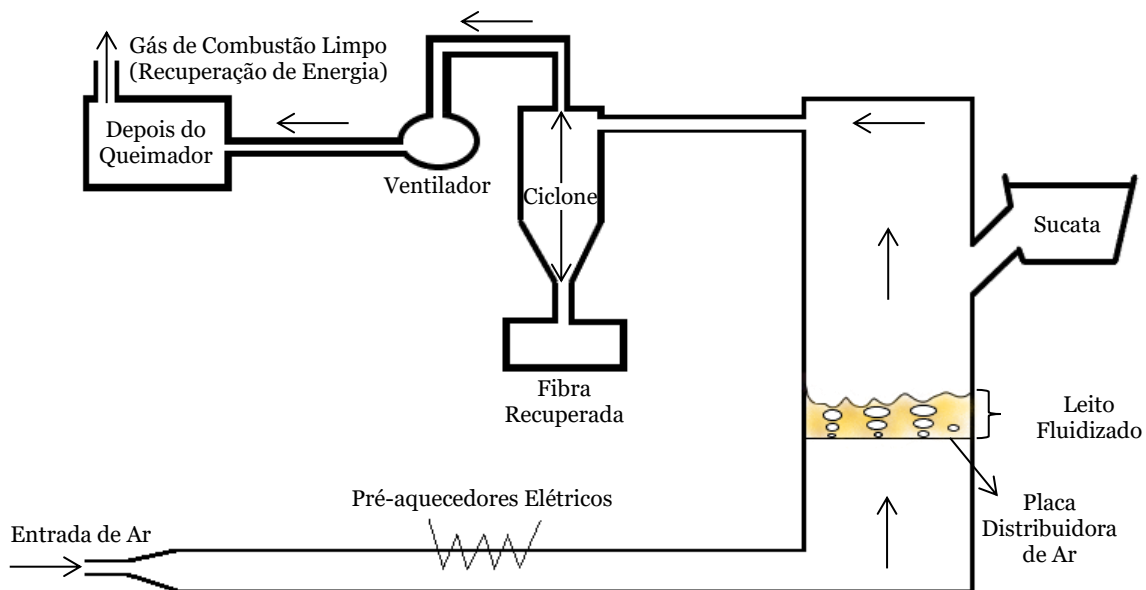


Figura 33 – Descrição do processo de leito fluidizado para a recuperação de fibras e energia (Adaptado de Kalkanis *et al.*, 2019).

6.1.3. Reciclagem Química

Em relação aos processos químicos, estes abrangem a solvólise e a hidrólise, tal como mencionado anteriormente. Os processos químicos são caracterizados pela transformação dos materiais compósitos sólidos em diferentes produtos líquidos, através do uso de diversos solventes. Deve-se salientar, que numa primeira fase, os resíduos sólidos são submetidos a um processo mecânico, com o intuito de aumentar a área da superfície do material e, assim, aumentar o processo de difusão. De um modo geral, estes processos consistem na degradação dos materiais da matriz, a resina, em soluções químicas básicas. Deste modo, ocorre a dissolução da parte orgânica dos materiais compósitos. Uma das vantagens competitivas deste método é o facto de ser menos agressivo para com os materiais, quando comparado com os restantes métodos, no entanto, também é caracterizado por consumir inúmeros produtos químicos, tais como, ácidos, bases, solventes e líquidos, sendo uma das suas desvantagens (Asmatulu, Twomey & Overcash, 2014; Oliveux, Dandy & Leeke, 2015).

A diferença entre a solvólise e a hidrólise foca-se no solvente, a solvólise é caracterizada por usar solventes orgânicos, enquanto, a hidrólise faz uso da água como solvente. Quanto à solvólise esta visa degradar a formação de poliéster-estireno da resina de poliéster, através da reação de ligações éster com refluxo que advêm de um solvente,

apresentando diferentes tempos de reação e concentrações de solvente. A solvólise oferece uma ampla gama de temperaturas, pressões, agitação e catalisadores que são parâmetros que se devem ter em atenção, uma vez que, podem ser alterados para aumentar a cinética deste processo. Usualmente, são necessárias temperaturas mais baixas para degradar os polímeros, sendo uma das vantagens deste método quando comparado à pirólise. Por outro lado, a hidrólise é considerada um processo de decomposição química, onde ocorre a dissolução das substâncias orgânicas pela água, acabando por reduzir o valor do produto final. O facto deste processo possibilitar a ocorrência de corrosão devido às propriedades modificadas e operar a temperaturas e pressões mais elevadas, exige a utilização de reatores com preços bem mais significativos, sendo uma das desvantagens deste processo. (Asmatulu, Twomey & Overcash, 2014; Oliveux, Dandy & Leeke, 2015). Para uma melhor compreensão da reciclagem química por solvólise, apresenta-se a figura 34.

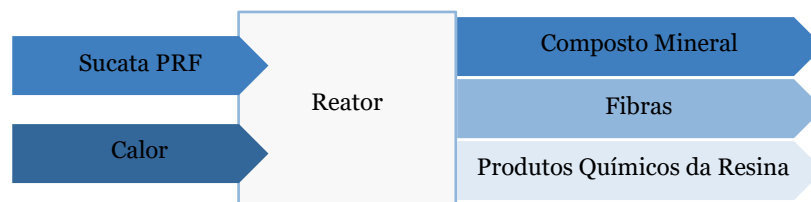


Figura 34 – Representação esquemática do processo químico, particularmente, a solvólise (Adaptado de Cefic, EuCia & Wind Europe, 2020).

As condições supercríticas ganharam uma especial atenção, a partir do ano 2000, devido à facilidade de ajustar as propriedades dos solventes, uma vez que, os solventes supercríticos demonstravam propriedades intermédias entre o meio líquido e o meio gasoso. Através de alterações de pressão, é possível controlar as propriedades do solvente, os tempos de reação, bem como, a seletividade. Salienta-se que, dependendo das condições adotadas, os solventes supercríticos são capazes de suportar reações iónicas, polares não iónicas ou de radicais livres, daí serem considerados adaptáveis (Oliveux, Dandy & Leeke, 2015).

É importante ter em consideração a concentração da resina, uma vez que, se esta estiver muito concentrada, faz com que o meio líquido fique saturado e, por sua vez, provoca o desaceleramento da reação. Também se consegue evitar a acumulação de resinas nas fibras e a degradação de produtos resultantes da resina. No entanto, quando se opera com temperaturas mais baixas, uma das vantagens é o controlo da reação, uma vez que, as reações secundárias já não ocorrem, possibilitando uma melhor recuperação dos monómeros de epóxi (Oliveux, Dandy & Leeke, 2015).

Para uma melhor compreensão e visualização do resultado da aplicação dos diferentes métodos, é apresentada na figura 35 uma fibra de vidro virgem. De seguida, na figura 36, são apresentados os resultados da recuperação das fibras de vidro pelos diferentes processos de reciclagem abordados anteriormente (Beauson, Lilholt & Brøndsted, 2014).

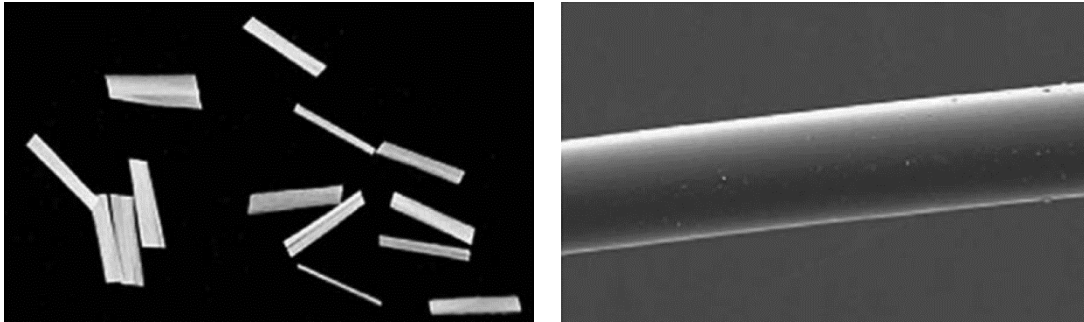


Figura 35 – Fibra de vidro virgem (Adaptado de Beauson, Lilholt & Brøndsted, 2014).

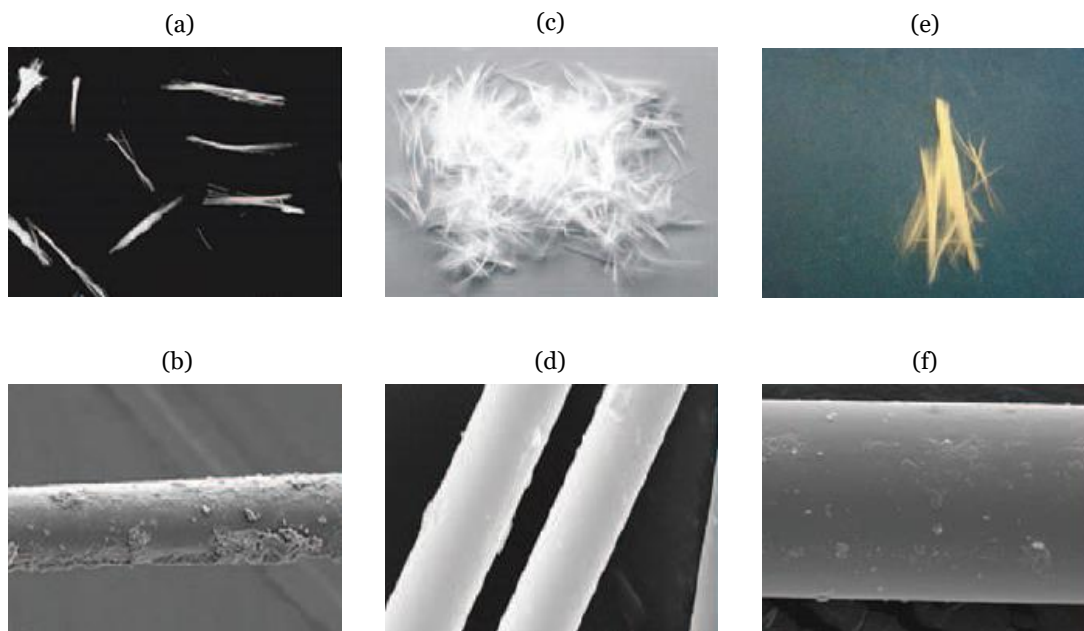


Figura 36 – Fibra de vidro recuperada pelos diferentes processos de reciclagem: (a) e (b) processo mecânico; (c) e (d) processo térmico, nomeadamente, a pirólise; (e) e (f) processo químico (Adaptado de Beauson, Lilholt & Brøndsted, 2014).

6.2. Métodos Combinados

No que diz respeito aos métodos combinados, destaca-se o método térmico combinado com o método mecânico. Quanto ao método térmico, a pirólise é o processo mais utilizado nos métodos combinados de reciclagem. Inicialmente, as amostras dos materiais compósitos são cortadas em fragmentos, normalmente entre 10 a 15 milímetros, com o intuito de conseguirem atravessar o reator da pirólise e, em seguida, são armazenadas em sacos de plásticos lacrados. As mesmas amostras passam por um

moinho de facas *Pulverisette 15*, obtendo-se um tamanho de partículas inferiores a 0,25 milímetros. Nestas primeiras etapas é aplicado o processo mecânico. Em seguida, recorre-se ao reator de leito estático a uma temperatura de 450 °C para pirolisar as amostras e assim conseguir recuperar parte das fibras (Cunliffe, Jones & Williams, 2003).

Também existe a combinação do método químico com o método térmico, onde o método químico adotado é a solvólise, daí designarem a este método combinado solvotérmico. Este método consiste na despolimerização por uma reação solvotérmica, utilizando como catalisador o fosfato de tripotássio (K_3PO_4), num solvente de éter monometílico de dietilenoglicol, do inglês *diethyleneglycol monomethylether* (DGMM), e álcool benzílico (C_7H_8O), no seu estado subcrítico (Iwaya *et al.*, 2008).

6.3. Comparação de Resultados Obtidos

Nas tabelas seguintes (10 a 17) são apresentados os resultados obtidos na recuperação das fibras de vidro por métodos de reciclagem isolados ou combinados.

Especificamente, na tabela 10 são apresentados os resultados obtidos por reciclagem mecânica, na qual se pode verificar que quanto maior for o comprimento da fibra, maior é a redução na resistência à tração da fibra recuperada quando comparada com a fibra virgem (Beauson, Lilholt & Brøndsted, 2014; Asmatulu, Twomey & Overcash, 2014).

Tabela 10 – Propriedades mecânicas das fibras de vidro recuperadas através da reciclagem mecânica (Adaptado de Beauson, Lilholt & Brøndsted, 2014; Asmatulu, Twomey & Overcash, 2014).

Processo de Reciclagem	Parâmetros	Resultados Obtidos
Reciclagem Mecânica	Resistência à Tração (%)	
	Medição do comprimento em 5 mm	Fibra Virgem - Para um comprimento de 5 mm, existe uma redução de
		Fibra Recuperada -17 17% da fibra recuperada em relação à sua fibra virgem;
	Medição do comprimento em 10 mm	Fibra Virgem - Para um comprimento de
		Fibra Recuperada -21 21% da fibra recuperada em relação à sua fibra virgem;
	Medição do comprimento em 15 mm	Fibra Virgem - Para um comprimento de
	Fibra Recuperada -29 29% da fibra recuperada em relação à sua fibra virgem.	

Na tabela 11, são apresentados os resultados obtidos por reciclagem mecânica e por reciclagem térmica, nomeadamente, a pirólise. Quanto à reciclagem mecânica é notória uma diminuição das propriedades mecânicas das fibras recuperadas, daí serem consideradas fracas. No entanto, com um tempo de mistura mais longo, é possível a obtenção de melhorias nas propriedades mecânicas. Em relação à pirólise revela-se uma diminuição, no mínimo, de 50% das propriedades mecânicas (Oliveux, Dandy & Leeke, 2015; Kalkanis *et al.*, 2019; Rahimizadeh *et al.*, 2020).

Tabela 11 – Propriedades mecânicas das fibras de vidro recuperadas através da reciclagem mecânica e da reciclagem térmica, nomeadamente, a pirólise (Adaptado de Oliveux, Dandy & Leeke, 2015; Kalkanis *et al.*, 2019; Rahimizadeh *et al.*, 2020).

Processo de Reciclagem	Resultados Obtidos
Reciclagem Mecânica	<p>As fibras recicladas quando comparadas com as fibras virgens, são consideradas mais frágeis, exibindo uma interface mais fraca com a matriz.</p> <p>Produção de fibras mais curtas, exibindo uma diminuição das propriedades mecânicas;</p> <p>O tempo de mistura afeta positivamente as propriedades mecânicas dos materiais obtidos, concluindo-se que para um tempo de mistura mais longo obteve-se um reciclado com melhores propriedades mecânicas, em comparação com o tempo de mistura padrão.</p>
Reciclagem Térmica <i>Pirólise</i>	<p>Redução significativa de 40 a 50% da resistência à tração média das fibras de vidro E recuperadas;</p> <p>As temperaturas mais altas afetam a qualidade da fibra resultante, diminuindo no mínimo em 50% as suas propriedades mecânicas;</p> <p>A resistência à tração pode ser reduzida até 85%.</p>

Na tabela 12, são apresentados os resultados obtidos por reciclagem térmica, mais concretamente, a pirólise. Revela-se uma certa sensibilidade do material em função das condições de temperatura adotadas. A temperaturas mais baixas existe um maior rendimento e, por sua vez, um maior valor calorífico bruto. As fibras recuperadas por pirólise apresentam um aspeto fofo e curto (Asmatulu, Twomey & Overcash, 2014; Beauson, Lilholt & Brøndsted, 2014; Oliveux, Dandy & Leeke, 2015; Hagnell & Åkermo, 2019).

Tabela 12 – Propriedades mecânicas das fibras de vidro recuperadas através da reciclagem térmica, mais concretamente, por pirólise (Adaptado de Asmatulu, Twomey & Overcash, 2014; Beauson, Lilholt & Brøndsted, 2014; Oliveux, Dandy & Leeke, 2015; Hagnell & Åkermo, 2019).

Processo de Reciclagem	Resultados Obtidos
<p>Reciclagem Térmica</p> <p><i>Pirólise</i></p>	<p>As fibras demonstram ter sensibilidade para diferentes condições de pirólise;</p> <p>As resinas epóxi são mais facilmente degradadas em condições oxidantes do que em condições inertes, com temperaturas entre 500 a 600 °C;</p> <p>A uma temperatura mínima de 400 °C, as fibras de vidro retêm menos de 50% das suas propriedades mecânicas;</p> <p>Os produtos resultantes de uma resina de poliéster, apresentaram propriedades excelentes num intervalo de temperatura compreendido entre 400 a 700 °C;</p> <p>A temperaturas mais baixas, por exemplo 300 °C, o rendimento e as características dos gases da pirólise aumentaram para o poliéster, uma vez que, a estas temperaturas os gases possuem mais monóxido de carbono, CO, e menos CO₂, resultando num valor calorífico bruto significativamente alto;</p> <p>O óleo resultante da pirólise a 300 °C apresenta um valor calorífico bruto de 33,9 MJ/kg, enquanto a 400 °C apresenta um valor inferior de 36,7 MJ/kg;</p> <p>As fibras recuperadas são curtas e apresentam um aspeto fofo.</p>

Na tabela 13, são apresentados os resultados obtidos por recuperação térmica, especificamente, por pirólise assistida por micro-ondas e por leito fluidizado. Referente à pirólise assistida por micro-ondas, obteve-se más propriedades mecânicas quando revestidas com carvão residual. Igualmente, no processo de leito fluidizado, tanto a forma física como o comprimento da fibra foram afetados (Oliveux, Dandy & Leeke, 2015; Kalkanis *et al.*, 2019).

Tabela 13 – Propriedades mecânicas das fibras de vidro recuperadas através da reciclagem térmica por pirólise assistida por micro-ondas e por leito fluidizado (Adaptado de Oliveux, Dandy & Leeke, 2015; Kalkanis *et al.*, 2019).

Processo de Reciclagem	Resultados Obtidos
Reciclagem Térmica <i>Pirólise Assistida por Micro-ondas</i>	As fibras recuperadas foram revestidas a carvão residual, originando uma má adesão à nova matriz e, conseqüentemente, péssimas propriedades mecânicas quando, apenas, estavam presentes fibras recicladas nos materiais compósitos.
Reciclagem Térmica <i>Leito Fluidizado</i>	A forma física e o comprimento da fibra apresentam uma considerável degradação.

Na tabela 14, são apresentados os resultados da recuperação das fibras por reciclagem térmica. Quanto à reciclagem térmica, o processo abordado é por leito fluidizado, concluindo-se que quanto maior a temperatura adotada para o processo, maior é a percentagem de redução na resistência à tração (Asmatulu, Twomey & Overcash, 2014; Beauson, Lilholt & Brøndsted, 2014).

Tabela 14 – Propriedades mecânicas das fibras de vidro recuperadas através do processo de reciclagem térmica, leito fluidizado (Adaptado de Asmatulu, Twomey & Overcash, 2014; Beauson, Lilholt & Brøndsted, 2014).

Processo de Reciclagem	Parâmetros	Resultados Obtidos		
Reciclagem Térmica <i>Leito Fluidizado</i>	Resistência à Tração (%)			
	450 °C	Fibra Virgem	-	A uma temperatura de 450 °C, a resistência à tração da fibra de vidro reduziu-se em aproximadamente 50%;
		Fibra Recuperada	-48	
	550 °C	Fibra Virgem	-	A uma temperatura de 550 °C, atingiu cerca de 80% de redução na resistência à tração;
		Fibra Recuperada	-82	
	650 °C	Fibra Virgem	-	A uma temperatura de 650 °C, as fibras acabam por perder cerca de 90% da sua resistência à tração.
Fibra Recuperada		-93		

Tal como se pode verificar, na tabela 15 são apresentados os resultados quanto à reciclagem química, da solvólise e da hidrólise. Em relação à solvólise as fibras são caracterizadas por exibirem uma menor perda das propriedades mecânicas, enquanto que, na hidrólise existe uma variação das propriedades mecânicas entre 50% a 60%, à temperatura de 300 °C e 350 °C, respetivamente. Na hidrólise também é demonstrado uma redução de 35% da resistência à tração das fibras, a uma temperatura de 275 °C.

Tabela 15 – Propriedades mecânicas das fibras de vidro recuperadas através do processo de reciclagem química, da solvólise e da hidrólise (Adaptado de Oliveux, Bailleul & Salle, 2012; Beauson, Lilholt & Brøndsted, 2014; Kalkanis et al., 2019).

<p>Reciclagem Química <i>Solvólise</i></p>	<p>Caracterizadas por exibirem uma menor perda de propriedades mecânicas; Apresentam um aspeto fofo, na qual o comprimento e a uniformidade da fibra reciclada tendem a ser maiores.</p>
<p>Reciclagem Química <i>Hidrólise</i></p>	<p>A uma temperatura mais alta com um determinado tempo de reação, realça-se uma maior degradação das propriedades mecânicas; A uma temperatura de 350 °C, as fibras de vidro exibem uma redução de 60% das propriedades mecânicas, enquanto que, a 300 °C exibem uma redução de 50%; A uma temperatura de 275 °C, a resistência à tração reduz-se em 35%, explicada pela corrosão ácida das fibras.</p>

A tabela 16, contém os resultados obtidos da recuperação das fibras por reciclagem térmica combinada com reciclagem mecânica. Revela-se uma diminuição dos resíduos sólidos, enquanto existia um aumento dos produtos condensáveis e do gás, salientando-se que os resíduos sólidos mantiveram constante a sua resistência e o tamanho dos compósitos (Cunliffe, Jones & Williams, 2003).

Tabela 16 – Propriedades mecânicas das fibras de vidro recuperadas através da combinação de reciclagem térmica e mecânica (Adaptado de Cunliffe, Jones & Williams, 2003).

Processo de Reciclagem	Parâmetros	Resultados Obtidos
Reciclagem Térmica e Mecânica	Copolímero ¹³ de poliéster/estireno reforçado com fibra de vidro	<p>Recuperação média do produto em mais de 98% da massa inicial da amostra;</p> <p>Os resíduos sólidos demonstraram que mantiveram a resistência e o tamanho do compósito;</p> <p>A uma temperatura de 400 a 800 °C, o volume do óleo era cerca de 80% do volume total;</p> <p>Diminuição significativa dos resíduos sólidos com um intervalo de temperatura compreendido entre 350 a 450 °C, enquanto que, era notório um aumento do rendimento dos produtos condensáveis e do gás;</p> <p>A degradação da matriz deu-se totalmente aos 450 °C;</p> <p>Houve um decréscimo significativo no rendimento dos sólidos entre 650 a 800 °C.</p>

¹³ Polímero cuja formação é realizada por diferentes monómeros.

São apresentados na tabela 17 os resultados obtidos da recuperação das fibras por reciclagem química, combinada com reciclagem térmica. Conclui-se que quanto maior a temperatura da reação, maior é o tempo de fracionamento, apresentando as fibras um aspeto limpo, sem qualquer dano (Iwaya *et al.*, 2008).

Tabela 17 – Propriedades mecânicas das fibras de vidro recuperadas através da combinação de reciclagem química e térmica (Adaptado de Iwaya *et al.*, 2008).

Processo de Reciclagem	Resultados Obtidos
Reciclagem Química e Térmica	<p>A fibra de vidro recuperada por C_7H_8O era relativamente comprida e encontrava-se limpa, sem qualquer dano;</p> <p>Uma maior influência do catalisador do que do solvente, daí ser uma reação favorecida em maior quantidade de catalisador e maior quantidade de solvente;</p> <p>A reação é acelerada pelo K_3PO_4;</p> <p>Quanto maior a temperatura de reação, maior é o grau de fracionamento. Uma vez que, a uma temperatura de 573 K, com um tempo de reação de 4 h, o grau de fracionamento atingiu 90%, enquanto que, a uma temperatura de 523 K, com um tempo de reação de 8 h, o grau de fracionamento atingiu apenas 60%. Ou seja, para uma reação mais curta está associado um maior grau de fracionamento;</p> <p>Em condições de reação mais leves, o material de enchimento permanece no PRF tratado, uma vez que, a taxa de despolimerização é mais lenta, logo o grau de fracionamento é baixo.</p> <p>Com o aumento do tempo de reação, houve a diminuição do ácido benzoico, $C_7H_6O_2$, enquanto que, houve o aumento dos restantes componentes intervenientes na reação, daí concluir-se que o $C_7H_6O_2$ é um produto intermediário da reação.</p>

Por fim, é importante evidenciar a razão pela qual se optou pela metodologia térmica para a componente laboratorial, fazendo uma análise de comparabilidade, segundo o que é mencionado neste capítulo. Começando pela metodologia química, depara-se que revela perdas de 50% das propriedades mecânicas a temperaturas mais baixas, 300 °C, quando comparado com a metodologia térmica, que exhibe perdas de 50% das propriedades mecânicas a temperaturas mais altas, 400 °C. Perante esta comparação, a metodologia térmica ganha em relação à metodologia química, uma vez que, consegue as mesmas perdas das propriedades mecânicas a temperaturas mais altas. No entanto, é também importante salientar que se expõem outros problemas associados à metodologia química, tais como, o elevado custo do processo, bem como, os inúmeros resíduos

químicos que são consumidos. Estes resíduos podem ser ácidos, bases, solventes e líquidos que quando presentes acabam por comprometer a resistência mecânica das fibras de vidro, descartando esta metodologia para a elaboração da componente laboratorial.

No que se refere à metodologia mecânica, esta é aquela que apresenta uma menor perda da resistência à tração das fibras, cerca de 29%, quando comparado com a metodologia térmica que revela no mínimo perdas de 50% da resistência à tração. No entanto, apesar da metodologia mecânica ganhar em relação às perdas da resistência à tração, demonstram-se outros problemas relacionados com a recuperação das fibras. Isto é, a metodologia mecânica só permite a recuperação de fibras curtas, com tamanhos compreendidos entre 10 microns e 20 milímetros, não sendo de todo o interesse deste trabalho, visto que, um dos objetivos centra-se na recuperação da resistência mecânica das fibras de vidro para futuras aplicações.

