



**Carlos Humberto
Gomes Faria**

**Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no
fabrico de pás de aerogerador**



**Carlos Humberto
Gomes Faria**

**Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no
fabrico de pás de aerogerador**

Relatório de estágio apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, realizado sob a orientação científica da Doutora Ana Isabel Miranda, Professora Catedrática do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro e sob a coorientação do Doutor Luís António da Cruz Tarelho, Professor Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Dedico este trabalho à minha família pelo apoio incondicional e por acreditarem sempre em mim.

O júri

Presidente

Doutora Maria Isabel Aparício Paulo Fernandes Capela
Professora Associada do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Doutor João António Labrincha Batista
Professor Associado com Agregação do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro

Doutora Ana Isabel Couto Neto da Silva Miranda
Professora Catedrática do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Esta dissertação simboliza o final de uma das melhores etapas da minha vida, agradeço a todos os que fizeram parte deste percurso e que contribuíram de alguma forma para o meu sucesso académico e crescimento pessoal.

Agradeço à minha orientadora Professora Ana Isabel Miranda e ao meu coorientador Professor Luís Tarelho pela orientação, acompanhamento e conhecimentos transmitidos ao longo da realização deste trabalho.

A toda a equipa da Ria Blades por todo o auxílio proporcionado ao longo deste estágio, em especial à Filipa Monteiro pela partilha de experiência, pela disponibilidade e pelo apoio.

A toda a minha família, mas em especial aos meus pais pelo carinho, apoio, incentivo, conselhos, sacrifícios e dedicação que me deram ao longo da minha vida. Aos meus irmãos e irmãs por tudo o auxílio prestado nesta jornada.

A todos os meus amigos, em especial a Nayjara, a Natacha, a Madalena, ao Pedro e ao Zé Pedro por toda a amizade ao longo destes anos.

Agradeço a Deus por me amparar nos momentos difíceis e me dar força para superar as dificuldades.

Palavras-chave

Energia eólica, pás de aerogerador, processo de fabrico, resíduos sólidos, indicadores ambientais e gestão de resíduos.

Resumo

O presente relatório surge na sequência do estágio realizado na unidade industrial da Ria Blades, sobre a temática dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador.

A produção de eletricidade a partir da energia eólica tem tido um forte crescimento em Portugal e no mundo. Este crescimento tem impulsionado a expansão dos setores industriais associados à produção de equipamentos para a geração de energia eólica, nomeadamente as pás de aerogerador.

Apesar da energia eólica ser considerada um recurso de origem renovável, é necessário que os processos associados à construção dos respetivos equipamentos de conversão de energia, como as pás de aerogerador, apresentem os menores impactos ambientais possíveis. A produção de pás de aerogerador origina uma grande diversidade de resíduos sólidos industriais, cuja correta caracterização e gestão é fundamental para maximizar a sustentabilidade ambiental e económica do processo.

Neste contexto, foi realizada a caracterização e a quantificação dos resíduos sólidos gerados, em cada operação, durante o processo de produção de uma pá de aerogerador. Através das contabilizações verificou-se que as composições dos resíduos variam de acordo com as dimensões das pás de aerogerador. As pás de aerogerador RE 40.0 (com 40 metros) e RE 59.8 (com 59.8 metros) geram resíduos nas seguintes composições, respetivamente: 52% e 60% de resíduos industriais banais, 22% e 14% de resíduos orgânicos contendo substâncias perigosas, 11% e 11% de fibra de vidro, 7% e 9% de papel e cartão, 4% e 4% de plástico e 4% e 2% de outros resíduos. Estas informações permitiram desenvolver indicadores de produção de resíduos, que serviram de suporte à proposta de soluções alternativas para a gestão adequada dos resíduos gerados.

Keywords

Wind energy, wind turbine blades, manufacturing process, solid waste, environmental indicators and waste management.

Abstract

The current report follows the internship conducted at industrial unit of Ria Blades, on the subject of solid waste produced in the manufacture of wind turbine blades.

The production of electricity from wind energy has had a strong growth in Portugal and worldwide. This growth has driven the expansion of industries associated with the production of equipment for the wind energy generation, including wind turbine blades.

Although wind energy is considered a renewable resource, it is necessary that the processes associated with the construction of the respective energy conversion equipment such as wind blades, present the lowest possible environmental impact. The production of wind turbine blades causes a great diversity of industrial solid waste, and the correct characterization and management is essential to maximize the environmental and economic sustainability of the process.

In this context, the characterization and quantification of solid waste generated in each operation during a wind blade production process was performed. Through accountings was verified that the waste compositions vary according to the dimensions of the wind blade. The wind blades RE 40.0 (with 40 meters) and RE 59.8 (with 59.8 meters) generate waste in the following compositions, respectively: 52% and 60% of ordinary industrial waste, 22% and 14% of organic waste containing harmful substances, 11% and 11% of glass fiber, 7% and 9% of paper and cardboard, 4% and 4% of plastic and 4% and 2% of others wastes. This information enabled the development of waste indicators that supported the proposal of alternative solutions for the proper management of the generated waste.

Índice

Capítulo I. Introdução.....	1
Capítulo II. A produção de pás de aerogerador	5
2.1. Tipologia de geradores de energia de aerogerador.....	5
2.2. Pás de aerogerador	7
2.2.1. Geometria das pás de aerogerador.....	7
2.2.2. Materiais aplicados nas pás de aerogerador	8
2.2.3. Processo de produção de pás de aerogerador.....	10
Capítulo III. Soluções para os resíduos gerados na produção de pás de aerogerador	17
3.1. Gestão dos resíduos sólidos na origem.....	18
3.2. Operações de eliminação dos resíduos sólidos gerados na produção de pás de aerogerador.....	19
3.3. Valorização dos resíduos compósitos gerados na produção de pás de aerogerador.	20
3.3.1. Reciclagem mecânica	21
3.3.2. Recuperação de fibras num processo térmico em leito fluidizado.....	21
3.3.3. Reciclagem por pirólise	23
3.3.4. Reciclagem química.....	23
3.3.5. Combustão com aproveitamento de energia e/ou de materiais.....	24
3.3.6. Síntese das opções de valorização de resíduos compósitos	25
3.4. Gestão dos resíduos associados às frações diferenciadas dos materiais que constituem a pá de aerogerador	27
3.4.1. Gestão de resíduos de fibra de vidro	27
3.4.2. Gestão de resíduos perigosos	28
3.5. Gestão dos resíduos associados aos consumíveis.....	29
3.5.1. Resíduos de papel e cartão	29
3.5.2. Resíduos de plástico	30
3.5.3. Resíduos Industriais Banais	32
Capítulo IV. A unidade fabril da Ria Blades	35

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

4.1.	Caracterização da Ria Blades.....	35
4.2.	Técnicas de produção aplicadas na Ria Blades	38
Capítulo V. Os resíduos sólidos produzidos na Ria Blades durante o fabrico de pás de aerogerador		47
5.1.	Gestão dos resíduos sólidos gerados na Ria Blades.....	47
5.2.	Caracterização dos resíduos sólidos gerados na Ria Blades	48
5.3.	Quantificação dos resíduos sólidos gerados na Ria Blades.....	56
5.3.1.	Indicadores de produção de resíduos por processo e por peça	56
5.3.2.	Indicadores de produção de resíduos por matéria-prima	66
5.3.3.	Indicadores de produção de resíduos em função da pá de aerogerador	68
Capítulo VI. Soluções para os resíduos sólidos gerados na Ria Blades		73
Capítulo VII. Síntese conclusiva.....		77
Referências bibliográficas		79
Webgrafia.....		83
Anexo I.....		I

Índice de Figuras

Figura 1: Evolução da capacidade eólica instalada (valor acumulado), a nível global, entre 2000 e 2015 [1].	1
Figura 2: Esquema dos componentes de um aerogerador (Busby, 2012).	5
Figura 3: Turbinas eólicas de eixo horizontal (Det Norske Veritas e Risø National Laboratory, 2002).	6
Figura 4: Turbinas eólicas de eixo vertical (Det Norske Veritas e Risø National Laboratory, 2002).	6
Figura 5: Secção de uma pá, exibindo as “Shells” superiores e inferiores e as duas “Webs” (adaptado de Det Norske Veritas and Risø National Laboratory, 2002).	7
Figura 6: Processo produtivo quando é usada a técnica de prepregs.	12
Figura 7: Técnica de prepreg [2].	13
Figura 8: Processo produtivo pela técnica de vacuum-assisted resin transfer moulding.	13
Figura 9: Processo de infusão [2].	14
Figura 10: Soluções identificadas para a gestão dos resíduos compósitos gerados na manufatura de pás de aerogerador.	20
Figura 11: Processo de reciclagem de resíduos compósitos em leiteo fluidizado (Pickering, 2006).	22
Figura 12: Unidade fabril da Ria Blades.	35
Figura 13: Pá de aerogerador produzida na Ria Blades.	36
Figura 14: Layout atual da Ria Blades.	37
Figura 15: Constituintes da pá de aerogerador RE 40.0 produzida na Ria Blades (Ribeiro, 2012).	38
Figura 16: Peças que constituem uma pá de aerogerador.	39
Figura 17: Sequência da montagem da pá de aerogerador da RE 40.0 (Ria Blades, 2016).	40
Figura 18: Processo de produção de <i>Webs</i> , <i>Girders</i> , <i>End Web</i> , <i>TEG</i> e <i>TEBC</i> .	41
Figura 19: Processo simplificado de produção das Root Joints da RE 59.8.	42
Figura 20: Esquema da produção das Main Shells e restantes processos a que a pá colada é submetida.	44
Figura 21: Principais resíduos gerados nas fases de produção das peças que constituem a pás de aerogerador.	50
Figura 22: Resíduos industriais banais gerados pelos processos de produção das peças que constituem uma pá aerogerador RE 40.0 e RE 59.8.	57

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

Figura 23: Produção de resíduos orgânicos contendo substâncias perigosas pelas fases de produção das peças que constituem uma pá de aerogerador RE 40.0 e RE 59.8.....	58
Figura 24: Resíduos orgânicos contendo substâncias perigosas gerados no pré-arranque e na limpeza das máquinas que realizam o abastecimento para a infusão e a colagem.	59
Figura 25: Indicadores da produção de resíduos de absorventes, panos e filtros contaminados com substâncias perigosas gerados nas fases de produção das peças que constituem a pá de aerogerador RE 40.0 e RE 59.8.....	60
Figura 26: Resíduos de fibra de vidro gerados por processo de produção das peças que constituem as pás de aerogerador RE 40.0 e RE 59.8.....	61
Figura 27: Resíduos de papel e cartão gerados por processo de produção das peças que constituem a pá do aerogerador RE 40.0 e RE 59.8 (com a exceção da Root Joints da RE 59.8).	62
Figura 28: Resíduos de plásticos gerados nos processos de produção das peças das pás de aerogerador RE 40.0 e RE 59.8 (com exceção das Root Joints da RE 59.8).	62
Figura 29: Resíduos de latão gerados pelas peças que constituem a pá do aerogerador RE 40.0 e RE 59.8.....	63
Figura 30: Resíduos gerados na produção das Root Joints da pá de aerogerador RE 59.8	64
Figura 31: Comparação dos resíduos gerados na produção das Root Joints da pá de aerogerador RE 40.0 e RE 59.8.....	65
Figura 32: Resíduos orgânicos contendo substâncias perigosas gerados em função das matérias-primas usadas nos processos de infusão e de colagem.....	66
Figura 33: Resíduos de fibra de vidro gerados em função das matérias-primas (fibra de vidro) usadas no processo de layup e de corte de fibra de vidro para a pá de aerogerador RE 40.0 e RE 59.8.....	67
Figura 34: Resíduos de green mesh gerados pela quantidade desta matéria-prima aplicada na pá de aerogerador RE 40.0 e RE 59.8.....	67
Figura 35: Resíduos gerados nos armazéns por pá de aerogerador.....	68
Figura 36: Resíduos gerados numa pá de aerogerador RE 40.0 e RE 59.8.....	69
Figura 37: Resíduos de plásticos gerados numa pá de aerogerador RE 40.0 e RE 59.8.....	70
Figura 38: Resíduos gerados em função do peso de uma pá de aerogerador RE 40.0 e RE 59.8.	70
Figura 39: Percentagens dos diferentes resíduos gerados na produção da pá de aerogerador RE 40.0 e RE 59.8.....	71
Figura A.1: Excerto da base de dados criada no âmbito do estágio.....	l

Índice de Tabelas

Tabela 1: Síntese comparativa dos processos produtivos de pás de aerogerador.....	11
Tabela 2: Síntese das várias opções identificadas para valorizar os resíduos compósitos gerados na manufatura de pás de aerogerador.	26
Tabela 3: Principais resíduos produzidos na produção de pás de aerogerador e os seus respetivos códigos LER.....	49
Tabela 4: Caracterização dos resíduos gerados nos processos de produção da pá de aerogerador RE 40.0.....	53
Tabela 5: Caracterização dos resíduos gerados nos processos de produção da pá de aerogerador RE 59.8, com a exceção das Roots Joints.	54
Tabela 6: Caracterização dos resíduos gerados nos processos de produção das Root Joints da pá de aerogerador RE 59.8.....	55

Acrónimos

ABS	Acrilonitrila butadieno estireno
EPI	Equipamentos de Proteção Individual
FRP	Plásticos reforçados com fibras
LER	Lista Europeia de Resíduos
PA	Poliamida
PC	Policarbonato
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de alta densidade
PEBD	Polietileno de baixa densidade
PET	Politereftalato de etileno
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVC	Policloreto de Vinilo
RH	Resíduos hospitalares
RIB	Resíduos industriais banais
RIP	Resíduos industriais perigosos
RIV	Resíduos industriais valorizáveis
RSU	Equipados a resíduos sólidos urbanos
Lado PS	Lado <i>Pressure side</i>
Lado SS	Lado <i>Suction side</i>
TEBC	<i>Trailing Edge Bonding Cap</i>
TEG	<i>Trailing Edge Girder</i>

Capítulo I. Introdução

Atualmente a demanda por energias limpas tem aumentando, devido às consequências do aquecimento global e da poluição em geral. A produção de eletricidade com base na energia eólica é um setor em crescimento, tanto em Portugal como no mundo. Na figura 1 é apresentada a evolução da capacidade eólica instalada (valor acumulado), a nível global, entre 2000 e 2015.

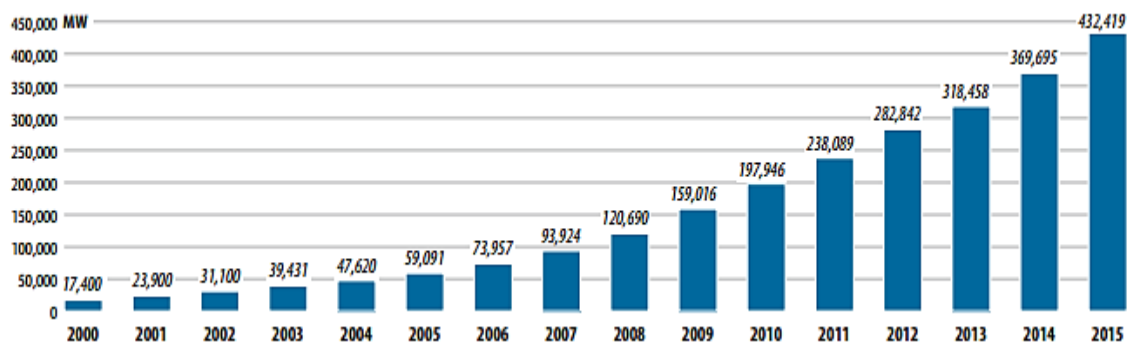


Figura 1: Evolução da capacidade eólica instalada (valor acumulado), a nível global, entre 2000 e 2015 [1].

Através da análise da figura 1 é possível verificar uma tendência crescente da capacidade eólica instalada no mundo durante os últimos 15 anos. Este crescimento impulsionou o desenvolvimento dos setores industriais associados à produção de equipamentos para conversão de energia eólica, nomeadamente as pás de aerogerador.

As tecnologias aplicadas neste setor estão em constante evolução, as turbinas modernas são 100 vezes mais potentes do que as que eram construídas em 1980 (Larsen, 2009). Segundo o mesmo autor, na década de 80 ocorreu o aumento do diâmetro dos rotores em cerca de oito vezes, com as pás de aerogerador superando os 60 metros de comprimento.

As características da pá de aerogerador são essenciais para se obter a aerodinâmica exigida para elevados rendimentos no processo de conversão da energia cinética do vento em trabalho mecânico e, conseqüentemente, na produção de energia elétrica. As pás de aerogerador são construídas envolvendo tecnologias, operações e materiais que lhes conferem o peso e configuração adequados ao fim a que se destinam.

As pás de aerogerador são normalmente constituídas por materiais compósitos, ou seja, são compostas por pelo menos dois componentes com propriedades físicas e químicas distintas. O compósito mais comum para o fabrico de uma pá de aerogerador é composto por uma matriz de polímero termoendurecível (resina) e fibras (normalmente de vidro) (Hau e von Renouard, 2006).

Na manufatura de pás de aerogerador ocorre a geração de resíduos, sendo alguns constituídos por materiais compósitos. A reciclagem de resíduos compósitos é complexa, devido

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

à dificuldade de separação dos componentes. Para além dos resíduos compósitos, nestas indústrias, também, ocorre a produção de resíduos associados aos consumíveis e aos restos de materiais desperdiçados.

As pás de aerogerador pesam diversas toneladas e no seu fabrico é gerada uma quantidade considerável de resíduos sólidos industriais. A correta caracterização e gestão destes resíduos é fundamental para reduzir os impactes ambientais negativos associados. Este aspeto é de enorme relevância para aumentar a sustentabilidade do processo, pois apesar da energia eólica ser considerada um recurso renovável é necessário que a cadeia de valor relacionada com a construção dos respetivos equipamentos de conversão de energia apresente o menor impacto ambiental possível.

Este estágio curricular teve como principal objetivo a caracterização e quantificação dos resíduos sólidos produzidos durante o fabrico de uma pá de um aerogerador na unidade fabril Ria Blades, de forma a servir de suporte ao desenvolvimento de procedimentos que melhorem a gestão dos resíduos.

A Ria Blades é uma empresa líder no mercado português da produção de pás para rotores de aerogeradores. Encontra-se empenhada em aplicar os melhores materiais e tecnologias disponíveis para a produção. Procura as soluções mais adequadas para a gestão dos resíduos sólidos gerados ao longo do processo industrial. Neste contexto, o estágio na Ria Blades surgiu no sentido de contribuir para uma adequada caracterização e subsequente gestão dos resíduos sólidos produzidos durante o processo de fabrico de uma pá de aerogerador.

As principais tarefas a desenvolver no âmbito deste estágio foram:

- Um trabalho prévio de pesquisa bibliográfica, de planificação do trabalho e de enquadramento do estágio. No presente capítulo realiza-se a apresentação do estágio curricular, do enquadramento do tema, dos objetivos e da metodologia aplicada. O segundo capítulo debruça-se sobre o estado da arte, abordando a revisão da literatura sobre a tipologia de geradores de energia eólica, os tipos de pás de aerogerador e os processos de produção de pás de aerogerador. O terceiro capítulo contém uma revisão da literatura sobre os resíduos sólidos produzidos durante o processo e as soluções existentes para a gestão destes.
- A segunda tarefa consiste na caracterização das operações envolvidas no processo de produção de uma pá de aerogerador na Ria Blades e das matérias-primas utilizadas. Para realizar esta tarefa foram realizadas visitas prévias às instalações da Ria Blades. O quarto capítulo é dedicado à caracterização da Ria Blades, sendo efetuada a descrição do processo de produção das pás de aerogerador e das matérias-primas.

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

- A terceira tarefa, correspondente ao trabalho concretizado na unidade fabril, decorreu de 10 de Fevereiro a 30 de Julho de 2016, sob supervisão de Filipa Monteiro. Consiste na caracterização da tipologia e na quantificação dos resíduos sólidos gerados em cada operação do processo de produção de uma pá de aerogerador. O quinto capítulo contém a caracterização da tipologia de resíduos sólidos gerados em cada operação durante o processo de produção da pá, bem como os resultados relativos às quantificações.
- Na quarta tarefa foi realizada a caracterização das soluções praticadas pela Ria Blades na gestão dos resíduos sólidos e a identificação de soluções alternativas, que permitam reduzir os impactos ambientais negativos e os custos económicos associados. Esta quarta tarefa decorre em simultâneo com a terceira, sendo apresentada no quinto e no sexto capítulo deste relatório. No sétimo capítulo constam as principais conclusões elaboradas com base neste estágio curricular.

A metodologia usada na quantificação dos resíduos sólidos, gerados em cada operação da produção de uma pá de aerogerador, baseia-se na pesagem das diversas tipologias de resíduos. Os resíduos produzidos nos armazéns foram contabilizados numa base temporal, de seguida foi feita a estimativa dos resíduos produzidos por pá de aerogerador através da quantidade de produto final gerado. Os restantes resíduos foram contabilizados pelas diversas fases do processo produtivo. Para facilitar o processo de caracterização e quantificação dos resíduos foi elaborada uma base de dados. Através das informações recolhidas ao longo do estágio foram desenvolvidos indicadores de produção de resíduos durante o processo. Ao longo desta etapa os resíduos sólidos foram caracterizados de acordo com a Lista Europeia de Resíduos (LER).

Capítulo II. A produção de pás de aerogerador

Para realizar a caracterização e a quantificação dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de uma pá de aerogerador e sugerir soluções de melhoria para a gestão dos mesmos é fundamental ter em consideração a tipologia dos geradores de energia eólica, os tipos de pás de aerogerador, os processos aplicados na produção deste produto, os resíduos sólidos gerados durante o processo e as soluções que já existem para a gestão destes resíduos sólidos.

2.1. Tipologia de geradores de energia de aerogerador

Os aerogeradores permitem converter a energia cinética do vento em energia elétrica. São constituídos por três componentes principais, o rotor com as pás, a transmissão (composta pela caixa de velocidades, o eixo e o gerador) e o sistema de controlo (Busby, 2012). Na figura 2 é apresentado o esquema dos componentes de um aerogerador.

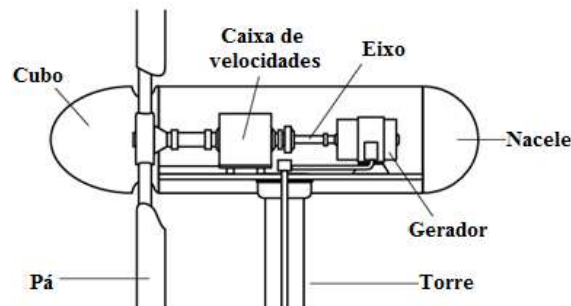


Figura 2: Esquema dos componentes de um aerogerador (Busby, 2012).

Os aerogeradores podem ser classificados, pelo seu formato, como turbinas eólicas de eixo horizontal ou vertical.

Atualmente, as turbinas eólicas de eixo horizontal são as mais utilizadas, devido à maior eficiência de conversão de energia e à simplicidade de conceção (Hau e von Renouard, 2006).

As turbinas de eixo horizontal (figura 3) possuem rotores com hélice, montados sobre um eixo horizontal no topo de uma torre vertical, devendo ser alinhados com a direção do vento de forma a permitir que este flua paralelamente ao eixo de rotação (Det Norske Veritas e Risø National Laboratory, 2002). Estes equipamentos exigem mecanismos que possibilitam a orientação do eixo do rotor relativamente à direção do vento (Hau e von Renouard, 2006). Estes rotores podem possuir uma ou várias pás (Det Norske Veritas e Risø National Laboratory, 2002).

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador



Figura 3: Turbinas eólicas de eixo horizontal (Det Norske Veritas e Risø National Laboratory, 2002).

As turbinas eólicas mais comuns possuem três pás. As estruturas com uma ou duas pás têm a vantagem de reduzir o custo e o peso do rotor quando comparadas com as de três pás. No entanto, as turbinas com menos pás necessitam de uma velocidade de rotação mais elevada para produzir a mesma energia que uma turbina de três pás de tamanho semelhante (Det Norske Veritas e Risø National Laboratory, 2002), pois com uma ou duas pás é preciso captar a mesma quantidade de energia cinética do vento que seria captada por três.

As turbinas eólicas de eixo horizontal podem ser *upwind* (o vento passa pela parte frontal e as pás são rígidas) e *downwind* (o vento sopra pela retaguarda das pás e o rotor é flexível) (Det Norske Veritas e Risø National Laboratory, 2002).