Capítulo 7

Caso Prático

Este capítulo apresenta os diversos materiais, equipamentos, bem como, o procedimento experimental adotado para a realização do caso prático. Por último, são apresentados os resultados e a sua discussão.

7.1. Material, Equipamento e Procedimento Experimental

O presente trabalho consiste em ensaiar uma metodologia de reciclagem, na qual se recorreu à reciclagem térmica. O objetivo compreende, essencialmente, a avaliação das propriedades mecânicas das fibras de vidro, em comparação com as amostras de fibra de controlo (fibra de vidro virgem), após um tempo de queima definido e temperatura previamente definidos. Neste sentido será, seguidamente, apresentada uma descrição sumária dos materiais, provetes, equipamentos, bem como, do procedimento experimental utilizado.

7.1.1. Produção dos Laminados

Foram inicialmente fabricados 12 laminados iguais, cujas placas contêm 8 camadas de fibra de vidro do tipo E, em forma de malha tafetá, fornecida pela empresa Rebelco, com as dimensões 290×165 milímetros. Quanto à resina utilizada, usou-se uma resina epóxi SR 8100 e um endurecedor SD 8824, ambas fornecidas pela empresa *Sicomín*. Segundo o fabricante, para 100 gramas de resina é necessário adicionar 22 gramas de endurecedor, correspondente a 22% em peso de endurecedor (Sicomín, 2019). Nas tabelas seguintes (18 a 19), são apresentadas algumas das propriedades da fibra de vidro E, da resina epóxi SR 8100, bem como, do endurecedor SD 8824.

Tabela 18 – Diferentes propriedades do reforço das placas, nomeadamente, da fibra de vidro E.

Propriedades	Fibra de Vidro E
Peso (g/m ²)	195
Espessura (mm)	0,17
Fio – Teia (mm)	80
Fio – Trama (mm)	60
Densidade (g/cm ³)	2,54
Módulo de <i>Young</i> (GPa)	74
Resistência à Tração (GPa)	2,5
Alongamento (%)	4,8

Tabela 19 – Diferentes propriedades da resina epóxi SR 8100 e do endurecedor SD 8824 (Adaptado de Sicomin, 2019).

Propriedades	Resina Epóxi SR 8100	Endurecedor SD 8824
Aspetto	Líquido	Líquido
Cor	Amarelo	Incolor
Viscosidade a 15 °C (mPa.s)	2350 ± 450	7 ± 2
Densidade a 20 °C (g/cm ³)	1,1580	0,9440
Índice de Refração a 25 °C	1,554 ± 0,002	1,498 ± 0,002
Armazenamento (meses)	24	24

Com o intuito de promover uma distribuição uniforme entre a matriz e o reforço, as 8 camadas de tecido de fibra de vidro foram impregnadas manualmente, uma a uma. Em seguida, foram colocadas num saco, selado a quente, sendo sujeitas a vácuo por um período de tempo de 10 horas, numa prensa hidráulica a uma pressão de 2,5 bar. Posteriormente, à mesma pressão e à temperatura ambiente, a placa manteve-se por mais 14 horas na prensa. Por último, introduziram-se as placas numa estufa a uma temperatura de 40 ± 2 °C, durante 24 horas. A geometria da placa, é conseguida com recurso a uma serra elétrica revestida a diamante. Deve-se realçar que para evitar o aquecimento e consequentes alterações nas propriedades mecânicas, utilizou-se ar comprimido seco na sua refrigeração. Segue a figura 37 que ilustra o aspeto final do laminado.

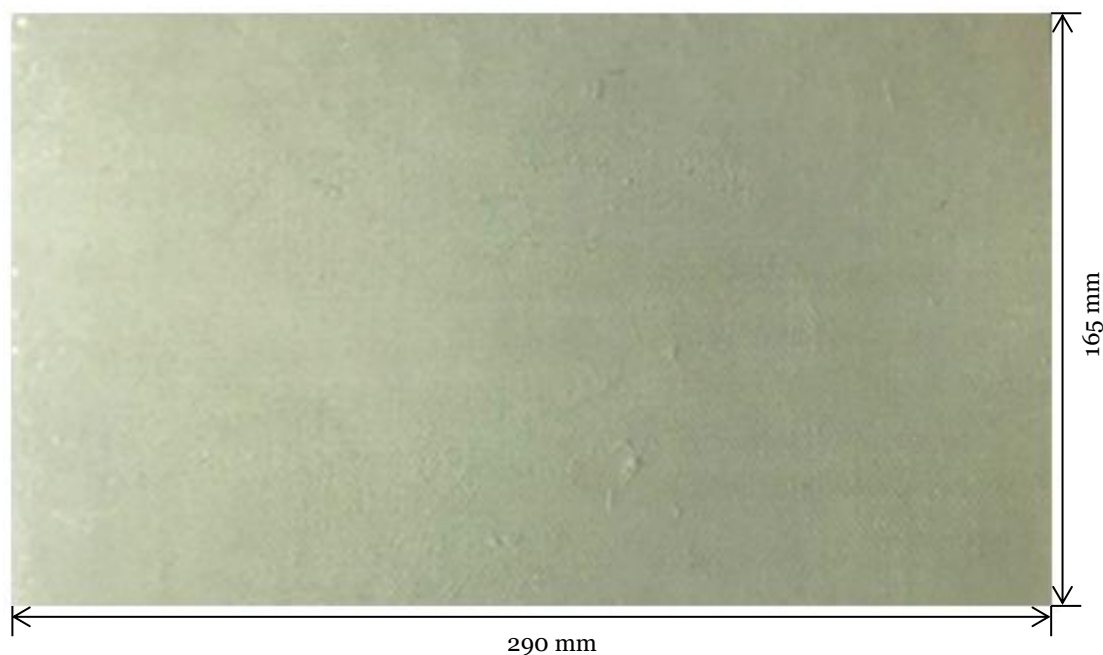


Figura 37 – Aspeto final do laminado de 8 camadas de fibra de vidro E, com dimensões de 290×165 mm.

7.1.2. Provetes

Os laminados descritos anteriormente foram submetidos a uma queima, cuja temperatura e tempo encontravam-se devidamente indicados na tabela 20, no forno da marca *TermoLab*. Salienta-se que, a preparação dos provetes só se realizou após esta etapa e que não existiu nenhum pós-tratamento para evitar uma maior degradação das fibras, para eliminar custos e tempo com este processo. Por outras palavras, pretendeu-se otimizar estes dois parâmetros por forma a minimizar a quantidade de resíduos de carvão nas fibras e tornar o processo mais próximo de ser replicado em contexto industrial.

Tabela 20 – Condições de ensaios referentes às temperaturas e aos tempos de queima.

Temperatura (°C)	Tempo de Queima (min)					
	15	30	60	120	180	240
400	15	30	60	120	180	240
600	15	30	60	-	-	-
800	5	10	15	-	-	-

Na figura 38, observa-se uma das doze placas obtidas após um tempo de queima de 15 minutos, a uma temperatura de 400 °C.



Figura 38 – Laminado obtido após um tempo de queima de 15 min a 400 °C.

Posteriormente, retiraram-se fios de fibra de vidro das diferentes placas, no entanto, devido à impossibilidade de os extrair de todas as placas (por consequência da excessiva presença de resina para os baixos tempos de queima ou pela sua degradação para as altas temperaturas), foram produzidos provetes com um comprimento de $115 \pm 0,2$ milímetros, uma largura de $10 \pm 0,2$ milímetros (por forma em que todos eles contivessem 9 fios de fibra na sua largura).

De modo a proteger os provetes nas extremidades de fixação, foram coladas umas tiras de cartão prensado com dimensões de 60×40×1 milímetros, como ilustra a figura 39.

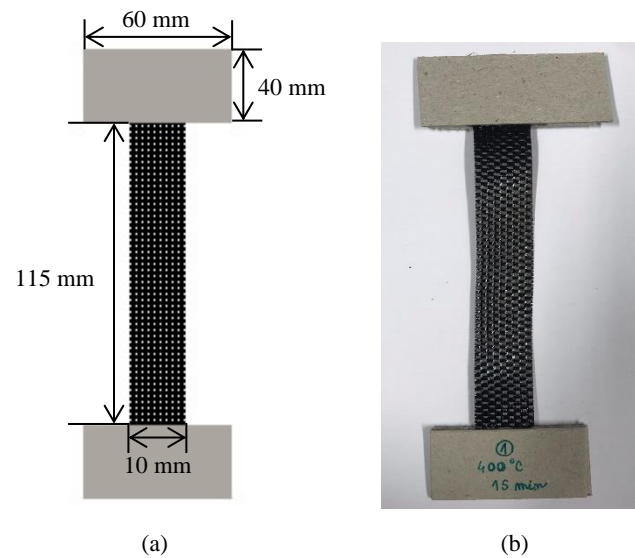


Figura 39 – Provetes das placas de fibra de vidro para uma temperatura de 400 °C a 15 min: (a) representação esquemáticas; (b) representação real.

7.1.3. Equipamentos

Os laminados foram submetidos a uma queima num forno, fabricado pela empresa *TermoLab*. A sua temperatura máxima de trabalho é de 1400 °C, onde o controlo da temperatura é executado pelo controlador *Eurotherm*, tal como se pode observar na figura 40.



Figura 40 – Ilustração do forno de câmara, da empresa *TermoLab*.

Posteriormente, os ensaios de tração dos fios foram realizados numa máquina universal da marca *Adamel Lhormargy*, modelo DY 35, equipada com uma célula de carga 100 N e monitorizada pelo *software* AutoTrac. Estes ensaios foram realizados à temperatura ambiente, com uma distância entre garras de 150 milímetros e uma velocidade de deformação de 150 mm/min. Na figura 41 encontra-se ilustrada o referido equipamento.

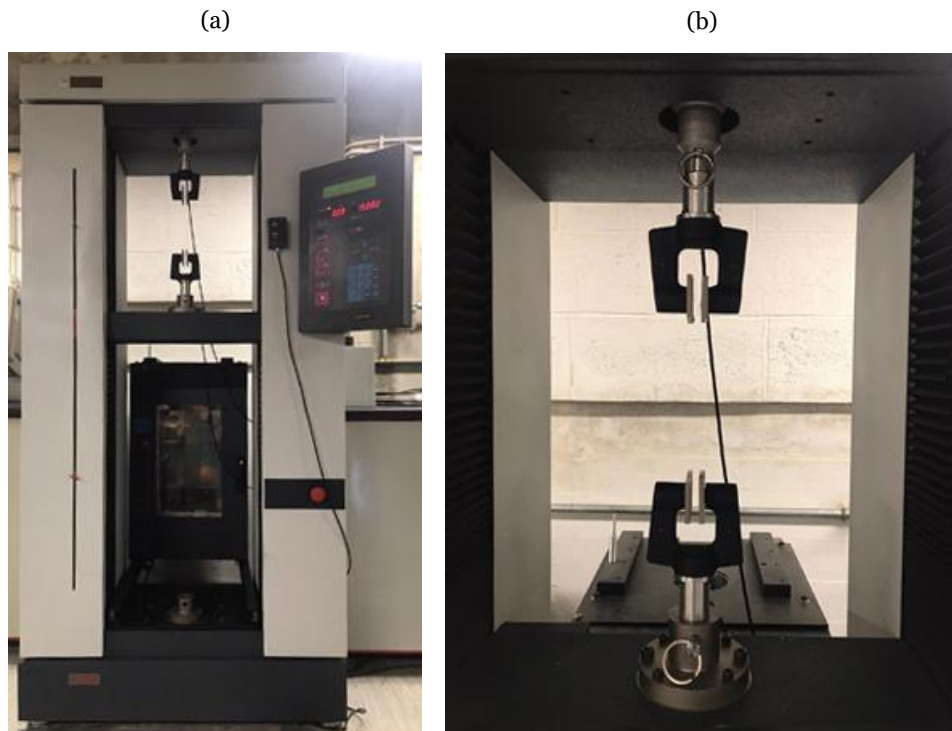


Figura 41 – (a) máquina de teste universal da marca *Adamel Lhormargy*, modelo DY 35; (b) dispositivo de fixação.

Finalmente, os provetes foram ensaiados numa máquina universal da marca *Shimadzu*, modelo AGS-X, equipada com uma célula de carga de 10 kN, ilustrada na figura 42. Os ensaios de tração foram realizados à temperatura ambiente, com uma distância entre amarras de 115 milímetros e uma velocidade de deformação de 2 mm/min. Este equipamento dispõe de um *software*, *Trapezium X*, versão 1.4.0., capaz de apresentar os resultados na versão Excel.

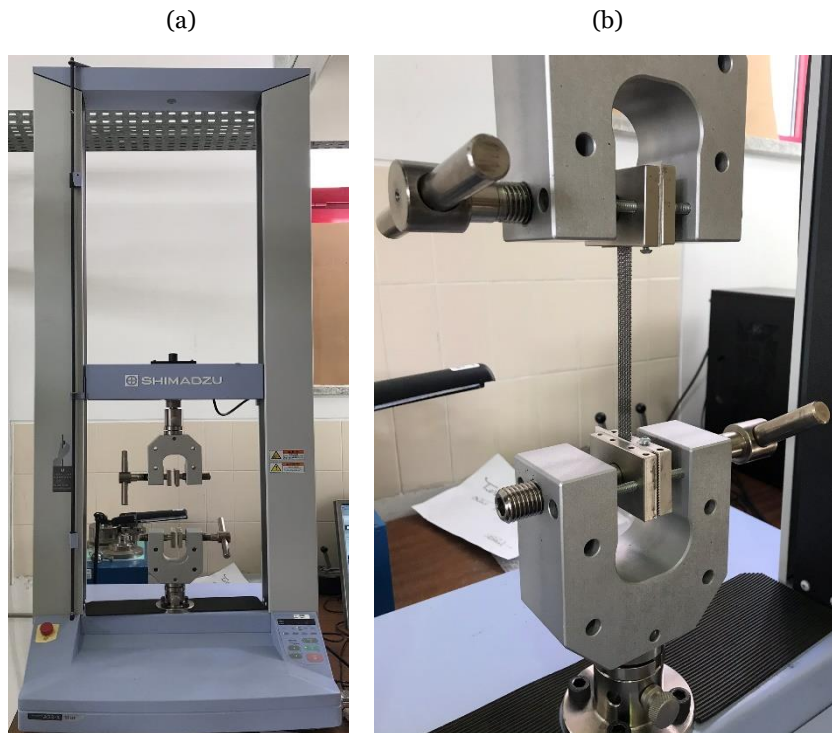


Figura 42 – (a) máquina de teste universal da marca *Shimadzu*, modelo AGS-X; (b) dispositivo de fixação.

Com o intuito de se conseguir uma melhor visualização e caracterização das diferentes amostras, recorreu-se à microscopia eletrónica de varrimento (do inglês *scanning electron microscope* – SEM), da marca *Hitachi*, modelo S-3400N. Inicialmente, as amostras foram fixas num *stub* de alumínio e, de modo a existir uma melhor condutividade, utilizou-se uma fita cola de dupla face de carbono. Deve-se salientar que as mesmas são revestidas a ouro, uma vez que, a fibra de vidro não é um bom condutor.

Depois de revestidas a ouro no aparelho Q150R ES, da marca *Quorum*, as amostras são colocadas no SEM. Por fim realizou-se uma análise quantitativa de elementos químicos presentes nas amostras com recurso a um detetor de espectrometria de energia dispersa, (do inglês *energy dispersive x-ray* – EDX), da marca *Bruker*, modelo 5010, com uma resolução de 129 eV em K α de Mn. Este equipamento tem um *software* de aquisição e análise de dados *Quantax ESPRIT*. Na figura 43, observa-se o SEM e o aparelho para revestir as amostras a ouro.

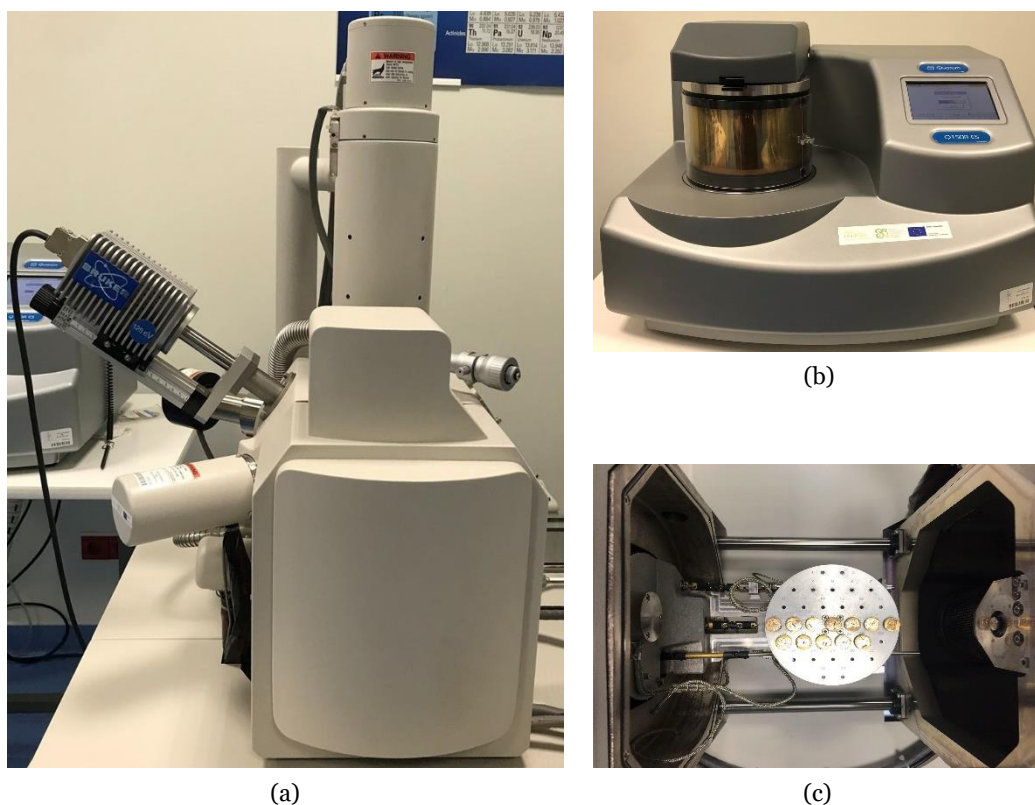


Figura 43 – (a) SEM; (b) aparelho de revestimento de ouro Q150R ES, da marca *Quorum*; (c) aspetos das amostras após revestidas a ouro.

7.1.4. Procedimento Experimental

Inicialmente, os laminados foram introduzidos num forno com tempos e temperaturas indicadas na tabela 20. Na tabela 21, encontram-se indicadas o número de amostras testadas para os diferentes ensaios realizados, num total de 126 amostras ensaiadas.

Tabela 21 – Número de amostras testadas para os diferentes ensaios realizados.

Amostras	Ensaio de Tração		Ensaio de Microscopia	Nº de Amostras
	Fios	Provetes		
Controlo	6	5	1	12
400 °C/15 min	-	5	1	6
400 °C/30 min	-	5	1	6
400 °C/60 min	6	5	1	12
400 °C/120 min	6	5	1	12
400 °C/180 min	6	5	1	12
400 °C/240 min	6	5	1	12
600 °C/15 min	6	5	1	12
600 °C/30 min	6	5	1	12
600 °C/60 min	6	5	1	12
800 °C/5 min	-	5	1	6
800 °C/10 min	-	5	1	6
800 °C/15 min	-	5	1	6
			Total	126

Em seguida, realizaram-se os ensaio de tração dos fios de fibra de vidro, bem como, dos provetes de fibra de vidro, os quais decorreram à temperatura ambiente e segundo o procedimento descrito na norma ASTM D578 e na norma ASTM D579 , respetivamente (ASTM International, 2015; ASTM International, 2018).

Referente aos testes de tração dos fios de fibra de vidro foram ensaiadas 6 amostras para cada condição de ensaio, na qual os dados foram posteriormente tratados em função dos respectivos valores médios. No entanto, deve-se realçar que neste equipamento não foram ensaiadas todas as amostras, uma vez que, não se conseguiu extrair os fios de fibra de vidro de todas as placas. Posto isto, apenas foram ensaiadas as amostras a 400 °C/60 min, a 400 °C/120 min, a 400 °C/180 min, a 400 °C/240 min, a 600 °C/15 min, a 600 °C/30 min e, por último, a 600 °C/60 min.

Em relação aos provetes de fibra de vidro foram ensaiadas 5 amostras para cada condição de ensaio, com a geometria adotada na secção 7.1.2., na qual, posteriormente, os resultados foram tratados segundo os valores médios. Ao contrário do equipamento mencionado anteriormente, aqui conseguiu-se ensaiar todas as amostras.

Por último, foram preparadas 13 amostras, incluindo o controlo, a partir dos laminados iniciais que foram sujeitos a diferentes temperaturas e tempos de queima, para analisar no SEM, uma vez que, este equipamento permite uma melhor visualização e caracterização das amostras. Também, de modo a identificar os diferentes elementos químicos que constituem as diferentes amostras, recorreu-se a uma avaliação no EDX.

7.2. Análise e Discussão de Resultados

Quanto à análise e discussão de resultados, pretende-se averiguar qual das 12 amostras apresenta as propriedades mais semelhantes às de controlo, ou seja, descobrir qual a temperatura e o tempo de queima ideal. Para isso, é essencial apresentar os ensaios de tração, a avaliação microscópica, bem como, a avaliação EDX das diferentes amostras.

Como referido anteriormente, após a queima foram retirados fios de cada um dos laminados incinerados, os quais foram sujeitos, posteriormente, a ensaios de tração com vista a obter a sua resistência mecânica. Com o intuito de mostrar a repetibilidade dos 6 ensaios para cada amostra, apresenta-se na figura 44, um exemplo dos ensaios da amostra a 400 °C, durante 120 minutos. Todavia, este comportamento é típico de todos os resultados obtidos para as outras configurações.

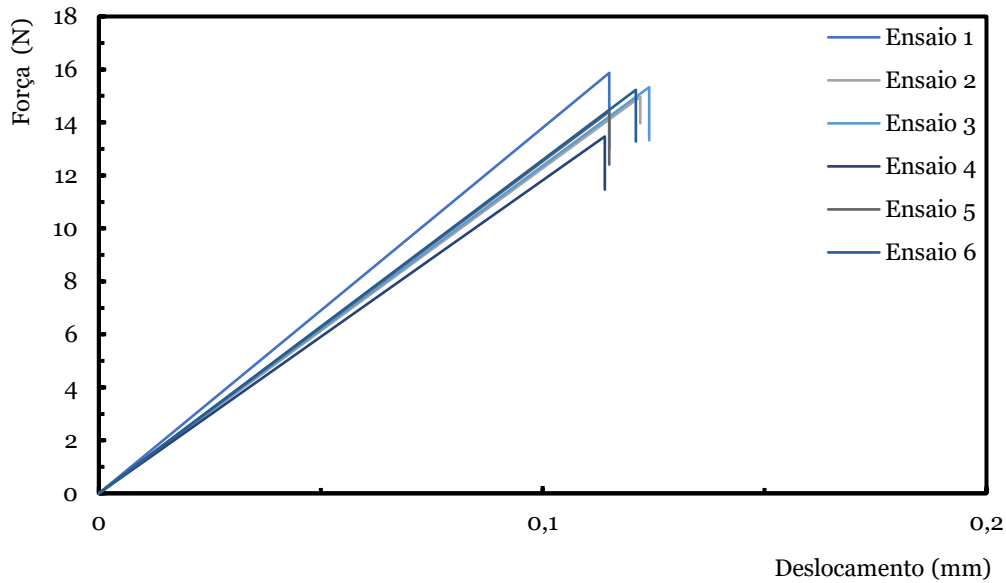


Figura 44 – Gráfico da força (N) em função do deslocamento (mm), relativo à amostra a 400 °C, durante 120 min.

Pode-se verificar que, para todas as condições, as curvas apresentam um comportamento linear até à carga máxima, ponto onde se dá o colapso da fibra. De acordo com Rahimizadeh *et al.* (2020) esta tendência foi observada para fibras de vidro do tipo E.

Por sua vez, a figura 45 ilustra uma comparação entre a curva representativa do controlo com as obtidas das amostras que foram expostas a uma temperatura de 400 °C e a um tempo de queima de 60 minutos, 120 minutos, 180 minutos e, por último, de 240 minutos.

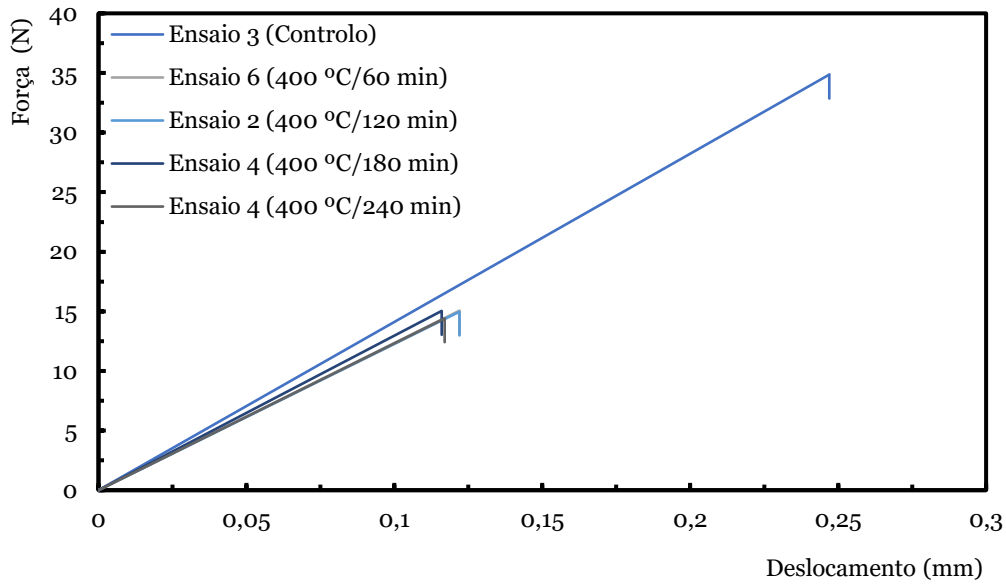


Figura 45 – Curvas representativas da força (N) em função do deslocamento (mm) das amostras sujeitas a uma temperatura de 400 °C e a um tempo de queima de 60 min, de 120 min, de 180 min, bem como, de 240 min.