As turbinas eólicas de eixo vertical (figura 4) têm pás que giram sobre um eixo vertical, ou seja, o eixo de rotação da turbina é perpendicular ao chão. Existem alguns exemplos de aerogeradores de eixo vertical implementados, mas o seu uso não é generalizado em grandes parques eólicos (Busby, 2012).



Figura 4: Turbinas eólicas de eixo vertical (Det Norske Veritas e Risø National Laboratory, 2002).

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

A principal vantagem destas turbinas é a facilidade de acesso à caixa de velocidades e ao gerador, pois estão colocados no solo. A principal desvantagem é a baixa eficiência resultante das menores velocidades do vento junto ao solo. Na maioria das utilizações, as desvantagens das turbinas de eixo vertical superam as suas vantagens (Det Norske Veritas e Risø National Laboratory, 2002).

2.2. Pás de aerogerador

O desempenho aerodinâmico dos aerogeradores tem melhorado drasticamente nos últimos 40 anos. Atualmente os rotores têm uma eficiência de conversão de energia cinética em energia mecânica que varia entre 35% a 45% (Busby, 2012). Segundo o mesmo autor, estas melhorias de desempenho foram conseguidas, em parte, devido a criação de pás de aerogerador personalizadas para cada aplicação. As pás de aerogerador são produzidas de forma a otimizar a eficiência da turbina em situações de baixas velocidades do vento e para proteger o sistema dos ventos com elevada velocidade.

2.2.1. Geometria das pás de aerogerador

As pás dos aerogeradores são os elementos responsáveis pela captação da energia cinética do vento, assim sendo, o seu *design* tem um impacto significativo na eficiência destes equipamentos.

No aerogerador, o vento ao atravessar mais rapidamente os lados largos da superfície da pá origina uma zona de baixa pressão. A diferença de pressão entre as zonas largas e finas provoca uma força ascendente que induz a rotação do sistema (Busby, 2012). O *design* de uma pá de aerogerador é realizado tendo em conta considerações aerodinâmicas, a secção transversal tem uma configuração assimétrica, com o lado mais liso virado para o vento. O perfil da pá é geralmente oco, constituído por duas estruturas com o formato de conchas coladas (*"Shells"*). As pás devem ser resistentes e rígidas para suportarem a fadiga, para tal são coladas *"Webs"* entre a estrutura superior e inferior (Det Norske Veritas e Risø National Laboratory, 2002). Na figura 5 é esquematizada a secção de uma pá de aerogerador, exibindo as *"Shells"* superiores e inferiores e as duas *"Webs"*.

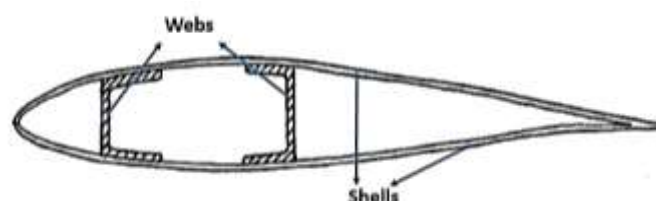


Figura 5: Secção de uma pá, exibindo as *"Shells"* superiores e inferiores e as duas *"Webs"* (adaptado de Det Norske Veritas and Risø National Laboratory, 2002).

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

O *design* da pá de aerogerador é realizado tendo em conta a magnitude e a direção das forças que atuam nela. As secções da pá de aerogerador perto do cubo (ver figura 2) devem ser capazes de resistir às forças e tensões do resto da pá, por isso o perfil perto do cubo é mais amplo e possui uma maior espessura. A força de sustentação sofre um acréscimo em direção à ponta, a redução gradual da largura nesta direção contribui para contrariar este efeito. As pás de aerogerador são torcidas ao longo do seu eixo para permitir acompanhar a mudança da direção do vento (Det Norske Veritas e Risø National Laboratory, 2002).

Algumas características que distinguem as pás de aerogerador são o comprimento, o perfil, a largura ao longo da pá, a distância entre a superfície superior e inferior e a torção da pá ao longo do seu eixo.

2.2.2. Materiais aplicados nas pás de aerogerador

Os primeiros aerogeradores desenvolvidos foram ineficazes devido a problemas associados ao *design* e aos materiais usados na pá. Atualmente muitos materiais e *designs* utilizados no passado caíram em desuso devido a problemas operacionais. Em função do material, as pás de aerogerador têm evoluído ao longo tempo. Alguns aerogeradores empregues no passado são os modelos de alumínio rebitado, de aço e de madeira (Hau e von Renouard, 2006).

Nos modelos de alumínio rebitado é usado como material o duralumínio, que tem a vantagem de possuir uma alta resistência à fadiga e à corrosão e ser mais leve que os modelos de aço. Os elevados custos associados à sua produção inviabilizam a sua aplicação (Hau e von Renouard, 2006).

No início dos anos oitenta, o aço era o material que prevalecia nas pás das turbinas experimentais. O aço tem valores de rigidez extraordinariamente elevados. Os preços relativamente baixos do material tornavam-no atraente para técnicas de soldadura convencionais. No entanto, a produção de pás de aço colocava vários problemas, tais como a dificuldade de garantir a qualidade após a soldadura, complicações associadas à corrosão e o elevado peso do material. Devido a estes problemas, os modelos de aço são considerados inviáveis (Hau e von Renouard, 2006).

Ocorreram várias tentativas de fabricar pás de aerogerador de madeira, pois a madeira natural possui uma resistência elevada à fadiga. O grande problema associado a estes modelos era a durabilidade da madeira. Atualmente a madeira é aplicada nas pás compósitas (Hau e von Renouard, 2006).

Nos compósitos de madeira ocorre a imersão de fibras madeira em resina epoxídica, o que permite eliminar algumas desvantagens associadas aos antigos modelos deste material e

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

continuar a fazer uso da sua grande resistência à fadiga. Apesar de, inicialmente, terem sido considerados vantajosos, rapidamente a maioria dos fabricantes descobriu que os compósitos de madeira não conseguiam competir com os de fibra de vidro, pelo menos em relação a durabilidade da madeira (Hau e von Renouard, 2006).

Atualmente a maioria das pás são produzidas com compósitos contendo reforços de fibras. Estes compósitos apresentam maior resistência, devido à aplicação de resinas sintéticas nas fibras. As primeiras pás de aerogerador compósitas empregavam fibra de vidro, estas tiveram tanto sucesso que ainda são o material predileto nesta aplicação (Hau e von Renouard, 2006).

A produção de pás de aerogerador usando compósitos de fibra de carbono é demasiado dispendiosa, para ser economicamente viável. A fibra de carbono gera produtos mais leves e com uma maior resistência ao vento (Det Norske Veritas e Risø National Laboratory, 2002). Em algumas situações, pequenas quantidades de fibra de carbono são utilizadas em pontos estratégicos das pás (Hau e von Renouard, 2006).

Os materiais compósitos são produzidos através da combinação de vários materiais, estas combinações permitem produzir materiais com melhores características para determinadas aplicações (Mallick, 2007). Algumas características usadas na seleção dos compósitos empregues no fabrico das pás de aerogerador são a rigidez, a massa específica e a resistência à fadiga (Hau e von Renouard, 2006). Os custos associados aos materiais também devem ser tidos em conta na seleção do material empregue. Os materiais devem atender as exigências legais a nível da qualidade e do ambiente.

Os principais materiais que podem ser usados na produção de pás de aerogerador atuais são (Det Norske Veritas e Risø National Laboratory, 2002):

- Resina epoxídica;
- Resina de poliéster;
- Resina de viniléster;
- Fibra de vidro;
- Fibra de carbono;
- Espuma de policloreto de vinilo (PVC);
- Madeira balsa;
- Madeira convencional;
- Madeira contraplacada.

Na manufatura de pás de aerogerador são usados como reforço a fibra de vidro e a fibra de carbono. As fibras de vidro e as fibras de carbono podem ser usadas nos painéis das pás e nas vergas internas, já no freio aerodinâmico geralmente é utilizada fibra de carbono. A combinação

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

de diferentes tipos de fibras origina uma malha híbrida (Det Norske Veritas e Risø National Laboratory, 2002).

As resinas normalmente usadas na produção das pás de aerogerador são de poliéster, viniléster e a epoxídica. A resina de poliéster é aplicada na maioria das situações, pelo contrário a epoxídica é usada em aplicações estruturalmente exigentes. As resinas são misturadas com endurecedor para iniciar o processo de reticulação (Det Norske Veritas e Risø National Laboratory, 2002). A resina epoxídica é vulgarmente utilizada como adesivo, como revestimento e como matriz das fibras (Yuyan *et al.*, 2009).

Os materiais do núcleo são espumas estruturais e produtos de madeira. As espumas são baseadas em termoplásticos (por exemplo, o PVC), podendo ser fornecidos com diversas densidades. Os produtos de madeira incluem a balsa, a convencional e a contraplacada. A madeira balsa é a mais utilizada, sendo fornecida em diferentes densidades (Det Norske Veritas e Risø National Laboratory, 2002).

Os adesivos são usados para estabelecer a ligação entre as folhas e as peças, também permitem preencher os vazios entre as peças do núcleo e as exteriores. A ligação deve ter a mesma resistência ao cisalhamento que o material do núcleo (Det Norske Veritas e Risø National Laboratory, 2002).

2.2.3. Processo de produção de pás de aerogerador

A maioria dos processos de fabrico de pás de aerogerador é realizada de uma forma pouco automatizada, exigindo muita mão-de-obra. A produção totalmente automatizada geralmente não é aplicada, devido aos factos das tecnologias existentes não serem capazes de fabricar produtos com a mesma qualidade que as técnicas mais manuais e das variações de forma das peças reduzirem a capacidade de automatização.

Na produção das peças que constituem as pás de aerogerador são aplicadas diversas técnicas de manufatura, sendo as principais a *wet hand lay-up*, a *prepregs* e a *vacuum-assisted resin transfer moulding* (ou infusão) (Det Norske Veritas e Risø National Laboratory, 2002). Estas técnicas podem sofrer algumas alterações, de forma a facilitar os processos e a aumentar a qualidade do produto final.

Na tabela 1 é apresentada uma síntese comparativa dos processos produtivos aplicados na produção de pás de aerogerador.

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

Tabela 1: Síntese comparativa dos processos produtivos de pás de aerogerador.

Processo Peça / Área	<i>Wet hand lay-up</i>	<i>Prepregs</i>	<i>Vacuum-assisted resin transfer moulding</i> ou <i>infusão</i>
Aplicação das camadas de reforço	Manual	Manual	Manual
Aplicação da resina	Manual (uso de rolos)	Fibra pré impregnada	Sucção da resina por vácuo
Capacidade de automação	Baixa	Elevada	Baixa
Duração do processo	-	Baixa	Mais elevada do que a técnica de <i>prepregs</i>
Temperatura de cura	-	Entre 80 e 120°C [2]	Entre 50 e 70°C [2]
Custos	-	Elevado	Inferior a técnica de <i>prepregs</i>

Atualmente, os processos aplicados na produção de pás de aerogerador são, normalmente, *vacuum-assisted resin transfer moulding* (infusão) e *prepregs*. Uma pá de aerogerador pode ser constituída por peças produzidas com diferentes tecnologias (por exemplo, *prepreg* e infusão) [2].

2.2.3.1. *Wet hand lay-up*

Na técnica *wet hand lay-up* é aplicada uma camada de resina num molde, previamente coberto por um desmoldante e uma camada de revestimento de “*gelcoat*”. De seguida a primeira camada da malha de reforço (fibra de vidro ou de carbono) é aplicada na resina húmida. Posteriormente, as restantes camadas são colocadas, alternando com a aplicação de resina (Det Norske Veritas e Risø National Laboratory, 2002).

A principal função do “*gelcoat*” é proporcionar uma superfície que possa ser levemente desgastada antes da pintura [2]. Este também proporciona um acabamento de alta qualidade e a proteção do compósito. Este produto tem na sua constituição resina de poliéster ou epoxídica (Yuhazri *et al.*, 2015).

Na aplicação das camadas, as malhas de reforço (por exemplo, fibra de vidro) são embebidas com resina através do uso de rolos metálicos ou de cerda. Os rolos são empregues para garantir que o exterior das fibras fica completamente embebidas em resina, para assegurar que o estratificado fica consolidado e para remover todo o ar retido. A resina em excesso é removida utilizando um raspador elástico. No caso da fibra de vidro, a cor indica se o humedecimento obtido é satisfatório, o mesmo não ocorre na fibra de carbono (Det Norske Veritas e Risø National Laboratory, 2002).

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

Na eventualidade da camada anterior secar completamente, a operação deixa de ser considerada uma laminação molhada, neste caso, a nova resina aplicada irá atuar como um adesivo (Det Norske Veritas e Risø National Laboratory, 2002).

A técnica *wet hand lay-up* pode ser realizada através do cobrimento do estratificado por uma membrana hermética (plástico) e com a posterior aplicação de vácuo. Este processo constitui um aperfeiçoamento do processo de laminação manual, podendo ser denominado moldagem a vácuo. Na moldagem a vácuo o ar por baixo da membrana é sugado por uma bomba, provocando uma sobrepressão que atua ao longo de todo o estratificado. A aplicação de vácuo permite melhorar a compactação do estratificado, elevar a resistência do compósito e aumentar a remoção das bolhas de ar aprisionadas (Det Norske Veritas e Risø National Laboratory, 2002).

2.2.3.2. *Prepregs*

O termo *prepreg* é uma abreviatura de “pré impregnação”, sendo usado para referir uma técnica e uma matéria-prima aplicada na produção de pás de aerogerador. A matéria-prima *prepregs* é uma pilha de camada de fibras saturadas em resina, sendo considerados precursores homogêneos utilizados no fabrico de pás de aerogerador. As resinas usadas na produção dos *prepregs* possuem elevadas viscosidades e são semissólidas à temperatura ambiente, facilitando o manuseamento [2]. Na figura 6 consta o esquema do processo produtivo quando é aplicada a técnica de *prepregs*.



Figura 6: Processo produtivo quando é usada a técnica de *prepregs*.

Os *prepregs* são transportados e armazenados a baixas temperaturas para preservar as suas características, muitas vezes são fornecidos em formato de rolos [2]. Antes de serem aplicados nos moldes os rolos de *prepregs* têm de sofrer um aumento de temperatura até a temperatura ambiente. De seguida o pré-impregnado é cortado para atingir a forma desejada. Durante a produção, a pilha completa é depositada no molde, sendo posteriormente coberta por uma membrana em vácuo e curada através do aquecimento do molde. A aplicação do vácuo permite consolidar os *prepregs* e remover o ar aprisionado (Det Norske Veritas e Risø National Laboratory, 2002). Os *prepregs* no molde são curados sob vácuo a temperaturas, tipicamente

entre 80 e 120°C [2]. Até 10% da massa de materiais pré-impregnados usados neste processo transformam-se em resíduos devido ao corte (Papadakis *et al.* 2010). Na figura 7 é ilustrada a técnica de *prepregs* com os diversos constituintes necessários para produzir as peças que constituem a pá de aerogerador.

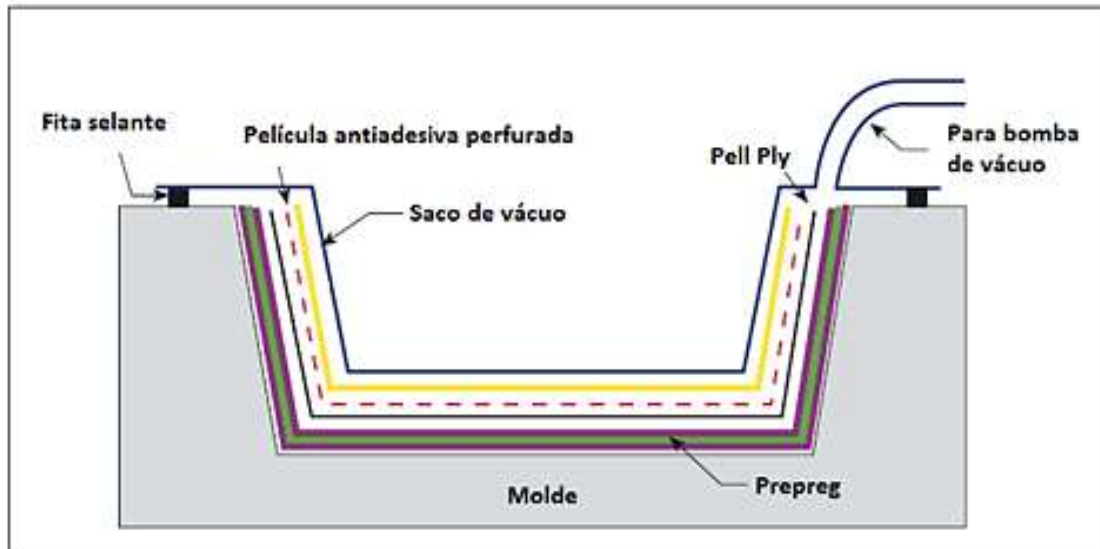


Figura 7: Técnica de *prepreg* [2].

Algumas vantagens da tecnologia *prepregs* são o facto do conteúdo de resina ser muito controlado, do desempenho das resinas ser mais elevado do que com a infusão, das taxas de deposição serem mais rápidas e da superior capacidade de automação. No entanto, o processo de *prepregs* é mais caro do que a infusão, devido à inclusão de resinas de maior desempenho, a exigência de armazenamento refrigerado, custos associados ao transporte e as temperaturas de processamento mais elevadas [2].

2.2.3.3. *Vacuum-assisted resin transfer moulding*

O processo de *vacuum-assisted resin transfer moulding* é assim denominado devido a forma como as camadas de reforço (fibra de vidro ou de carbono) são aplicadas. Este, também, pode ser classificado tendo em conta a forma como a resina é fornecida ao sistema, sendo denominado por infusão.

Na figura 8 é apresentado um esquema com um resumo do processo produtivo da técnica de *vacuum-assisted resin transfer moulding*.



Figura 8: Processo produtivo pela técnica de *vacuum-assisted resin transfer moulding*.

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

Na técnica de *vacuum-assisted resin transfer moulding* o conjunto completo de camadas de reforço (fibra de vidro ou de carbono) é aplicado ao molde, mas sem a adição de resina. De seguida a membrana hermética é colocada por cima do conjunto. A resina é, então, transferida através de uma tubagem pela sucção criada pelo vácuo. A vantagem desta técnica é o bom controlo da consistência e das propriedades das camadas e o menor peso do estratificado. O tempo de gelificação deve ser suficientemente longo, de modo a que a resina tenha tempo para infundir todo o molde antes da gelificação (Det Norske Veritas e Risø National Laboratory, 2002). Tal como ocorre no processo *wet hand layup* no início deste processo existe a necessidade de aplicar “gelcoat”.

Na técnica de manufatura *vacuum-assisted resin transfer moulding* ocorre a infusão. Na infusão acontece a transferência de resina através de uma tubagem pela sucção criada pelo vácuo. O princípio geral da infusão é de “sugar” a resina para dentro das fibras de reforço e restantes tecidos através da utilização de vácuo. A pressão disponível para infundir o estratificado com resina é dependente da pressão atmosférica no momento da infusão e da capacidade da bomba de vácuo. O vácuo é um dos parâmetros mais importantes para o processo de infusão, sendo essencial garantir que não existem fugas. Mesmo que mínimas, as fugas provocam a entrada de ar nas camadas de reforço, reduzindo a qualidade do mesmo, devido à criação de vazios. Para evitar a redução da qualidade das camadas de reforço ou a possível necessidade de reparações é feita uma cuidadosa verificação da integridade dos sacos de vácuo e restantes equipamentos. O processo de infusão é adequado para a pá de aerogerador, pois a geometria das “Shells” da pá não contém quaisquer detalhes estruturais complexos [2]. Na figura 9 é ilustrado o processo de infusão com os diversos constituintes necessários para produzir as peças que formam a pá de aerogerador.

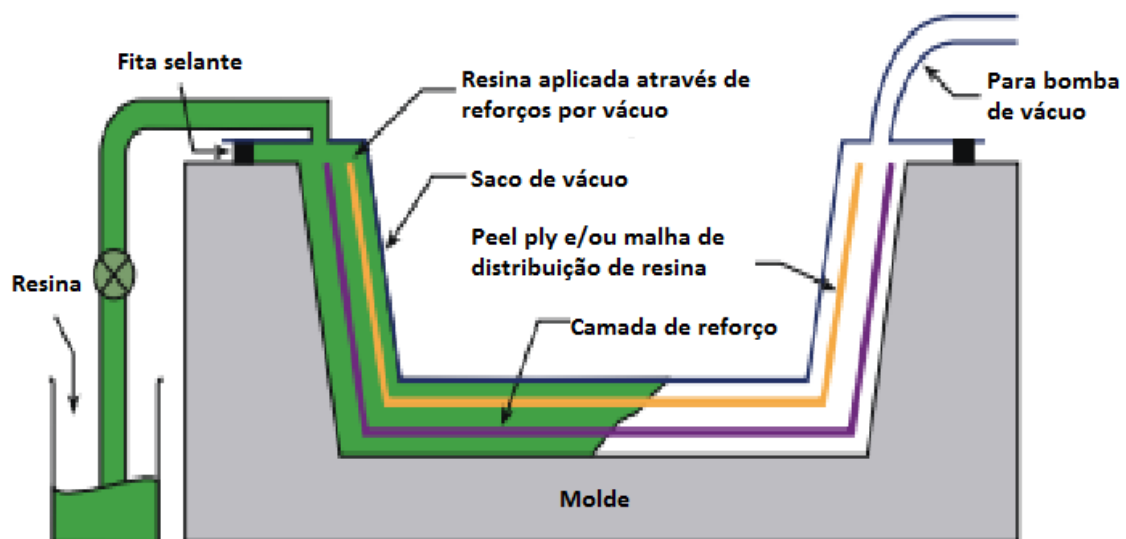


Figura 9: Processo de infusão [2].

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

Na figura 9 é possível observar que para proporcionar um gradiente de pressão e de vácuo nas camadas de reforço, durante a infusão, é usado um saco de vácuo e outros consumíveis, sendo aplicada uma primeira camada de “*peel ply*” sobre as camadas de reforço. No topo do “*peel ply*” é colocada uma malha de infusão que permite acelerar a velocidade de infusão. As tubagens de resina são adicionadas à malha de infusão para garantir que o fluxo de resina necessário é alcançado através de todo o componente. Um saco de vácuo impermeável é então colocado sobre o conjunto inteiro e fixo às bordas do conjunto [2].

Após o processo de infusão, a camada de reforço necessita de ser submetido a um tratamento térmico para desenvolver o desempenho mecânico ideal. A maior parte dos tipos de resinas utilizadas no processo de infusão apresenta uma elevada velocidade de cura à temperatura ambiente, mas esta reação pode levar até 4 semanas. Para obter uma produtividade ótima, o componente necessita de ser removido do molde o mais rapidamente possível, assim sendo, o processo de cura é normalmente acelerado pela aplicação de calor. A temperatura de cura ronda os 50 a 70°C [2].

A reação de transformação da resina (epoxídica, poliéster, éster de vinilo) líquida numa matriz sólida é um processo exotérmico, ou seja, emite calor para as vizinhanças durante a reação. Para iniciar a reação a resina é misturada com um catalisador ou um endurecedor [2].

Após a cura todos os consumíveis são removidos da superfície das camadas de reforço, deixando uma superfície limpa. A remoção de todos os consumíveis da superfície da peça origina uma quantidade significativa de resíduos [2].

Capítulo III. Soluções para os resíduos gerados na produção de pás de aerogerador

Na manufatura de pás de aerogerador são produzidos diversos tipos de resíduos, que se podem dividir em resíduos de materiais compósitos, frações diferenciadas dos materiais que constituem a pá de aerogerador e resíduos associados aos consumíveis usados no processo.

Os resíduos gerados no fabrico de cada pá de aerogerador representam 10% da massa dos materiais (resina, fibras e materiais de enchimento) usados nos processos, ao que acrescem os resíduos associados aos consumíveis (por exemplo, *peel ply* e sacos de vácuo) (Papadakis *et al.*, 2010).

Os resíduos de materiais compósitos gerados na produção das pás de aerogerador são constituídos por uma grande variedade de materiais, podendo conter fibra de vidro ou de carbono impregnadas em resinas epoxídica ou poliéster, madeiras e espuma de PVC. Esta diversidade de materiais torna as operações de valorização complexas (Cherrington *et al.*, 2012). A geração de resíduos compósitos ocorre tanto quando é aplicada a técnica de infusão como de *prepregs*. No caso da técnica de *prepregs* os resíduos compósitos são associados às sobras de fibras pré-impregnadas originadas nos processos de corte [3]. Os resíduos compósitos também podem ser originados pelo corte de extremidades das peças, após a cura.

As frações diferenciadas dos materiais que constituem a pá de aerogerador são uma parte significativa dos resíduos produzidos no processo de manufatura. Alguns exemplos destes resíduos são restos de fibra de vidro não impregnada em resinas, restos de resinas, madeiras e espuma PVC. Os restos de resina epoxídica constituem um resíduo perigoso associado aos processos de infusão e de colagem das peças. Numa pá de aerogerador com 7 toneladas, produzida por infusão a vácuo, origina 0,4 toneladas de resíduos de resina epoxídica [3].

Para além dos resíduos constituídos pelos materiais que integram as pás de aerogerador, também são produzidos resíduos associados aos consumíveis, ou seja, materiais usados ao longo do processo e que não constituem o produto final (Papadakis *et al.*, 2010). Alguns exemplos de consumíveis são: plásticos associados ao processo, tubagens de transporte de resina [3], caixas de papel, embalagens contaminadas com resinas, sacos de vácuo, equipamentos de proteção Individual (EPI) usados, sucata metálica e paletes de madeira.

Na análise da viabilidade da recuperação de um resíduo é necessário ter em conta questões técnicas e económicas. Os resíduos industriais podem ser atraentes do ponto de vista de reciclagem, pois as contaminações podem ser facilmente controladas. Em algumas situações é possível valorizar um resíduo industrial nas mesmas instalações em que os resíduos são produzidos (Reynolds e Pharaoh, 2010).

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

Atualmente os destinos para os resíduos das pás de aerogerador podem ser o aterro, a incineração e a valorização (energética e/ou material). No entanto, uma grande parte destes resíduos tem como destino operações de eliminação (Cherrington *et al.*, 2012).

Apesar de existirem algumas soluções para a valorização dos resíduos sólidos gerados no processo de manufatura de pás de aerogerador, a primeira medida da gestão dos resíduos deve passar por evitar a produção dos mesmos, e na impossibilidade de aplicar esta estratégia devem ser procuradas outras soluções.

A reciclagem de peças compósitas continua a ser um desafio devido a diversas razões técnicas e legislativas, embora existam tecnologias para a reciclagem destes resíduos. Este setor encontra-se pouco desenvolvido, devido ao baixo valor do produto reciclado e à falta de enquadramento legislativo adequado [4].

A valorização dos resíduos associados às frações consumíveis e às frações diferenciada dos resíduos que constituem a pá parecem ser mais promissoras, devido ao baixo nível de contaminação dos mesmos.

3.1. Gestão dos resíduos sólidos na origem

Na gestão de resíduos é fundamental promover a redução na origem. A redução na origem refere-se a qualquer alteração no projeto, no fabrico, na compra ou na utilização dos materiais ou produtos, que permita reduzir a quantidade ou toxicidade destes antes de se tornarem em resíduos. A redução na fonte, também, pode referir-se à reutilização de materiais. Esta redução traz vantagens a nível económico e ambiental, tais como: a redução da poluição na origem, a menor depleção de recursos, a redução dos gastos energéticos, a diminuição de custos associados a aquisição de matérias-primas, a obtenção de receitas provenientes da revenda de mercadorias e menores custos de gestão dos resíduos (Tchobanoglous e Kreith, 2002).

Algumas estratégias para reduzir os resíduos na origem são evitar o uso de embalagens desnecessárias (através da compra de produtos com menos embalagens, da utilização de embalagens com retorno e de embalagens que permitam a recarga), usar produtos de longa duração, reutilizar embalagens e recipientes, minimizar os desperdícios e reutilizar os resíduos no processo de fabrico, comprar produtos a granel e educar os funcionários no sentido de evitar a geração de resíduos desnecessários. A introdução dos resíduos de uma indústria nos processos de outra pode trazer vantagens económicas e ambientais (Tchobanoglous e Kreith, 2002).

O correto manuseamento e separação dos resíduos na origem é fundamental para reduzir os impactes ambientais negativos associados à gestão dos mesmos, pois influencia

significativamente as características dos resíduos e as operações que terão de ser aplicadas posteriormente (Tchobanoglous *et al.*, 1993).

A nível industrial, geralmente, são aplicadas técnicas que permitem reduzir o volume dos resíduos, diminuindo os custos associados ao transporte e à gestão dos mesmos. Segundo Tchobanoglous *et al.* (1993), algumas técnicas aplicadas nas indústrias para reduzir o volume dos resíduos são a compactação e a redução mecânica de dimensões (trituração).

A compactação ou prensagem é uma operação usada para reduzir o volume. Esta técnica permite melhorar o aproveitamento do espaço de armazenamento e de transporte dos resíduos. Para realizar a compactação são usadas prensas hidráulicas que permitem produzir fardos de um determinado resíduo, que estes têm como destino as indústrias recicladoras ou outras operações de gestão. A compactação pode ser aplicada em resíduos de cartão, papel, plástico, latas de alumínio e para aumentar a densidade dos Combustíveis Derivados de Resíduos (Tchobanoglous *et al.*, 1993).

As operações de redução mecânica de dimensões são usadas para diminuir o tamanho dos materiais que constituem os resíduos. A redução mecânica de dimensões abrange processos como o destroçamento, a trituração, a moagem, a pulverização e a desintegração. O objetivo desta operação é aumentar a homogeneidade dos resíduos, facilitar o transporte e tornar as operações subsequentes mais eficazes (Tchobanoglous *et al.*, 1993).

3.2. Operações de eliminação dos resíduos sólidos gerados na produção de pás de aerogerador

As operações de eliminação são, geralmente, aplicadas nas frações de resíduos compósitos e nas frações dos materiais que constituem a pá do aerogerador. As operações de eliminação, quando aplicadas a resíduos compósitos como as pás de aerogerador em fim de vida e alguns produtos originados na sua produção, têm a vantagem de poderem ser realizadas a preços relativamente atrativos [4].

As operações de eliminação dos resíduos gerados na produção de pás de aerogerador consistem no envio para aterro e na incineração [4]. As principais desvantagens da incineração das frações compósitas dos resíduos são o facto de grandes peças não poderem ser incineradas e de gerarem um elevado teor de cinzas, necessitando estas de ser enviadas posteriormente para aterro [4]. A incineração sem aproveitamento energético e a disposição em aterro são as opções menos favoráveis para gestão dos resíduos dos compósitos de fibra de vidro e de resinas, pois resultam em perdas de energia, que poderia ser aproveitada.

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

Geralmente, os resíduos associados aos consumíveis (por exemplo: papel, cartão e plásticos) quando não estão contaminados com outros materiais, não são submetidos a operações de eliminação, sendo valorizados, pois existem técnicas de valorização que são tecnicamente e economicamente viáveis. Algumas soluções para valorizar os resíduos plásticos são a reciclagem mecânica, a reciclagem química e a incineração com recuperação de energia.

3.3. Valorização dos resíduos compósitos gerados na produção de pás de aerogerador

A valorização dos resíduos compósitos e dos materiais que constituem a pá dum aerogerador deve ser uma opção a considerar, devido, preponderantemente, ao aumento do uso destes materiais e a escassez do volume disponível nos aterros para a sua disposição. Para além das soluções associadas à eliminação, na figura 10 são apresentadas as alternativas identificadas para valorizar os resíduos compósitos gerados na manufatura de pás de aerogerador. No entanto, estas alternativas são muito pouco aplicadas numa escala comercial, devido aos elevados custos económicos associados.

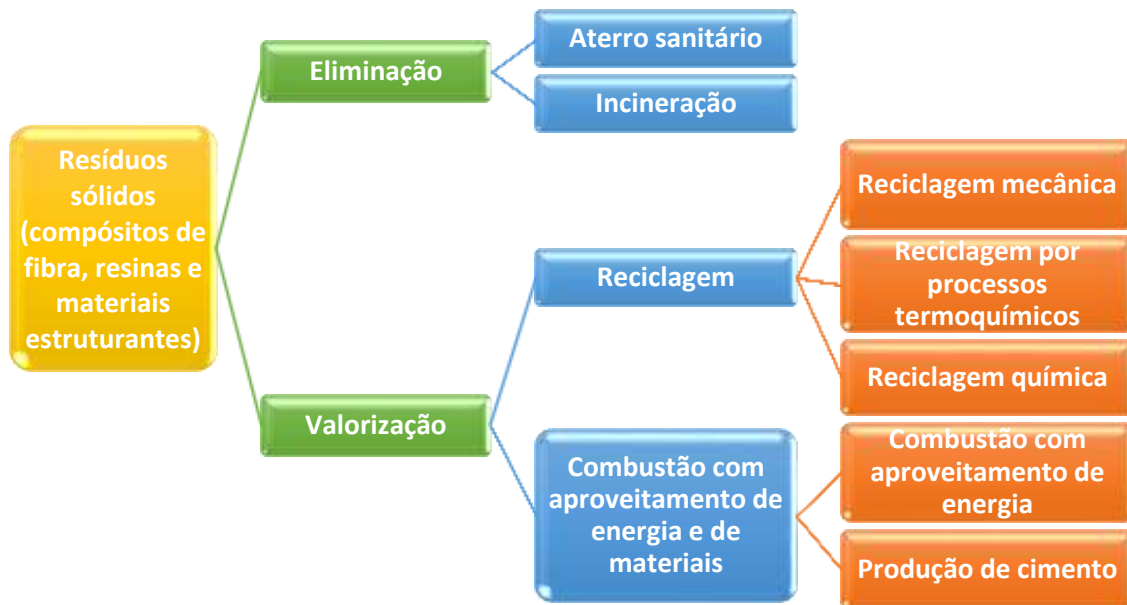


Figura 10: Soluções identificadas para a gestão dos resíduos compósitos gerados na manufatura de pás de aerogerador.

Normalmente, os resíduos compósitos, gerados na produção de pás de aerogerador, têm como destino a eliminação em aterro ou a incineração. Existe alguma investigação científica no sentido de valorizar os resíduos compósitos através da reutilização, da reciclagem mecânica, termoquímica e química, da combustão com aproveitamento de energia e da produção de cimento. A combustão com aproveitamento de energia pode ser uma opção praticável, quando os compósitos tem um grande teor materiais orgânicos (por exemplo, madeira ou PVC). No

entanto, a utilização na produção de cimento parece ser a alternativa mais viável, pois permite aproveitar energia e materiais (Pickering, 2006).

3.3.1. Reciclagem mecânica

Na reciclagem mecânica os materiais que constituem os compósitos sofrem uma redução da granulometria através de moagem, de trituração, ou de outros processos semelhantes. A reciclagem mecânica é um método muito simples, mas provoca danos nas fibras, reduzindo a sua qualidade. Este processo facilita a posterior separação dos resíduos e, se feita na altura da produção dos resíduos, facilita o transporte. A redução do tamanho dos compósitos é realizada em moinhos de martelos ou de alta velocidade, onde o material é reduzido a um produto mais fino. De seguida ocorre uma operação de separação em ciclones e peneiras (Pickering, 2006).

Os processos de reciclagem mecânica são adequados para resíduos pouco contaminados e de origem conhecida (Pickering, 2006).

A reciclagem mecânica tem as vantagens de permitir a recuperação das fibras e da resina e de não usar, nem produzir, materiais perigosos. No entanto, degrada significativamente as propriedades mecânicas das fibras e o produto obtido não é homogéneo (Pimenta e Pinho, 2011).

Os materiais resultantes da reciclagem mecânica são constituídos por uma mistura de polímeros (resinas), de fibras e dos componentes de enchimento (por exemplo, madeira e espuma PVC) (Pickering, 2006).

O material originado neste tipo de reciclagem possui uma baixa qualidade, sendo normalmente usado para aplicações menos exigentes (Song *et al.*, 2009). As aplicações típicas para os compósitos reciclados mecanicamente são a sua incorporação em novos compósitos (como enchimento ou reforços), a aplicação no setor da construção (por exemplo, como agentes de enchimento de madeiras artificiais ou de asfalto) e a utilização como fonte de minerais para a produção de cimento (Pimenta e Pinho, 2011; Pickering, 2006). No entanto, esta alternativa normalmente não é usada numa escala comercial, devido aos elevados custos e a baixa qualidade dos produtos obtidos.

3.3.2. Recuperação de fibras num processo térmico em leito fluidizado

Na recuperação das fibras em leito fluidizado os compósitos são reduzidos ao tamanho de cerca de 25 mm e introduzidos no processo térmico. Este leito é constituído por areia de sílica, tendo as partículas um tamanho de cerca de 0,85 mm. A areia é fluidizada com uma

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

corrente de ar quente a temperaturas entre 450 a 550°C (Pickering, 2006). No leito fluidizado os polímeros presentes no compósito volatilizam-se, libertando as fibras, que são transportadas para fora do leito, como partículas individuais suspensas no gás. Posteriormente as fibras são separadas da corrente de gás. De seguida o gás pode passar para uma câmara de combustão secundária em que o polímero é queimado, existindo o potencial de aproveitamento de energia. Este processo permite a recuperação de fibras de vidro e de carbono (Pickering, 2006). Na figura 11 é ilustrado o processo de reciclagem de resíduos compósitos em leito fluidizado.

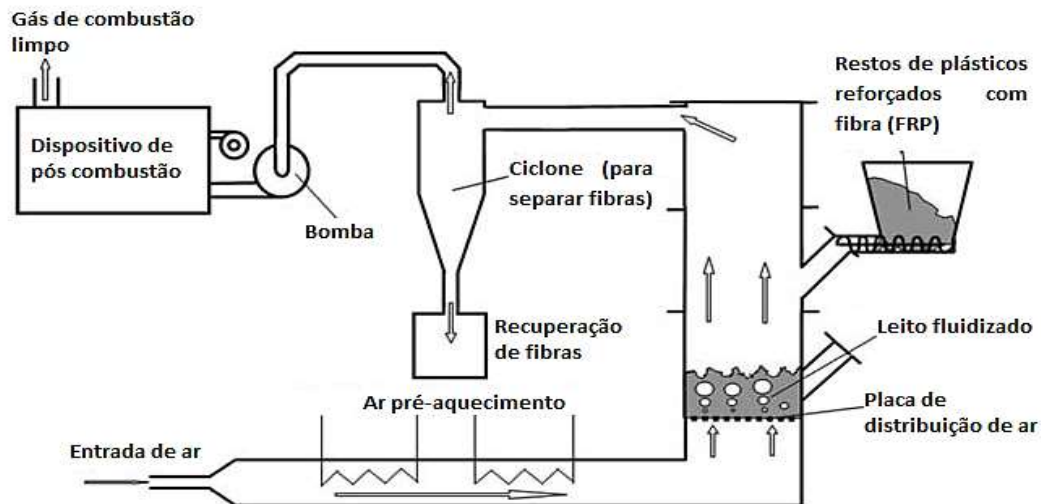


Figura 11: Processo de reciclagem de resíduos compósitos em leito fluidizado (Pickering, 2006).

Os compósitos de fibra de vidro e poliéster podem ser processados a 450°C, pelo contrário os que possuem resina epoxídica requerem temperaturas próximas de 550°C para volatilizarem (Pickering, 2006).

O processo de leito fluidizado tem a vantagem de ser tolerante a materiais contaminados. Neste processo, as misturas de compósitos de qualquer tipo de polímero podem ser processadas. Este processo tem algumas vantagens quando comparado com outros processos térmicos, nomeadamente as fibras produzidas não se encontram contaminadas com carbonizados e é um processo bem documentado. As principais desvantagens deste processo são a degradação da resistência das fibras, a redução do seu comprimento e a impossibilidade de recuperar a resina (Pimenta e Pinho, 2011).

As fibras recuperadas pelo processo térmico em leito fluidizado podem ser usadas como reforço em materiais compósitos (Feih *et al.*, 2015). As aplicações mais promissoras para as fibras recuperadas são aquelas que exigem fibras curtas e aplicadas numa forma dispersa, tais como em compostos de moldagem em massa (mistura de resinas e de fibras, usadas como uma pré-mistura na fabricação de compósitos) (Pickering, 2006). Apesar da valorização dos resíduos

compósitos por esta técnica ter sido alvo de investigação, não é usada numa escala comercial, devido aos elevados custos.

3.3.3. Reciclagem por pirólise

No processo de pirólise ocorre o aquecimento (entre 450°C e 700°C) do resíduo compósito na ausência de oxigénio. Este processo permite converter a resina polimérica num gás, pelo contrário as fibras de vidro e de carbono permanecem inertes e são posteriormente recuperadas (Cherrington *et al.*, 2012). A pirólise também permite a recuperação de materiais contidos nos resíduos compósitos, que têm o potencial de ser usadas como matéria-prima na indústria química (Pickering, 2006).

Os processos de pirólise produzem fibras com poucos contaminantes, mas que não possuem a mesma qualidade das fibras virgens. A qualidade das fibras depende do nível de contaminação por carbonizados originados nos processos de decomposição do polímero, esta contaminação pode inviabilizar o processo de reciclagem ou exigir tratamentos adicionais (Pickering, 2006). Este processo apresenta um inconveniente do ponto de vista ambiental por originar efluentes gasosos perigosos para o ambiente (Pimenta e Pinho, 2011).

As principais vantagens da aplicação dos processos de pirólise são a alta manutenção das propriedades mecânicas das fibras, não ser necessário utilizar solventes químicos e existir a possibilidade de recuperação de matéria-prima que pode ser usada na indústria química (Pimenta e Pinho, 2011). Os produtos condensáveis contêm uma mistura de diferentes classes de materiais orgânicos, que tem o potencial de ser empregue como combustível (Feih *et al.*, 2015).

As fibras recuperadas pelos processos de pirólise possuem o potencial de serem usadas como reforço em novos materiais compósitos (Feih *et al.*, 2015). Atualmente, esta solução não é aplicada comercialmente, devido aos elevados custos associados [4].

3.3.4. Reciclagem química

Na reciclagem química dos resíduos compósitos gerados na produção de pás de aerogerador a resina polimérica é decomposta em óleos e as fibras de carbono permanecem inertes, sendo posteriormente recolhidas (Cherrington *et al.*, 2012).

Os métodos químicos para a reciclagem de fibras de carbono contaminadas com polímeros aplicam um meio reativo (por exemplo, soluções catalíticas, álcool benzílico ou fluidos supercríticos) a temperaturas geralmente inferiores a 350°C (Pimenta e Pinho, 2011). A

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

reciclagem química das fibras de carbono permite uma manutenção elevada das propriedades mecânicas e do comprimento das fibras (Pimenta e Pinho, 2011).

Um estudo realizado por Oliveux *et al.* (2012) avaliou o potencial da reciclagem por hidrólise das fibras de vidro contaminadas com resina. As fibras após a hidrólise foram submetidas a uma lavagem com um solvente de forma a reduzir a contaminação orgânica. Alguns inconvenientes devem-se à degradação das propriedades mecânicas e à contaminação com compostos orgânicos das fibras.

A reciclagem química destes resíduos pode permitir a recuperação de substâncias derivadas das resinas com valor comercial. Alguns inconvenientes destes processos são o facto de serem pouco tolerantes à contaminação, de os reciclados produzidos terem uma baixa capacidade de adesão a resinas poliméricas e os elevados impactos ambientais associados ao uso de solventes perigosos (Pimenta e Pinho, 2011).

Atualmente, é complexo encontrar aplicações para as fibras obtidas por reciclagem química. Estas fibras podem ser usadas, por exemplo, na produção de *prepregs* para estruturas não críticas de turbinas eólicas (Pimenta e Pinho, 2011). Apesar de esta técnica ter sido alvo de investigação, não é usada numa escala comercial, devido aos elevados custos.

3.3.5. Combustão com aproveitamento de energia e/ou de materiais

A combustão com aproveitamento energético consiste na queima de um material com o intuito de utilizar a energia contida neste. A combustão converte uma estrutura química assente no carbono e no hidrogénio, em produtos simples tais como dióxido de carbono (CO₂), acompanhada da libertação de energia térmica. Estas reações ocorrem geralmente na presença do oxigénio do ar atmosférico.

Na combustão dos resíduos compósitos de fibra e resina só é possível aproveitar o poder calorífico da fração orgânica. Para prever o desempenho técnico e económico da combustão é essencial conhecer a composição do material e o seu poder calorífico. As fibras de vidro não são combustíveis, assim sendo, o poder calorífico destes resíduos depende, geralmente, da proporção de polímero (resina poliéster, resina epoxídica e PVC) e de fibra de carbono (Pickering, 2006). Os teores elevados de fibra de vidro poderão inviabilizar a aplicação desta técnica para aproveitamento de energia. Após o processo de combustão os componentes inertes do compósito dão origem a cinzas que necessitam de ser geridas.

A queima dos compósitos em fornos de cimento pode ser uma via eficaz para recuperar algum valor a partir do material não combustível, pois a fibra de vidro e os minerais usados nos compósitos contêm substâncias que podem ser incorporadas no cimento. Um problema desta recuperação é a presença de boro na fibra de vidro, pois o excesso de boro no cimento pode

aumentar o tempo de secagem. Devido a este problema apenas uma pequena parte do combustível aplicado no forno de cimento pode ser substituído por este tipo resíduo (Pickering, 2006). A combustão de resíduos compósitos de fibra de vidro em fornos de cimento é uma possível solução para a sua valorização, pois as resinas atuam como combustível dentro do forno, enquanto os agentes de reforço de vidro e minerais são incorporados no cimento (López *et al.*, 2012).

A valorização destes resíduos em fábricas de cimento pode constituir uma solução económica e oferece uma completa recuperação [4]. No entanto, a utilização desta técnica é complexa, pois exige uma preparação considerável [4] e pode originar problemas operacionais nas cimenteiras devido a presença de fibra de vidro.

3.3.6. Síntese das opções de valorização de resíduos compósitos

Na tabela 2 consta uma síntese das várias opções identificadas para a valorização dos resíduos compósitos gerados na manufatura de pás de aerogerador. Apresentam-se as principais características, os produtos obtidos, as vantagens e as desvantagens.

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

Tabela 2: Síntese das várias opções identificadas para valorizar os resíduos compósitos gerados na manufatura de pás de aerogerador.

Opções para a valorização	Características	Produtos obtidos	Vantagens	Desvantagens
Reciclagem mecânica	- Permite reduzir da granulometria	- Misturas de resina, fibras e agentes de enchimento	- Recuperação das fibras e da resina - Não origina substâncias perigosas	- Material obtido possui uma baixa qualidade
Recuperação de fibras num processo térmico em leito fluidizado	- Volatilização dos polímeros presentes nos compósitos e libertação das fibras - Processamento entre 450°C e 550°C (Pickering, 2006)	- Fibra de vidro	- As fibras obtidas não estão contaminadas com carbonizados - Bem documentado - Possível aproveitamento de energia através da combustão dos gases gerados	- Degradação da resistência das fibras - Impossibilidade de recuperar a resina
Reciclagem por pirólise	- Volatilização dos polímeros nos compósitos e libertação das fibras - Recuperação de materiais que têm potencial para serem aplicados no processamento químico	- Fibra de vidro ou de carbono - Matéria-prima para o processamento químico	- Elevada manutenção das propriedades das fibras - Não é necessário usar solventes - Recuperação de matéria-prima que pode ser usada na indústria química	- A qualidade das fibras obtidas é inferior a das fibras virgens - Efluentes gasosos perigosos
Reciclagem química	- Decomposição da resina polimérica - As fibras de carbono permanecem inertes - Realizado em meio catalítico - Temperaturas inferiores a 350°C (Pimenta e Pinho, 2011).	- Fibra de carbono ou de vidro	- Recuperação de matéria-prima que pode ser usada na indústria química	- Pouco tolerantes a contaminação - Uso de solventes perigosos - Baixa qualidade do produto obtido
Combustão com aproveitamento de energia e/ou de materiais	- Combustão com aproveitamento de apenas energia	- Energia	- Aproveitamento de energia	- Inviável se os teores de fibra de vidro forem muito elevados - Os componentes inertes do compósito dão origem a resíduos inertes
	- Combustão com aproveitamento de energia e de materiais em cimenteira	- Cimento	- Aproveitamento de energia - Os materiais inertes são incluídos no cimento - Não origina resíduos inertes após o processo	- Apenas uma pequena parte do combustível aplicado no processo pode ser resíduos compósitos com origem na indústria de pás de aerogerador

3.4. Gestão dos resíduos associados às frações diferenciadas dos materiais que constituem a pá de aerogerador

Os principais resíduos associados às frações diferenciadas dos materiais que constituem a pá de aerogerador são fibras e restos de resinas não curadas. Os resíduos associados às resinas não curadas possuem uma certa perigosidade, causando algumas preocupações do ponto de vista ambiental. Nesta seção apresentam-se algumas alternativas para a gestão dos desperdícios de fibra de vidro e dos resíduos perigosos.