De forma semelhante, a figura 46 mostra a curva representativa do controlo com as amostras que foram sujeitas a uma temperatura de 600 °C, a um tempo de queima de 15 minutos, 30 minutos, bem como, de 60 minutos. É notório que, em ambas as condições, todas as amostras encontram-se com valores de resistência à tração inferiores aos obtidos para as amostras de controlo.

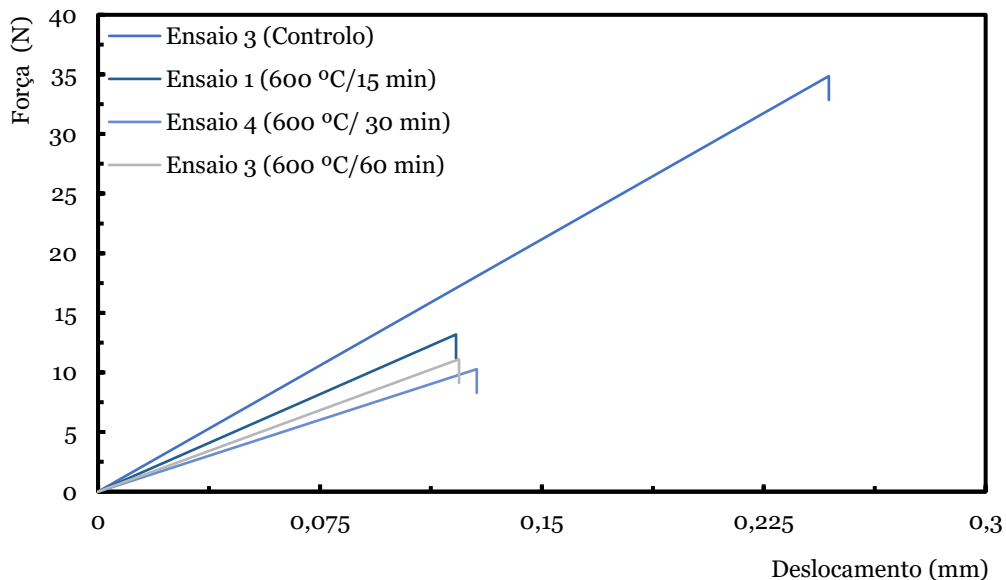


Figura 46 – Curvas representativas da força (N) em função do deslocamento (mm) das amostras sujeitas a uma temperatura de 600 °C e a um tempo de queima de 15 min, de 30 min e de 60 min.

A tabela 22 sintetiza os resultados obtidos em termos de valores médios e respetivos desvios padrões, assim como a variação da resistência relativamente aos valores de controlo.

Tabela 22 – Resultados obtidos das amostras de fio de fibra de vidro.

Fios	Valor Médio (N)	Desvio Padrão (N)	Varição da Resistência à Tração Face ao Controlo (%)
Controlo	34,6	2,2	100
400 °C/60 min	16,3	2,6	52,9
400 °C/120 min	14,9	0,8	56,9
400 °C/180 min	14,9	1,8	56,9
400 °C/240 min	14,5	2,7	58,1
600 °C/15 min	12,7	3,7	63,3
600 °C/30 min	10,2	0,6	70,5
600 °C/60 min	9,8	2,4	71,7

Segundo a tabela anteriormente representada, a amostra de controlo apresenta um valor médio de 34,6 N e um desvio padrão de 2,2 N. Para as amostra de 400 °C, no qual se variou o tempo de queima, o valor médio varia entre 14,5 N a 16,3 N, com um desvio padrão compreendido entre 0,8 a 2,7 N. Quanto à resistência à tração face à amostra de controlo, estas amostras revelam uma diminuição percentual da resistência à tração, face ao controlo, que varia entre 52,9% a 58,1%.

Recorrendo a uma análise quantitativa, verifica-se que a amostra de 400 °C, a 60 minutos reduz o seu valor médio em 52,9%, face ao controlo. Quanto à amostra exposta a 400 °C, a 120 minutos, esta diminui o seu valor médio em 56,9%, quando comparada

com o controlo. Por sua vez, a amostra a 400 °C, a 180 minutos revela uma redução de 56,9% do valor médio, em comparação com o controlo. Referente à última amostra sujeita a 400 °C, a um tempo de queima 240 minutos, demonstrou uma diminuição de 58,1% no valor médio, novamente comparando com a amostra padrão.

É de realçar, que para a temperatura de 400 °C, não existe uma grande variação da resistência à tração entre os 120 minutos e os 180 minutos da queima, não sendo por isso necessário sujeitar as amostras a um tempo de queima mais elevado, pois estas terão tendência a degradarem-se. Por outro lado, do ponto de vista de uma aplicação industrial, seria uma otimização do tempo e dos custos do processo de reciclagem. Posto isto, de um modo geral, pode-se verificar que o aumento da temperatura e, simultaneamente, o aumento do tempo de queima, origina uma perda da percentagem da resistência à tração, em relação ao controlo, isto é, à fibra de vidro virgem.

Por sua vez, as amostras sujeitas a uma temperatura fixa de 600 °C, variando, mais uma vez, o tempo de queima, o valor médio varia entre 9,8 e 12,7 N. Para estas condições, obteve-se uma diminuição na percentagem da resistência à tração face ao controlo superior a 60%.

Mais detalhadamente, verificou-se que as amostras sujeitas a 600 °C, durante 15 minutos apresentam uma diminuição de 63,3% face ao valor médio observado para as condições de controlo. Relativamente, à amostra de 600 °C, a 30 minutos revela-se uma diminuição de 70,5% em relação ao valor médio, quando comparadas com o controlo. Por fim, a amostra a 600 °C, a 60 minutos diminui em 71,7% em comparação com o controlo.

Em suma, torna-se evidente que existe uma tendência face à diminuição da resistência à tração com o aumento da temperatura, tal como observado por Beauson *et al.* (2015). Estes autores realizaram um estudo envolvendo diferentes temperaturas e tempos de queima diferentes, nomeadamente, a 350 °C durante 300 minutos e a 400 °C durante 120 minutos, tendo observado, no primeiro caso, uma redução de 38,2% da resistência à tração face à de controlo. No caso da amostra queimada à temperatura mais alta, verificou-se uma redução da resistência à tração da fibra de 58,5%. Quando comparadas com as amostras em estudo, para a mesma temperatura e mesmo tempo de queima, 400 °C a 120 minutos, o valor obtido foi menor, 56,9%, em relação ao estudo referido. Também Oliveux, Dandy & Leeke (2015) referem que as propriedades mecânicas das

fibras de vidro diminuem, em pelo menos, 50% para temperaturas compreendidas entre 500 °C e 550 °C.

Quanto às amostras de fios de fibra de vidro, chegou-se à conclusão de que a melhor condição de queima é atribuída à amostra de 400 °C, a 60 minutos, pois é aquela que apresenta um comportamento mais próximo da amostra de controlo, uma vez que, revelou a menor perda de resistência à tração face ao controlo, de 52,9%.

Relativamente às amostras de provetes, na figura 47, começa por ilustrar as curvas representativas das amostras que foram queimadas a uma temperatura de 400 °C, em conjunto com as de controlo, enquanto as figuras 48 e 49 fazem a mesma comparação, mas, respetivamente, para as temperaturas de 600°C e 800°C. Tal como se pode verificar, as amostras que foram sujeitas a uma temperatura de 400°C e a um tempo de queima de 15 minutos, 30 minutos e 60 minutos, encontram-se com valores de resistência à tração superiores aos obtidos para as de controlo. Por sua vez, todas as restantes (48 a 49), independentemente da temperatura e do tempo, revelam menor resistência mecânica.

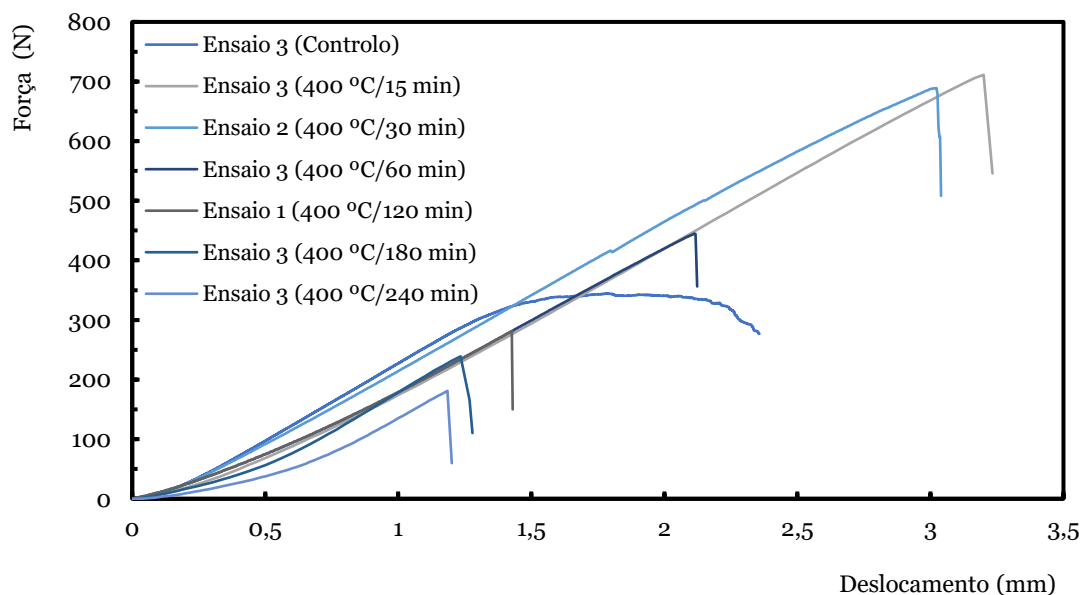


Figura 47 – Curvas representativas da força (N) em função do deslocamento (mm) das amostras sujeitas a uma temperatura de 400 °C e a um tempo de queima de 15 min, de 30 min, de 60 min, de 120 min, bem como, de 240 min.

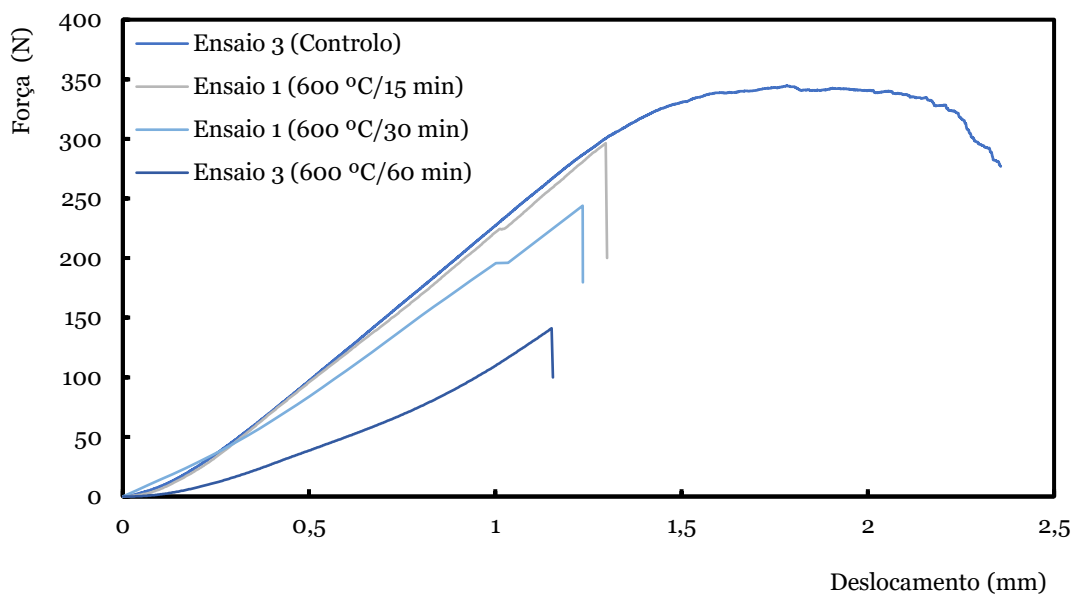


Figura 48 – Curvas representativas da força (N) em função do deslocamento (mm) das amostras sujeitas a uma temperatura de 600 °C e a um tempo de queima de 15 min, de 30 min e de 60 min.

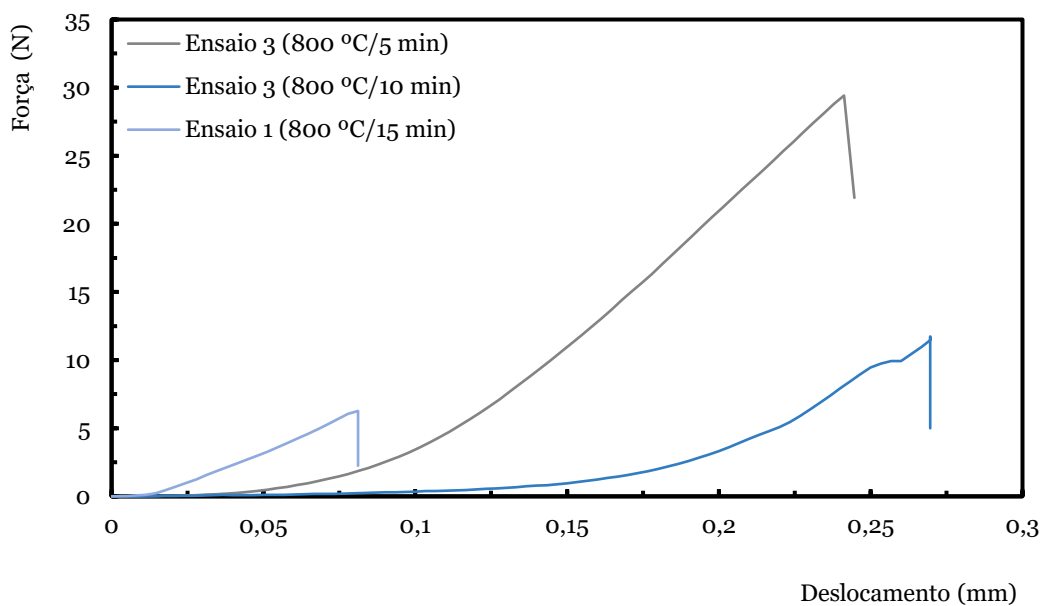


Figura 49 – Curvas representativas da força (N) em função do deslocamento (mm) das amostras sujeitas a uma temperatura de 800 °C e a um tempo de queima de 5 min, de 10 min e de 15 min.

A tabela 23 apresenta um resumo dos resultados obtidos em termos de valores médios e respetivos desvios padrões, bem como a variação da resistência relativamente aos valores de controlo.

Tabela 23 – Resultados obtidos das amostras dos provetes.

Provetes	Valor Médio (N)	Desvio Padrão (N)	Varição da Resistência à Tração Face ao Controlo (%)
Controlo	350,3	3,5	100
400 °C/15 min	712,3	15,7	103,3 ↑
400 °C/30 min	683,3	47,6	95,0 ↑
400 °C/60 min	429,9	43,8	22,7 ↑
400 °C/120 min	281,2	12,8	19,7 ↓
400 °C/180 min	249,2	27,3	28,9 ↓
400 °C/240 min	180,1	14,9	48,6 ↓
600 °C/15 min	296,8	46,7	15,3 ↓
600 °C/30 min	243,7	36,7	30,4 ↓
600 °C/60 min	141,1	7,7	59,7 ↓
800 °C/5 min	27,1	2,6	92,3 ↓
800 °C/10 min	12,0	3,0	96,6 ↓
800 °C/15 min	4,4	1,7	98,7 ↓

Conforme apresentado na tabela acima, verificou-se que a amostra de controlo apresenta um valor médio de 350,3 N e um desvio padrão de 3,5 N. Para as amostras de 400 °C, no qual se variou o tempo de queima, o valor médio varia entre 180,1 N e 712,3 N. Quanto

às amostras sujeitas a tempos de queima de 15 minutos, de 30 minutos e de 60 minutos, o valor da sua resistência à tração aumentou face ao controlo em 103,3%, em 95% e em 22,7%, respetivamente. Isto pode ser justificado pelas condições a que foram sujeitas, isto é, estas amostras não foram submetidas a uma temperatura e a um tempo de queima ideal, visto que, aqui as fibras de vidro não se encontram soltas, mas sim impregnadas de resina. Ou seja, a carga distribui-se entre as fibras, resultando num aumento da resistência à tração para estas amostras. Posto isto, assume-se que estas temperaturas e tempos de queima são ineficazes para o objetivo pretendido, tornando inválidas estas amostras neste estudo.

Para a mesma temperatura, variando apenas o tempo de queima, nomeadamente, 120 minutos, 180 minutos e 240 minutos, as amostras apresentam um valor médio compreendido entre 180,1 N e 281,2 N. Quanto à resistência à tração face ao controlo, revela-se uma diminuição da mesma para estas amostras de 19,7%, de 28,9% e de 48,6%, respetivamente, apontando certamente para a degradação das fibras.

Recorrendo a uma análise quantitativa, verifica-se que a amostra a 400 °C, a 15 minutos aumenta o seu valor médio em 103,3%, face ao controlo. Quanto à amostra exposta à mesma temperatura, variando o tempo de queima, 30 minutos, verifica-se um aumento do valor médio em 95,0% , quando comparada com o controlo. Por sua vez, a amostra sujeita à mesma temperatura, a um tempo de queima de 60 minutos revela um aumento de 22,7% em relação ao valor médio, em comparação com a amostra padrão. Referente à amostra de 400 °C, a 120 minutos verifica-se uma diminuição no valor médio de 19,7%, quando comparado com o controlo. Em relação à amostra de 400 °C, a 180 minutos, revela-se uma diminuição do valor médio de 28,9%. Por fim, quanto à amostra sujeita a 400 °C, a um tempo de queima de 240 minutos, demonstra-se uma diminuição no valor médio de 48,6%, novamente comparando com a amostra de controlo.

Relativamente às amostras submetidas a 600 °C, a uma queima de 15 minutos, 30 minutos e 60 minutos, o valor médio é de 296,8 N, de 243,7 N e de 141,1 N. Quanto ao desvio padrão, este varia entre 7,7 N e 46,7 N, apresentando uma diminuição da resistência à tração de 15,3%, de 30,4% e de 59,7%.

É possível observar a diminuição das amostras de 600 °C quanto ao controlo. Para um tempo de queima de 15 minutos, revelou-se uma diminuição do valor médio de 15,3%. A um tempo de queima de 30 minutos, demonstrou-se uma diminuição do valor médio de

30,4%. Finalmente, para um tempo de queima de 60 minutos, exibiu-se uma diminuição de 59,7%.

As amostras que foram sujeitas a uma temperatura de 800 °C, a um tempo de queima de 5 minutos, de 10 minutos e de 15 minutos, o valor médio varia entre 4,4 N e 27,1 N, apresentando uma redução na resistência à tração superior a 90%, nomeadamente, de 92,3%, de 96,6% e de 98,7%, respetivamente. Estes resultados podem ser justificados pela degradação das fibras de vidro.

Fazendo uma análise quantitativa, consegue-se perceber qual foi a diminuição do valor médio das amostras sujeitas a 800 °C, em comparação com o controlo. Assim sendo, a um tempo de queima de 5 minutos, verifica-se uma redução do valor médio de 92,3%. Para um tempo de queima de 10 minutos, o valor médio diminui em 96,6%. Por último, para um tempo de queima de 15 minutos, verifica-se uma diminuição do valor médio de 98,7%.

Mais uma vez, tal como foi observado em relação às amostras de fio de vidro, verifica-se o mesmo comportamento para as amostras dos provetes. Isto é, à medida que aumenta a temperatura e o tempo de queima, diminui a resistência à tração das fibras de vidro. Tal como referido anteriormente, um estudo realizado por Beauson *et al.* (2015) comprova esta tendência, que pode ser explicada pela metodologia adotada, uma vez que recorre a temperaturas muito elevadas.

Por fim, quanto às amostras de provetes de fibra de vidro, chegou-se à conclusão de que a melhor condição de queima é atribuída à amostra de 600 °C, a 15 minutos, uma vez que é aquela que apresenta um comportamento mais semelhante com o controlo, tendo relevado uma menor perda de resistência à tração face ao controlo, de 15,3% e uma redução de 53,5 N do valor médio em relação ao controlo.

Posteriormente, recorreu-se ao microscópio estereoscópico trinocular (do inglês *trinocular stereoscopic microscope* – TSM), da marca *Nikon*, modelo SMZ-2t, com uma objetiva de 10x, na maior ampliação, de 20x. No entanto, com o intuito de obter uma descrição mais pormenorizada das amostras, utilizou-se o SEM, na ampliação de 200x, de 1000x e, por último, de 2000x. Nas tabelas seguintes (24 a 27) são apresentadas as imagens relativas às diferentes amostras em estudo, sendo o principal objetivo da avaliação microscópica comprovar os resultados obtidos referentes aos ensaios de tração.

Tabela 24 – Ilustração das amostras de controle, de 400 °C/15 min, de 400 °C/30 min e de 400 °C/60 min, após observação no TSM e no SEM.

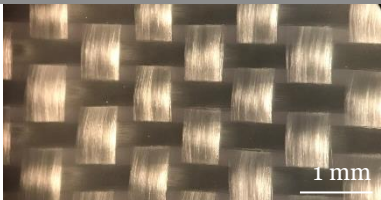
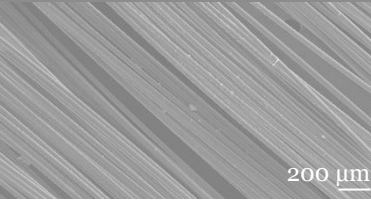
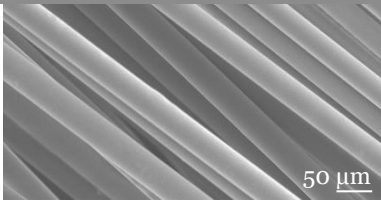
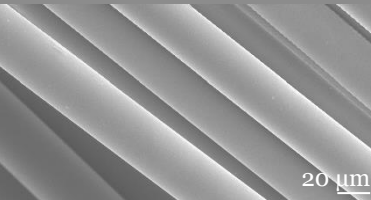

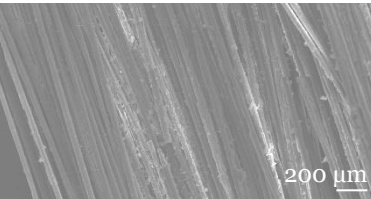
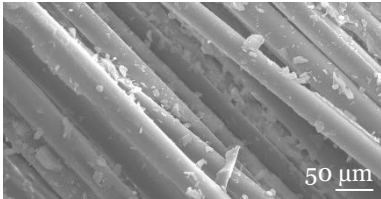
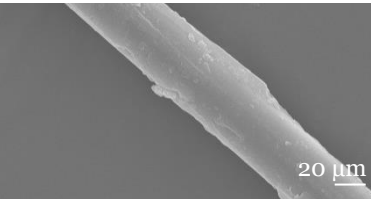

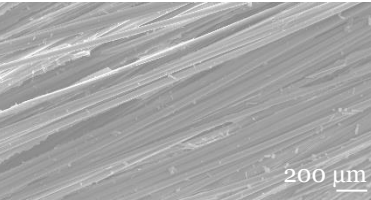
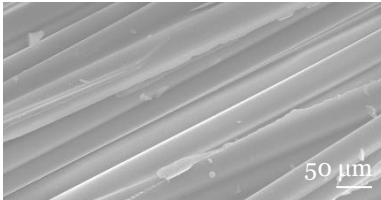
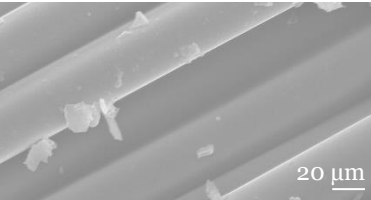

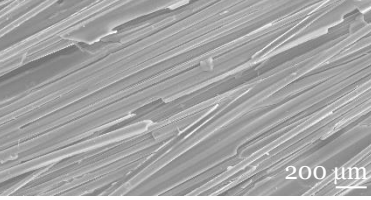
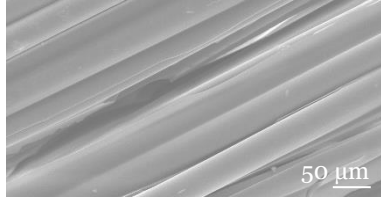
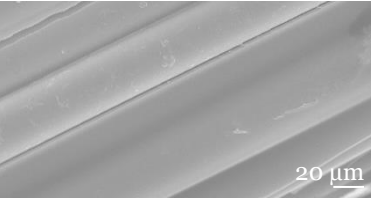
Provetes	Objetiva 10x (maior ampliação)	Lente Eletromagnética (ampliação 200x)	Lente Eletromagnética (ampliação 1000x)	Lente Eletromagnética (ampliação 2000x)
Controlo				
400 °C/15 min				
400 °C/30 min				
400 °C/60 min				

Tabela 25 – Ilustração das amostras de 400 °C/120 min, de 400 °C/180 min e de 400 °C/240 min, após observação no TSM e no SEM.