3.4.1. Gestão de resíduos de fibra de vidro

A produção de materiais compósitos, como as pás de aerogerador, é uma indústria em crescimento. Nestes materiais, geralmente, é usada fibra de vidro, sendo uma parte desta fibra descartada. Os resíduos de fibra de vidro têm como destino final principalmente as operações de eliminação. As alternativas à eliminação são a reciclagem e a reutilização. No entanto, como a fibra de vidro é um material barato e amplamente disponível não existem grandes estímulos do ponto de vista económico às operações de valorização. A gestão dos resíduos de fibra de vidro pode ser melhorada através da minimização na origem e do reaproveitamento nos processos produtivos. Uma possibilidade para valorizar os resíduos de fibra de vidro é a substituição de parte do volume das mantas de fibras de vidro virgem por este subproduto em compósitos (Castro e Amico, 2009).

A valorização dos resíduos de fibra de vidro não contaminada com resinas originados na indústria das pás de aerogerador pode passar pelo estabelecimento de trocas com outras fábricas que consigam aplicar este material no seu processo produtivo. As fibras de vidro são usadas na produção de plásticos reforçados com fibras (FRP), que são compósitos constituídos por uma matriz polimérica (resina) e reforçada por fibras (por exemplo, fibra de vidro). Os FRP são aplicados nas indústrias de produção de automóveis, de camiões, de barcos, de canos, de reservatórios de armazenamento (Cameron e Rapp, 2001), de capacetes e de brinquedos.

Diversas das soluções que foram apresentadas para os compósitos de resina e de fibra podem ser aplicadas às frações diferenciadas de fibra de vidro, tais como a reutilização na construção civil e a aplicação noutros compósitos. A fibra de vidro, a nível da construção civil, pode ser aplicada na produção de, por exemplo, argamassas de cimento (Keleştemur *et al.*, 2014) e pavimentos de asfalto (Ferrotti *et al.*, 2012).

3.4.2. Gestão de resíduos perigosos

As embalagens e os restos de resinas não curadas, de endurecedores, de colas e de tintas são resíduos que ocorrem no processo de manufatura de pás de aerogerador, tendo um certo nível de perigosidade associada, sendo essencial a sua correta gestão.

A nível industrial a gestão de resíduos perigosos envolve a coleta, o transporte, o tratamento, a reciclagem e a eliminação dos materiais perigosos. Estas substâncias podem ser inflamáveis, nocivas, tóxicas, corrosivas, entre outras (Samanlioglu, 2013).

A separação na fonte permite reduzir a produção de resíduos perigosos, pois evita a contaminação de grandes volumes de resíduos não perigosos, através da remoção dos materiais perigosos, obtendo-se uma menor fração de resíduos perigosos que necessitam de ser tratados (LaGrega *et al.*, 2010).

Em determinadas situações, pequenas modificações no processo podem reduzir a perigosidade dos resíduos, tais como a alteração da temperatura, da pressão, da composição do material e a introdução de novos processos. A substituição de substâncias que geram resíduos perigosos por outras com características mais amigáveis do ponto de vista ambiental permite reduzir alguns resíduos perigosos. No entanto, esta substituição é complexa, devido à necessidade de assegurar a qualidade dos produtos e de manter preços competitivos (Tchobanoglous e Kreith, 2002).

Os tratamentos a que os resíduos perigosos são sujeitos (térmicos, físicos ou químicos) podem eliminar permanentemente o carácter perigoso do material ou apenas conter os constituintes perigosos (Vanguilder, 2012).

A incineração é a técnica mais óbvia de tratamento de resíduos perigosos envolvendo altas temperaturas, porque decompõe os materiais orgânicos perigosos em componentes menos perigosos. Os tratamentos químicos permitem realizar o rearranjo molecular, originando substâncias menos perigosas. Ambas as tecnologias permitem eliminar ou reduzir definitivamente os riscos associados (Vanguilder, 2012; LaGrega *et al.*, 2010).

Algumas técnicas que têm o intuito de conter os constituintes perigosos dos resíduos são a deposição em aterro, a solidificação e a estabilização. A solidificação é uma técnica físico-química que fixa um resíduo numa matriz sólida, resultando um produto final sólido. A estabilização é uma técnica física que consiste no envolvimento dum resíduo com uma substância intransponível (Vanguilder, 2012). A solidificação e a estabilização de resíduos perigosos permite diminuir a sua aptidão à solubilização e ao transporte para o meio natural.

3.5. Gestão dos resíduos associados aos consumíveis

Os consumíveis associados às atividades industriais são, por exemplo, cartão, papel, diferentes tipos de plásticos e alguns metais. A grande maioria destes materiais, quando não estão contaminados, são passíveis de serem submetidos a operações de valorização (Tchobanoglous e Kreith, 2002). Os principais consumíveis associados à produção de pás de aerogerador são papel, cartão e plásticos. Estes podem surgir durante o processo produtivo de pás de aerogerador contaminados, sendo nestes casos geridos como resíduos industriais banais (RIB).

3.5.1. Resíduos de papel e cartão

O papel e o cartão limpo, após o uso, podem ser submetidos a operações de reciclagem. A reciclagem de papel desempenha um papel fundamental na indústria de produção de papel, porque os fluxos de entrada podem incluir tanto as fibras virgens quanto as fibras recuperadas. Todavia, existe sempre a necessidade de introduzir fibras virgens no processo para substituir o material perdido durante a reciclagem (Ervasti *et al.*, 2016).

Para que a reciclagem dos resíduos de papel e de cartão seja realizada com sucesso é necessário que estes se encontrem livres de contaminantes, tais como plástico, metal e outros resíduos. As grandes unidades fabris vendem normalmente os resíduos de papel e de cartão a indústrias recicladoras, havendo um incentivo a que estes resíduos sejam manipulados com cuidado para evitar contaminações. Uma medida para evitar a contaminação do papel e do cartão passa pela separação na origem. O papel com níveis de contaminação muito elevado não pode ser reciclado, tendo como destino a compostagem, a incineração (com ou sem aproveitamento de energia) ou o aterro sanitário.

Nas instalações de reciclagem os resíduos de papel são classificados de acordo com a quantidade e o valor do papel, sendo de seguida separados. A separação é fundamental, pois estas indústrias produzem diferentes tipos de produtos com base nos materiais que estão a ser recuperados. Após a separação dos diferentes resíduos de papel, estes são submetidos a um processo de desagregação, no qual ocorre a desintegração do papel velho por ação mecânica. Após o material ser finamente triturado, é misturado numa solução aquosa que permite a quebra das fibras do papel, formando uma substância pastosa. De seguida, esta mistura é submetida a processos para remover os maiores contaminantes (por exemplo: agrafos). O material obtido é então misturado com matérias-primas virgens para formar um produto final mais firme. Depois, a pasta de papel é submetida a processos que permitem remover mais alguns detritos e tintas. Por fim, a pasta de papel é secada (Dhir *et al.*, 2001).

3.5.2. Resíduos de plástico

Os resíduos plásticos associados à produção de pás de aerogerador têm origem nos processos de manufatura e nas embalagens. Os materiais plásticos podem ser divididos em termoendurecíveis e em termoplásticos.

Alguns exemplos de termoplásticos são o policarbonato (PC), o polietileno (PE), o policloreto de vinilo (PVC), o poliestireno (PS), o polipropileno (PP), o politereftalato de etileno (PET). Os polietilenos podem ser classificados em polietileno de baixa densidade (PEBD) e em polietileno de alta densidade (PEAD). Os termoplásticos são plásticos que amaciam com o aumento da temperatura e que endurecem com a diminuição da temperatura. Podem ser moldados sucessivamente, o que facilita a sua reciclagem. (Azapagic *et al.*, 2003).

Os termoendurecíveis são polímeros que solidificam ou endurecem à medida que são aquecidos, uma vez endurecidos não voltam à sua forma original. Este tipo de plástico não é reciclável por meios físicos. Alguns exemplos destes plásticos são as poliamidas (PA), os poliésteres, as resinas alquílicas, as resinas epoxídicas e as resinas fenólicas (Miranda, 2009).

A valorização é a opção ideal para gerir os resíduos plásticos. As opções de valorização passam pela reciclagem mecânica, reciclagem química e a incineração com recuperação de energia (Azapagic *et al.*, 2003). A reciclagem mecânica e química permitem recuperar os materiais constituintes dando origem a novos produtos. A incineração com recuperação de energia permite reduzir os impactes ambientais associados à incineração, pois possibilita a produção de energia a partir de resíduos e evita o consumo de outros combustíveis.

Antes que os reprocessamentos associados à reciclagem mecânica ou química possam ser realizados é essencial executar a separação dos resíduos, a moagem, a lavagem e a secagem (Spinacé e De Paoli, 2005).

A separação dos resíduos plásticos consiste na triagem manual ou automatizada de forma a obter frações diferenciadas destes materiais. A separação dos diferentes tipos de plásticos, geralmente, é realizada antes e depois do material ser triturado (Azapagic *et al.*, 2003).

Depois de separados, os resíduos plásticos são moídos em moinhos de facas rotativas e crivos, o que facilita a acomodação do material nos equipamentos em que o reprocessamento é realizado. De seguida são submetidos a processos de lavagem e de secagem (Spinacé e De Paoli, 2005).

Na reciclagem mecânica dos resíduos plásticos ocorrem processos de trituração, de aquecimento e de extrusão. O reprocessamento dos resíduos plásticos na reciclagem mecânica pode ser realizado através de técnicas de extrusão, injeção, termoformagem e moldagem por compressão (Spinacé e De Paoli, 2005).

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

A extrusão é realizada numa tremonha, na qual é introduzido o resíduo plástico. Este é transportado ao longo de um parafuso aquecido, no qual o polímero funde totalmente. A extrusão permite a produção de produtos semiacabados (por exemplo: granulado na indústria de reciclagem) e novos produtos (Azapagic *et al.*, 2003). Geralmente, os processos de injeção ou a termoformagem são utilizados em conjunto com a extrusão, pois são obtidos produtos com uma maior homogeneidade (Spinacé e De Paoli, 2005). Na termoformagem e na injeção o plástico é aquecido até ficar deformável, sendo posteriormente introduzido num molde e após ter arrefecido é retirado.

A reciclagem química é um processo que permite gerar matérias-primas para a indústria química ou combustíveis com base em resíduos de plásticos (Azapagic *et al.*, 2003). Os polímeros submetidos a esta técnica são totalmente despolimerizados em monómeros ou degradado parcialmente em materiais secundários (Achilias *et al.*, 2007). A reciclagem química encontra-se pouco implementada comercialmente, devido aos elevados custos económicos associados.

A reciclagem química pode ser realizada através de processos de despolimerização por solvólise (por exemplo: hidrólise), por métodos térmicos (pirólise à baixa e alta temperaturas, gaseificação e hidrogenação) e por métodos catalíticos (utilização de catalisadores seletivos).

A solvólise é utilizada para polímeros como os poliésteres, as poliamidas e as poliuretanas, pelo contrário as técnicas térmicas e catalíticas são mais utilizados para as poliolefinas (por exemplo, PE e PP). Na hidrólise é possível recuperar os monómeros dos polímeros através de uma reação com excesso de água à alta temperatura e na presença de um catalisador. A hidrólise de resíduos de PET permite sintetizar o etileno glicol e o ácido tereftálico, podendo estes ser utilizados para obtenção novamente do polímero (Spinacé e De Paoli, 2005).

A pirólise dos resíduos plásticos consiste na sua degradação térmica, na ausência de oxigénio. As técnicas de pirólise com o intuito de recuperação de plásticos têm evoluído nos últimos anos, mas para manter estas tendências é necessário desenvolver processos economicamente viáveis (Kruse *et al.*, 2003).

Na pirólise a baixa temperatura são gerados pequenas quantidades de compostos aromáticos, gases leves (por exemplo: metano) e líquidos com elevados pontos de ebulição (por exemplo: alcatrões). Na pirólise de polímeros a alta temperatura são produzido óleos e gases, havendo a necessidade de os purificar através de técnicas de aplicação comum na indústria petroquímica. Os polímeros contaminados com impurezas podem ser reciclados por pirólise. No entanto, o produto obtido possui uma grande variedade de substâncias para as quais a separação é complexa e possuem um valor comercial menor que os produtos obtidos por hidrólise (Spinacé e De Paoli, 2005).

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

A gasificação ocorre na presença de oxigénio e de vapor de água numa gama de temperaturas entre 1200 e 1500°C, sendo os principais produtos o monóxido de carbono (CO), o hidrogénio (H₂), o metano (CH₄), o CO₂ e o vapor de água (H₂O) (Spinacé e De Paoli, 2005).

Segundo Spinacé e De Paoli (2005), a hidrogenação consiste na quebra das cadeias poliméricas, inicialmente feita termicamente, que resulta em radicais livres altamente reativos, os quais são posteriormente saturados com hidrogénio. A hidrogenação ocorre numa gama de temperaturas entre 440 a 480°C. Através deste processo é possível obter hidrocarbonetos como, por exemplo, metano, etano e propano.

Para aumentar o grau de conversão e a seletividade dos produtos obtidos na degradação térmica dos resíduos de plástico podem ser aplicados catalisadores, tais como zeólitos (Spinacé e De Paoli, 2005). A degradação catalítica de plásticos possui um maior potencial de aplicação comercial do que a degradação térmica, pois os hidrocarbonetos produzidos neste processo assemelham-se a gasolina normal e os custos de produção também são menores (Panda *et al.*, 2010).

3.5.3. Resíduos Industriais Banais

Os resíduos industriais banais são os resíduos de origem industrial que não apresentam características de perigosidade para a saúde ou para o ambiente. Alguns plásticos usados nos processos de produção de pás de aerogerador já não possuem características que possibilitem a reciclagem de uma forma economicamente viável. No entanto, não apresentam perigosidade que justifique que sejam geridos como resíduos perigosos, podendo ser geridos como resíduos industriais banais (RIB).

Os resíduos industriais banais têm características idênticas aos resíduos sólidos urbanos, mas possuem uma percentagem superior de materiais não biodegradáveis (Baidya *et al.*, 2016).

As frações compósitas dos resíduos gerados na produção de pás de aerogerador podem, em determinadas situações, serem consideradas resíduos banais. As alternativas mais comuns para valorizar os resíduos industriais banais passam pela incineração com recuperação de energia e pela introdução nos processos de produção de cimento.

A incineração de RIB origina gases simples (maioritariamente CO₂ e H₂O), cinzas e liberta calor. Na análise da viabilidade de um resíduo para ser submetido a um processo de incineração é fundamental considerar o teor de humidade, de sólidos voláteis e inorgânicos, o poder calorífico, o teor de enxofre, o conteúdo de compostos halogenados, entre outros. Quanto maior o teor de humidade maior é a necessidade de aplicar combustível auxiliar para incinerar os resíduos. A incineração não é viável num resíduo com um poder calorífico inferior a 2325 kJ/kg em base tal e qual. Porém, existem casos de materiais essencialmente inertes que

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

possuem um conteúdo relativamente pequeno de substâncias combustíveis em que a incineração é uma opção viável. A presença de quantidades elevadas de cloretos ou de sulfuretos nos resíduos resulta na formação de compostos ácidos nos gases de combustão, sendo necessário aplicar tecnologias para proteger os equipamentos (Tchobanoglous e Kreith, 2002).

O tratamento térmico dos resíduos com a recuperação de energia fornece uma fonte de energia limpa na forma de calor e de potência, constituindo uma alternativa à aplicação de combustíveis fósseis na produção de energia elétrica. As principais vantagens do tratamento térmico com recuperação de calor é o curto período de tempo de tratamento, a possibilidade de tratar resíduos perigosos, a possibilidade de controlar as emissões de poluentes atmosféricos e a possibilidade de o calor libertado ser utilizado. No entanto, a incineração não possui uma grande aceitação por parte da opinião pública, devido ao receio de problemas de saúde para a população nas imediações das incineradoras (Pavlas *et al.*, 2010), as principais preocupações são devido às dioxinas e à toxicidade das cinzas (Tchobanoglous e Kreith, 2002).

Os sistemas aplicados na recuperação da energia térmica são constituídos por caldeiras, turbinas, condensadores e bombas. A caldeira permite gerar vapor de água a alta pressão, que posteriormente é expandido numa turbina, permitindo converter o trabalho mecânico de expansão do vapor em trabalho de veio, para, por exemplo, produzir energia elétrica.

As unidades de cogeração permitem a produção simultânea de calor e de energia elétrica, podendo ser usadas para abastecer cidades e unidades industriais (Pavlas *et al.*, 2010). A rejeição de calor num sistema de condensação de uma central termoelétrica com base num ciclo de *Rankine* é quase o dobro da energia elétrica gerada (Conradie e Kröger, 1996).

O coprocessamento de resíduos industriais banais em cimenteiras com intuito de recuperar energia e matérias-primas é uma alternativa eficaz para a sua gestão. A produção de cimento exige o consumo intensivo de materiais e de energia, o processamento de resíduos para este fim representa uma estratégia para conservar recursos e reduzir emissões de gases com efeito de estufa (Baidya *et al.*, 2016).

Na aplicação dos resíduos industriais banais nos processos produtivos de uma cimenteira é essencial conhecer a composição, o poder calorífico, a granulometria das partículas e os teores de cinzas, de humidade e de voláteis (Cortada Mut *et al.*, 2015). O combustível derivado de resíduos usado nas cimenteiras, possui um teor de cinzas que varia entre 8 e 32% em base seca, o teor de voláteis ronda 60 a 84% em base seca e o poder calorífico inferior é aproximadamente 14 MJ/kg (Cortada Mut *et al.*, 2015).

A queima de resíduos em cimenteira é viável, pois os combustíveis derivados de resíduos têm teores energéticos satisfatórios para a indústria cimenteira (Baidya *et al.*, 2016). Os resíduos

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

industriais banais são valorizados através da mistura com as matérias-primas, sendo alimentados no processo de produção do cimento, tornando-se parte da sua composição final. A parte orgânica dos resíduos é queimada, fornecendo energia térmica, e a parte mineral dos resíduos é integrada no produto.

As principais vantagens do processamento dos resíduos industriais banais em cimenteiras são o facto de não gerar cinza, que tem de ser depositada em aterro, não ter efeitos adversos na qualidade do cimento e na quantidade das emissões, e evitar o consumo de recursos energéticos não renováveis (Baidya *et al.*, 2016; Cortada Mut *et al.*, 2015; Trezza e Scian, 2000).

Capítulo IV. A unidade fabril da Ria Blades

Ao longo deste capítulo é apresentada a caracterização da Ria Blades e das operações envolvidas na produção de uma pá de aerogerador nesta unidade fabril. Este contém informações sobre as matérias-primas utilizadas e os procedimentos específicos de cada operação na produção destas pás.

4.1. Caracterização da Ria Blades

A Ria Blades é uma empresa líder no mercado português da produção de pás de aerogerador, encontrando-se empenhada em aplicar os melhores materiais, tecnologias disponíveis e soluções para a gestão dos resíduos sólidos. Nasceu no seguimento da atribuição da fase B do concurso nacional de gestão de parques eólicos ao consórcio *Ventinveste* (constituído, em 2007, pela *Galp*, *Martifer*, *Repower*, *Efacec* e *Enersis*). Em 2009 a Ria Blades iniciou a sua atividade, após um ano foi produzida a primeira pá de aerogerador. Atualmente a Ria Blades produz pás de aerogerador para o grupo *Senvion*. A *Senvion* é um dos principais fabricantes de centrais de energia eólica do mundo, estando presente na França, em Portugal, na Itália, na Espanha, na Grécia, no Reino Unido, na Austrália e no Canadá.

A unidade fabril da Ria Blades localiza-se no Parque Empresarial de Soza, situado na freguesia de Soza, pertencente ao concelho de Vagos. Na figura 12 é apresentada uma fotografia da unidade fabril da Ria Blades.



Figura 12: Unidade fabril da Ria Blades.

As pás de aerogerador produzidas na Ria Blades são de turbina de eixo horizontal, sendo destinadas para parques eólicos *onshore* (localizados em terra). A Ria Blades produz aproximadamente 35 pás de aerogerador por semana, sendo o volume de exportação

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

aproximadamente 95%. Na figura 13 apresenta-se uma pá de aerogerador produzida na Ria Blades.



Figura 13: Pá de aerogerador produzida na Ria Blades.

A Ria Blades é o maior empregador do concelho de Vagos, com cerca de 1200 trabalhadores. A unidade fabril da Ria Blades possui um sistema de gestão segundo as normas NP EN ISO 9001 e NP EN ISO 14001. A Ria Blades possui certificação GL (aprovação para o fabrico de componentes feitos de plásticos reforçados com fibras (FRP)). Na figura 14 é apresentado o *layout* atual da Ria Blades.

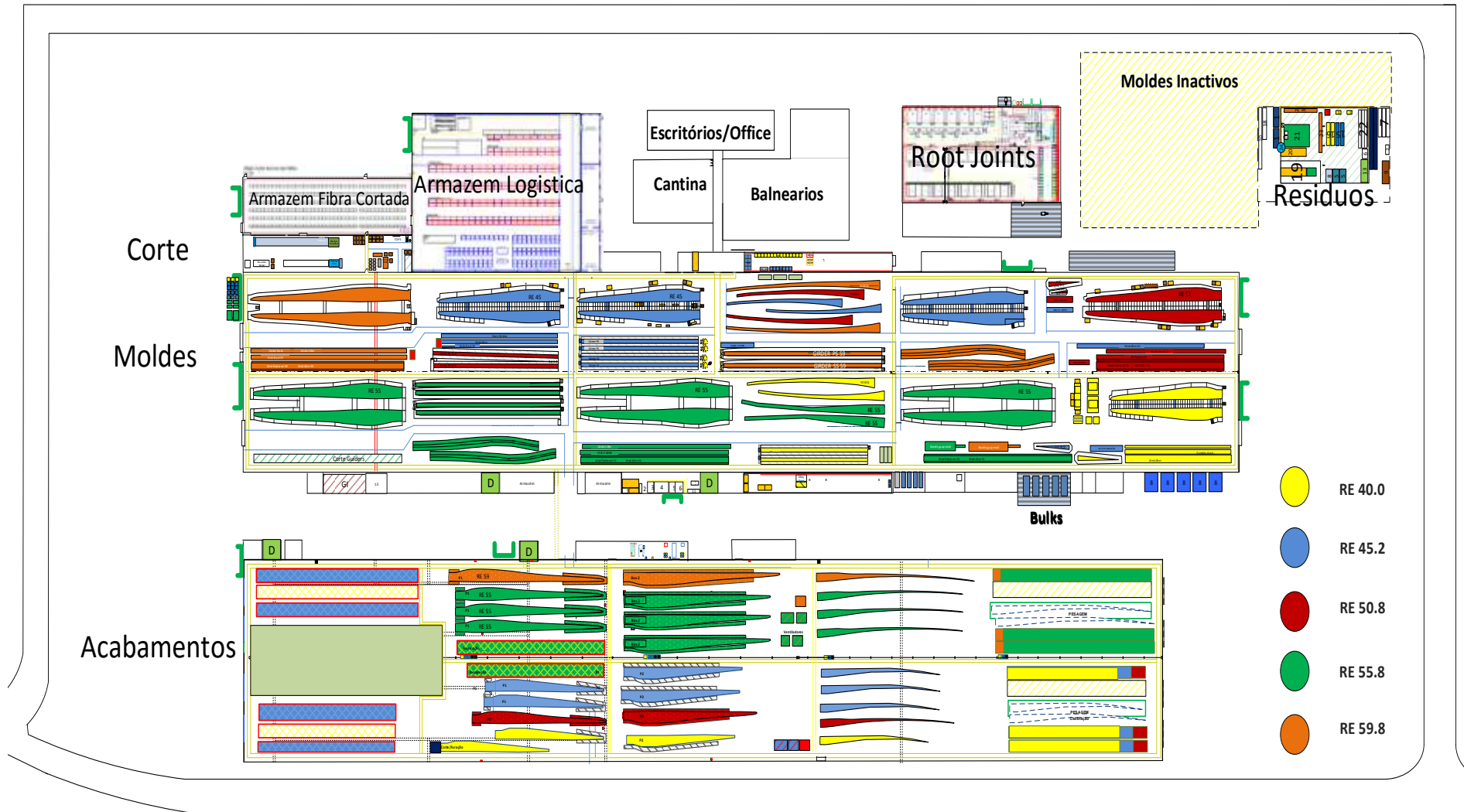


Figura 14: Layout atual da Ria Blades.