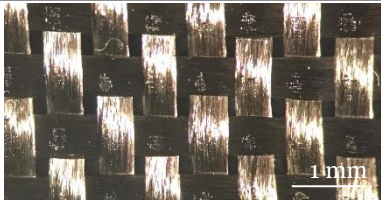
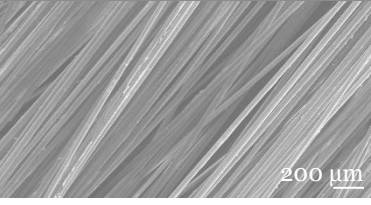
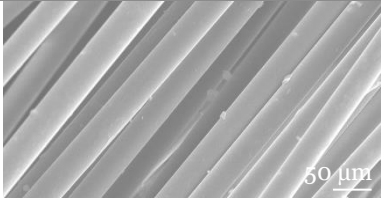
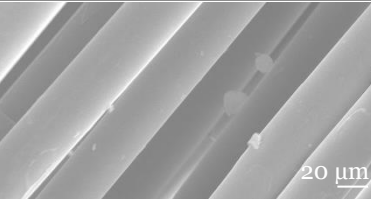

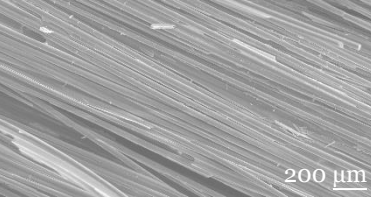
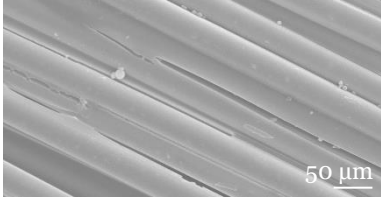
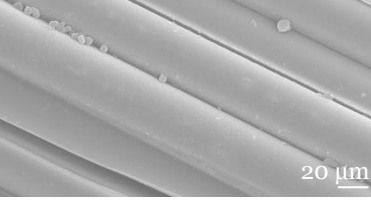

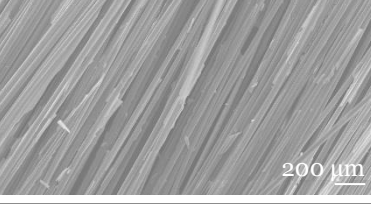
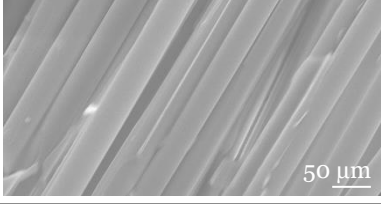
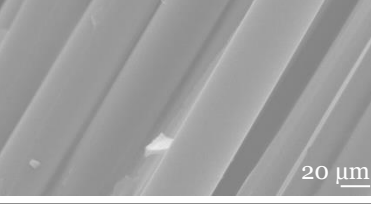
Provetes	Objetiva 10x (maior ampliação)	Lente Eletromagnética (ampliação 200x)	Lente Eletromagnética (ampliação 1000x)	Lente Eletromagnética (ampliação 2000x)
400 °C/120 min				
400 °C/180 min				
400 °C/240 min				

Tabela 26 – Ilustração das amostras de 600 °C/15 min, de 600 °C/30 min e de 600 °C/60 min, após observação no TSM e no SEM.

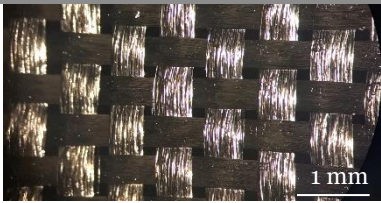
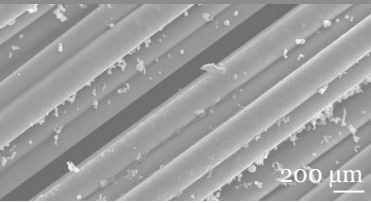
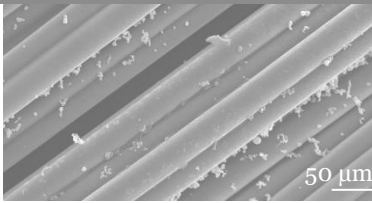
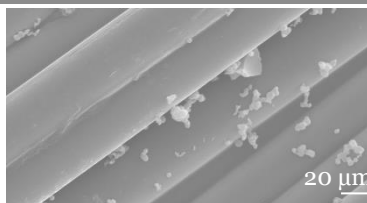
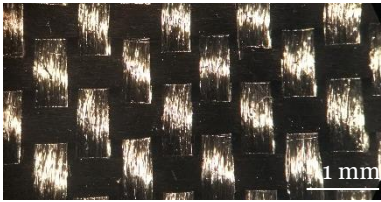
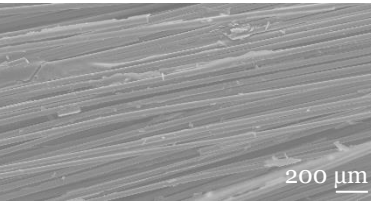
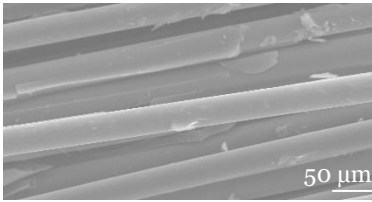
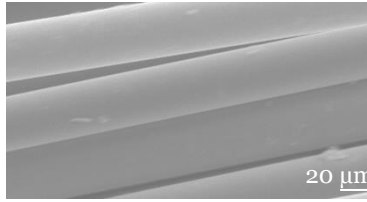
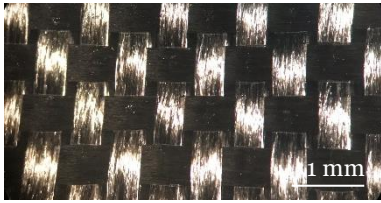
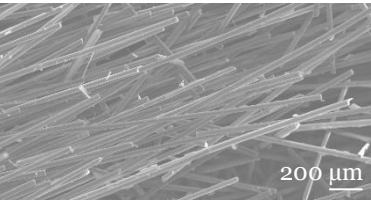
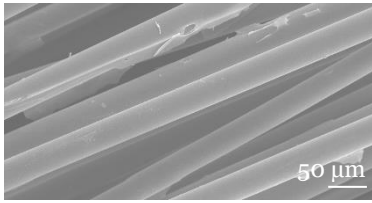
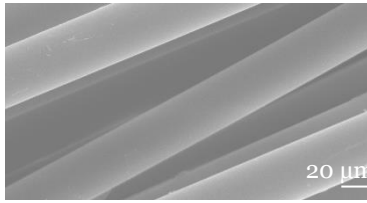
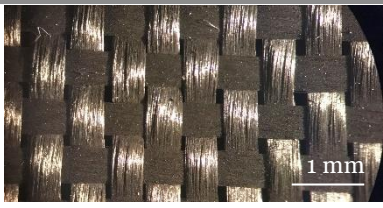
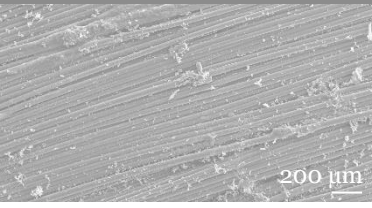
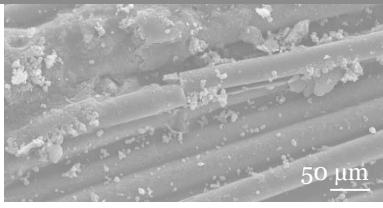
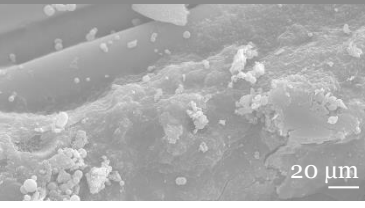
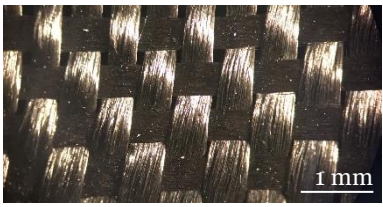
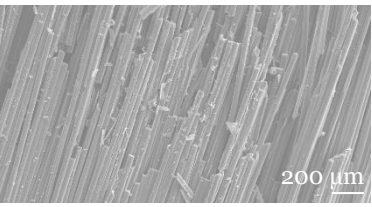
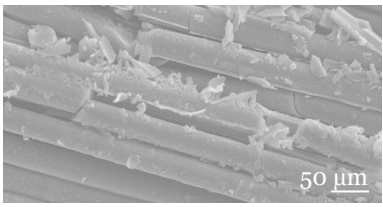
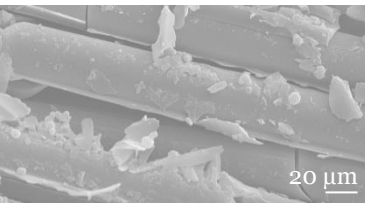
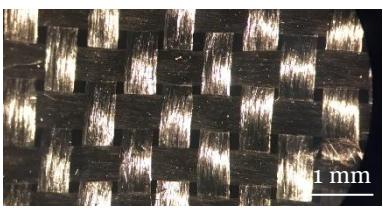
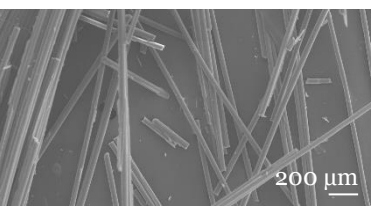
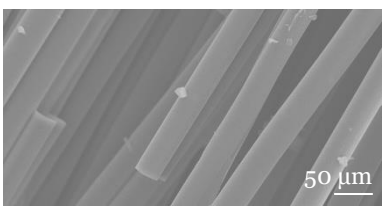
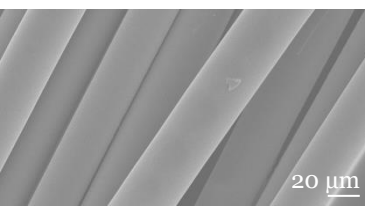
Provetes	Objetiva 10x (maior ampliação)	Lente Eletromagnética (ampliação 200x)	Lente Eletromagnética (ampliação 1000x)	Lente Eletromagnética (ampliação 2000x)
600 °C/15 min				
600 °C/30 min				
600 °C/60 min				

Tabela 27 – Ilustração da amostra de 800 °C/5 min, de 800 °C/10 min e de 800 °C/15 min, após observação no TSM e no SEM.

Provetes	Objetiva 10x (maior ampliação)	Lente Eletromagnética (ampliação 200x)	Lente Eletromagnética (ampliação 1000x)	Lente Eletromagnética (ampliação 2000x)
800 °C/5 min				
800 °C/10 min				
800 °C/15 min				

A amostra de controlo apresenta na sua constituição, unicamente, fibra de vidro virgem, no entanto, denota-se a presença de algumas impurezas na superfície das fibras, tal como se pode verificar na tabela 24, na lente eletromagnética com a ampliação de 200x. Apesar da presença de impurezas, apresenta uma superfície sem rugosidades e uniforme. De acordo com Rahimizadeh *et al.* (2020), estes autores depararam-se com o mesmo problema em relação às fibras de vidro virgem, isto porque encontram impurezas desiguais nas fibras de vidro virgem. Descrevem também a superfície da fibra de vidro virgem como lisa e homogénea. No entanto, dado a importância destas impurezas nas propriedades mecânicas das fibras, estes autores reportam este estudo para trabalhos futuros.

Tal referido já anteriormente, existiram amostras nas quais não foi possível a remoção de fios de fibras de vidro. Este facto deveu-se às fibras de vidro estarem ainda unidas/ligadas por resina que não foi totalmente queimada durante a combustão, daí apresentarem uma cor negra. A presença de resina pode-se verificar para as amostras de 400 °C/15 minutos, de 400 °C/30 minutos e de 400 °C/60 minutos, na objetiva de 10x na maior ampliação, recorrendo à tabela 24. Num estudo de Beauson *et al.* (2015), surgiu o mesmo problema na extração dos fios de fibra de vidro, conseguindo apenas extrair fios de fibra de vidro curtos com tamanhos compreendidos entre 10 a 15 milímetros, pois a combustão não se deu na totalidade, apresentando as fibras um aspeto negro. Após análise dos resultados obtidos nos ensaios de tração, reparou-se que estas três amostras são aquelas que apresentam uma resistência à tração superior à amostra de controlo, nomeadamente de 103,3%, de 95% e de 22,7%. Estas encontram-se impregnadas de resina, na qual a carga distribui-se entre todas as fibras e, por sua vez, leva a um aumento da resistência à tração. Segundo os autores Krishna *et al.* (2020), a resistência à tração das fibras varia com a quantidade de resina, relevando que as amostras que registaram elevadas quantidades de resina, apresentavam os maiores valores de resistência à tração.

Relativamente às restantes amostras sujeitas a 400 °C, a um tempo de queima de 120 minutos, 180 minutos e 240 minutos, tal como mencionado anteriormente, estas amostras apresentam uma diminuição da resistência à tração de 19,7%, de 28,9% e de 48,6%, respetivamente. Tal como se pode observar na tabela 25, na lente eletromagnética de ampliação de 200x a 2000x, verifica-se uma redução significativa de resina na constituição das fibras, verificando-se algumas quebras no aspeto das fibras. Por sua vez, as amostras sujeitas a 600 °C, para um tempo de queima de 15 minutos, de 30 minutos e de 60 minutos, existe, também, uma diminuição na resistência à tração das fibras de vidro face ao controlo, nomeadamente, de 15,3%, de 30,4% e de 59,7%, respetivamente.

Na tabela 26, na lente eletromagnética de ampliação de 200x a 2000x verifica-se uma diminuição significativa da quantidade de resina. Tal como Beauson *et al.* (2015), estes autores referiram que as fibras de vidro que apresentam um aspeto limpo, são aquelas que revelam uma menor resistência à tração.

No que diz respeito às amostras expostas a 800 °C, para um tempo de queima de 5 minutos, de 10 minutos e de 15 minutos, comprava-se perante a tabela 27, na lente eletromagnética de ampliação de 1000x a 2000x, a presença de fibras de vidro partidas, releva um aumento da fragilidade das mesmas, devido às altas temperaturas a que são expostas. Também é demonstrado a deposição de cinzas nas fibras de vidro, devido à elevada temperatura de queima para estas amostras, tal como é confirmado na literatura pelos autores Gopalraj & Kärki (2020). Estes autores anunciam que uma temperatura inadequada pode levar à presença de carvão na superfície das fibras e, conseqüente, diminuição percentual das propriedades mecânicas, resultando na impossibilidade de reutilização das fibras. Também, de acordo com os autores Chen *et al.* (2020), estes comprovam o comportamento frágil das fibras de vidro a altas temperaturas, anunciando reduções consideráveis na rigidez.

A figura 50 faz referência aos diâmetros das diferentes amostras de fibra de vidro, nomeadamente, da amostra de controlo, da amostra sujeita a uma temperatura de 400 °C, a um tempo de queima de 15 minutos e, por último, da amostra exposta a uma temperatura de 800 °C, a um tempo de queima de 15 minutos. Para amostra controlo, revela-se um diâmetro médio de 8,75 micrón. Por sua vez, a amostra de 400 °C, a um tempo de queima de 15 minutos exibe um diâmetro médio de 11,3 micrón e a amostra de 800 °C, a um tempo de queima de 15 minutos, demonstra um diâmetro médio de 9,39 micrón. A amostra de 400 °C a 15 minutos é aquela que revela um maior diâmetro, isto porque as fibras encontram-se impregnadas de resina. É importante salientar que com o aumento da temperatura, de 400 °C para 800 °C, diminui o diâmetro das fibras de vidro em 1,91 micrón. Esta afirmação é comprovada pelos autores Gopalraj & Kärki (2020), que anunciam que para temperaturas elevadas revela-se uma diminuição no diâmetro das fibras recuperadas.

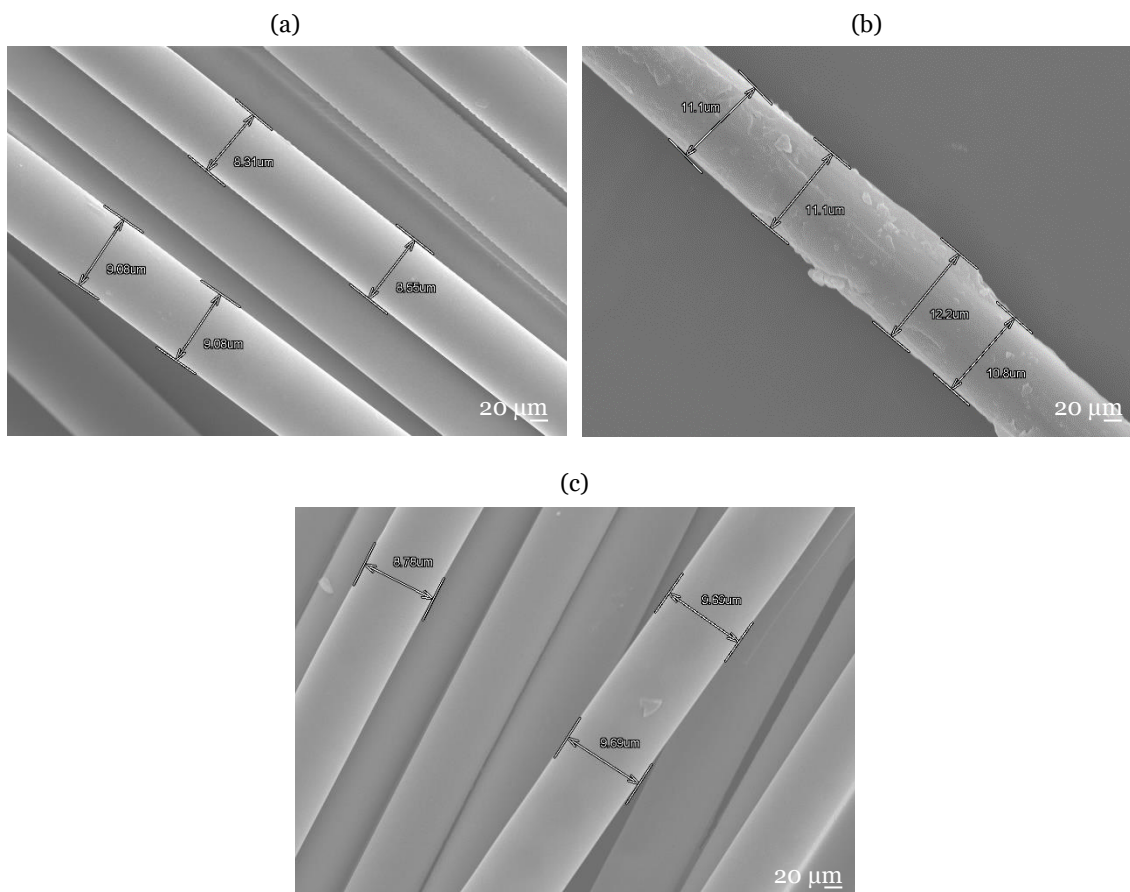


Figura 50 – Diâmetro das amostras de fibra de vidro: (a) controlo; (b) 400 °C/15 min; (c) 800 °C/15 min.

Por fim, procedeu-se à avaliação EDX, com o intuito de quantificar os principais elementos químicos das fibras de vidro, após queima. Para isso, de modo a ter um termo comparativo, efetuou-se a avaliação EDX às diferentes temperaturas, para os tempos de queima mais baixos e mais altos, tal como se pode verificar nas figuras 51 a 57.

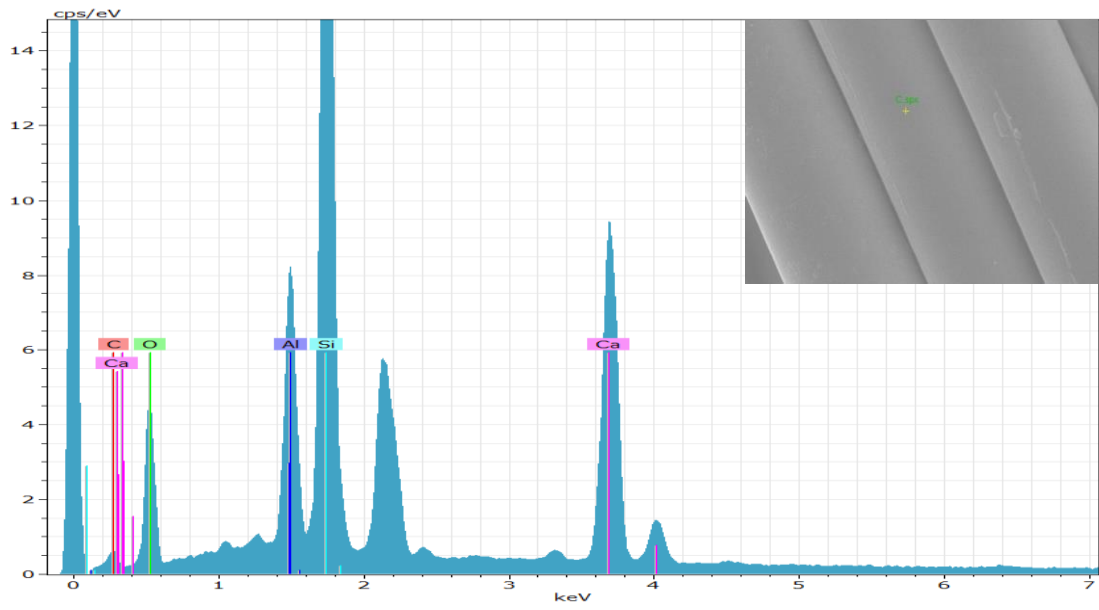


Figura 51 – Espectro de energia dispersa, referente à amostra de controlo.

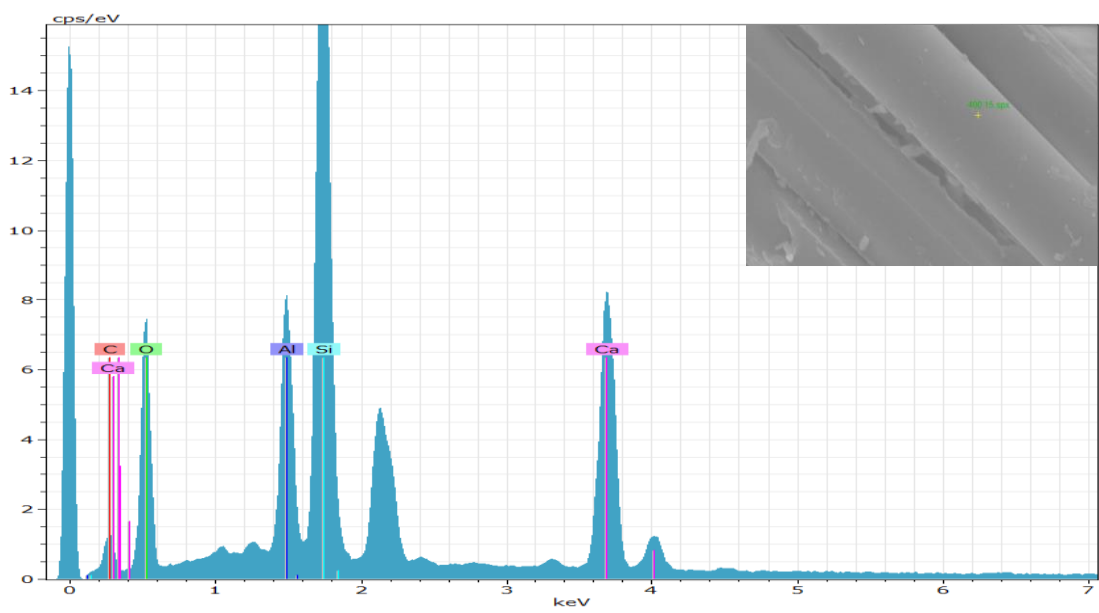


Figura 52 – Espectro de energia dispersa, referente à amostra de 400 °C/15 min.

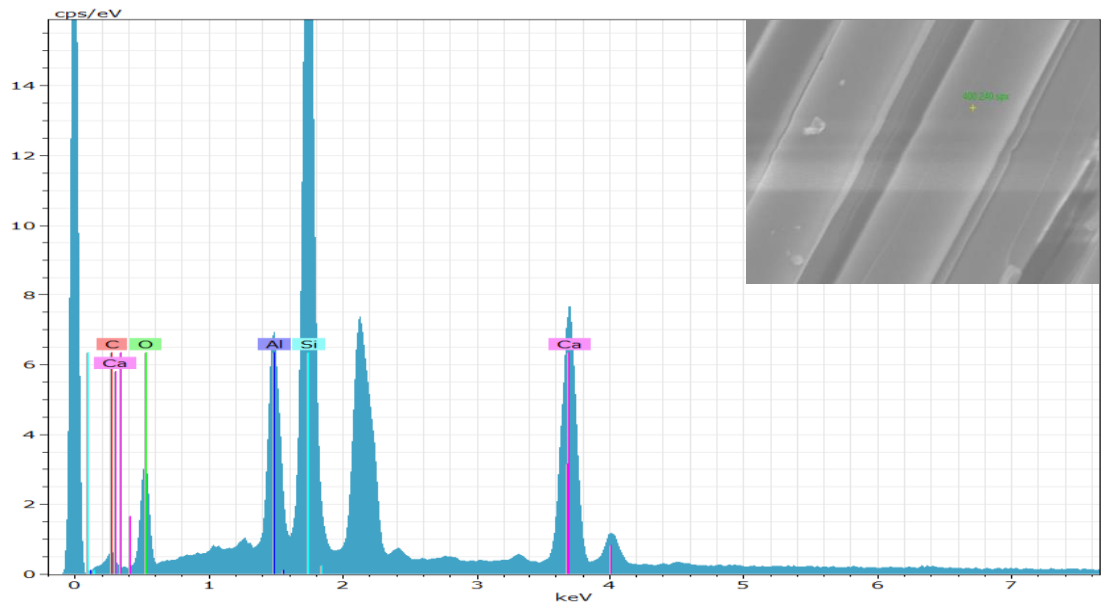


Figura 53 – Espectro de energia dispersa, referente à amostra de 400 °C/240 min.