Na figura 14 é possível observar que a unidade fabril da Ria Blades é composta por diversos edifícios. No edifício dos moldes ocorre a produção das peças que constituem a pá de aerogerador e a sua montagem. Após a pá de aerogerador estar montada, a pá inacabada segue para o edifício dos acabamentos. Também existem outros edifícios, tais como os armazéns, os balneários, os escritórios e a cantina.

4.2. Técnicas de produção aplicadas na Ria Blades

As pás de aerogerador manufaturadas na Ria Blades possuem diversos comprimentos, nomeadamente: 59,8 m, 55,8 m, 50,8 m, 45,2 m e 40 m. Os pesos destas são 14,3, 14, 12, 8 e 7 toneladas, respetivamente. As pás de aerogerador fabricadas na Ria Blades são denominadas de acordo com o seu comprimento, por exemplo: a pá com 40 m é denominada por RE 40.0, a que possui 59,8 é chamada de RE 59.8, e assim sucessivamente. Ao longo deste estágio foi realizada a classificação e quantificação dos resíduos gerados na produção das pás de aerogerador RE 40.0 e RE 59.8, com processos produtivos ligeiramente diferentes.

As pás de aerogerador são fabricadas na Ria Blades com recurso a materiais compósitos, constituídos pela combinação de fibras de vidro e resinas. Ao longo da cadeia de produção são aplicados outros materiais que podem, ou não, fazer parte do produto final.

As pás de aerogerador concebidas na Ria Blades são constituídas por diversas peças individuais, nomeadamente, duas *Main Shells* (constituem o corpo da pá) e um conjunto de *pre-fabs*. Estas encontram-se divididas no lado *suction side* (lado SS) e no lado *pressure side* (lado PS). Na figura 15 são apresentados os diversos constituintes da pá de aerogerador RE 40.0, produzida nesta unidade fabril.

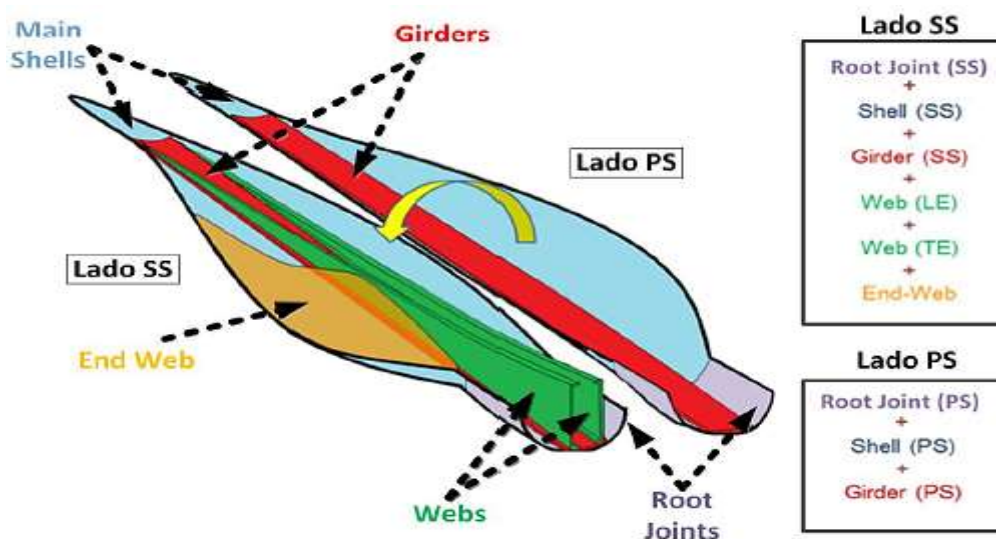


Figura 15: Constituintes da pá de aerogerador RE 40.0 produzida na Ria Blades (Ribeiro, 2012).

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

Na figura 16 são apresentadas as fotografias das peças que constituem as pás de aerogerador produzidas na Ria Blades.

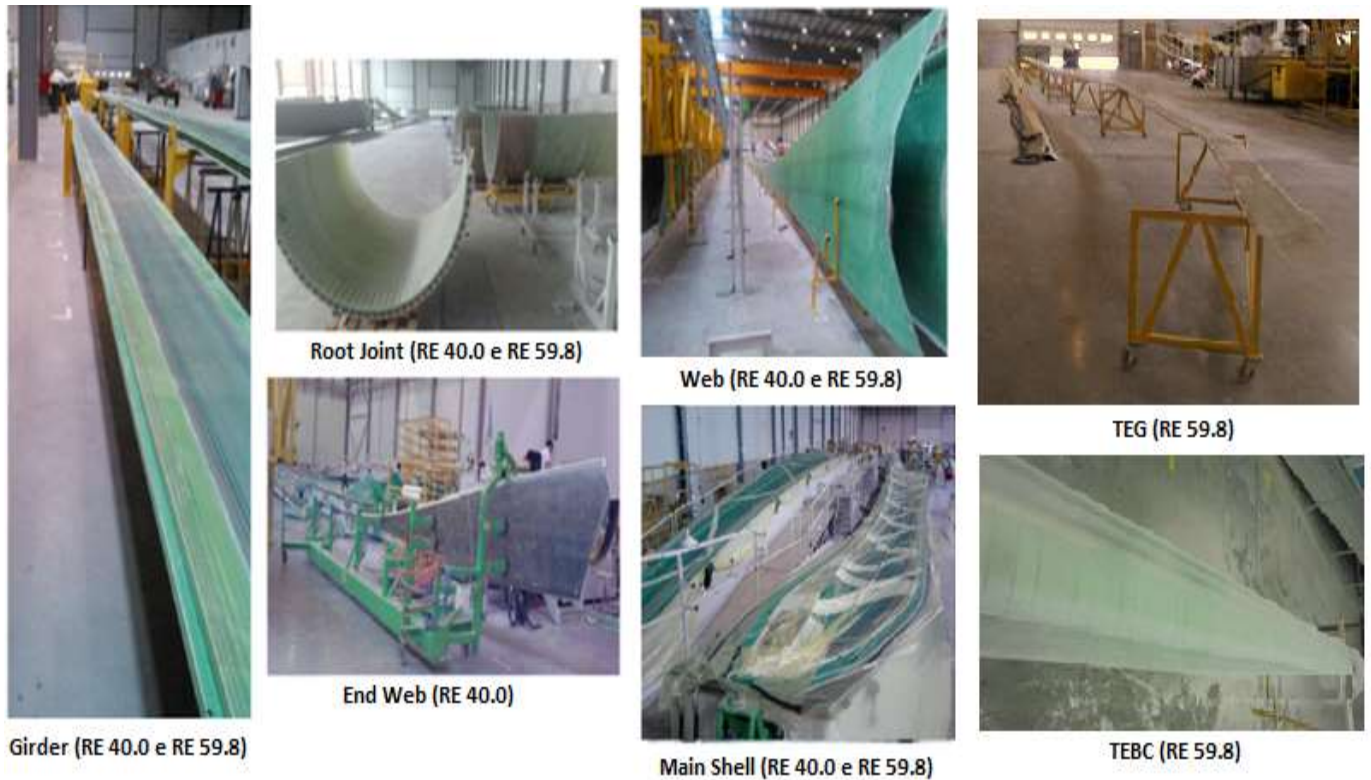


Figura 16: Peças que constituem uma pá de aerogerador.

Os *pre-fabs* permitem conferir resistência e flexibilidade à pá de aerogerador. Os *pre-fabs* são fabricados separadamente e posteriormente são incorporados nas *Main Shells*. Os *pre-fabs* aplicados na pá de aerogerador RE 40.0 são duas *Webs*, duas *Girders*, duas *Root Joints* e uma *End Web*. No caso da pá de aerogerador RE 59.8 são usadas duas *Webs*, duas *Girders*, duas *Root Joints*, dois *Trailing Edge Girder (TEG)* e um *Trailing Edge Bonding Cap (TEBC)*.

As *Webs* são responsáveis pela estrutura da pá de aerogerador, sendo sustentadas pelas *Girders*. As *Root Joints* permitem fazer a ligação entre a pá de aerogerador e o resto da estrutura do aerogerador. A *End Web* permite melhorar as condições aerodinâmicas da pá. As *TEGs* servem de reforço estrutural lateral, permitindo aumentar a robustez da pá, sendo coladas no interior do produto. O *TEBC* serve para unir as duas *Main Shells*, sendo colado no interior da pá aerogerador.

As pás dos aerogeradores RE 40.0 e RE 59.8 possuem alguns *pre-fabs* diferentes, no entanto o formato das *Main Shells* é adaptado para desempenhar as mesmas funções que as peças que não estão presentes.

Todas as peças que constituem uma pá de aerogerador são pré-fabricadas e montadas com uma cola. Na figura 17 é exibido a sequência de montagem de uma pá de aerogerador RE 40.0.

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

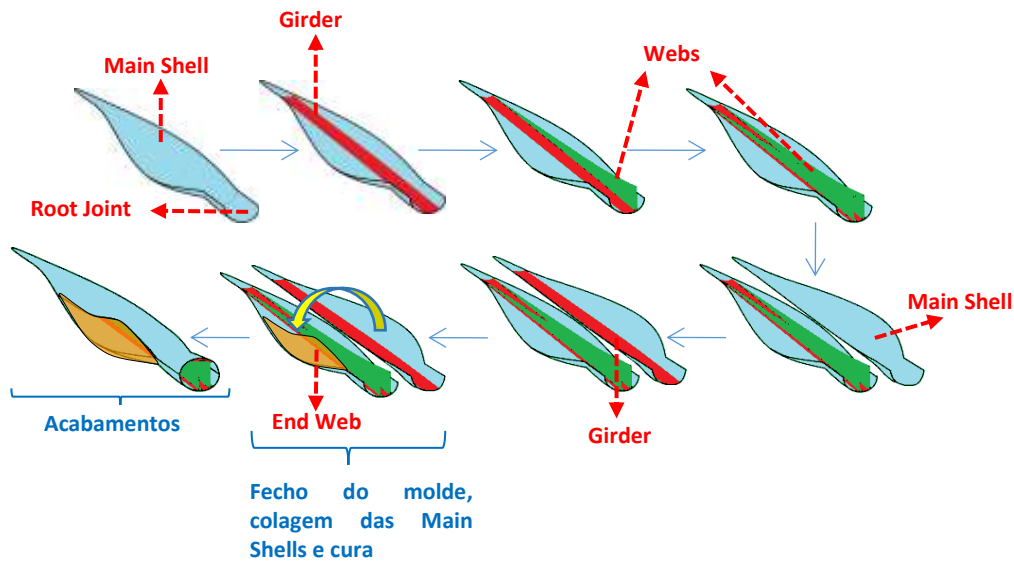


Figura 17: Sequência da montagem da pá de aerogerador da RE 40.0 (Ria Blades, 2016).

No início da sequência da montagem da RE 40.0, as *Root Joints* são coladas nas *Main Shells*. Depois, as *Girders* são colocadas no conjunto *Main Shell* e *Root Joint*. De seguida, as *Webs* são coladas numa das *Girders*, sendo a *End Web* também fixada nesta. Posteriormente, o molde é fechado e as *Main Shells* são coladas e curadas, formando uma pá completa. Por fim, a pá colada é desmoldada e submetida aos acabamentos. O procedimento é idêntico para RE 59.8, com exceção de não ser colocada uma *End Web*, sendo introduzidos um *TEBC* e duas *TEGs*.

Os processos produtivos da maioria dos componentes que constituem as pás de aerogerador RE 40.0 e RE 59.8 são muito idênticos, com a exceção das *Root Joints*. Nas pás de aerogerador RE 40.0 e RE 59.8 todas as peças são produzidas com recurso a técnica de infusão, com a exceção das *Root Joints* da RE 59.8 na qual é aplicada a técnica de *prepregs*.

Na figura 18 é esquematizado o processo produtivo aplicado na produção das *Webs*, *Girders*, *End Web*, *TEG* e *TEBC*, realizado com recurso a técnica de infusão. O processo produtivo das *Root Joint* da RE 40.0 é idêntico ao esquematizado, com a exceção de não incluir a fase de corte.

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

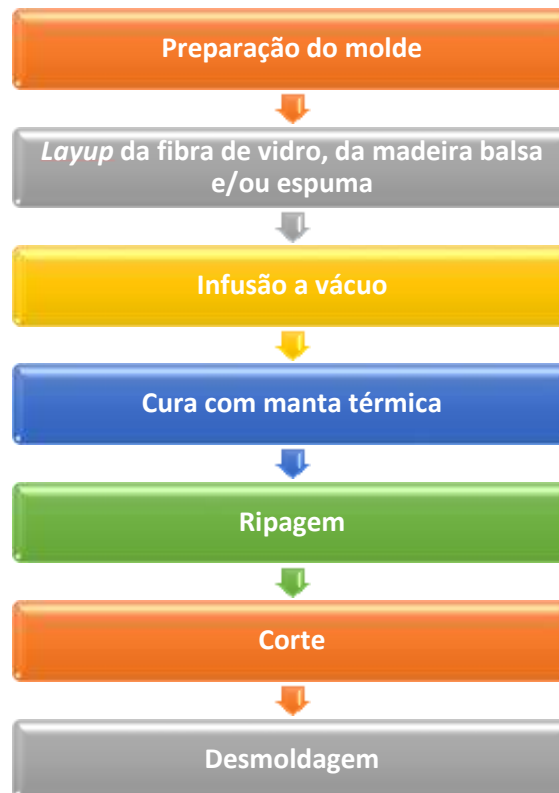


Figura 18: Processo de produção de *Webs*, *Girders*, *End Web*, *TEG* e *TEBC*.

A preparação do molde no processo de produção das *Webs*, das *Girders*, das *End Web*, das *Root Joints* (apenas da *Root Joints* da RE 40.0), do *TEBC* e das *TEG* consiste na limpeza dos moldes e na aplicação de desmoldante. A limpeza do molde é essencial para evitar a contaminação do produto final com restos de resina, fibras ou outros resíduos. Nesta fase é aplicada uma substância desmoldante para facilitar a remoção da peça do molde no fim do processo.

Nas *Root Joints* da RE 40.0, nas *Webs*, nas *Girders*, nas *End Web*, nos *TEBC* e nas *TEG*, a fase do *layup* corresponde à sobreposição de diversas camadas de fibra de vidro com os materiais de reforço (madeira balsa e espumas), e também são colocados diversos consumíveis. Entre os consumíveis colocados no processo de infusão encontram-se os sacos de vácuo (plástico) que permitem envolver o molde e a peça. Na infusão, uma mistura de resina epoxídica e de endurecedor é espalhada uniformemente em toda a peça com recurso a vácuo. Na infusão a vácuo é utilizada a pressão negativa para aspirar o ar para o exterior da pá, enquanto os materiais de reforço são impregnados com resina. Após a infusão, as peças passam por um processo de cura que permite solidificar a resina e endurecer a peça. A resina e o endurecedor ao serem misturados iniciam uma reação química que transforma os componentes líquidos combinados num sólido. Quanto mais calor for fornecido, mais rapidamente o processo decorre. De seguida são removidos os sacos de vácuo e os restantes consumíveis de cima das peças, num processo de ripagem. A fase de corte confere às peças a forma apropriada; nas *Webs* esta fase segue a sequência apresentada na figura

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

18, nas *Girders*, na *End Web*, nas *TEGs* e no *TEBC* é realizada após a desmoldagem. A desmoldagem consiste na remoção da peça do molde.

Nas *Root Joints* da RE 59.8 são aplicadas *prepregs* (fibra pré-impregnada em resina), o mesmo não acontece nas *Root Joints* da RE 40.0, em que é usado o processo de infusão. No caso das *Root Joints* da RE 59.8 não é realizada a infusão, pois as fibras já se encontram impregnadas em resina, sendo somente aplicado vácuo para comprimir as camadas de fibras. Na figura 19 é apresentado o processo simplificado de produção das *Root Joints* da RE 59.8.



Figura 19: Processo simplificado de produção das *Root Joints* da RE 59.8.

No edifício onde é realizada a produção das *Root Joints* da pá de aerogerador da RE 59.8 existem diversas áreas e processos destinados a preparar os materiais aplicados nas fases apresentadas na figura 19. Para garantir a completa contabilização dos resíduos associados as *Root Joints* da RE 59.8 foram feitas as amostragens nos seguintes processos e áreas:

1. Área de armazenamento a baixa temperatura;
2. Área de descongelação;
3. Colocação de fibra na máquina de corte;
4. Corte de fibra *Prepreg*;
5. Corte de consumíveis;
6. *Kit's*;
7. Corte de resina;
8. *Racks* de encaixes;
9. *Layup*;
- 9.1. Limpeza de molde e colocação de *peel ply*;

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

- 9.2. Colocação de fibra;
- 9.3. Colocação de encaixes, de *oring's* e de massa;
- 9.4. Colocação de consumíveis;
10. Cura;
11. Desmoldagem;
12. Preparação para corte de *robot*;
13. Corte de *robot*.

No edifício onde são produzidas as *Root Joints* da RE 59.8, existe uma área de armazenamento a baixa temperatura onde são armazenadas as fibras *prepregs* (pré-impregnadas), que são posteriormente transportadas para a área de descongelação onde são submetidas a temperatura ambiente. De seguida, as fibras *prepregs* são colocadas na máquina de corte, onde são cortadas de forma a atingirem as dimensões apropriadas para serem aplicadas nos moldes. No processo de corte de consumíveis ocorre o corte dos plásticos que vão ser aplicados no *layup*, pois estes chegam à unidade fabril em rolos com grandes dimensões, sendo preciso retirar apenas a quantidade necessária. Nos *Kit's* são colocados pequenos consumíveis que serão necessários ao longo do processo de produção destas peças, tais como fita-cola e *taky tape*. Os *racks* de encaixes são peças metálicas que estabelecem a ligação da pá de aerogerador com a restante estrutura do aerogerador, sendo introduzidos nas *Root Joints*. Nos locais próximos dos encaixes metálicos é preciso aplicar resinas, estas encontram-se em rolos no estado sólido, havendo a necessidade de proceder ao processo de corte da resina. Para facilitar o processo de contabilização, no *layup* foi incluída a limpeza do molde e a colocação de *peel ply*, de fibra, de encaixes metálicos, de *oring's*, de massa e de consumíveis. Antes de colocar as fibras *prepregs* no molde é fundamental proceder à limpeza e à colocação do *peel ply*, após a deposição das fibras ocorre a introdução dos restantes consumíveis. A colocação de encaixes metálicos, de *oring's* e de massa consiste na introdução e aperto das peças metálicas nas *Root Joints*. O processo de cura é realizado em estufas. Na desmoldagem ocorre a remoção dos consumíveis e a retirada das peças dos moldes. Após a desmoldagem ocorre a preparação para o corte de *robot*, na qual a peça é transportada para o local em que ocorre o corte. O corte de *robot* consiste no desbastamento das extremidades da peça para se obter a forma apropriada. Após o corte de *robot* a peça está pronta a ser colada na *Main Shell*.

Na figura 20 é esquematizado o processo produtivo aplicado na produção das *Main Shells* e da incorporação dos restantes *pre-fabs* nestas. As fases que correspondem à produção da *Main Shell* são a preparação do molde, a aplicação de *gelcoat*, o *layup*, a infusão a vácuo, a cura com manta térmica e a ripagem. O *gelcoat* é um gel protetor que é aplicado na superfície do molde das *Main Shells* para proteger contra a abrasão, a radiação UV e a humidade. Os processos de preparação do molde, de *layup*, de infusão a vácuo, de cura com manta térmica e de ripagem da

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

Main Shells são idênticos aos dos *pre-fabs*. Após a produção das *Main Shells* ocorre a colagem dos *pre-fabs* e dos calibradores nestas e o fecho do molde. Os calibradores são peças que permitem ajustar o peso da pá de aerogerador. A última fase da produção da pá de aerogerador é a dos acabamentos.

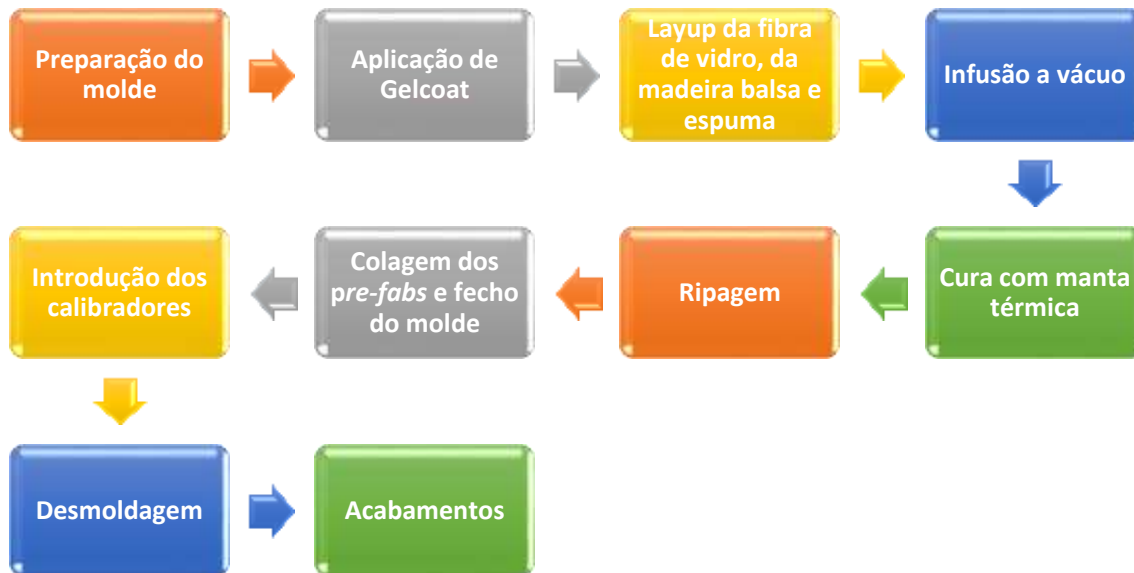


Figura 20: Esquema da produção das *Main Shells* e restantes processos a que a pá colada é submetida.

O edifício dos acabamentos encontra-se dividido nas seguintes áreas:

- P0 – Ocorrem processos de corte em locais específicos da pá do aerogerador para que atinja a forma pretendida. Também ocorre o lixamento das superfícies para permitir uma melhor aderência da tinta.
- P1 - As ligações entre as duas metades da pá são reforçadas e algumas imperfeições que possam existir são corrigidas com massa de enchimento. Ocorre a laminação dos reforços (na laminação é aplicada fibra de vidro e resinas), a aplicação de massa de enchimento, a furação dos recetores do lado PS (os recetores localizam-se nas *Roots Joints*, são os componentes metálicos que permitem estabelecer ligação entre a pá e o aerogerador), a furação dos encaixes do cabo elétrico e a laminação do cabo elétrico.
- P2 – São feitos acertos na base da pá onde está a *Root Joint*, a *End Web* é pintada, ocorre o lixamento e a aplicação de massas na superfície do lado SS, os encaixes são retificados, é realizada a furação dos recetores do lado SS e a retificação de espessuras.
- P3 – Os reforços feitos nas posições anteriores são curados, a pá é pintada e ocorre a montagem de outros subcomponentes que permitem proteger o equipamento de fenómenos naturais como, por exemplo, descargas elétricas.

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

- P4 – A pá é inspecionada, pesada, calibrada através de introdução de chumbo nos calibradores e submetida aos últimos retoques. Após esta fase a pá é expedida.

Nos processos de manufatura praticados na Ria Blades são usadas diversas matérias-primas, parte destas serão consumidas ao longo do processamento e outras constituirão o produto final.

Os materiais usados que ficam incluídos no produto final são a resina epoxídica, a resina adesiva (usada na colagem), o endurecedor, a fibra de vidro, a espuma de PVC e de PET, a madeira balsa e a fibra *prepreg*.

Uma grande parte dos materiais consumidos ao longo do processo de manufatura não ficam incluídos nas pás de aerogerador, dando origem a resíduos após o uso. Estes materiais podem ser papel, cartão, plásticos, metais, entre outros.

As operações realizadas na unidade fabril da Ria Blades não são apenas associadas ao processo de produtivo, pois também existem armazéns, escritórios e cantina.