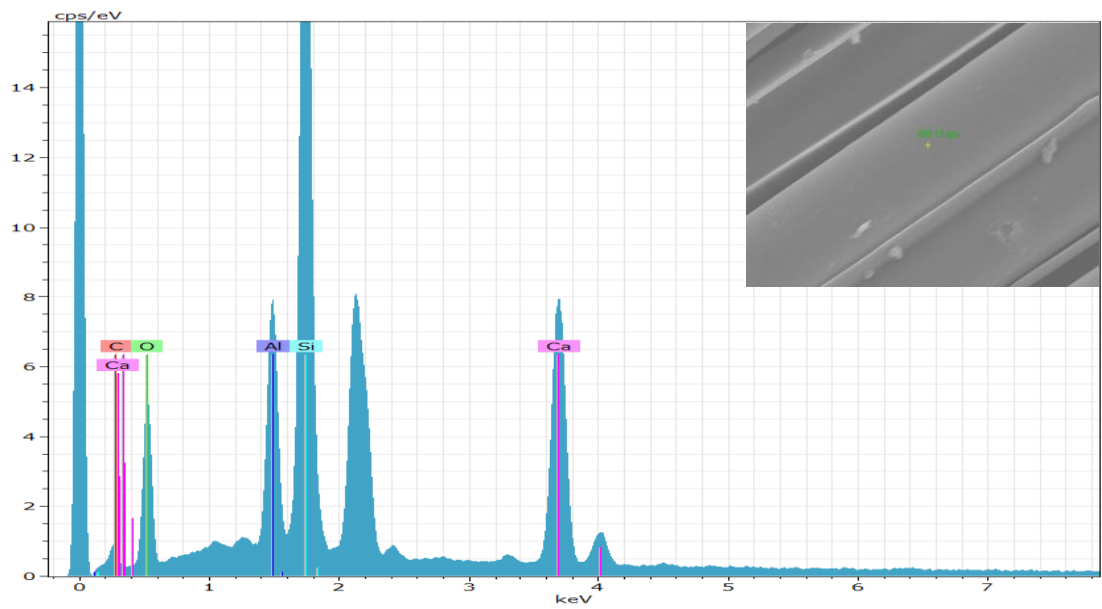


Figura 54 – Espectro de energia dispersa, referente à amostra de 600 °C/15 min.

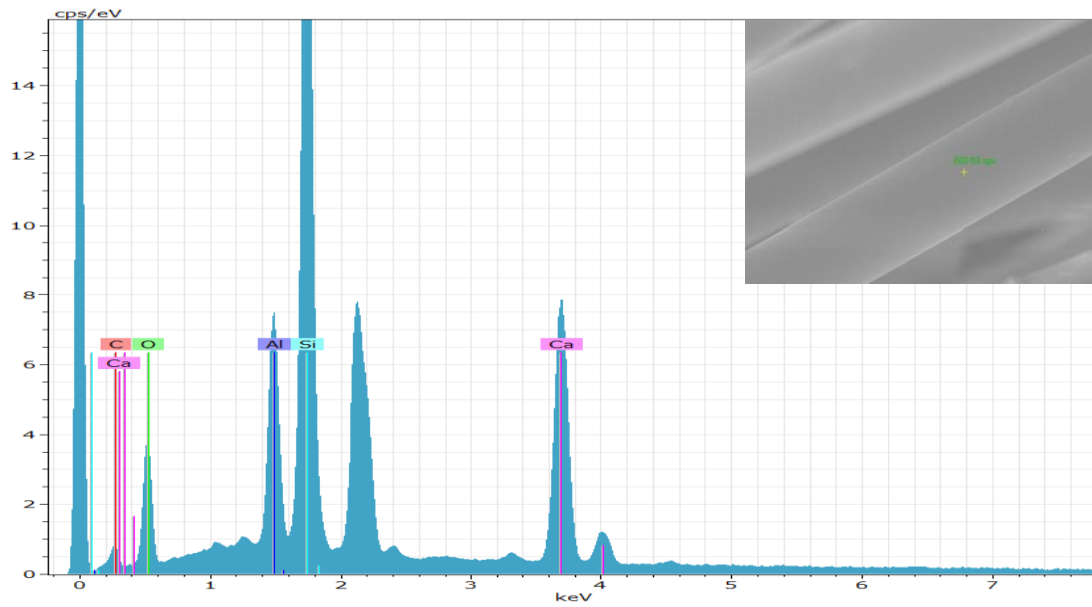


Figura 55 – Espectro de energia dispersa, referente à amostra de 600 °C/60 min.

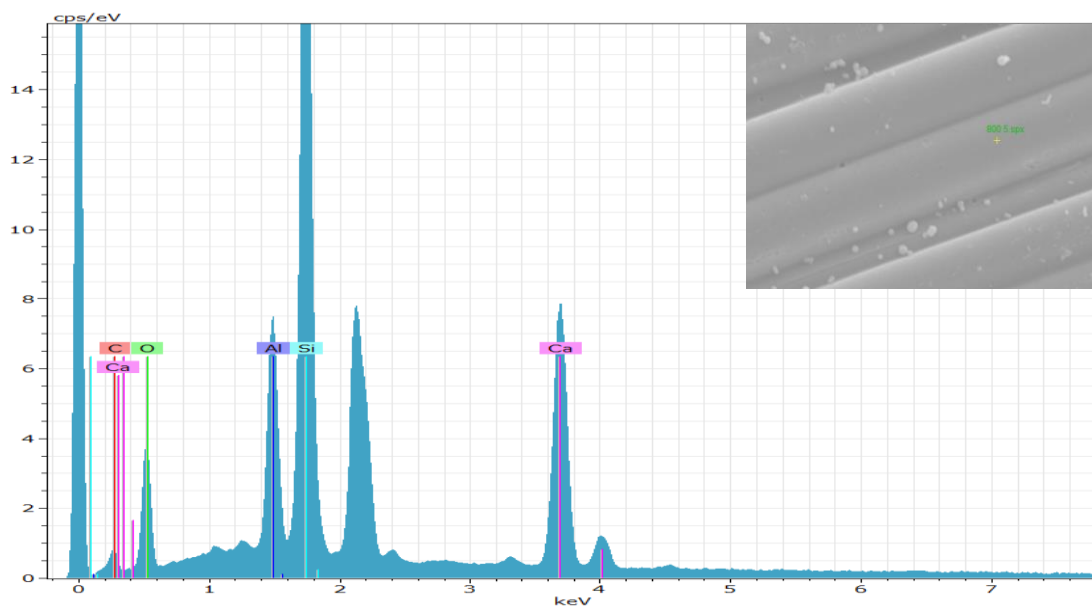


Figura 56 – Espectro de energia dispersa, referente à amostra de 800 °C/15 min

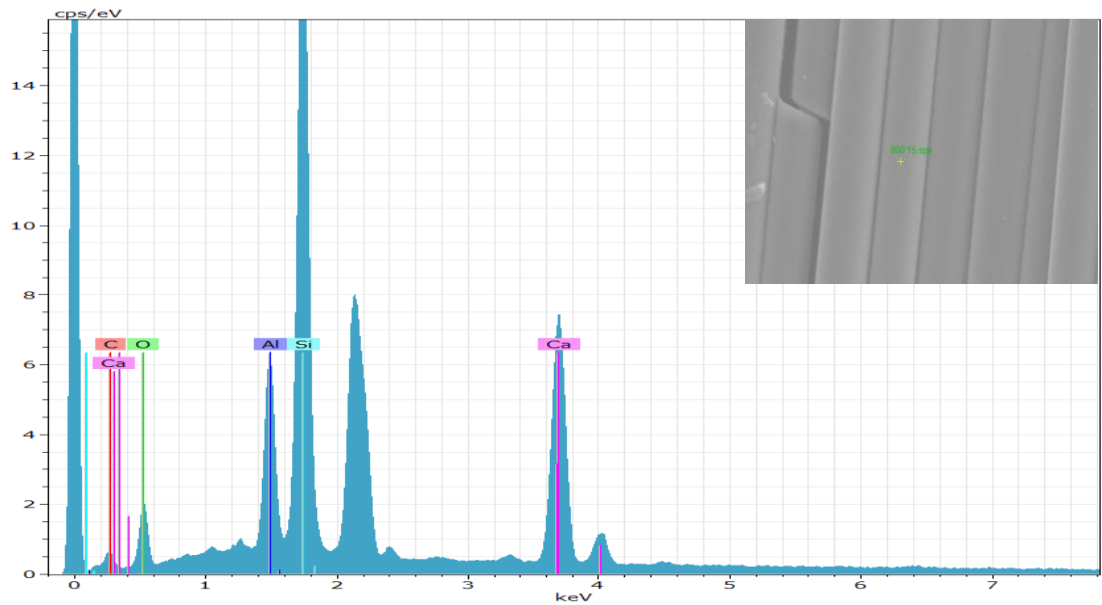


Figura 57 – Espectro de energia dispersa, referente à amostra de 800 °C/15 min.

Em primeiro lugar, é importante salientar que o tipo de fibra usado no decorrer deste presente trabalho apresenta um tratamento de silano, daí os diferentes elementos químicos na sua constituição, salientando também, segundo Oliveux, Dandy & Leeke, (2015), que a resina quando volatilizada, produz alguns gases (dióxido de carbono, CO_2 , hidrogénio, H_2 , e metano, CH_4) e frações de óleo. Na tabela 28, é apresentada a percentagem mássica de cada elemento químico constituinte das diferentes amostras de fibras de vidro às diferentes temperaturas, para os tempos mais baixos e mais altos de queima, dando um especial enfoque aos elementos químicos de carbono e sílica.

Tabela 28 – Quantificação dos elementos químicos das amostras.

Amostras	Percentagem Mássica (%)				
	Carbono (C)	Oxigénio (O)	Alumínio (Al)	Sílica (Si)	Cálcio (Ca)
Controlo	8,33	34,46	8,66	26,27	22,28
400 °C/15 min	14,34	41,08	7,48	21,11	15,98
400 °C/240 min	11,46	30,4	8,8	26,89	22,45
600 °C/15 min	12,29	35,58	8,37	24,4	19,37
600 °C/60 min	12,72	35,64	8,97	26,23	26,29
800 °C/5 min	13,05	31,89	8,47	25,88	20,7
800 °C/15 min	13,45	24,01	9,27	29,08	24,20

A amostra de controlo apresenta na sua constituição 8,33% de carbono, 34,46% de oxigénio, 8,66% de alumínio, 26,27% de sílica e 22,28% de cálcio. Comparando as amostras que foram sujeitas a uma temperatura de 400 °C, para o menor tempo de queima, 15 minutos, apresenta na sua constituição 14,34% de carbono, 41,08% de oxigénio, 7,48% de alumínio, 21,11% de sílica e 15,98% de cálcio. Ou seja, um aumento significativo da percentagem mássica de carbono e uma diminuição da percentagem mássica de sílica, quando comparado com a amostra de controlo. Por sua vez, para a amostra de 400 °C, para o maior tempo de queima, 240 minutos, apresenta 11,46% de carbono, 30,4% de oxigénio, 8,8% de alumínio, 26,89% de sílica e 22,45% de cálcio, existindo uma diminuição da percentagem mássica de carbono e um aumento da percentagem mássica de sílica.

Comparando ambas as amostras, a que foi sujeita ao maior tempo de queima apresenta uma menor percentagem de carbono. Enquanto que, a que foi sujeita ao menor tempo de queima, apresenta uma maior percentagem de carbono. Embora quando comparadas

com o controlo ambas apresentam maior teor de carbono. Na amostra sujeita ao menor tempo de queima, 15 minutos, o aumento de carbono ocorre devido à existência de resina, como demonstra a figura anteriormente apresentada na tabela 24, pela lente eletromagnética na ampliação 1000x. Quanto à que foi sujeita ao maior tempo de queima, 240 minutos, a percentagem mássica de carbono continua elevada, o que pode ser justificado pelo aumento do teor de carvão. Estes resultados podem ser corroborados pelos estudos desenvolvidos por Gopalraj & Kärki (2020).

Quanto às amostras sujeitas a 600 °C, para o menor tempo de queima, 15 minutos, apresenta uma percentagem de carbono de 12,29%, de oxigénio de 35,58%, de alumínio de 8,37%, de sílica de 24,40% e de cálcio de 19,37%, apresentando uma diminuição de sílica face ao controlo. Em relação à que apresenta o maior tempo de queima, exhibe 12,72% de carbono, 35,64% de oxigénio, 8,97% de alumínio, 26,33% de sílica e 26,29% de cálcio. Revela-se um aumento da percentagem mássica de carbono de 0,5%, o que contribui para a diminuição da resistência à tração em 44,4%. Conclui-se que, para ambas as amostras, existe uma diminuição do teor de sílica e um aumento do teor de carbono, quando comparadas com o controlo. O que pode ser justificado, no caso da amostra sujeita ao menor tempo de queima, 15 minutos, pela presença de resina, enquanto, na amostra sujeita ao maior tempo de queima, 60 minutos, pela formação de carvão na superfície das fibras, tal como verificaram Gopalraj & Kärki (2020).

Referente às amostras expostas a uma temperatura de 800 °C, a uma queima de 5 minutos, revela na sua constituição 13,05% de carbono, 31,89% de oxigénio, 8,47% de alumínio, 25,88% de sílica e 20,7% de cálcio. Quanto à amostra sujeita a 15 minutos, apresenta na sua constituição 13,45% de carbono, 24,01% de oxigénio, 9,27% de alumínio, 29,08% de sílica e 24,20% de cálcio. Ambas as amostras, revelam um aumento do teor de carbono face ao controlo. No entanto, para o menor tempo de queima, há uma pequena diminuição da percentagem de sílica, enquanto que, para o maior tempo de queima há um aumento face ao controlo. De um tempo de queima de 5 minutos para um tempo de queima de 15 minutos, verifica-se um aumento da percentagem mássica de carbono de 0,4%, o que comprova a presença de carvão na superfície das fibras, uma vez que, é o elemento químico mais abundante no carvão. Esta presença de carvão, resulta numa diminuição da resistência à tração de 6,4%. Por sua vez, também se verifica uma diminuição percentual do oxigénio de 7,88%, uma vez que a altas temperaturas a combustão consome mais oxigénio. De acordo com os autores Gopalraj & Kärki (2020) estes comprovam que a presença de carvão à superfície das fibras para temperaturas elevadas, resulta numa diminuição percentual das propriedades mecânicas.

Capítulo 8

Considerações Finais

Neste capítulo, são apresentadas as considerações finais da temática estudada, enunciado as conclusões relevantes da parte laboratorial. Faz-se também uma abordagem a possíveis perspectivas de trabalho e investigações futuras.

8.1. Conclusões

Perante os objetivos inicialmente definidos, são possíveis obter algumas conclusões, após análise e discussão de resultados referente à prática laboratorial, nomeadamente, dos ensaios de tração, da avaliação microscópica e da avaliação EDX.

Através dos ensaios de tração, foi possível concluir que existe uma maior resistência à tração para as amostras expostas a menores temperaturas, em simultâneo, com os menores tempos de queima. Por sua vez, a partir de uma avaliação microscópica, depreendeu-se que para os valores altos de resistência à tração, existia a maior quantidade de resina na superfície das fibras de vidro. Concluindo-se assim, que estas amostras não foram sujeitas a temperaturas/tempos de queima ideais, intitulado-as como inválidas para o estudo deste trabalho.

Por outro lado, demonstrou-se menores quantidades de resina ou mesmo a inexistência desta, para as amostras que exibiram os valores mais baixos de resistência à tração e, que por sua vez, apresentaram um comportamento frágil. Devido à degradação das fibras na presença da temperatura, estas acabam por se partir.

Para as temperaturas mais elevadas, denotou-se um considerável aumento da percentagem de carbono nas fibras de vidro, salientando que quanto maior a percentagem de carvão menor a resistência à tração das fibras de vidro. Também se verificou a diminuição do diâmetro das fibras para temperaturas elevadas.

Em suma, pode-se confirmar que é possível a realização da reciclagem das pás de rotor em ambiente industrial, após a metodologia adotada. Chegou-se à conclusão de que a melhor condição de ensaio, face ao estudo desenvolvido, foi realizada a uma temperatura de 600 °C a um tempo de queima de 15 minutos. Visto que, foi a amostra que revelou um

comportamento mais idêntico ao controlo, relevando uma perda de apenas de 15,3% da resistência à tração em relação à amostra de controlo.

8.2. Perspetivas Futuras

Como perspetiva futura, pretende-se ampliar os ensaios a menores valores de temperatura, visto que a mesma apresenta um papel relevante no decorrer deste trabalho. Para além desta, deve-se elaborar uma análise comparativa com tratamentos após a queima e fazer uma discussão detalhada da relação entre benefício/custo.

Produzir novos compósitos, adotando a condição ideal obtida neste trabalho, para assim, determinar a resistência mecânica em comparação ao mesmo compósito com fibra virgem.

Por fim, sugere-se que seja adotada a hibridização com outras fibras virgens ou o recurso a nanopartículas, com vista ao aumento da resistência mecânica para os valores próximos dos compósitos manufacturados com fibras virgens

Bibliografia

Adams, R. D., Collins, A., Cooper, D., Wingfield-Digby, M., Watts-Farmer, A., Laurence, A., Patel, K., Stevens, M. & Watkins, R. (2014) 'Recycling of Reinforced Plastics', *Applied Composite Materials*, 21(1), pp. 263–284. doi: <http://doi.org/10.1007/s10443-013-9380-1>.

Åkesson, D., Krishnamoorthi, R., Foltynowicz, Z., Christéen, J., Kalantar, A. & Skrifvars, M. (2013) 'Glass Fibres Recovered by Microwave Pyrolysis as a Reinforcement for Polypropylene', *Polymers and Polymer Composites*, 21(6), pp. 333–340. doi: <https://doi.org/10.1177/096739111302100601>.

Altenbach, H., Altenbach, J. & Kissing, W. (2018) 'Classification of Composite Materials', in *Mechanics of Composite Structural Elements*. 2nd edn. Springer, pp. 3–18. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-10-8935-0_1.

APA (2020a) 'Classificação de Resíduos'. [Online]. Available at: <https://apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=84&sub2ref=254&sub3ref=264> (Accessed: 29 june 2020).

APA (2020b) 'Gestão de Resíduos'. [Online]. Available at: <https://apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=84&sub2ref=254> (Accessed: 29 june 2020).

APA (2020c) 'Gestão de Resíduos Perigosos'. [Online]. Available at: <https://apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=84&sub2ref=938> (Accessed: 29 june 2020).

APA (2020d) 'Gestão de Resíduos Setoriais'. [Online]. Available at: <https://apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=84&sub2ref=972> (Accessed: 29 june 2020).

APA (2020e) 'Gestão de Resíduos Urbanos'. [Online]. Available at: <https://apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=84&sub2ref=933> (Accessed: 29 june 2020).

APA (2020f) 'Resíduos'. [Online]. Available at: <https://apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=84> (Accessed: 29 June 2020).

APREN (2017) 'O Futuro do Setor Eólico: Extensão de Vida e Repowering das Centrais Eólicas'. Lisboa.

Asmatulu, E., Twomey, J. & Overcash, M. (2014) 'Recycling of fiber-reinforced composites and direct structural composite recycling concept', *Journal of Composite Materials*, 48(5), pp. 593–608. doi: <https://doi.org/10.1177/0021998313476325>.

ASTM International (2015). ASTM D579: Standard Specification for Greige Woven Glass Fabrics. [Online] Available at: <https://www.astm.org/Standards/D579.htm> (Accessed: 17 September 2020).

ASTM International (2000). ASTM D578: Standard Specification for Glass Fiber Strands. [Online] Available at: <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D578-00.htm> (Accessed: 17 September 2020).

Beauson, J., Fraise, A., Toncelli, C., Bech, J. I. & Brøndsted, P. (2015) 'Thermoset composite recycling: Properties of recovered glass fiber', in *Proceedings of the 20 th International Conference on Composite Materials*, Copenhagen, Denmark.

Beauson, J., Lilholt, H. & Brøndsted, P. (2014) 'Recycling solid residues recovered from glass fibre-reinforced composites - A review applied to wind turbine blade materials', *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33(16), pp. 1542–1556. doi: <https://doi.org/10.1177/0731684414537131>.

Bhattacharjee, A. (2012) 'Social Science Research: Principles, Methods, and Practices'. *Textbooks Collection*. 3. 2nd edn. Florida. doi: <https://doi.org/10.1186/1478-4505-9-2>.

Biron, M. (2013) 'Thermosets and Composites: Material Selection, Applications, Manufacturing and Cost Analysis'. 2nd edn. United States. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-3124-4.00006-7>.

Borges, C., Furtado, G. & Oliveira, J. (2015) 'Metodologias de investigação comuns nas ciências sociais: Possíveis contributos para o conhecimento de sujeitos em planeamento arquitetónico e urbanístico', *Revista de Arquitetura da Universidade Fernando Pessoa*, (9), pp. 9-26.

Botelho, J. M. & Cruz, V. A. G. (2013) 'Metodologia científica'. São Paulo: Pearson Education do Brasil.

Busby, R. L. (2012) 'Components: What's Wind Turbine Made of?', in Penn Well Corporation (ed.) *Wind Power: The Industry Grows Up*. Tulsa, Oklahoma, USA, pp. 11–24.

Callister, W. D. & Rethwisch, D. G. (2014) 'Materials Science and Engineering: An Introduction'. 9th edn. United States: Wiley. doi: <https://doi.org/10.1126/science.239.4836.125>.

Cefic, EuCia & Europe, W. (2020) 'Accelerating Wind Turbine Blade Circularity'. [Online]. Available at: <https://cefic.org/app/uploads/2020/05/Accelarating-wind-turbine-blade-waste-recycling.pdf> (Accessed: 7 august 2020).

Chawla, K. K. (2019) 'Composite Materials: Science and Engineering'. *Chemical and Engineering News*. 4th edn. Birmingham: Springer Nature Switzerland AG. doi: <https://doi.org/10.1016/c2013-0-17714-8>.

Cherrington, R., Goodship, V., Meredith, J., Wood, B. M., Coles, S. R., Vuillaume, A., Feito-Boirac, A., Spee, F. & Kirwan, K. (2012) 'Producer responsibility: Defining the incentive for recycling composite wind turbine blades in Europe', *Energy Policy*. Elsevier, 47, pp. 13–21. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.03.076>.

Chen, T., Mansfield, G. D., Ju., L. & Baird, D. G. (2020) 'The influence of mechanical recycling on the properties of the thermotropic liquid crystalline polymer and long glass fiber reinforced polypropylene', *Composites Part B*, 200, 108316. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108316>.

Clyne, T. W. & Hull, D. (2019) 'An Introduction to Composite Materials'. 3rd edn. United Kingdom: Cambridge University Press.

Conenor (2020) 'RECYCLING THERMOSET FRP-WASTE'. [Online] Available at: <http://www.conenor.com/recycling-thermoset-frpwaste> (Accessed: 9 august 2020).

Cunliffe, A. M., Jones, N. & Williams, P. T. (2003) 'Recycling of fibre-reinforced polymeric waste by pyrolysis: Thermo-gravimetric and bench-scale investigations', *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 70(2), pp. 315–338. doi: [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(02\)00161-4](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(02)00161-4).

Decreto-Lei n.º 189/88 do Ministério da Indústria e Energia (1988) *Diário da República n.º 123/1988, Série I (de 27/05/1988)*. [Online] Available at: <https://dre.pt/application/conteudo/374244> (Accessed: 7 august 2020).

Decreto-Lei n.º 73/2011 do Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território (2011) *Diário da República n.º 116/2001, Série I (de 17/06/2001)*. [Online] Available at: <https://dre.pt/application/conteudo/670034> (Accessed: 29 june 2020).

Duarte, M. J. (2019) 'o enquadramento legislativo da energia eólica no panorama da política de promoção das energias renováveis a nível nacional', *Renováveis Magazine*. Porto. [Online] Available at: http://www.renovaveismagazine.pt/PDF/dossier_rm36.pdf (Accessed: 1 june 2020).

Duflou, J. R., Deng, Y., Acker, K. V. & Dewulf, W. (2012) 'Do fiber-reinforced polymer composites provide environmentally benign alternatives? A life-cycle-assessment-based study', *MRS Bulletin*, 37(4), pp. 374–382. doi: <https://doi.org/10.1557/mrs.2012.33>.

Durães, T. F. C. (2016) *Enquadramento Legal e Estudo Económico de Parques Eólicos*, obtenção para o grau de Mestre (Energias Renováveis e Eficiência Energética), Instituto Politécnico de Bragança, Bragança.

E2P (2020a) 'CAPACIDADE POR DISTRITO E REGIÃO AUTÓNOMA'. [Online] Available at: <https://e2p.inegi.up.pt/> (Accessed: 31 may 2020).

E2P (2020b) 'EVOLUÇÃO DA POTÊNCIA INSTALADA EM PORTUGAL'. [Online] Available at: <https://e2p.inegi.up.pt/> (Accessed: 26 may 2020).

E2P (2020c) 'FABRICANTES'. [Online] Available at: <https://e2p.inegi.up.pt/> (Accessed: 31 may 2020).

E2P (2020d) 'LISTA DE CEPS'. [Online] Available at: <https://e2p.inegi.up.pt/> (Accessed: 26 may 2020).

E2P (2020e) 'PROMOTORES'. [Online] Available at: <https://e2p.inegi.up.pt/> (Accessed: 31 may 2020).

E2P (2020f) 'QUOTA DE MERCADO DOS FABRICANTES'. [Online] Available at: <https://e2p.inegi.up.pt/> (Accessed: 31 may 2020).

E2P (2020g) 'QUOTA DE MERCADO DOS PROMOTORES'. [Online] Available at: <https://e2p.inegi.up.pt/> (Accessed: 31 may 2020).

E2P (2020h) 'TOTAL DE POTÊNCIA INSTALADA RENOVÁVEL EM PORTUGAL'. [Online] Available at: <https://e2p.inegi.up.pt/> (Accessed: 25 may 2020).

Europe, W. (2019) 'Wind Energy in Europe: Outlook to 2023'. [Online] Available at: <https://www.anev.org/wp-content/uploads/2019/10/Market-outlook-2019.pdf> (Accessed: 31 august 2020).

Figueiras, B. J. P. P. (2013) '*Mecanismos de incentivos ao fotovoltaico: estudo comparativo Portugal/Brasil*', obtenção para o grau de Mestre (Engenharia da Energia e do Ambiente), Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Lisboa.

Gil, A. C. (2008) 'Métodos e Técnicas de Pesquisa Social'. 6th edn. A. S. A. São Paulo.

Gopalraj, S. K. & Kärki, T. (2020) 'A review on the recycling of waste carbon fibre/glass fibre-reinforced composites: fibre recovery, properties and life-cycle analysis', *SN Applied Sciences*. Springer International Publishing, 2(3), pp. 1–21. doi: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2195-4>.

Hagnell, M. K. & Akermo, M. (2019) 'The economic and mechanical potential of closed loop material usage and recycling of fibre-reinforced composite materials', *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 223, pp. 957–68. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.156>.

Hagnell, M. K. & Åkermo, M. (2019) 'The economic and mechanical potential of closed loop material usage and recycling of fibre-reinforced composite materials', *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 223, pp. 957–968. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.156>.

Hamad, K., Kaseem, M. & Deri, F. (2013) 'Recycling of waste from polymer materials: An overview of the recent works', *Polymer Degradation and Stability*. Elsevier Ltd, 98(12), pp. 2801–2812. doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.09.025>.

Hao, S., Kuah, A. T. H., Rudd, C. D., Wong, K. H., Lai, N. Y. G., Mao, J. & Liu, X. (2020) 'A circular economy approach to green energy: Wind turbine, waste, and material recovery', *Science of the Total Environment*. Elsevier Ltd, 702, p. 135054. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135054>.

IEP (2019) 'O Futuro da Energia Eólica em Portugal', IEP. [Online] Available at: <https://www.iep.pt/o-futuro-da-energia-eolica-em-portugal/> (Accessed: 22 may 2020).

Iwaya, T., Tokuno, S., Sasaki, M., Goto, M. & Shibata, K. (2008) 'Recycling of fiber reinforced plastics using depolymerization by solvothermal reaction with catalyst', *Journal of Materials Science*, 43(7), pp. 2452–2456. doi: <https://doi.org/10.1007/s10853-007-2017-8>.

Jensen, J. P. & Skelton, K. (2018) 'Wind turbine blade recycling: Experiences, challenges and possibilities in a circular economy', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd, 97, pp. 165–176. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.041>.

Jin, F. L., Li, X. & Park, S. J. (2015) 'Synthesis and application of epoxy resins: A review', *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. Elsevier B.V., 29, pp. 1–11. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.03.026>.

Job, S. (2014) 'Recycling composites commercially', *Reinforced Plastics*. Elsevier Ltd, 58(5), pp. 32–34. doi: [https://doi.org/10.1016/S0034-3617\(14\)70213-9](https://doi.org/10.1016/S0034-3617(14)70213-9).

Joeman, I. (2019) 'Alternatives on afterlife use of amortized wind turbine blades in the Netherlands', to obtaining for the Master's degree (Environmental and Energy Management), University of Twente, Netherlands.

Joye, T. (2015) 'A World Made of Rotor Blades'. [Online] Available at: <https://www.notechmagazine.com/2015/02/a-world-made-of-rotor-blades.html> (Accessed: 12 august 2020).

Kalkanis, K., Psomopoulos, C. S., Kaminaris, Ioannidis, G. & Pachos, P. (2019) 'Wind turbine blade composite materials - End of life treatment methods', *Energy Procedia*. Elsevier B.V., 157(2018), pp. 1136–1143. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.281>.

Kellner, T. (2019) 'Extreme Measures: At 107 Meters, The World's Largest Wind Turbine Blade Is Longer Than A Football Field. Here's What It Looks Like', *GE Reports*. [Online] Available at: <https://www.ge.com/reports/extreme-measures-107-meters-worlds-largest-wind-turbine-blade-longer-football-field-heres-looks-like/> (Accessed: 7 may 2020).

Krishna, U. B. G., Srinivasa, C. S., Amara, N. S. & Gudoor, S. (2020) 'Processing, characterization and property evaluation of seashell and glass fibre added epoxy based polymer matrix composite', *Materials Today: Proceedings*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mat.pr.2020.02.818>.

Larsen, K. (2009) 'Recycling wind', *Reinforced Plastics*. Elsevier Ltd, 53(1), pp. 20-25. doi: [https://doi.org/10.1016/S0034-3617\(09\)70043-8](https://doi.org/10.1016/S0034-3617(09)70043-8)

Lei n.º 79/2019 da Assembleia da República (2019). [Online] Available at: <https://dre.pt/application/file/a/124347449> (Accessed: 7 august 2020).

Ma, Y., Yang, Y., Sugahara, T. & Hamada, H. (2016) 'A study on the failure behavior and mechanical properties of unidirectional fiber reinforced thermosetting and thermoplastic composites', *Composites Part B: Engineering*. Elsevier Ltd, 99, pp. 162–172. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.005>.

MacDonald, S. & Headlam, N. (2010) 'Research Methods Handbook: Introductory guide to research methods for social research'. CLES. Manchester. doi: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4464.3448>.

MarketsandMarkets. (2020) 'Composites Market by Fiber Type (Glass Fiber Composites, Carbon Fiber Composites, Natural Fiber Composites), Resin Type (Thermoset Composites, Thermoplastic Composites), Manufacturing Process, End-use Industry and Region - Global Forecast to 2025', *MarketsandMarkets*. [Online] Available at: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/composite-market-200051282.html> (Accessed: 6 august 2020).

Oliveira, E. R. & Ferreira, P. (2014) 'Métodos de Investigação - Da Interrogação à Descoberta Científica'. Editorial. Porto.

Oliveux, G., Bailleul, J. L. & Salle, E. L. G. L. (2012) 'Chemical recycling of fibre reinforced composites using subcritical water', *Composites: Part A*, 43, pp. 1809-1818. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.06.008>

Oliveux, G., Dandy, L. O. & Leeke, G. A. (2015) 'Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties', *Progress in Materials Science*, 72, pp. 61–99. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.01.004>.

Peña, I., Azevedo, I. L. & Ferreira, L. A. F. M. (2014) 'Economic analysis of the profitability of existing wind parks in Portugal', *Energy Economics*. Elsevier B.V., 45, pp. 353–363. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2014.06.013>.

Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J. & Shitsuka, R. (2018) 'Metodologia da Pesquisa Científica'. 1st edn. Santa Maria.

Pico, D., Seide, G. & Gries, T. (2014) 'Thermo chemical processes: Potential improvement of the wind blades life cycle', *Chemical Engineering Transactions*, 36, pp. 211–216. doi: <https://doi.org/10.3303/CET1436036>.

Rahimizadeh, A., Tahir, M., Fayazbakhsh, K. & Lessard, L. (2020) 'Tensile properties and interfacial shear strength of recycled fibers from wind turbine waste', *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. Elsevier, 131. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105786>.

Reciclalia (2020) 'About us'. [Online] Available at: <https://reciclaliacomposite.com/wordpress/about-us/> (Accessed: 9 august 2020).

Rybicka, J., Tiwari, A., Campo, P. A. D. & Howarth, J. (2015) 'Capturing composites manufacturing waste flows through process mapping', *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 91, pp. 251–261. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.033>.

Santos, L. A. B., Lima, J. M. M. V., Garcia, F. M. G. P. P., Monteiro, F. T., Silva, N. M. P., Silva, J. C. V. F., Santos, R. J. R. P., Afonso, C. F. N. L. D. & Piedade, J. C. L. (2016) 'Orientações Metodológicas para a Elaboração de Trabalhos de Investigação'. Cadernos do IUM. 2nd edn. (8). Instituto Universitário Militar, Lisboa.

Sicomín (2019) SR 8100 / SD 882X. [Online] Available at: <http://www.sicomín.com/datasheets/product-pdf94.pdf> (Accessed: 14 september 2020).

Simões, T., Madeira, L. & Estanqueiro, A. (2009) 'Wind Power in Portugal, REVE'. [Online] Available at: <https://www.evwind.es/2009/10/05/wind-power-in-portugal-by-teresa-simoes-liliana-madeira-and-ana-estanqueiro/1685> (Accessed: 22 may 2020).

Skelton, K. (2017) 'Discussion paper on managing composite blade waste'. Aalborg.

Speksnijder, S. (2019) 'BRIDGE OF BLADES'. [Online] Available at: <http://www.stijnspeksnijder.com/gallery/bridge-of-blades/> (Accessed: 12 august 2020).

União Europeia (2001) Diretiva 2001/77/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 27 de setembro, relativa à promoção da electricidade produzida a partir de fontes de energia renováveis no mercado interno da electricidade. [Online] Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32001L0077&from=EN> (Accessed: 1 june 2020).

União Europeia (2008) Diretiva 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de novembro, relativa aos resíduos de construção e demolição. [Online] Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0098&qid=1596705950951&from=PT> (Accessed: 5 december 2019).

União Europeia (2009) Diretiva 2009/28/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de abril, relativa à promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis. [Online] Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0028&from=pt> (Accessed: 2 june 2020).

União Europeia (2012) Diretiva 2012/19/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 4 de julho, relativa aos resíduos de equipamentos elétricos e eletrónicos (REEE) (reformulação). [Online] Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0019&qid=1596706696796&from=PT> (Accessed: 4 december 2019).

Varma, I. K. & Gupta, V. B. (2000) 'Thermosetting Resin - Properties', in *Comprehensive Composite Materials*. Delhi: Elsevier Science Ltd., pp. 1–56.

Vergara, S. E. & Tchobanoglous, G. (2012) 'Municipal Solid Waste and the Environment: A Global Perspective', *Annual Review of Environment and Resources*, 37(1), pp. 277–309. doi: <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-050511-122532>.

Yi, X.-S., Du, S. & Zhang, L. (2018) 'Composite Materials Engineering', 1. 1st edn. Springer. doi: <https://doi.org/10.1007/978-981-10-5690-1>.

Apêndice A

Caracterização dos Parques Eólicos por Distrito e por Região Autónoma

Relativamente ao distrito de Aveiro, o primeiro parque eólico a ser instalado foi em 2003, com uma potência de 4,5 megawatt. O mais recente parque apresenta uma potência instalada de 28,7 megawatt, com início de atividade em 2016. Até ao momento, este distrito conta com 5 parques eólicos. Segue a tabela 29, com os parques eólicos instalados no distrito de Aveiro (E2P, 2020d).

Tabela 29 – Parques eólicos no distrito de Aveiro (Adaptado de E2P, 2020b)

Nome	Ano de Entrada em Funcionamento	Potência Instalada (MW)
Alto do Côco	2003	4,5
Doninhas	2005	0,8
Freita I	2006	18,4
Freita II	2006	18,4
Guardão	2016	28,7

Atualmente, o distrito de Aveiro apresenta uma potência total instalada de 70,8 megawatt que representa 45,4% das energias renováveis do distrito. Posto isto, a figura 58 ilustra a evolução da potência instalada no distrito de Aveiro (E2P, 2020a; E2P, 2020c).

Evolução da Potência Instalada no Distrito de Aveiro

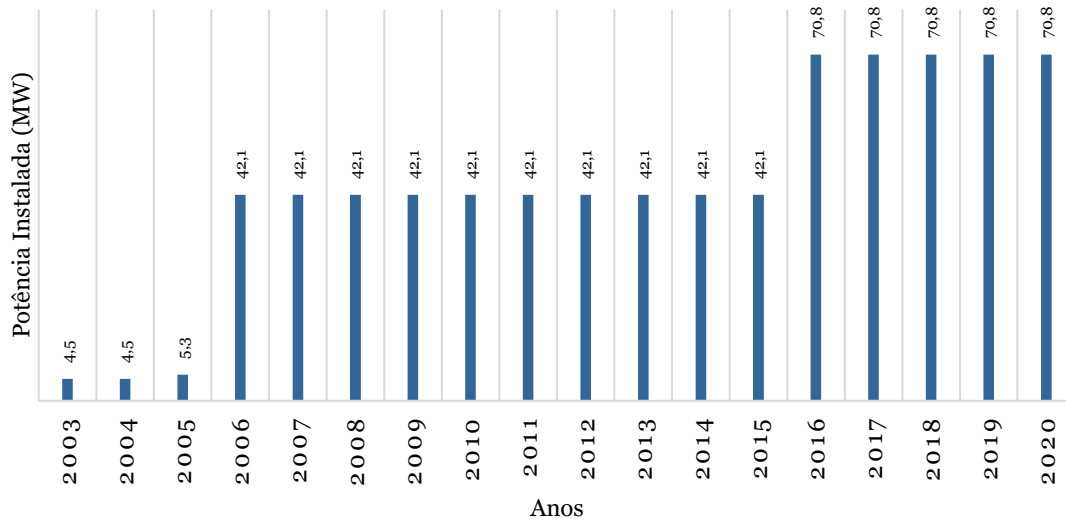


Figura 58 – Evolução da potência instalada no distrito de Aveiro, desde 2003 até 2020 (Adaptado de E2P, 2020c).

Referente ao distrito de Braga, foi em 2002 a primeira instalação eólica, com uma capacidade de 2,4 megawatt. Em 2008, foi inaugurado o mais recente parque eólico deste distrito, com uma potência instalada de 0,9 megawatt. Atualmente, este distrito soma 9 parques eólicos. Na tabela 30, observa-se os parques eólicos instalados no distrito de Braga (E2P, 2020d).

Tabela 30 – Parques eólicos no distrito de Braga (Adaptado de E2P, 2020b).

Nome	Ano de Entrada em Funcionamento	Potência Instalada (MW)
Alto da Vaca	2002	2,4
Serra da Cabreira	2004	20
Terras Altas de Fafe	2004	106
Alfarrobeira	2005	0,6
Vilarchão	2005	2
Penouta	2006	0,8
Viso	2006	1,6
Azinheira	2007	14
Ruivães	2008	0,9

No presente ano, o distrito de Braga apresenta uma potência total instalada de 148,3 megawatt que representa 42,7% das energias renováveis do distrito. Assim, segue a figura 59 que ilustra a evolução da potência instalada no distrito de Braga (E2P, 2020a; E2P, 2020c).

Evolução da Potência Instalada no Distrito de Braga

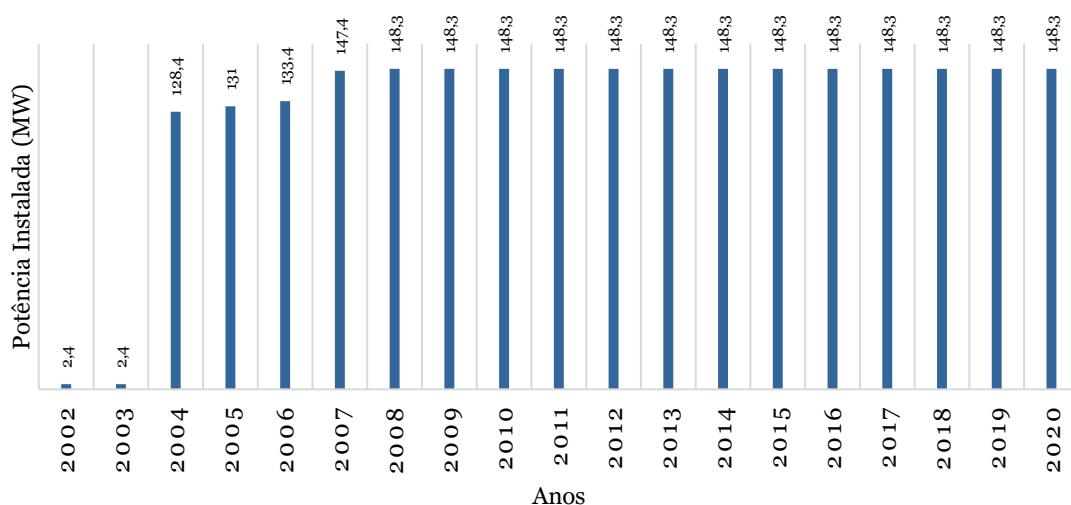


Figura 59 – Evolução da potência instalada no distrito de Braga, desde 2002 até 2020 (Adaptado de E2P, 2020c).

No distrito de Bragança, os primeiros parques eólicos a serem instalados foram em 2004, com uma potência total de 6 megawatt. O mais recente parque eólico, com uma potência instalada de 70 megawatt, teve início de funcionamento em 2009. Este distrito, conta, até ao momento, com 4 parques eólicos. Segue a tabela 31, com os diferentes parques eólicos instalados no distrito de Bragança (E2P, 2020d).

Tabela 31 – Parques eólicos no distrito de Bragança (Adaptado de E2P, 2020b).

Nome	Ano de Entrada em Funcionamento	Potência Instalada (MW)
Borninhos	2004	2
Castanheira	2004	4
Felgar	2007	8
Bornes	2009	70

Em 2020, o distrito de Bragança dispõe de uma potência total instalada de 84 megawatt, representando 4,1% das energias renováveis do distrito. Posto isto, segue a figura 60 com a evolução da potência instalada no distrito de Bragança (E2P, 2020a; E2P, 2020c).

Evolução da Potência Instalada no Distrito de Bragança

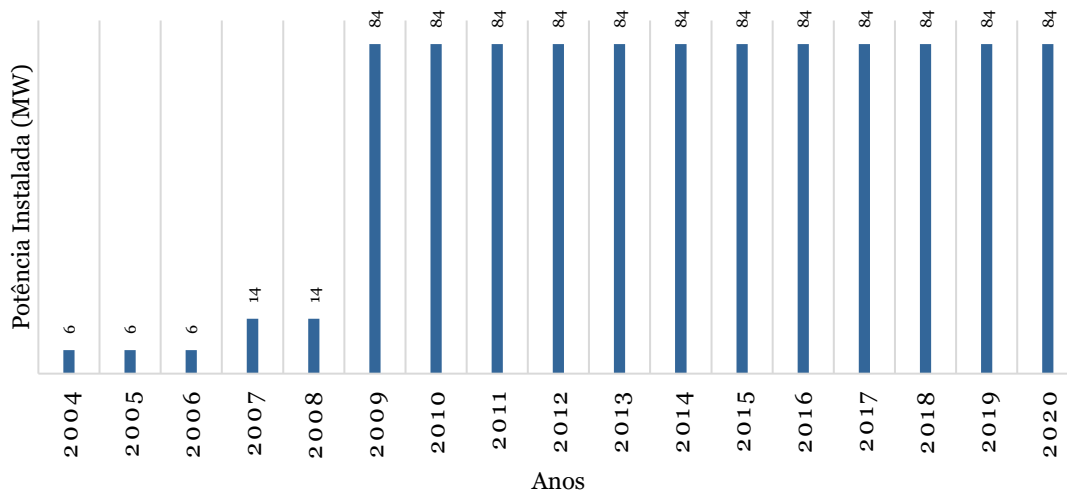


Figura 60 – Evolução da potência instalada no distrito de Bragança, desde 2004 até 2020 (Adaptado de E2P, 2020c).

O primeiro parque eólico a ser instalado no distrito do Porto foi em 1998, com uma potência de 1,1 megawatt. O parque mais atual, com uma potência instalada de 6,3 megawatt, foi fundado em 2009. Atualmente, este distrito dispõe de 13 parques eólicos. Segue a tabela 32, com os diversos parques eólicos instalados no distrito do Porto (E2P, 2020d).

Tabela 32a – Parques eólicos no distrito do Porto (Adaptado de E2P, 2020b).

Nome	Ano de Entrada em Funcionamento	Potência Instalada (MW)
Portal da Freita	1998	1,1
Boneca	2003	0,6
Teixeiró	2004	14
Serra da Boneca II	2005	8
Penedo Ruivo	2005	13
Chorida 1	2006	0,6

Tabela 32b – Parques eólicos no distrito do Porto (Adaptado de E2P, 2020b).

Nome	Ano de Entrada em Funcionamento	Potência Instalada (MW)
Chorida II	2006	0,8
Sebolido	2006	0,8
Abogalheira	2006	3,34
Seixinhos	2006	10,4
Serra da Boneca – Torrão	2007	2
Mafômedes	2008	4,2
Baião	2009	6,3

Neste momento, o distrito do Porto apresenta uma potência total instalada de 65,14 megawatt que representa 15,7% das energias renováveis do distrito. Posto isto, a figura 61 ilustra a evolução da potência instalada no distrito do Porto (E2P, 2020a; E2P, 2020c).

Evolução da Potência Instalada no Distrito do Porto

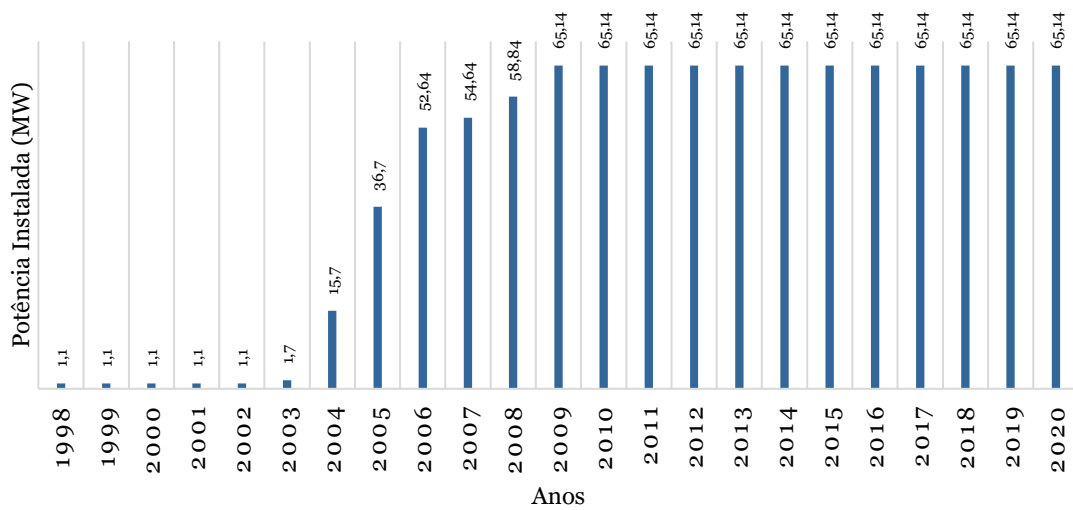


Figura 61 – Evolução da potência instalada no distrito do Porto, desde 1998 até 2020 (Adaptado de E2P, 2020c).

Relativamente ao distrito de Viana do Castelo, em 2003, foi instalado o primeiro parque eólico com uma capacidade de 0,6 megawatt. Por outro lado, o mais atual foi instalado em 2012 com uma potência de 2 megawatt. Até ao momento, este distrito conta com 9 parques eólicos. Na tabela 33, observa-se os diferentes parques eólicos do distrito de Viana do Castelo (E2P, 2020d).

Tabela 33a – Parques eólicos no distrito de Viana do Castelo (Adaptado de E2P, 2020b).

Nome	Ano de Entrada em Funcionamento	Potência Instalada (MW)
Fonte da Lameira	2003	0,6
Carreço – Outeiro	2004	20,7
Espiga	2005	6
São Paio	2005	10
Alagoa de Cima	2005	13,5

Tabela 33b – Parques eólicos no distrito de Viana do Castelo (Adaptado de E2P, 2020b).

Nome	Ano de Entrada em Funcionamento	Potência Instalada (MW)
Arga	2006	40,7
Alto Minho I	2008	263,5
Carreço – Outeiro II	2010	13,8
Praia Norte	2012	2

Atualmente, o distrito de Viana do Castelo apresenta uma potência total instalada de 370,8 megawatt, representando 31,6% das energias renováveis do distrito. Assim sendo, a figura 62 exhibe a evolução da potência instalada no distrito de Viana do Castelo (E2P, 2020a; E2P, 2020c).

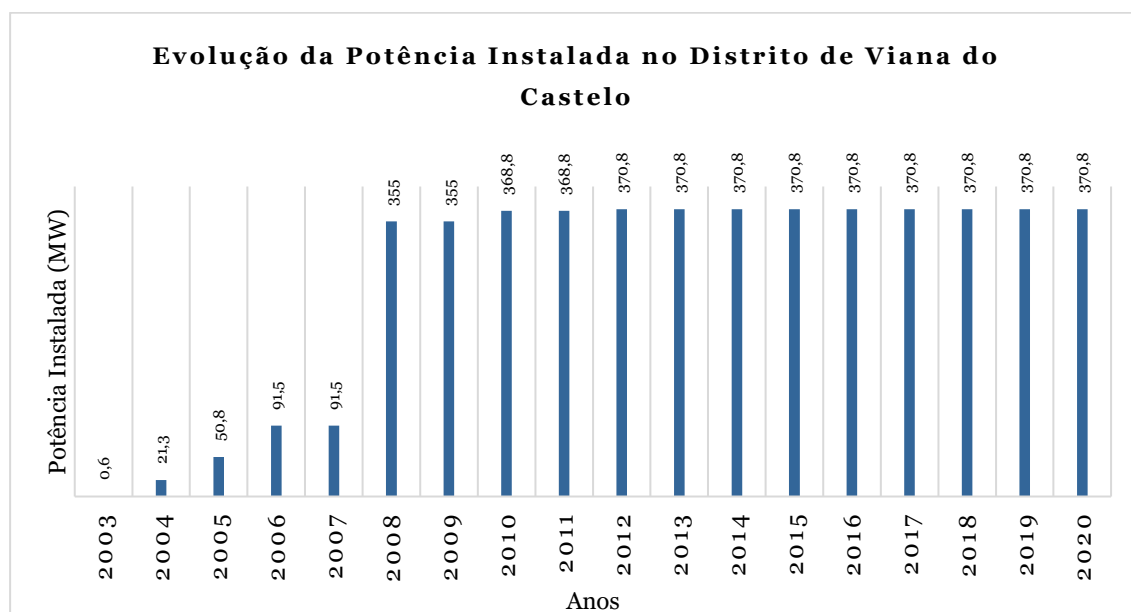


Figura 62 – Evolução da potência instalada no distrito de Viana do Castelo, desde 2003 até 2020 (Adaptado de E2P, 2020c).