Capítulo V. Os resíduos sólidos produzidos na Ria Blades durante o fabrico de pás de aerogerador

Ao longo deste capítulo é apresentada a caracterização e quantificação dos resíduos sólidos gerados em cada operação apresentada no capítulo IV, relativa ao processo de manufatura das pás de aerogerador na Ria Blades. Para auxiliar neste processo foi elaborada uma base de dados (Anexo I) que permite estabelecer uma relação entre as operações do processo de fabrico das pás de aerogerador e os respetivos resíduos sólidos gerados. Neste capítulo é também apresentada a forma como a gestão dos resíduos sólidos gerados na Ria Blades é realizada.

5.1. Gestão dos resíduos sólidos gerados na Ria Blades

Os resíduos gerados na unidade fabril da Ria Blades têm origem em operações de produção das pás de aerogerador, nos armazéns, nos escritórios, nas cafetarias, entre outros.

Os resíduos produzidos nas instalações são classificados pela Ria Blades como:

- RSU (equiparados a resíduos sólidos urbanos);
- RH (resíduos hospitalares);
- RIB (resíduos industriais banais);
- RIV (resíduos industriais valorizáveis);
- RIP (resíduos industriais perigosos);
- Resíduos de fibra de vidro.

O atual sistema de gestão de resíduos na Ria Blades baseia-se na melhoria contínua, na redução na origem e numa correta separação. A gestão dos resíduos na Ria Blades assenta nas diversas categorias de resíduos gerados (RSU, RH, RIB, RIV e RIP).

Os RSU da Ria Blades possuem características que permitem que sejam geridos como equiparados a resíduos sólidos urbanos, sendo produzidos principalmente na cantina.

Nesta unidade fabril, os resíduos hospitalares (RH) são produzidos no posto médico e nas salas de primeiros socorros. Segundo o Despacho nº 242/96 estes resíduos hospitalares encontram-se englobados nos grupos 3 e 4. Os RH pertencentes ao grupo 3 apresentam risco biológico, ou seja, estão contaminados ou existe suspeita de contaminação, são suscetíveis de incineração ou de outro pré-tratamento eficaz, podendo posteriormente ser eliminados como resíduos urbanos. Os RH que pertencem ao grupo 4 são resíduos hospitalares específicos, tais como matérias cortantes e perfurantes, sendo a incineração obrigatória.

Os resíduos industriais banais (RIB) não apresentam características de perigosidade para a saúde ou para o ambiente. Os RIB gerados na Ria Blades são submetidos a uma operação de

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

redução mecânica de dimensões para facilitar o processo de transporte e armazenamento. Este tratamento físico mecânico é realizado numa trituradora. O destino principal destes resíduos é a valorização em cimenteira em regime de co-incineração (com aproveitamento energético e de materiais).

Na Ria Blades são classificados como RIV todos os resíduos de origem industrial passíveis de serem valorizados e cuja valorização seja economicamente viável. Os RIV produzidos na Ria Blades são separados nos seguintes tipos: papel e cartão, plásticos e resíduos metálicos. Uma vez que estes têm valor de mercado, existe um esforço de separação das diversas frações de resíduos, na origem, de forma a facilitar a gestão e evitar contaminações que reduzam o seu valor comercial. Os resíduos de papel, de cartão e plástico são submetidos a processos de compactação (prensagem) antes de serem encaminhados para o seu destino final, originando fardos destes materiais. Os fardos e os resíduos metálicos valorizáveis são vendidos a entidades licenciadas para a gestão dos mesmos.

Os resíduos industriais perigosos gerados nesta fábrica são separados em diversas tipologias, facilitando as posteriores operações realizadas pelos operadores de gestão de resíduos. Estes são separados nas seguintes categorias:

- ❖ Resíduos orgânicos contendo substâncias perigosas;
- ❖ Absorventes, panos e filtros contaminados por substâncias perigosas;
- ❖ Embalagens contendo ou contaminadas por resíduos de substâncias perigosas;

A fibra de vidro produzida na Ria Blades é considerada um resíduo inerte, tendo como destino final o aterro. Uma vez que a deposição em aterro é onerosa e tem elevadas consequências do ponto de vista ambiental, as operações de corte de fibra de vidro são cuidadosamente calculadas, permitindo um menor gasto de matérias-primas e geração de resíduos.

Nesta unidade fabril é realizada a reutilização de alguns resíduos gerados, tais como: os bidões metálicos vazios são usados para colocar resíduos perigosos até que sejam encaminhados para o seu destino final e uma parte dos resíduos de fibra de vidro são misturados com os resíduos do processo de infusão para evitar a emissão de vapores nocivos por parte das resinas.

5.2. Caracterização dos resíduos sólidos gerados na Ria Blades

Ao longo deste estágio caracterizaram-se os resíduos associados à produção das pás de aerogerador RE 40.0 e RE 59.8. A caracterização ocorreu tanto ao nível do processo produtivo quanto dos armazéns. Os materiais aplicados na produção que não ficam integrados nas pás de aerogerador originarão, inevitavelmente, resíduos. Estes resíduos podem ser valorizados ou

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

submetidos a processos de eliminação. Na Tabela 3 são apresentados os principais resíduos produzidos na Ria Blades e os seus respetivos códigos segundo a Lista Europeia de Resíduos (LER).

Tabela 3: Principais resíduos produzidos na produção de pás de aerogerador e os seus respetivos códigos LER.

Resíduos	Código LER
Resíduos industriais banais	20 01 99
Resíduos orgânicos contendo substâncias perigosas	16 03 05
Absorventes, panos e filtros contaminados por substâncias perigosas	15 02 02 (*)
Embalagens contendo ou contaminadas por resíduos de substâncias perigosas	15 01 10 (*)
Fibra de vidro	10 11 03
Papel e cartão	15 01 01
Embalagens de plástico	15 01 02
Latão	20 01 40
Sucata metálica ferrosa	20 01 40
Limalhas de metais ferrosos	12 01 01

(*) Resíduos perigosos

Na figura 21 são indicados os principais resíduos gerados nas fases de produção das peças que constituem as pás de aerogerador. Nas tabelas 4, 5 e 6 é feita uma caracterização mais detalhada desses resíduos.

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador



Figura 21: Principais resíduos gerados nas fases de produção das peças que constituem a pás de aerogerador.

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

Nesta unidade fabril todos os resíduos industriais que não apresentam perigosidade para a saúde ou para o ambiente e não têm valor de mercado são geridos com RIB.

Nas operações de preparação do molde ocorre a produção de RIB e de resíduos industriais perigosos (RIP). Os RIP ocorrem em quantidades extremamente baixas, sendo constituídos por absorventes contaminados com substâncias perigosas. No *layup* são gerados RIB, em pequenas quantidades, constituídos por restos de consumíveis (por exemplo: *tacky tape*).

Os consumíveis ripados após os processos de cura são considerados resíduos banais, pois a resina epoxídica impregnada nos consumíveis sofre uma redução da perigosidade depois do processo de cura.

Nas operações de corte ocorre a produção de resíduos compósitos constituídos por fibra, por resina epoxídica curada, por madeira balsa, entre outros materiais. Estes resíduos são classificados com resíduos industriais banais.

Nas fases P0, P1, P2 e P3 dos acabamentos ocorre a produção de resíduos industriais banais, sendo estes associados aos processos de corte, de lixamento, de furações e de montagem de componentes.

A inclusão da categoria dos RIV na gestão de resíduos permite não só reduzir os custos, mas também é uma mais-valia do ponto de vista ambiental. Alguns RIV produzidos nesta fábrica são papel e cartão, diversos tipos de plástico, tubos de PVC e metais. Na produção dos *pre-fabs*, os resíduos plásticos foram identificados nas operações de *layup*. No caso das *Main Shells* são associados aos processos de *layup* e de ripagem. Os plásticos obtidos nos processos de ripagem não foram contaminados por resinas e outras substâncias, sendo passíveis de serem valorizados. Nos acabamentos (P1, P2 e P3) também foram detetados resíduos de plásticos. Os resíduos valorizáveis de papel e de cartão são associados aos processos de *layup* das *Main Shells*, *Girders*, *End Web*, *Webs*, *TEBC* e *TEGs* e aos acabamentos (P1, P2 e P3). Nos processos de infusão é necessário usar torneiras de latão, sendo os resíduos de latão valorizáveis e possuem um elevado valor de mercado. Apesar do latão ser usado na infusão, estes resíduos geralmente aparecem nos processos de ripagem ou de desmoldagem, sendo possível separá-lo dos restantes consumíveis.

Na unidade fabril da Ria Blades existe a produção de vários tipos de resíduos industriais perigosos, nomeadamente: embalagens com excedentes de cola e resina, rolos de tinta e panos contaminados. A maioria dos RIP gera-se no processo de infusão (resíduos orgânicos contendo substâncias perigosas), na aplicação de *gelcoat* (resíduos orgânicos contendo substâncias perigosas e absorventes contaminados), nas fases P1, P2 e P3 dos acabamentos (resíduos orgânicos contendo substâncias perigosas e absorventes contaminados) e nos armazéns, onde são armazenadas e distribuídas as substâncias perigosas.

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

Os resíduos de fibra de vidro aparecem ao longo do processo produtivo nas operações de *layup* e num fase auxiliar de corte de fibra de vidro. A fibra de vidro chega às instalações da unidade fabril na forma de rolos, sendo necessário ser submetida a um processo de corte para que atinja as configurações necessárias para o *layup*. O processo de corte de fibra de vidro gera uma quantidade significativa de resíduos deste material.

Os resíduos gerados nas pás de aerogerador RE 40.0 e RE 59.8 são ligeiramente diferentes. Na tabela 4 é apresentada a caracterização dos resíduos produzidos nos diversos processos de produção de uma pá de aerogerador RE 40.0. Na preparação do molde era expectável a produção de embalagens contendo ou contaminadas por resíduos de substâncias perigosas, no entanto, nas amostragens realizadas não foi detetado este resíduo, pois uma só embalagem tem capacidade para ser usada na produção de diversas peças. Na área P4 não se verificou a produção de resíduos porque neste local apenas ocorre a calibração e pesagem das pás de aerogerador.

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

Tabela 4: Caracterização dos resíduos gerados nos processos de produção da pá de aerogerador RE 40.0.

PROCESSO	Tipologia de resíduos	RIB	RIP			Fibra de vidro	RIV		
	Denominação dos resíduos	Resíduos industriais banais	Resíduos orgânicos contendo substâncias perigosas	Absorventes, panos e filtros contaminados por substâncias perigosas	Embalagens contendo ou contaminadas por resíduos de substâncias perigosas		Papel e cartão	Plástico	Latão
	LER Peça / Área	20 01 99	16 03 05	15 02 02 (*)	15 01 10 (*)	10 11 03	15 01 01	15 01 02	20 01 40
Corte de fibra de vidro	Área de corte					X			
Preparação do molde	Main Shell; Roots Joints; Girders; End Web; Webs	X	X (produção de resíduos apenas nas Root Joints; Girders)	X	X				
Aplicação de Gelcoat	Main Shell		X	X					
Layup	Main Shell; Roots Joints; Girders; End Web; Webs	X (Resíduos produzidos em todas as peças, com a exceção das Main Shell)				X (Resíduos produzidos em todas as peças, com a exceção das Root Joints)	X (Resíduos produzidos em todas as peças, com a exceção das Root Joints)		
Infusão	Main Shell; Roots Joints; Girders; End Web; Webs		X						
Ripagem	Main Shell; Roots Joints; Girders; End Web; Webs	X					X (produção de resíduos apenas na Main Shells)		X (Resíduos produzidos em todas as peças, com a exceção das Main Shells)
Colagem	Main Shell		X	X					X (produção de resíduos apenas na Main Shells)
Calibradores	Main Shell	X	X	X					
Corte	Girders; End Web; Webs	x							
Desmoldagem	Main Shell; Roots Joints; Girders; End Web; Webs	X (produção de resíduos apenas na Main Shells)							
Acabamentos	P0	X							
	P1	X	X	X			X	X	
	P2	X	X	X			X	X	
	P3	X	X	X			X	X	
	P4								

Na tabela 5 é apresentada a caracterização dos resíduos produzidos nos diversos processos de produção de uma pá de aerogerador RE 59.8, com exceção dos processos aplicados nas *Root Joints*. Não é apresentada a caracterização dos resíduos produzidos nas *Root Joints* da RE 59.8, pois o processo de produção é muito diferente das restantes peças que constituem a pá de aerogerador. A tipologia de resíduos produzidos na pá de aerogerador RE 59.8 é similar à da pá RE 40.0.

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

Tabela 5: Caracterização dos resíduos gerados nos processos de produção da pá de aerogerador RE 59.8, com a exceção das *Roots Joints*.

PROCESSO	Tipologia de resíduos	RIB	RIP			Fibra de vidro	RIV			
	Denominação dos resíduos	Resíduos industriais banais	Resíduos orgânicos contendo substâncias perigosas	Absorventes, panos e filtros contaminados por substâncias perigosas	Embalagens contendo ou contaminadas por resíduos de substâncias perigosas		Papel e cartão	Plástico	Latão	Limalhas de metais ferrosos
LER Peça / Área		20 01 99	16 03 05	15 02 02 (*)	15 01 10 (*)	10 11 03	15 01 01	15 01 02	20 01 40	12 01 01
Corte de fibra de vidro	Área de corte					X				
Preparação do molde	Main Shell; Girders; Web; TEG; TEBC	X		X	X					
Aplicação de Gelcoat	Main Shell		X	X						
Layup	Main Shell; Girders; Webs; TEG; TEBC	X (Resíduos produzidos em todas as peças, com a exceção das Main Shells e TEBC)				X (Resíduos produzidos em todas as peças, com a exceção das TEGs)	X	X		
Infusão	Main Shell; Girders; Webs; TEG; TEBC		X							
Ripagem	Main Shell; Webs; TEG; TEBC	X						X (produção de resíduos apenas na Main Shells)	X (Resíduos produzidos em todas as peças, com a exceção das Main Shells)	
Colagem	Main Shell		X	X					X (produção de resíduos apenas na Main Shells)	
Calibradores	Main Shell	X	X	X						
Corte	Girders; Web; Webs; TEG; TEBC	x								
Desmoldagem	Main Shell; Girders; Webs; TEG; TEBC	X (produção de resíduos apenas na Main Shells)								
Acabamentos	P0	X								
	P1	X	X	X			X	X		
	P2	X	X	X			X	X		X
	P3	X	X	X			X	X		
	P4									

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

Na tabela 4 e 5 é possível observar as principais diferenças nos tipos de resíduos gerados nas peças que constituem a pá de aerogerador RE 40.0 e RE 59.8, sendo estas:

- ❖ Apenas nas *Root Joints* e *Girders* da pá de aerogerador RE 40.0 foi detetado, na preparação do molde, a produção de resíduos orgânicos contendo substâncias perigosas;
- ❖ Na produção das *Root Joints* da pá de aerogerador RE 40.0 ocorre a produção de resíduos orgânicos contendo substâncias perigosas, o mesmo não ocorre no modelo RE 59.8;
- ❖ Só na pá de aerogerador RE 59.8 houve a geração de limalhas de metais ferrosos na fase P2.

Na tabela 6 consta a tipologia de resíduos gerados em cada fase do processo de produção das *Root Joints* da pá de aerogerador RE 59.8.

Tabela 6: Caracterização dos resíduos gerados nos processos de produção das *Root Joints* da pá de aerogerador RE 59.8.

Processos	Resíduos	Código LER
1. Área de armazenamento à baixa temperatura	Sem produção de resíduos	
2. Área de descongelação	Sem produção de resíduos	
3. Colocação de fibra na máquina de corte	Plástico	15 01 02
	Papel e cartão	15 01 01
4. Corte de fibra <i>Prepreg</i>	Papel e cartão	15 01 01
	Plástico	15 01 02
	Fibra <i>prepreg</i> (é curada, sendo gerida como RIB)	20 01 99
5. Corte de consumíveis	Plástico	15 01 02
	Papel e cartão	15 01 01
6. <i>Kit's</i>	Papel e cartão	15 01 01
7. Corte automático de resina	Papel e cartão	15 01 01
	RIB	20 01 99
8. <i>Racks</i> de encaixes	Plástico	15 01 02
	RIB	20 01 99
	Papel e cartão	15 01 01
9. Layup		
9.1. Limpeza de molde e colocação de <i>peel ply</i>	Papel e cartão	15 01 01
	RIB	20 01 99
	Embalagens contendo ou contaminadas por resíduos de substâncias perigosas	15 01 10 (*)
9.2. Colocação de fibra	Plástico	15 01 02
9.3. Colocação de encaixes, de <i>oring's</i> e de massa	Embalagens contendo ou contaminadas por resíduos de substâncias perigosas	15 01 10 (*)
9.4. Colocação de consumíveis	Plástico	15 01 02
	RIB	20 01 99
10. Cura	Sem produção de resíduos	
11. Desmoldagem	RIB	20 01 99
12. Preparação de corte de <i>robot</i>	Sem produção de resíduos	
13. Corte de <i>robot</i>	RIB	20 01 99

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

Nos armazéns que fornecem matérias-primas ao resto da unidade fabril também ocorre a produção de resíduos, nomeadamente: papel e cartão, embalagens de plástico, calhas de acrilonitrila butadieno estireno (ABS), poliestireno, *green mesh* e sucata metálica ferrosa. A *green mesh* é um plástico constituído por polietileno de alta densidade, sendo aplicado no processo produtivo e não fazendo parte do produto final.

5.3. Quantificação dos resíduos sólidos gerados na Ria Blades

Nesta seção são apresentados os indicadores desenvolvidos no âmbito deste trabalho, elaborados em função das diversas fases do processo produtivo (identificados no capítulo IV), das diferentes peças que constituem a pá de aerogerador, dos materiais aplicados por pá de aerogerador e pelo peso final da pá de aerogerador.

Os resíduos produzidos na Ria Blades foram quantificados com recurso a pesagens, tendo sido realizadas três amostragens para cada fase do processo produtivo. No caso da pá de aerogerador RE 40.0 os resíduos foram quantificados em duas *Main Shells*, duas *Webs*, duas *Girders*, duas *Root Joints* e uma *End Web*. Na pá de aerogerador RE 59.8 foram contabilizados para duas *Main Shells*, duas *Webs*, duas *Girders*, duas *Root Joints*, duas *TEG* e um *TEBC*.

5.3.1. Indicadores de produção de resíduos por processo e por peça

A quantificação dos resíduos gerados nas diferentes fases do processo produtivo foram realizadas tendo em conta as peças que constituem as pás de aerogerador em que o inventário foi realizado.

Na figura 22 são apresentados os indicadores de produção de resíduos industriais banais, por fase do processo de produção das peças que constituem as pás de aerogerador RE 40.0 e RE 59.8.

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

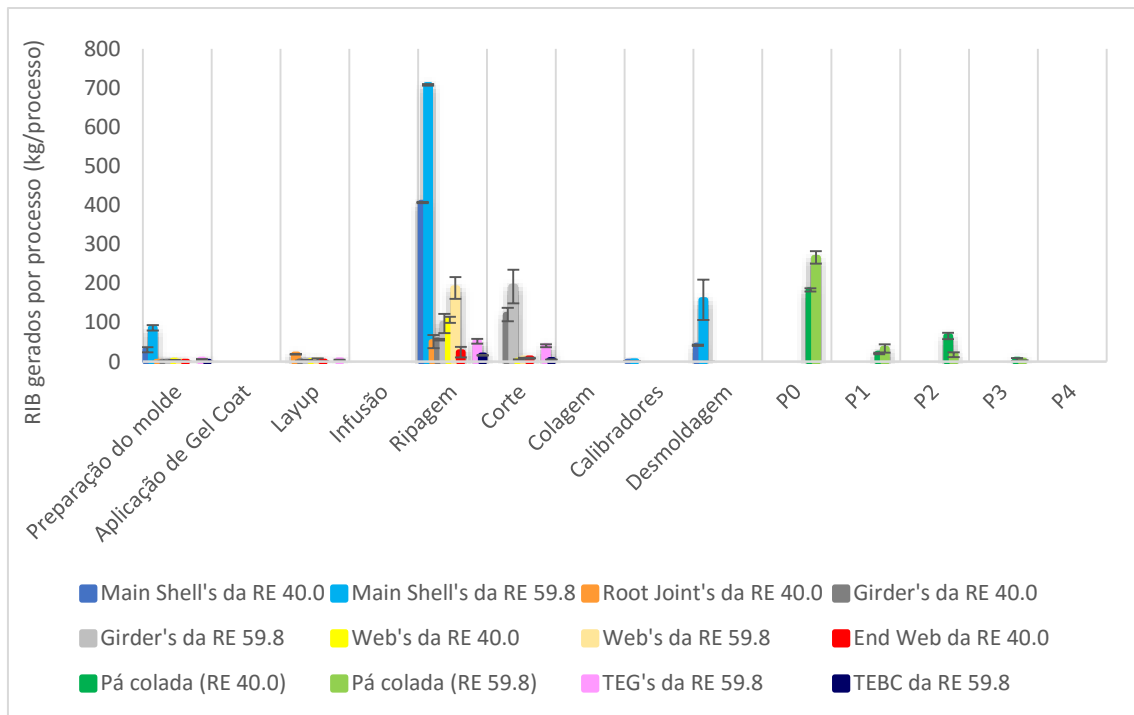


Figura 22: Resíduos industriais banais gerados pelos processos de produção das peças que constituem uma pá aerogerador RE 40.0 e RE 59.8.

Em todas as peças, a fase que gera maiores quantidades de RIB é a ripagem, com a exceção das *Girders*. No processo de ripagem ocorre a remoção de todos os consumíveis aplicados nas fases anteriores, assim sendo, é expectável que nesta fase sejam geradas maiores quantidades de RIB do que nas restantes. A ripagem das peças da RE 59.8 geram mais RIB do que na RE 40.0, pois a área que necessita de ser coberta por consumíveis é muito superior no primeiro caso. Nas *Girders* verifica-se uma maior geração de RIB no corte do que na ripagem, pois ocorre o corte das extremidades da peça e a remoção dos consumíveis localizados na parte inferior desta. A maioria dos RIB detetados são gerados nas *Main Shells*, devido a serem as maiores peças que constituem a pá de aerogerador. Os resíduos banais gerados nos acabamentos são originados, maioritariamente, nos processos de corte e de lixamento.

A tendência da geração de maiores quantidades de resíduos banais na RE 59.8 do que na RE 40.0 é visível em quase todas as fases de produção, com exceção da P2 e P3. Na fase P2 ocorre a geração de menores quantidades de RIB na RE 59.8 do que na RE 40.0, devido ao facto de apenas na pá de aerogerador RE 40.0 ser feito o corte das extremidades das *Root Joints* para introduzir os encaixes metálicos. Os encaixes metálicos realizam a ligação entre a pá de aerogerador e o corpo do aerogerador, no caso do modelo RE 59.8 a colocação dos encaixes é feita na produção das *Root Joints* e não no processo P2 dos acabamentos.

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

Na figura 23 apresenta-se a quantidade de resíduos orgânicos contendo substâncias perigosas geradas nas diferentes fases da produção das peças que constituem a pá de aerogerador RE 40.0 e RE 59.8.

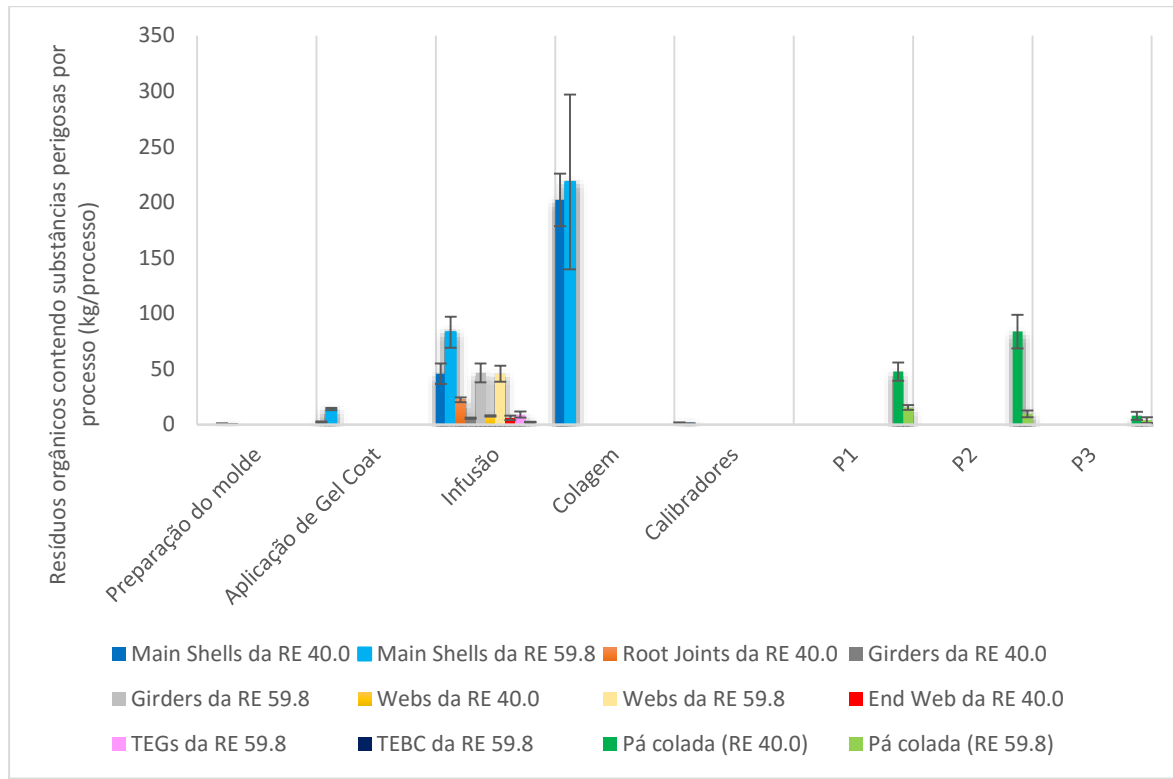


Figura 23: Produção de resíduos orgânicos contendo substâncias perigosas pelas fases de produção das peças que constituem uma pá de aerogerador RE 40.0 e RE 59.8.