No distrito de Vila Real, foi instalado o primeiro parque eólico com uma capacidade de 18,1 megawatt, em 1998. Os mais recentes parques, instalados em 2014, apresentam uma potência total de 66,7 megawatt. Atualmente, este distrito dispõe 34 parques eólicos. Na tabela 34, com os diferentes parques eólicos do distrito de Vila Real (E2P, 2020d).

Tabela 34a – Parques eólicos no distrito de Vila Real (Adaptado de E2P, 2020b).

Nome	Ano de Entrada em Funcionamento	Potência Instalada (MW)
Pena Suar	1998	18,1
Caravelas	2000	1,2
Cabeço Alto	2000	11,7
Lomba da Seixa	2001	13
Alvão	2002	22,8
Aguieira	2003	0,6
Alturas do Barroso	2003	0,6
Padrela	2003	0,6
Bulgueira	2003	2,4
Meroicinha	2003	9
Serra do Barroso	2003	18
Trandeiras	2003	18,2
Padrela	2004	7,5
Lomba da Seixa	2004	12
Outeiro	2005	30

Tabela 34b – Parques eólicos no distrito de Vila Real (Adaptado de E2P, 2020b).

Nome	Ano de Entrada em Funcionamento	Potência Instalada (MW)
Casa da Lagoa	2006	0,6
Leiranco	2006	0,6
Mairos 2	2006	0,6
Alto do Seixal	2006	1,6
Mairos 1	2006	2,6
Serra do Alvão	2008	42
Chã de Guilhado	2009	2
Serra do Barroso II	2009	12
Salgueiros – Guilhado	2009	12,6
Negrelo e Guilhado	2009	22
Serra do Barroso III	2009	22,9
Lomba do Vale	2010	21,1
Terra Fria	2010	104
Alto da Coutada	2010	1465,6
Alto do Marco	2011	12

Tabela 34c – Parques eólicos no distrito de Vila Real (Adaptado de E2P, 2020b).

Nome	Ano de Entrada em Funcionamento	Potência Instalada (MW)
Meroicinha II	2011	15
Gevancas II	2013	11,5
Serra do Leiranco	2014	32,2
Vila Cova	2014	34,5

Atualmente, o distrito de Vila Real dispõe de uma potência total instalada de 681,1 megawatt que representa 28,8% das energias renováveis do distrito. Assim sendo, a figura 63 exibe a evolução da potência instalada no distrito de Vila Real (E2P, 2020a; E2P, 2020c).

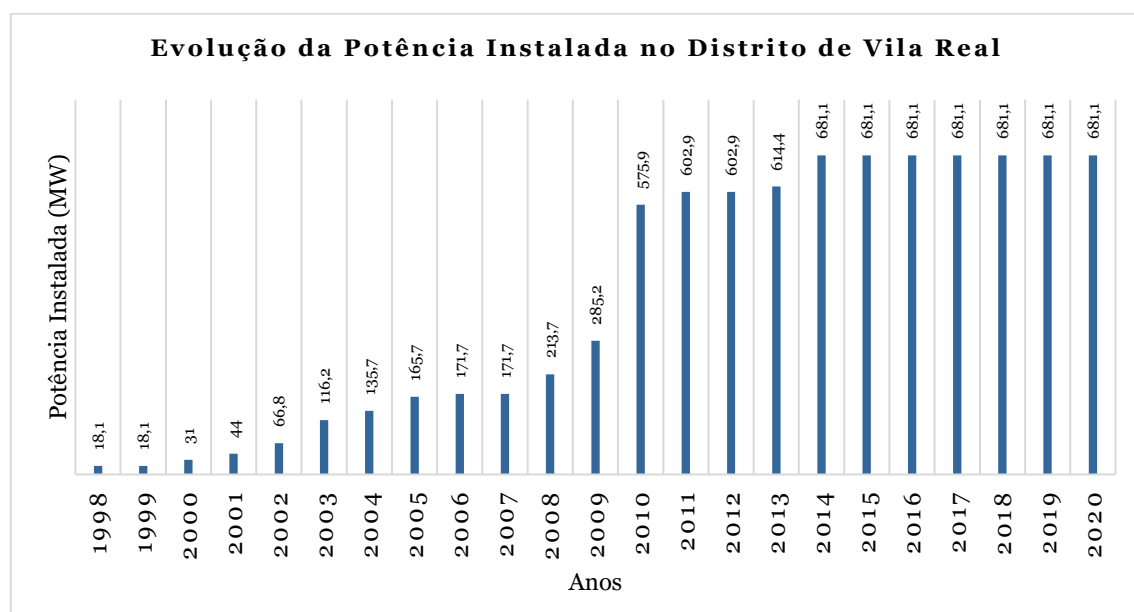


Figura 63 – Evolução da potência instalada no distrito de Vila Real, desde 1998 até 2020 (Adaptado de E2P, 2020c).

No distrito de Castelo Branco, em 2000 foi realizada a primeira instalação de um parque eólico com uma capacidade de 26,2 megawatt. Em 2012, foi inaugurado o mais recente parque eólico deste distrito, com uma potência instalada de 8 megawatt. Atualmente,

este distrito conta com 10 parques eólicos. Na tabela 35, observa-se os parques eólicos instalados no distrito de Castelo Branco (E2P, 2020d).

Tabela 35 – Parques eólicos no distrito de Castelo Branco (Adaptado de E2P, 2020b).

Nome	Ano de Entrada em Funcionamento	Potência Instalada (MW)
Cabeço da Rainha	2000	26,2
Vergão	2003	23
Penamacor	2006	143,8
Pinhal Interior	2006	144
Perdigão	2007	2
Gardunha	2007	114
Cabeço da Rainha II	2008	30
Mougueiras	2009	8
Bravo	2009	16
Enerfer I	2012	8

Presentemente, o distrito de Castelo Branco dispõe de uma potência total instalada de 517 megawatt, representando cerca de 73,9% das energias renováveis deste distrito. Assim sendo, a figura 64 demonstra a evolução da potência instalada no distrito de Castelo Branco (E2P, 2020a; E2P, 2020c).

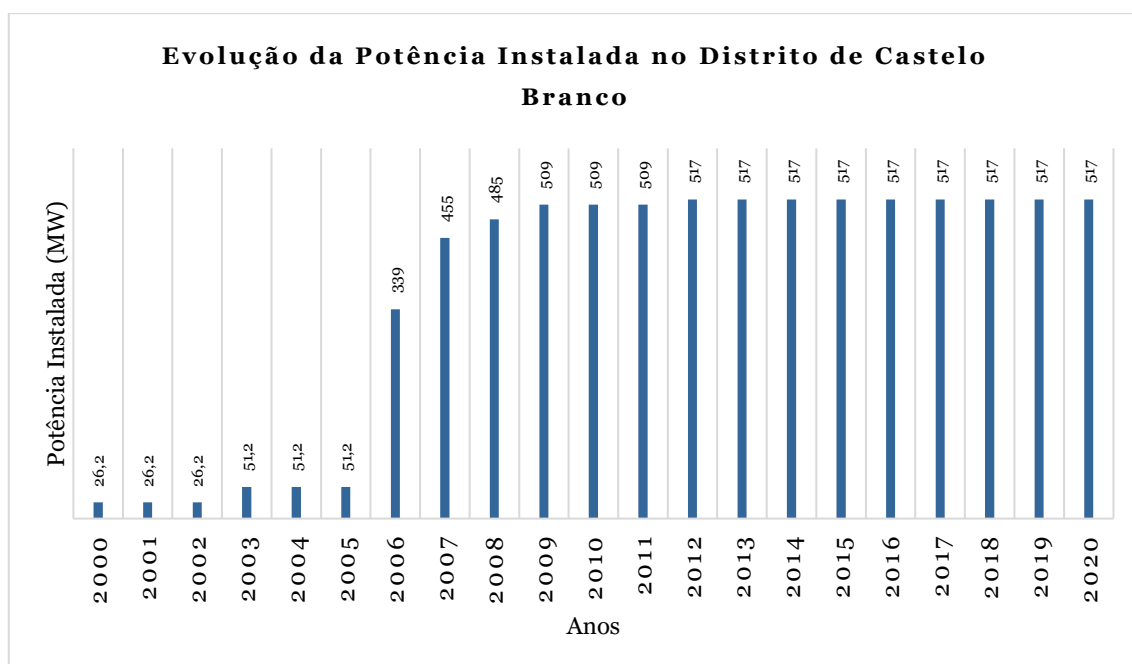


Figura 64 – Evolução da potência instalada no distrito de Castelo Branco, desde 2000 até 2020 (Adaptado de E2P, 2020c).

Quanto ao distrito de Coimbra, os primeiros parques eólicos a serem instalados foram em 2001, com uma capacidade total de 22,1 megawatt. O mais atual, foi instalado em 2019 com uma potência de 46,8 megawatt. Atualmente, este distrito dispõe de 23 parques eólicos. Segue a tabela 36 com os diversos parques eólicos no distrito de Coimbra (E2P, 2020d).

Tabela 36a – Parques eólicos no distrito de Coimbra (Adaptado de E2P, 2020b).

Nome	Ano de Entrada em Funcionamento	Potência Instalada (MW)
Malhadas Góis	2001	9,9
Cadafaz	2001	12,2
Açor	2004	24,3
Vila Nova	2004	30
Rabaçal	2005	2

Tabela 36b – Parques eólicos no distrito de Coimbra (Adaptado de E2P, 2020b).

Nome	Ano de Entrada em Funcionamento	Potência Instalada (MW)
Malhadizes	2005	12
Degracias	2005	20
Pampilhosa da Serra	2005	114
Vidual	2006	1
Lousã	2006	35
Coentral Safra	2006	41,8
Chiqueiro	2007	4
São João	2007	21,71
Toutiço	2008	102
Vila Nova II	2009	28,6
Alto Arganil	2009	36
Lousã II	2009	60
Serra da Boa Viagem	2010	6
Beiras	2010	100,8

Tabela 36c – Parques eólicos no distrito de Coimbra (Adaptado de E2P, 2020b).

Nome	Ano de Entrada em Funcionamento	Potência Instalada (MW)
Vale Grande	2011	12,3
Picos – Vale do Chão	2015	22,6
Penacova	2019	46,8

Atualmente, o distrito de Coimbra dispõe de uma potência total instalada de 752,01 megawatt que representa 55,2% das energias renováveis do distrito. Assim sendo, a figura 65 exhibe a evolução da potência instalada no distrito de Coimbra (E2P, 2020a; E2P, 2020c).

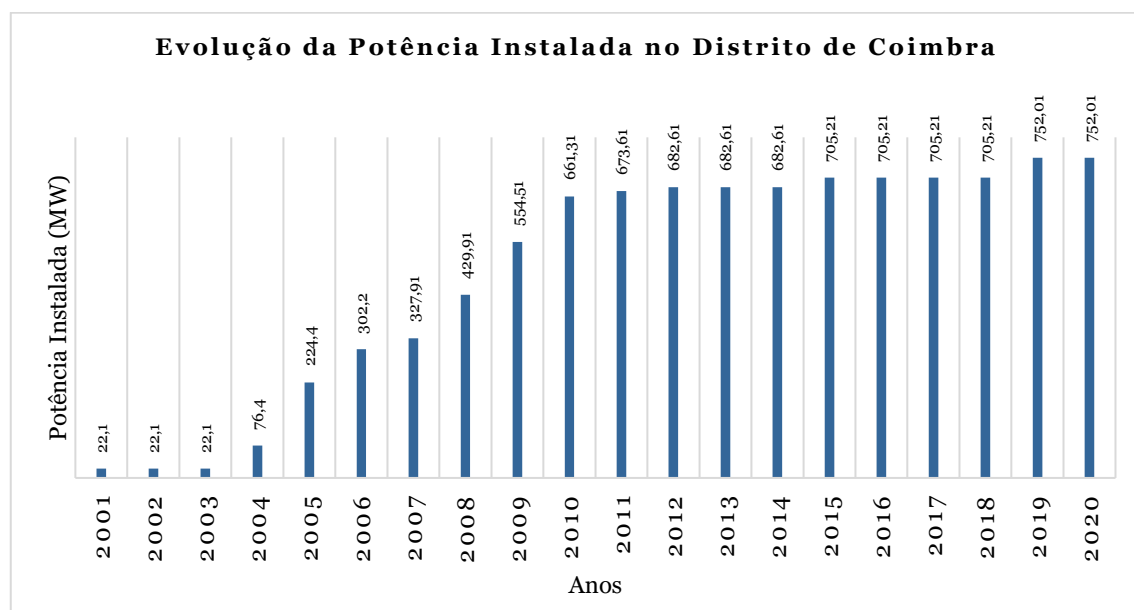


Figura 65 – Evolução da potência instalada no distrito de Coimbra, desde 2001 até 2020 (Adaptado de E2P, 2020c).

No distrito da Guarda, os primeiros parques eólicos a serem instalados foram em 2004, com uma potência total de 13,5 megawatt. Em 2015, foi instalado o parque mais recente com uma capacidade de 50 megawatt. É de realçar, que até ao momento este distrito dispõe de 15 parques eólicos. Na tabela 37, observa-se os respetivos parques eólicos deste distrito (E2P, 2020d).

Tabela 37 – Parques eólicos no distrito da Guarda (Adaptado de E2P, 2020b).

Nome	Ano de Entrada em Funcionamento	Potência Instalada (MW)
Dirão da Rua	2004	2,6
Mosteiro	2004	10,9
Terreiro das Bruxas	2006	1
Serra do Ralo	2006	32
Guarda	2007	8
Serra da Alvoaça	2007	36,1
Mosqueiros	2008	8
Trancoso	2008	28
Serra Alta	2009	2
Mosqueiros II	2009	24,6
Raia	2011	128,8
Prados	2013	39,1
Vale da Estrela	2014	25,3
Beira Interior	2014	57,5
Pisco	2015	50

Até ao momento, o distrito da Guarda apresenta uma potência total instalada de 453,90 megawatt que representa 57,5% das energias renováveis do distrito. Na figura 66, ilustra a evolução da potência instalada no distrito da Guarda (E2P, 2020a; E2P, 2020c).

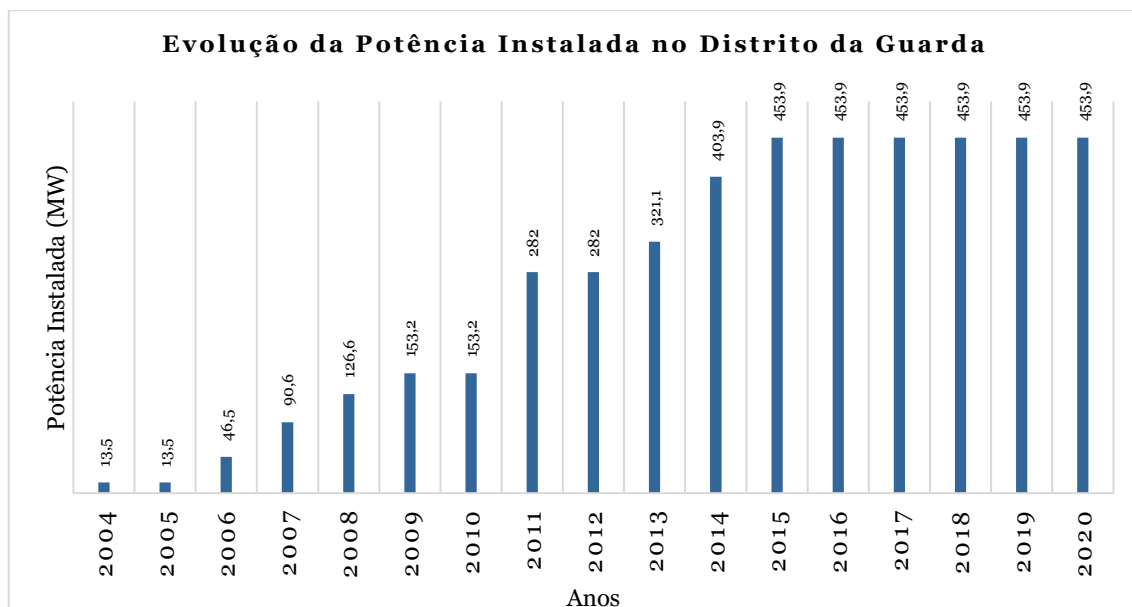


Figura 66 – Evolução da potência instalada no distrito da Guarda, desde 2004 até 2020 (Adaptado de E2P, 2020c).

Relativamente ao distrito de Leiria, foi em 2004 a primeira instalação de um parque eólico, com 12 megawatt. Já o mais recente, foi instalado em 2018 com uma capacidade de 20,5 megawatt. Neste momento, este distrito apresenta 12 parques eólicos. Na tabela 38, estão representados os parques eólicos deste distrito (E2P, 2020d).

Tabela 38a – Parques eólicos no distrito de Leiria (Adaptado de E2P, 2020b).

Nome	Ano de Entrada em Funcionamento	Potência Instalada (MW)
Senhora da Vitória	2004	12
Videira	2005	6
Caldas	2005	10
Chão Falcão	2005	90,5

Tabela 38b – Parques eólicos no distrito de Leiria (Adaptado de E2P, 2020b).

Nome	Ano de Entrada em Funcionamento	Potência Instalada (MW)
Cela	2006	2
Ortiga	2006	13,4
Serra d’El Rei	2006	21,71
Marvila	2008	12
Sicó	2008	20
Alvaiázere	2010	18
Portela do Pereiro	2014	7,8
Maúnça	2018	20,5

Atualmente, o distrito de Leiria apresenta uma potência total instalada de 233,91 megawatt que representa 82,4% das energias renováveis do distrito. Posto isto, a figura 67 representa a evolução da potência instalada no distrito da Guarda (E2P, 2020a; E2P, 2020c).

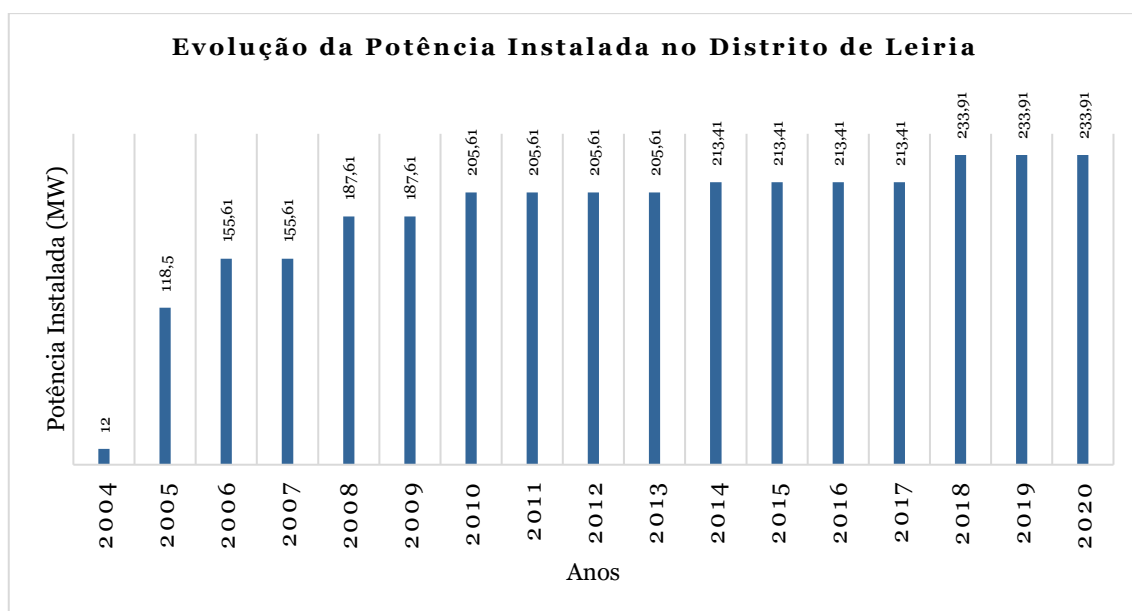


Figura 67 – Evolução da potência instalada no distrito de Leiria, desde 2004 até 2020 (Adaptado de E2P, 2020c).

A primeira instalação, no distrito de Santarém, foi em 1999 com uma potência de 4,5 megawatt. O mais atual, teve início em 2009 com uma capacidade de 22 megawatt. Neste momento, este distrito dispõe 5 parques eólicos. Na tabela 39, estão enumerados os parques eólicos deste distrito (E2P, 2020d).

Tabela 39 – Parques eólicos no distrito de Santarém (Adaptado de E2P, 2020b).

Nome	Ano de Entrada em Funcionamento	Potência Instalada (MW)
Serra da Lage	1999	4,5
Serra da Amêndoa	2002	19,4
Serra dos Candeeiros	2005	121
Pracana	2006	2
Bairro	2009	22

A potência total instalada no distrito de Santarém é de 168,9 megawatt que equivale a 34,1% das energias renováveis do distrito. Na figura 68, está representado a evolução da potência instalada neste distrito (E2P, 2020a; E2P, 2020c).

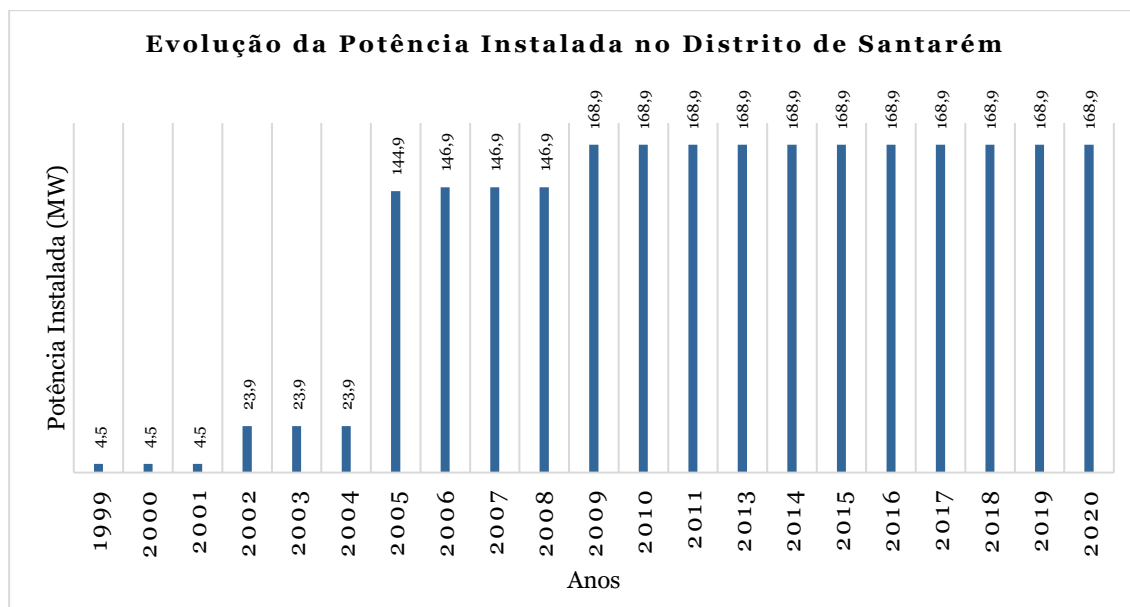


Figura 68 – Evolução da potência instalada no distrito de Santarém, desde 1999 até 2020 (Adaptado de E2P, 2020c).

Em 1996, com uma potência de 10,2 megawatt, foi instalado o primeiro parque eólico no distrito de Viseu. O mais recente foi instalado em 2018 com uma potência de 28,8 megawatt. Atualmente, o distrito de Viseu soma com 9 parques eólicos. Na tabela 40, está representado os parques eólicos do distrito de Viseu (E2P, 2020d).

Tabela 40a – Parques eólicos no distrito de Viseu (Adaptado de E2P, 2020b).

Nome	Ano de Entrada em Funcionamento	Potência Instalada (MW)
Fonte da Mesa	1996	10,2
Vila Lobos	1998	10
São Cristóvão	2001	5,3
Bigorne	2002	7

Tabela 40b – Parques eólicos no distrito de Viseu (Adaptado de E2P, 2020b).

Nome	Ano de Entrada em Funcionamento	Potência Instalada (MW)
Cabril	2002	20,2
Pinheiro	2002	21,6
Arcipreste	2003	0,6
Senhora do Castelo I	2003	1,2
Senhora do Castelo II	2003	4
Cadraço	2004	1,2
Alto do Talefe	2004	13,5
Fonte da Quelha	2004	13,5
Santa Helena	2005	4
Sirigo	2005	4
Meadas	2005	9
Lameira	2005	10,4
São Pedro	2005	12
Alto do Monção	2006	32
Candal/Coelheira	2006	40

Tabela 40c – Parques eólicos no distrito de Viseu (Adaptado de E2P, 2020b).

Nome	Ano de Entrada em Funcionamento	Potência Instalada (MW)
Alto Douro	2010	253,2
São Macário II	2011	23
Douro Sul	2016	149,1
Vigia	2018	28,8

Neste momento, o distrito de Viseu apresenta uma potência total instalada de 1130,4 megawatt que corresponde a 67,7% das energias renováveis do distrito. A figura 69 demonstra a evolução da potência instalada deste distrito (E2P, 2020a; E2P, 2020c).

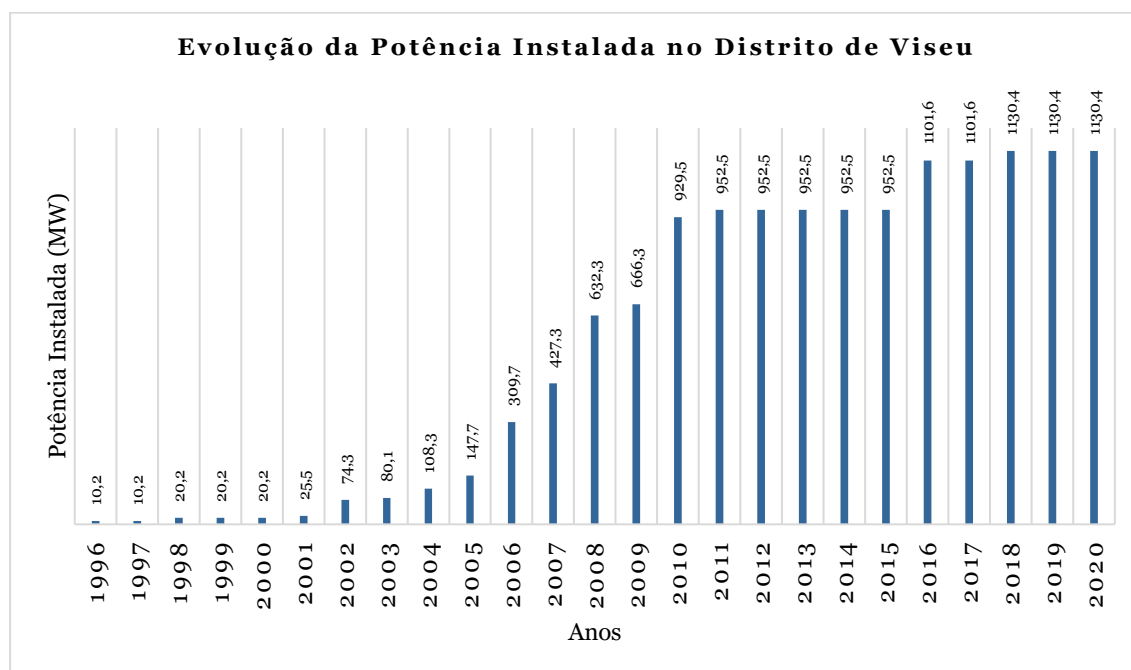


Figura 69 – Evolução da potência instalada no distrito de Viseu, desde 1996 até 2020 (Adaptado de E2P, 2020c).

Atualmente, o distrito de Beja apresenta, somente, 2 parques eólicos. Estes foram instalados em 2008 e em 2013, com uma potência de 30,7 megawatt e 43,7 megawatt, respetivamente. Na tabela 41, está representado os parques eólicos deste distrito (E2P, 2020d).

Tabela 41 – Parques eólicos no distrito de Beja (Adaptado de E2P, 2020b).

Nome	Ano de Entrada em Funcionamento	Potência Instalada (MW)
Serra do Mú	2008	30,7
Baixo Alentejo/Mértola	2013	43,7

A potência total instalada do distrito de Beja é de 74,4 megawatt que equivale a 9,8% das energias renováveis do distrito. Posto isto, segue a figura 70 que representa a evolução da potência instalada deste distrito (E2P, 2020a; E2P, 2020c).

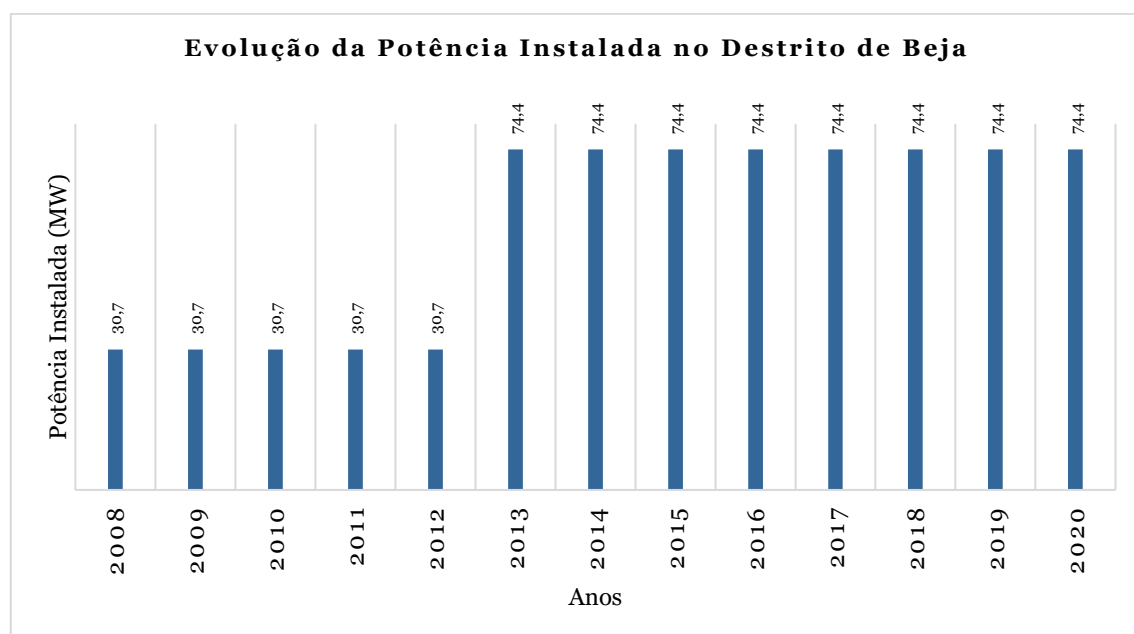


Figura 70 – Evolução da potência instalada no distrito de Beja, desde 2008 até 2020 (Adaptado de E2P, 2020c).

Em 1998, foi instalado o primeiro parque eólico no distrito de Faro com uma potência de 2 megawatt. O último a ser construído foi em 2015, com uma capacidade de 6 megawatt. Atualmente, este distrito apresenta 12 parques eólicos. Na tabela 42, está representado os parques eólicos do distrito de Faro (E2P, 2020d).

Tabela 42 – Parques eólicos no distrito de Faro (Adaptado de E2P, 2020b).

Nome	Ano de Entrada em Funcionamento	Potência Instalada (MW)
Vila do Bispo I	1998	2
Vila do Bispo II	2003	10,5
Madrinha	2006	10
Pico Alto	2007	6
Espinhaço do Cão	2008	10
Guerreiros	2008	21,8
Bordeira	2009	24
Barão de São João	2009	50
Lagoa Funda	2011	12
Malhanito	2012	66,7
Raposeira	2014	5,5
Corte de Álamos	2015	6

O distrito de Faro apresenta uma potência total instalada de 224,50 megawatt que equivale a 82% das energias renováveis do distrito. A figura 71 ilustra a evolução da potência instalada no distrito de Faro (E2P, 2020a; E2P, 2020c).

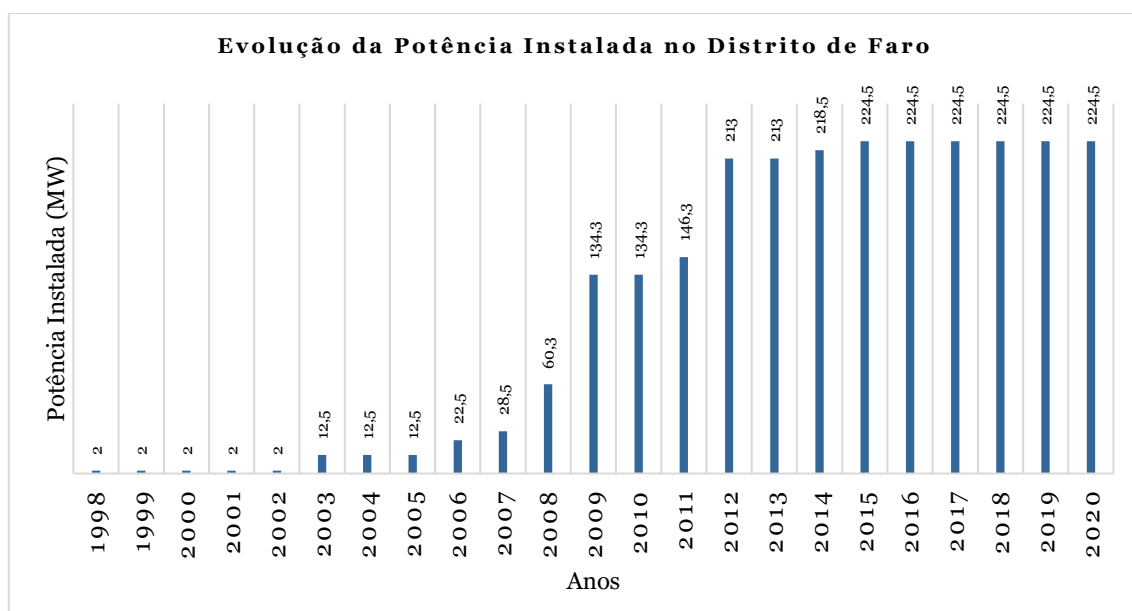


Figura 71 – Evolução da potência instalada no distrito de Faro, desde 1998 até 2020 (Adaptado de E2P, 2020c).

O distrito de Lisboa é caracterizado por apresentar 39 parques eólicos, onde o primeiro a ser instalado foi em 1999, com uma capacidade de 7,2 megawatt. Por sua vez, o mais recente parque conta com uma potência de 20,7 megawatt, tendo sido inaugurado no ano 2013. Segue a tabela 43, onde está representado os parques eólicos do distrito de Lisboa (E2P, 2020d).

Tabela 43a – Parques eólicos no distrito de Lisboa (Adaptado de E2P, 2020b).

Nome	Ano de Entrada em Funcionamento	Potência Instalada (MW)
Igreja Nova	1999	7,2
Archeira I	2000	0,6
Gi	2000	6,4
Jarmeira	2002	0,85
Bolores	2003	5,2
Moinho Velho	2004	1,8

Tabela 43b – Parques eólicos no distrito de Lisboa (Adaptado de E2P, 2020b).

Nome	Ano de Entrada em Funcionamento	Potência Instalada (MW)
Moinho de Manique	2004	2,6
Archeira II	2004	4
Ribamar	2004	6
Amaral	2004	10
Serra de Todo o Mundo	2004	12
Catefica	2004	18
Archeira	2005	0,6
Montijo	2005	2
Serra da Escusa	2005	2
Archada	2005	6,9
Serra da Capucha	2005	10
Arcela	2005	11,5
Passarinho	2005	12
Fanhões	2005	18
Picotinhos - Valérios	2006	2

Tabela 43c – Parques eólicos no distrito de Lisboa (Adaptado de E2P, 2020b).

Nome	Ano de Entrada em Funcionamento	Potência Instalada (MW)
Vale de Galegos	2010	27,8
Seramena	2011	2
Lourinhã II	2011	20,7
Lourinhã I	2013	20,7

Atualmente, o distrito de Lisboa possui uma potência total instalada de 364,45 megawatt que corresponde a 80,4% das energias renováveis do distrito. Na figura 72, observa-se a evolução da potência instalada no distrito de Lisboa (E2P, 2020a; E2P, 2020c).

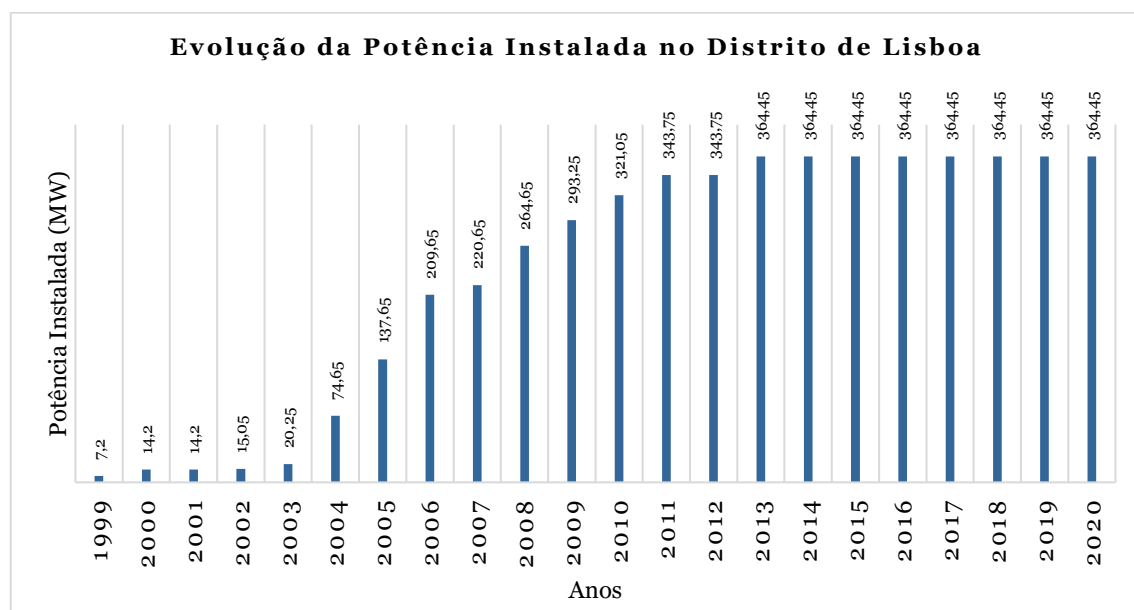


Figura 72 – Evolução da potência instalada no distrito de Lisboa, desde 1999 até 2020 (Adaptado de E2P, 2020c).

Em 2014, foi instalado o único parque eólico existente em Portalegre. Este possui uma capacidade de 8,2 megawatt. Na tabela 44, consta a informação referente a este parque eólico (E2P, 2020d).

Tabela 44 – Parque eólico no distrito de Portalegre (Adaptado de E2P, 2020b).

Nome	Ano de Entrada em Funcionamento	Potência Instalada (MW)
Alto dos Forninhos	2014	8,2

Por possuir apenas 1 parque eólico, a sua potência total instalada é igual à capacidade desse mesmo parque, sendo de 8,2 megawatt. Esta potência corresponde a 4,6% das energias renováveis deste distrito. Na figura 73, observa-se a evolução da potência instalada no distrito de Portalegre (E2P, 2020a; E2P, 2020c).

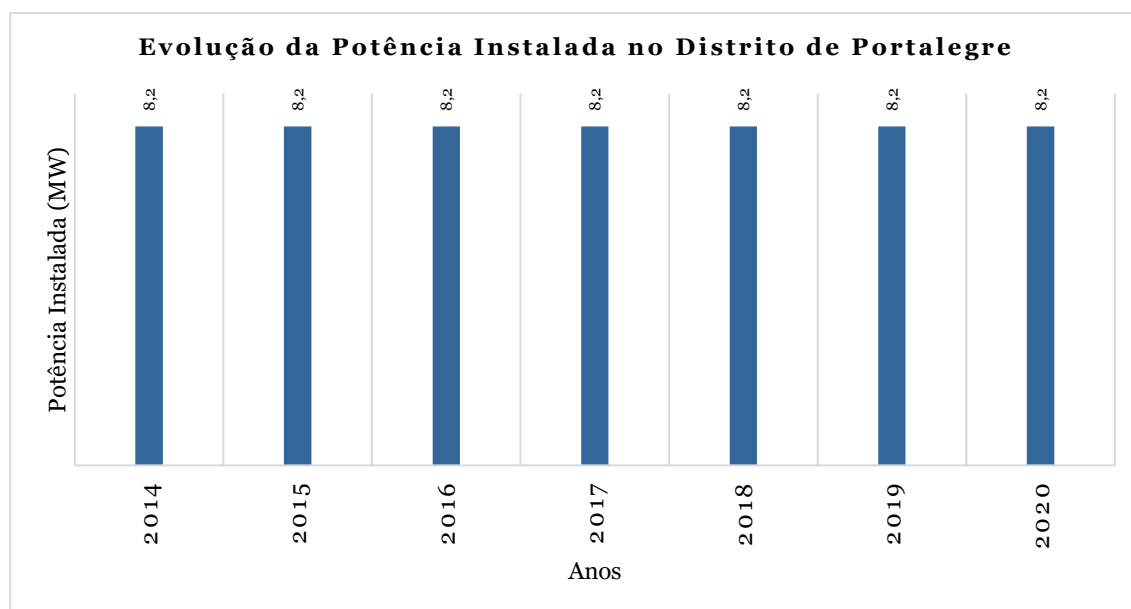


Figura 73 – Evolução da potência instalada no distrito de Portalegre, desde 2014 até 2020 (Adaptado de E2P, 2020c).

Em Setúbal, o primeiro parque eólico foi instalado em 1992 com uma capacidade de 1,8 megawatt. No entanto, o mais recente foi instalado em 2005 com uma potência de 10 megawatt. Atualmente, este distrito dispõe de 3 parques eólicos. Segue a tabela 45 com a informação referente aos parques eólicos (E2P, 2020d).

Tabela 45 – Parques eólicos no distrito de Setúbal (Adaptado de E2P, 2020b).

Nome	Ano de Entrada em Funcionamento	Potência Instalada (MW)
Moinho dos Chãos	1,8	1992
Chaminé	6,9	2004
Costa Vicentina	10	2005

A potência total instalada no distrito de Setúbal é de 18,70 megawatt, correspondente a 11,5% das energias renováveis do distrito. Na figura 74, está representado a evolução da potência instalada no distrito de Setúbal (E2P, 2020a; E2P, 2020c).

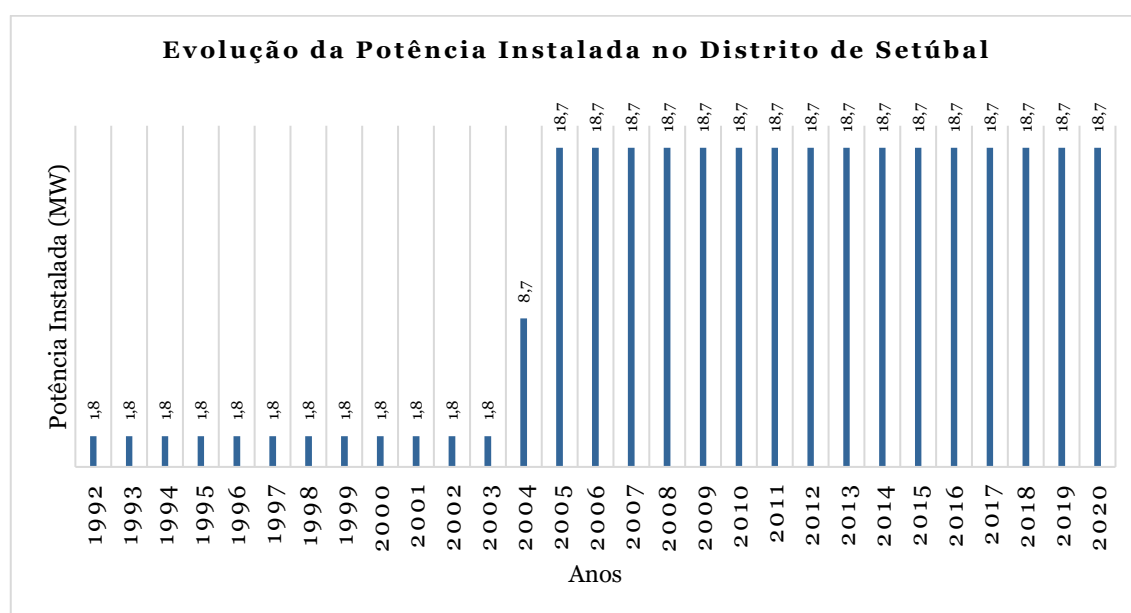


Figura 74 – Evolução da potência instalada no distrito de Setúbal, desde 1992 até 2020 (Adaptado de E2P, 2020c).

A região autónoma dos Açores é caracterizada por apresenta 9 parques eólicos, dos quais o primeiro parque eólico teve início no ano 1991, com uma potência de 1,8 megawatt. Por sua vez, o mais atual foi inaugurado em 2016, com uma potência de 4,5 megawatt. Na tabela 46, consta toda a informação dos parques eólicos relativa à região autónoma dos Açores (E2P, 2020d).

Tabela 46 – Parques eólicos na região autónoma dos Açores (Adaptado de E2P, 2020b).

Nome	Ano de Entrada em Funcionamento	Potência Instalada (MW)
Pico da Urze	1991	1,8
Boca da Vereda	2002	0,6
Figueiral	2002	1,5
Terras do Canto	2005	2,4
Serra do Cume	2008	9
Graminhais	2012	9
Serra do Cume Norte	2013	3,6
Salão	2013	4,25
Graciosa	2016	4,1

Em 2020, a região autónoma dos Açores possui uma capacidade instalada de 36,65 megawatt que equivale a 44,4% das energias renováveis da região autónoma. Na figura 75, apresenta-se a evolução da potência instalada na região autónoma dos Açores (E2P, 2020a; E2P, 2020c).

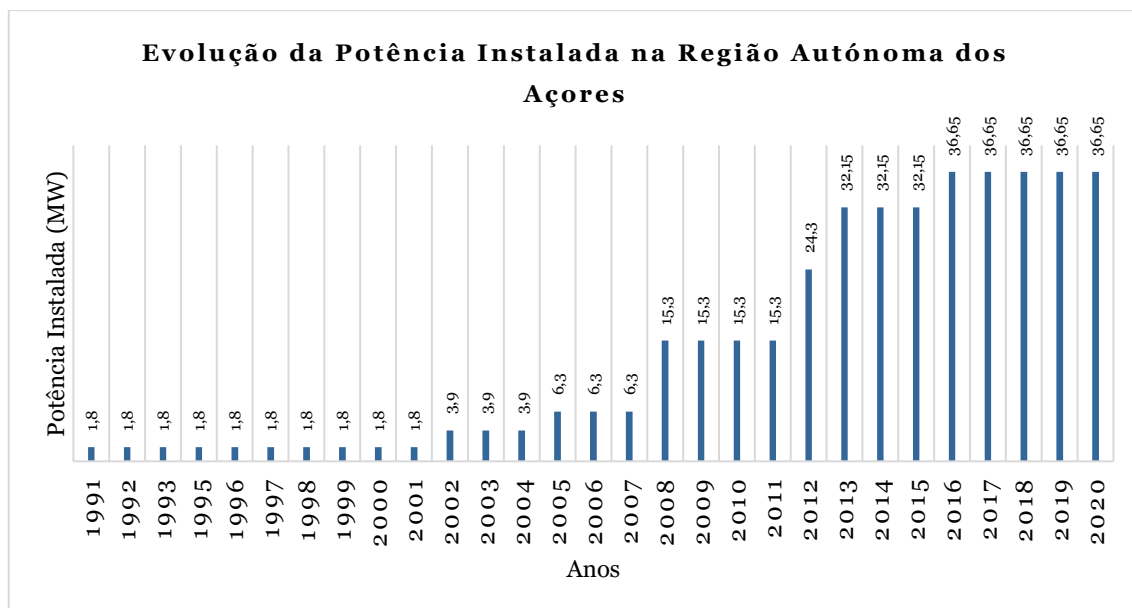


Figura 75 – Evolução da potência instalada na região autónoma dos Açores, desde 1991 até 2020 (Adaptado de E2P, 2020c).

Quanto à região autónoma da Madeira, o primeiro parque eólico a ser instalado foi em 1992, com uma potência instalada de 8,06 megawatt. O mais recente, instalado em 2011, apresentam uma potência de 6 megawatt. Atualmente, esta região dispõe de 10 parques eólicos. Na tabela 47, observa-se os diversos parques eólicos desta região (E2P, 2020d).

Tabela 47a – Parques eólicos na região autónoma da Madeira (Adaptado de E2P, 2020b).

Nome	Ano de Entrada em Funcionamento	Potência Instalada (MW)
Fonte do Juncal	1992	8,06
Caniçal	1993	0,9
Bica da Cana	1993	3
Cabeço do Carvalho	1996	1,11
Paul da Serra	2003	3,2
Quinta do Lorde	2009	2,55

Tabela 47b – Parques eólicos na região autónoma da Madeira (Adaptado de E2P, 2020b).

Nome	Ano de Entrada em Funcionamento	Potência Instalada (MW)
Loiral	2009	5,1
Pedras	2009	10,2
Paul da Serra	2010	6
Loiral II	2011	6

Atualmente, a potência total instalada na região autónoma da Madeira é de 46,22 megawatt que corresponde a 37% das energias renováveis da região. A figura 76 exhibe a evolução da potência instalada na região autónoma da Madeira (E2P, 2020a; E2P, 2020c).

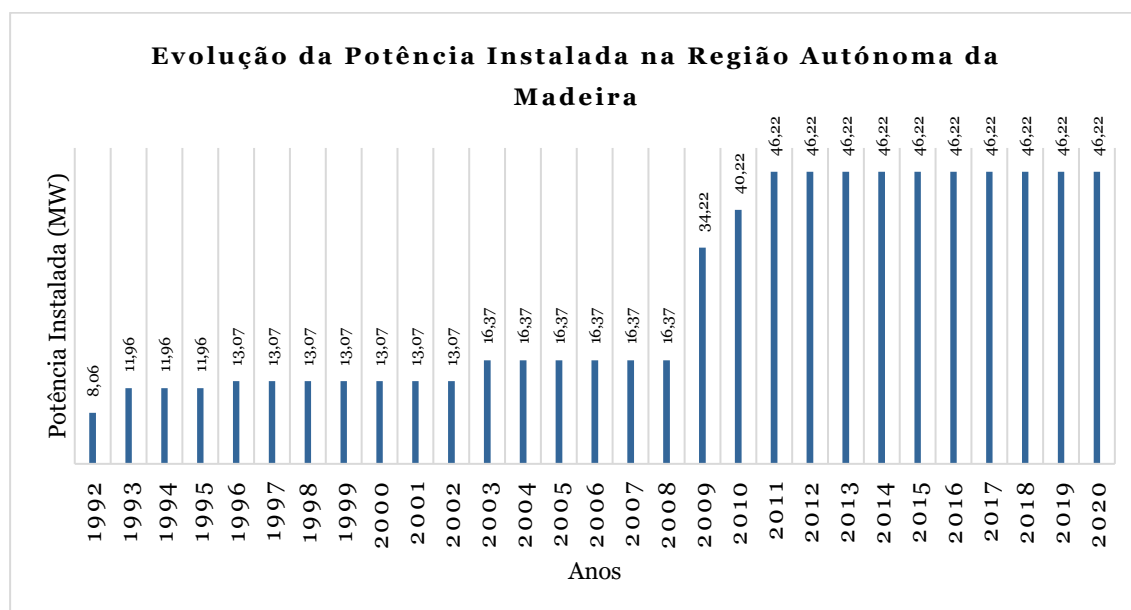


Figura 76 – Evolução da potência instalada na região autónoma da Madeira, desde 1992 até 2020 (Adaptado de E2P, 2020c).