O processo de infusão é a única fase da manufatura na qual existe a produção de resíduos orgânicos perigosos em todas as peças, o que se deve aos excedentes de resina e de endurecedor. No processo de colagem verifica-se a maior produção desta tipologia de resíduos. O elevado desperdício na colagem deve-se ao grande número de peças envolvidas no processo e de surgirem grandes quantidades de restos de cola entre as peças, após serem apertadas. Estes resíduos gerados na infusão e na colagem são devidos a sobra de matérias-primas usadas, havendo um grande potencial de otimização do processo, pois uma melhor adequação das quantidades necessárias pode permitir reduzir os desperdícios.

Os resíduos orgânicos contendo substâncias perigosas surgem nos acabamentos, nas áreas onde são realizadas as operações de enchimento (P1 e P2) e de pintura (P2 e P3).

A produção de resíduos orgânicos contendo substâncias perigosas é, geralmente, superior nas fases da produção da pá aerogerador RE 59.8 do que na RE 40.0, pois na primeira as necessidades de *gelcoat* e cola são superiores, devido às maiores dimensões dos moldes e das peças. Nos acabamentos (P1, P2 e P3) não se verifica a mesma tendência, sendo a geração desta tipologia de resíduo superior na RE 40.0 em comparação com a RE 59.8. A maior produção de

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

resíduos orgânicos contendo substâncias perigosas nas fases P1 e P2 da RE 40.0 pode dever-se a possível necessidade de corrigir imperfeições que tenham ocorrido nas pás de aerogerador deste modelo na altura em que a amostragem foi realizada.

O fornecimento dos reagentes nos processos de colagem e de infusão é realizado através de uma máquina que disponibiliza a quantidade selecionada. Para evitar problemas operacionais nestes equipamentos é realizado o pré-arranque e a limpeza. O pré-arranque tem como objetivo garantir que a resina e o endurecedor estão adequadamente misturados quando ocorre a infusão, existindo também a rejeição de uma certa quantidade desta mistura, garantindo que os restos de um dos reagentes que possam ter ficado na mangueira, da última limpeza, são removidos. A limpeza é realizada no fim do processo, servindo para garantir que o endurecedor e a resina não ficam a reagir nas mangueiras do equipamento, para o efeito é escoado pela mangueira apenas um dos reagentes. As matérias-primas aplicadas no pré-arranque e na limpeza acabam sempre como resíduos orgânicos contendo substâncias perigosas.

Na figura 24 são apresentadas as quantidades de resíduos gerados no pré-arranque e na limpeza das máquinas que realizam a infusão e a colagem.

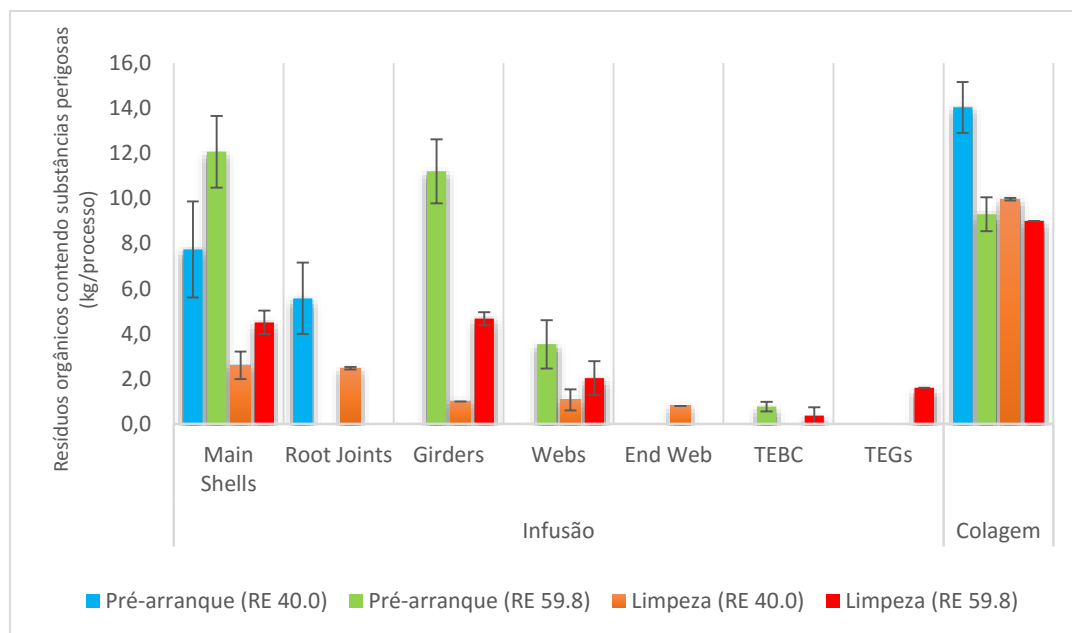


Figura 24: Resíduos orgânicos contendo substâncias perigosas gerados no pré-arranque e na limpeza das máquinas que realizam o abastecimento para a infusão e a colagem.

As máquinas que realizam o abastecimento das resinas e dos endurecedores são usadas em diversos modelos de pás de aerogerador produzidas na unidade fabril. Em algumas monitorizações da produção de resíduos não houve a necessidade de realizar o pré-arranque, pois já tinha sido realizados para os outros modelos de pás. Como é possível observar na figura 24, as quantidades de resíduos orgânicos contendo substâncias perigosas geradas nestes processos são

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

bastante significativas. Normalmente, os processos em que é detetada uma maior produção desta tipologia de resíduos são a colagem e a infusão das *Main Shells*. Na maioria dos casos o pré-arranque gera mais resíduos do que as operações de limpeza da máquina.

Na figura 25 é apresentada a quantificação dos resíduos de absorventes, panos e filtros contaminados por substâncias perigosas gerados nas diferentes fases da produção das peças que constituem a pá de aerogerador RE 40.0 e RE 59.8.

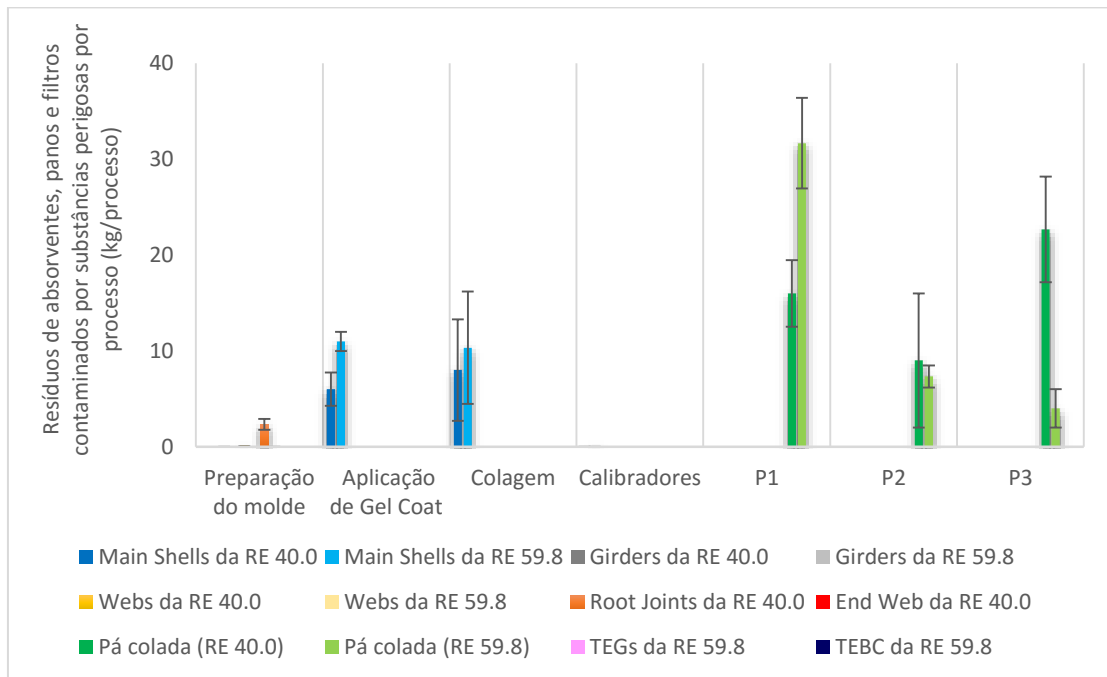


Figura 25: Indicadores da produção de resíduos de absorventes, panos e filtros contaminados com substâncias perigosas gerados nas fases de produção das peças que constituem a pá de aerogerador RE 40.0 e RE 59.8.

A maioria dos resíduos de absorventes, panos e filtros contaminados com substâncias perigosas eram originalmente equipamentos de proteção individual e rolos de pintura que foram contaminados com substâncias perigosas. Nos processos onde os operadores podem ser expostos a compostos perigosos (aplicação de *gelcoat*, colagem, operações de enchimento e pintura) ocorrem maiores produções destes resíduos. No geral, as peças que constituem a pá de aerogerador RE 59.8 geram maiores quantidades de resíduos do que a RE 40.0.

Nas fases P2 e P3 dos acabamentos verificou-se uma produção de resíduos de absorventes, panos e filtros contaminados por substâncias perigosas superior na pá de aerogerador RE 40.0 em relação à RE 59.8. Esta situação pode dever-se aos comportamentos das equipas que executam estas fases, ou seja, existe a possibilidade das equipas da RE 40.0 deitarem fora os equipamentos de proteção individual sem que estes estejam contaminados.

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

Na figura 26 apresenta-se a geração de resíduos de fibra de vidro pelas diferentes fases da produção das peças que constituem a pá de aerogerador RE 40.0 e RE 59.8, bem como nas operações de corte de fibra de vidro.

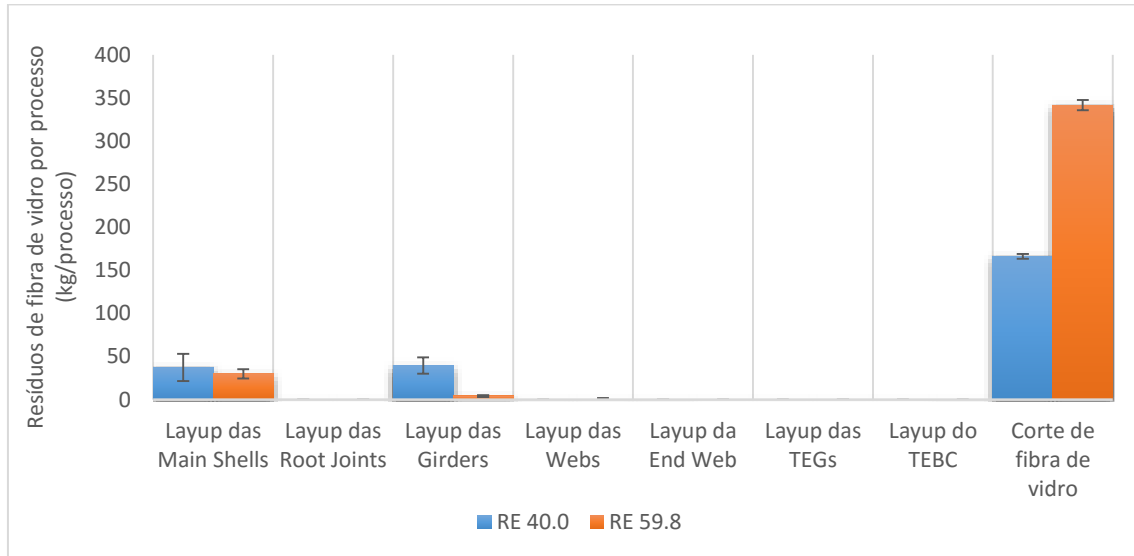


Figura 26: Resíduos de fibra de vidro gerados por processo de produção das peças que constituem as pás de aerogerador RE 40.0 e RE 59.8.

As operações de corte de fibra de vidro são as maiores responsáveis pela produção dos resíduos de fibra de vidro, sendo as produções superiores na pá de aerogerador RE 59.8 em relação à pá RE 40.0. A pá de aerogerador RE 59.8 gera mais resíduos de fibra devido às maiores quantidades de matéria-prima processada. O outro processo onde é verificada a produção de resíduos de fibra de vidro é o *layup*.

Na figura 26 é possível observar que as *Girders* da RE 40.0 geram maior quantidade de resíduos de fibra de vidro do que as *Main Shells*. Esta situação evidencia algum desperdício de fibra de vidro nas *Girders*, pois estas peças são de tamanho ligeiramente inferior às *Main Shells*. No *layup* das *Girders* da RE 40.0 verifica-se a produção de resíduos de fibra de vidro muito superior a RE 59.8. Após o processo de *layup* das *Girders*, o que sobra dos rolos deveria voltar para o armazém, no entanto verificou-se que a equipa que realiza esta operação na RE 40.0 não devolvia os rolos, deitando fora as sobras. Nas *Girders* da RE 59.8 a produção de resíduos de fibra de vidro é muito inferior, porque a equipa cumpria o protocolo de operação estabelecido.

Os resíduos de papel e cartão são uma das principais tipologias de resíduos valorizáveis na Ria Blades. Na figura 27 constam as fases do processo produtivo das pás de aerogerador, RE 59.8 e RE 40.0, que geram resíduos de papel e cartão. Os resíduos da produção das *Root Joints* da RE 59.8 não são apresentados, porque o processo produtivo é muito distinto em comparação com as restantes peças.

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

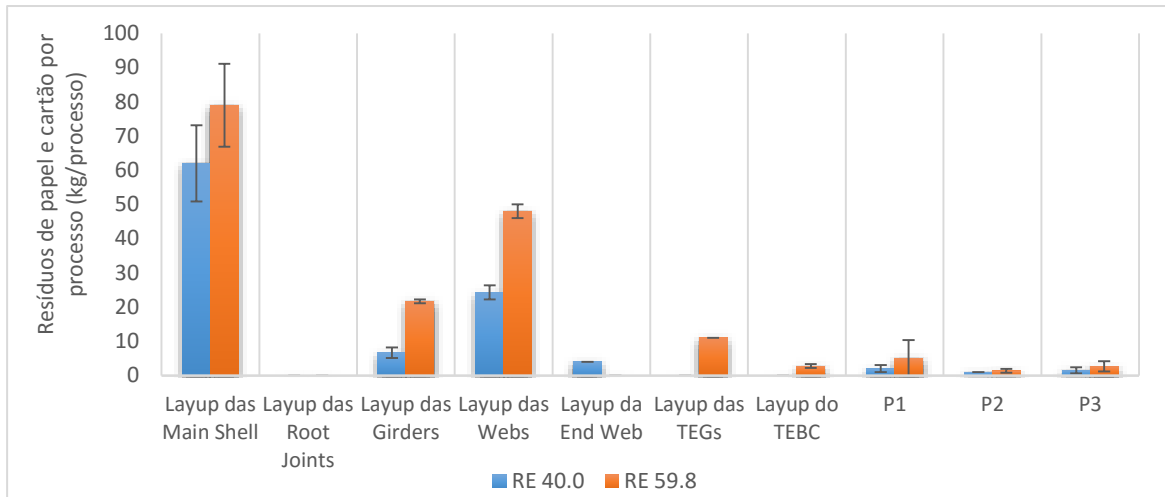


Figura 27: Resíduos de papel e cartão gerados por processo de produção das peças que constituem a pá do aerogerador RE 40.0 e RE 59.8 (com a exceção da *Root Joints* da RE 59.8).

A maioria dos resíduos de papel e cartão são produzidos nas operações de *layup*, esta geração deve-se ao facto dos diversos materiais aplicados neste processo estarem embalados em caixas de cartão. Para além das operações do *layup*, também foi detetada a produção deste tipo de resíduos nas operações de acabamentos, devido às embalagens de papel e cartão. A produção de resíduos de papel e cartão foi mais elevada nos processos e peças relativas à pá RE 59.8 do que na RE 40.0, pois na primeira é usada maior quantidade de materiais, que se encontravam embalados em caixas de cartão.

Na figura 28 são apresentados os resíduos de plásticos gerados nos processos de produção das peças das pás de aerogerador RE 40.0 e RE 59.8 (com exceção das *Root Joints* da RE 59.8). Os resíduos de plástico são apresentados segundo a tipologia, pois a fase do processo influencia o tipo de plástico gerado.

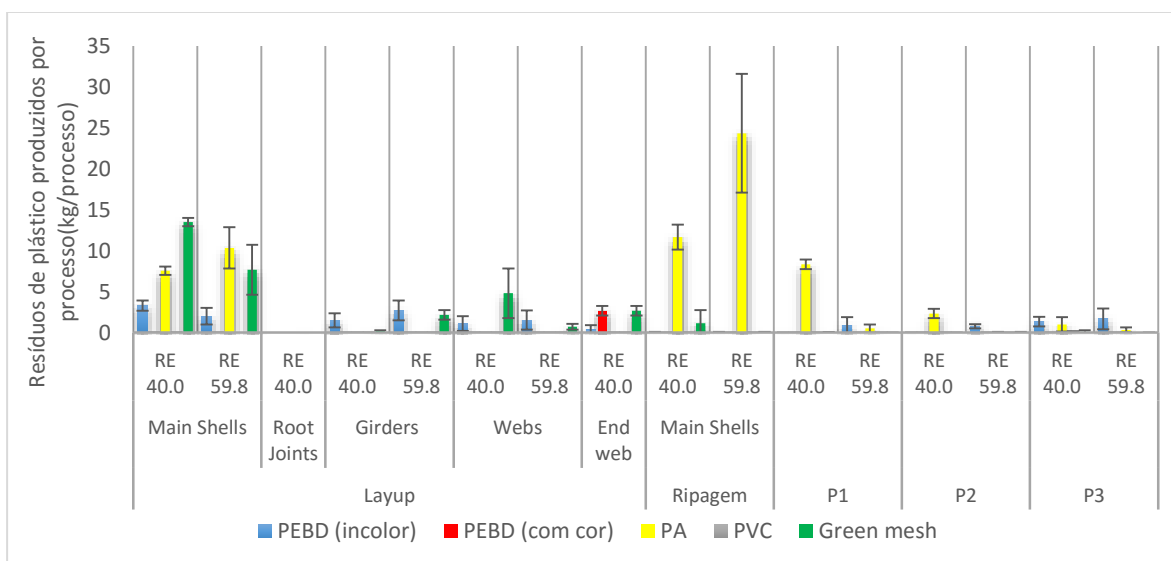


Figura 28: Resíduos de plásticos gerados nos processos de produção das peças das pás de aerogerador RE 40.0 e RE 59.8 (com exceção das *Root Joints* da RE 59.8).

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

Os resíduos de plástico surgem nos processos de *layup*, de ripagem das *Main Shells* e nas operações de acabamentos (P1, P2 e P3), sendo as principais tipologias as poliamidas (PA), o polietileno de baixa densidade (PEBD) e a *green mesh* (constituída por PEAD).

Os resíduos de poliamidas são gerados principalmente nas operações de *layup* e na ripagem das *Main Shells*. Este material é usado como saco de vácuo, envolvendo as camadas de reforço para que possa ser aplicada a infusão através de vácuo. Na ripagem das *Main Shells* é possível obter PA passível de ser valorizada, pois são aplicados dois sacos de vácuo no *layup* e um deles não fica contaminado.

Na fase P1 da pá de aerogerador RE 40.0 ocorreu a produção de quantidades significativas de poliamida, pois nas pás em que foi feita esta monitorização houve a necessidade de fazer infusão de enchimento. A infusão de enchimento é um procedimento realizado para corrigir algumas imperfeições que possam existir nas pás de aerogerador submetidas aos acabamentos.

Os resíduos de PEBD incolor têm origem nas embalagens que contêm os materiais aplicados nos processos produtivos, sendo detetados nos processos de *layup* e de acabamentos.

A maioria da *green mesh* aplicada no processo é removida na ripagem, sendo gerida como resíduo banal porque não apresenta condições de ser reciclada. No entanto, são gerados alguns resíduos de *green mesh*, no *layup* e na ripagem, que possuem os requisitos para serem encaminhados para operações de reciclagem. Ocorrem devido à necessidade de cortar os rolos deste material para ter a forma necessária para ser aplicada nos moldes.

Os resíduos de latão são originados pelos passadores (torneiras) de latão usados nos processos de infusão. Na figura 29 são apresentadas as quantidades de resíduos de latão gerados nas diversas peças que constituem as pás de aerogerador RE 59.8 e RE 40.0.

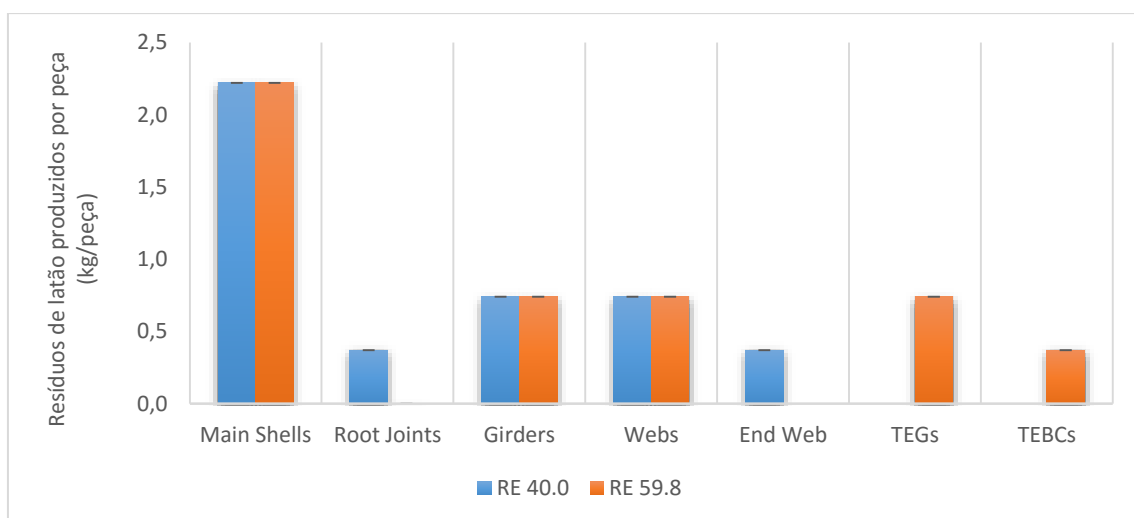


Figura 29: Resíduos de latão gerados pelas peças que constituem a pá do aerogerador RE 40.0 e RE 59.8.

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

Em ambas as pás de aerogerador, a maioria dos resíduos de latão foram gerados nas *Main Shells*. Esta situação era expectável porque é nestas peças que são aplicados o maior número de passadores (6 passadores). As *Girders*, as *Webs* e as *TEGs* originam as segundas maiores gerações de resíduos de latão, uma vez que no processo de infusão de cada uma são usados 2 passadores. No caso das *Root Joints* da RE 40.0, dos *TEBCs* e da *End Web* é apenas aplicado 1 passador de latão. Nas *Root Joints* da RE 59.8 não são gerados resíduos de latão, pois não é aplicado o processo de infusão.

Na fase P2 da produção da pá de aerogerador RE 59.8, foram produzidos $4,7 \pm 1,2$ kg de limalhas de metais ferrosos. A geração deste resíduo deve-se ao facto de na fase P2 da RE 59.8 ser feita a colocação dos encaixes metálicos, havendo a necessidade de limar estas peças metálicas.

O processo de produção das *Root Joints* da pá de aerogerador RE 59.8 é realizada com recurso à técnica de *prepreg*, uma vez que esta técnica é muito distinta das aplicadas nas restantes peças que constituem uma pá de aerogerador produzida na Ria Blades. Os resultados da contabilização são apresentados separadamente (figura 30).

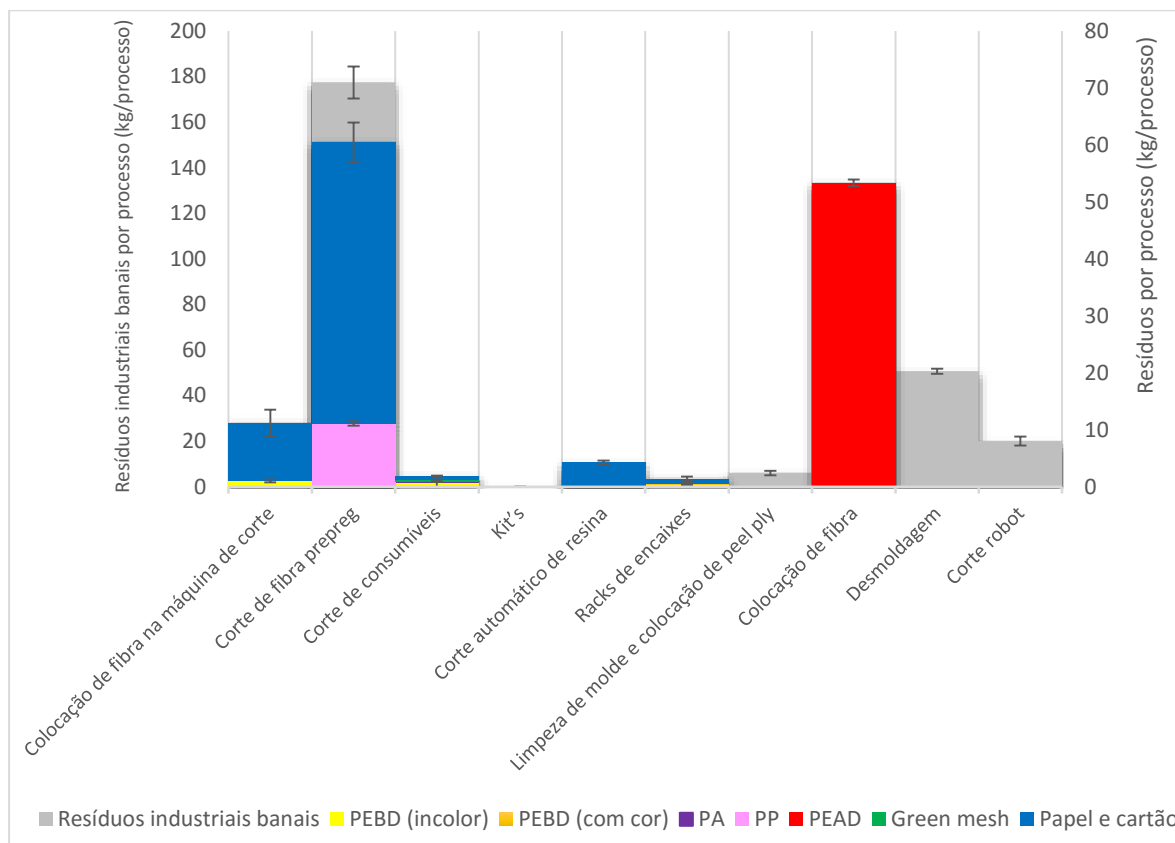


Figura 30: Resíduos gerados na produção das *Root Joints* da pá de aerogerador RE 59.8

A maioria dos resíduos gerados nas *Root Joints* da RE 59.8 (técnica *prepreg*) são banais, sendo gerados nos processos de corte de fibra *prepreg* (maior parte dos resíduos), na desmoldagem e no corte de robot. Os resíduos de fibra *prepreg* gerados nos processos de corte são submetidos ao processo de cura numa estufa, sendo posteriormente geridos com resíduos banais.

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

Os resíduos banais gerados na desmoldagem e no corte de robot são respetivamente associados à remoção dos consumíveis e ao corte das extremidades da peça para que fique com a forma necessária.

Nas *Root Joints* da pá de aerogerador RE 59.8 são geradas quantidades significativas de papel e cartão. Estes resíduos são gerados, maioritariamente, nos processos de corte de fibra *prepreg* e na colocação de fibra na máquina de corte. No corte de fibra *prepreg* é necessário colocar uma camada de papel para proteger a máquina contra possíveis danos, após o processo o papel torna-se num resíduo. Na colocação de fibra na máquina de corte são originados resíduos de cartão, devido aos rolos em que as matérias-primas chegam à unidade fabril.

A colocação da fibra *prepreg* é uma das etapas do *layup* das *Root Joints* da RE 59.8, originando quantidades significativas de polietileno de alta densidade. Este é o resíduo de plástico gerado em maior quantidade nesta peça. O PEAD é usado para evitar que as camadas de fibra *prepreg* colem umas nas outras, enquanto estão nos rolos.

Na figura 31 é estabelecida a comparação entre os resíduos produzidos nas *Root Joints* da pá de aerogerador RE 40.0 na qual é aplicada a técnica de infusão e RE 59.8 onde é usado o processo de *prepreg*.

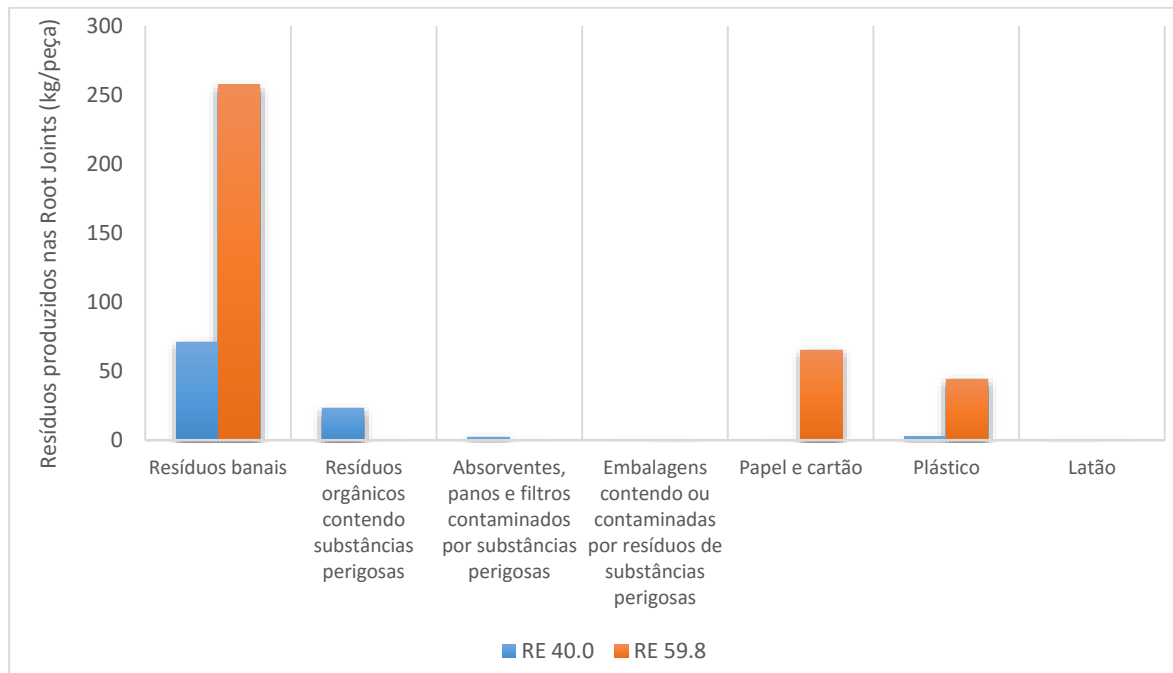


Figura 31: Comparação dos resíduos gerados na produção das *Root Joints* da pá de aerogerador RE 40.0 e RE 59.8.

Nas *Root Joints* da pá de aerogerador RE 59.8 (técnica de *prepreg*), ocorre uma maior produção de resíduos banais, de papel e de plástico do que na RE 40.0 (técnica de infusão). Em contrapartida, quando é aplicada a técnica de infusão ocorre a produção de uma maior quantidade de resíduos perigosos. A comparação da produção de resíduos associados a estas duas técnicas possui algumas limitações devido ao facto das dimensões das peças serem diferentes.

5.3.2. Indicadores de produção de resíduos por matéria-prima

Os indicadores da produção de resíduos por quantidade de matérias-primas, aplicadas no processo de fabrico, foram desenvolvidos apenas para algumas tipologias de resíduos. Esta metodologia foi aplicada porque alguns resíduos são constituídos pela mistura de diversas matérias-primas, sendo difícil identificar os materiais presentes com os recursos disponíveis na fábrica.

Na figura 32 são apresentados os indicadores de produção de resíduos orgânicos contendo substâncias perigosas, gerados em função das matérias-primas (resinas e endurecedores), usadas na infusão e na colagem das diversas peças que constituem a pá de aerogerador.

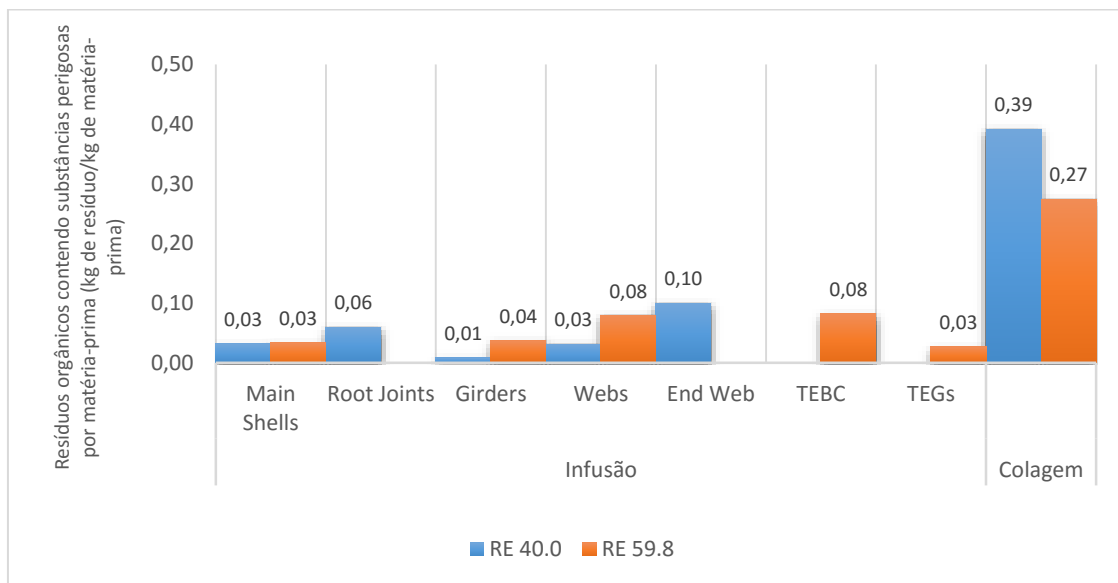


Figura 32: Resíduos orgânicos contendo substâncias perigosas gerados em função das matérias-primas usadas nos processos de infusão e de colagem.

Os indicadores de produção de resíduos orgânicos contendo substâncias perigosas geradas por unidade de massa de matéria-prima utilizada atingem o valor mais elevado no processo de colagem, porque uma grande parte da cola utilizada necessita de ser removida após a compactação das peças. Na infusão da *End Web* da RE 40.0 e do *TEBC* da RE 59.8 verificam-se as maiores gerações deste tipo de resíduos por matéria-prima aplicada. Nas *Girders* e nas *Webs* verifica-se uma grande discrepância neste indicador entre a RE 40.0 e a RE 59.8, evidenciando que na RE 59.8 está a ocorrer um grande desperdício de resina e de endurecedor, possivelmente, devido à utilização de quantidades inadequadas de matérias-primas.

Na figura 33 constam os indicadores dos resíduos de fibra de vidro gerados em função do consumo de matérias-primas (fibra de vidro) aplicadas no processo de *layup* e no corte de fibra de vidro para a pá de aerogerador RE 40.0 e RE 59.8.

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

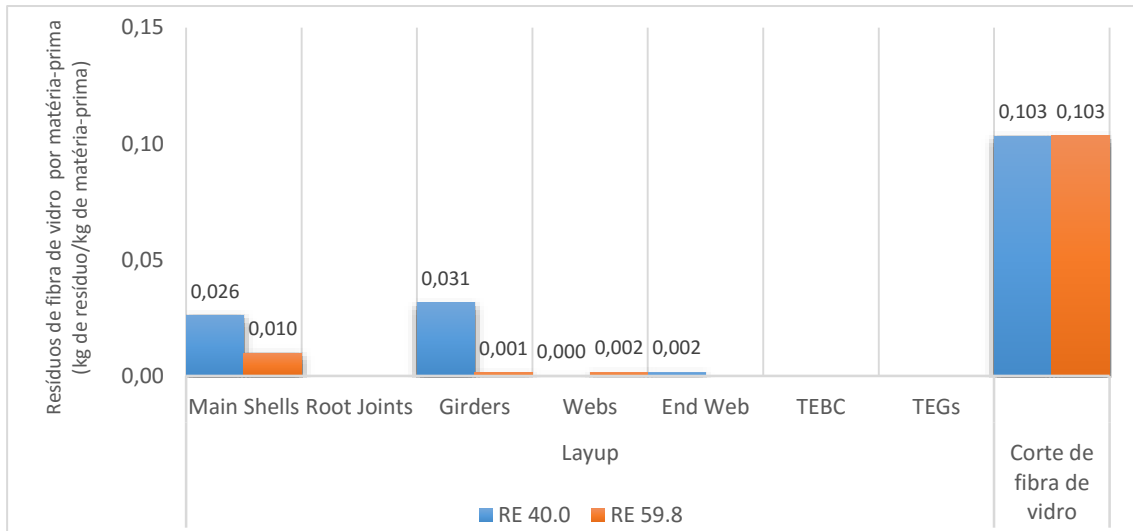


Figura 33: Resíduos de fibra de vidro gerados em função das matérias-primas (fibra de vidro) usadas no processo de *layup* e de corte de fibra de vidro para a pá de aerogerador RE 40.0 e RE 59.8.

O processo de corte de fibra vidro é o processo onde é detetado um maior desperdício de fibra de vidro tendo em conta a matéria-prima usada, nas duas pás de aerogerador analisadas o desperdício ronda os 10%.

Nas *Main Shells* e nas *Girders* verificou-se que o desperdício, por unidade de matéria-prima usada, é superior na RE 40.0 relativamente à RE 59.8. No caso das *Girders* esta situação deveu-se à não devolução dos restos dos rolos ao armazém. No *layup* das *Main Shells* é sempre expectável a produção de uma certa quantidade de resíduos de fibra de vidro, pois os rolos usados têm uma quantidade ligeiramente superior ao necessário, devido à fibra ter uma certa elasticidade, o que pode levar a ligeiras variações do comprimento dos rolos no enrolamento após o corte e o desenrolamento para aplicar no molde.

Nesta unidade fabril as sobras não contaminadas de *green mesh* voltam para os armazéns, onde é avaliado se têm as dimensões necessária para serem reutilizadas. Na figura 34 apresenta-se os resíduos deste polímero gerado por quantidade de matérias-primas aplicadas.

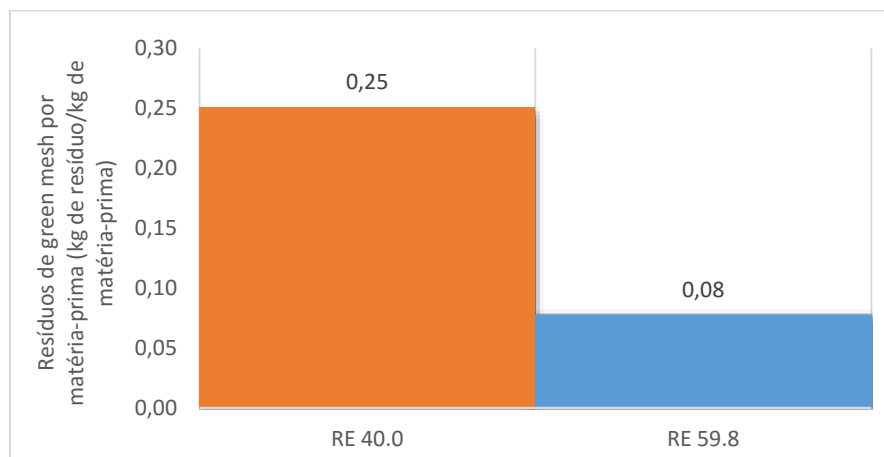


Figura 34: Resíduos de *green mesh* gerados pela quantidade desta matéria-prima aplicada na pá de aerogerador RE 40.0 e RE 59.8.

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

Através da figura 34 é possível visualizar que ocorre um grande desperdício de *green mesh*. O desperdício de *green mesh*, em função das matérias-primas, é inferior na pá de aerogerador RE 59.8 do que na RE 40.0. Uma possível explicação para esta situação é o facto de os rolos terem dimensões mais próximas das necessárias para os moldes da pá de aerogerador RE 59.8, não sendo necessário proceder a tantos cortes para atingir a forma desejada.

A produção de resíduos industriais banais com origem no corte de fibra *prepreg* para a pá de aerogerador RE 59.8 é de cerca de 0,15 kg de RIB/kg de fibra *prepreg*, ou seja, 15% das matérias-primas acabam como resíduo.

5.3.3. Indicadores de produção de resíduos em função da pá de aerogerador

Os dados coletados ao longo deste estágio permitiram elaborar indicadores da geração de resíduos por pá de aerogerador e pelo peso final da pá de aerogerador e uma caracterização percentual das tipologias dos resíduos gerados na produção das pás de aerogerador.

A figura 35 ilustra as quantidades de resíduos gerados nos armazéns por pá de aerogerador. Esta quantificação foi realizada numa base temporal, ou seja, ocorreu a pesagem dos resíduos gerados, nos armazéns, num determinado intervalo de tempo. De seguida, foi realizada uma estimativa dos resíduos por pá de aerogerador, através do número de pás produzidas nesse período. Na contabilização dos resíduos originados nos armazéns foi assumido que as quantidades geradas são iguais para todos os tipos de aerogerador.

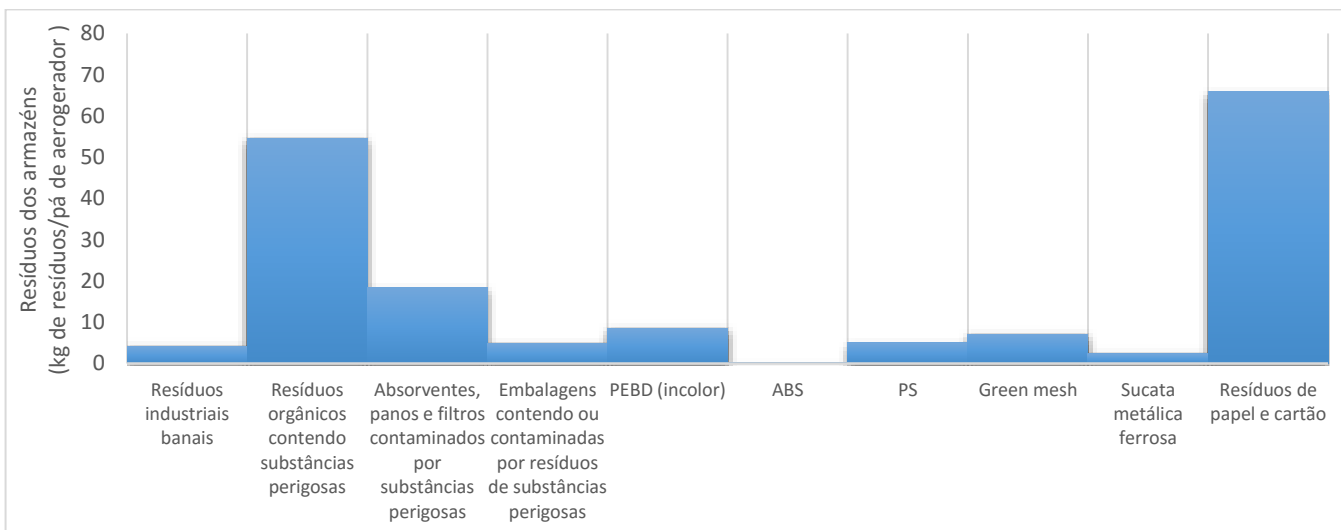


Figura 35: Resíduos gerados nos armazéns por pá de aerogerador.

A tipologia de resíduos gerados em maiores quantidades nos armazéns são os resíduos papel e cartão, sendo originados pelos rolos e embalagens em que os materiais chegam à unidade fabril. Os resíduos industriais perigosos são relevantes, tendo origem em operações de distribuição e

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

manipulação de substâncias perigosas. Nestes locais também ocorreu a geração de resíduos de plástico, sendo a grande maioria proveniente de embalagens, com exceção da *green mesh*.

Na figura 36 encontra-se ilustrada a distribuição dos resíduos produzidos nas pás de aerogerador RE 40.0 e RE 59.8.

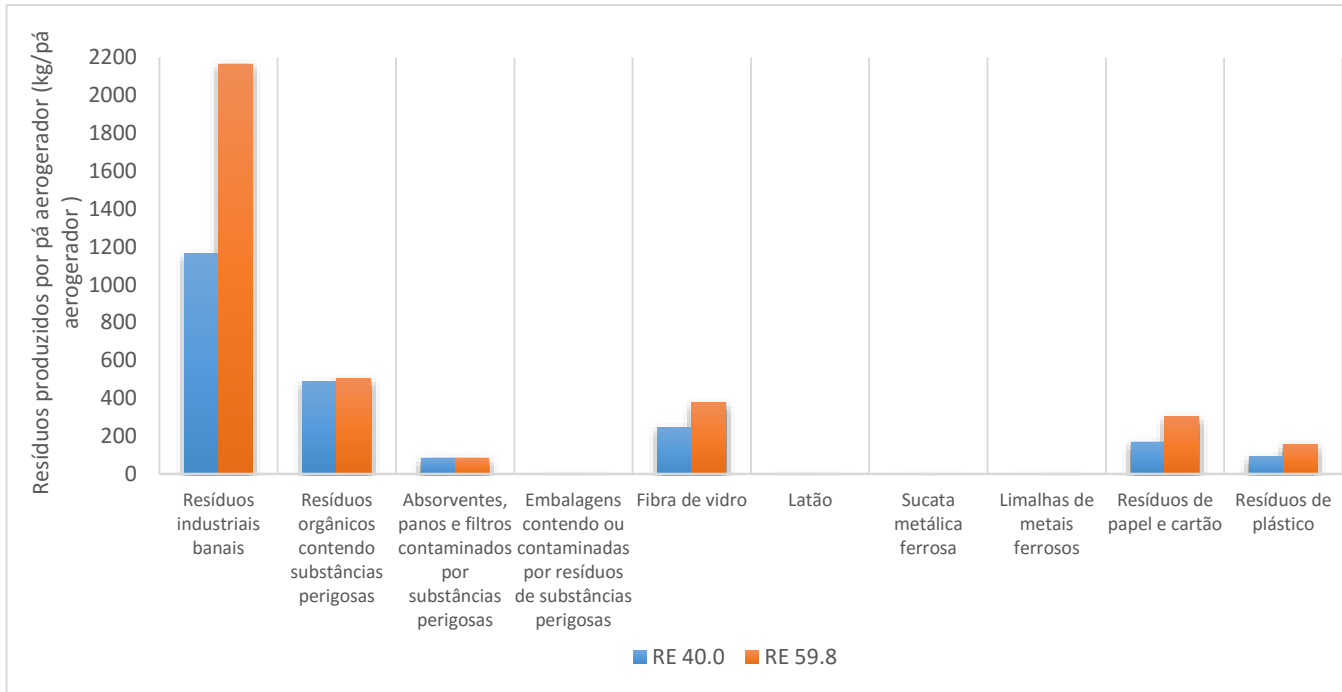


Figura 36: Resíduos gerados numa pá de aerogerador RE 40.0 e RE 59.8.

Na figura 36 é visível que em ambos os modelos e pás de aerogerador a maioria dos resíduos gerados são banais, detetando-se no modelo de maiores dimensões (RE 59.8) uma maior produção. Os resíduos orgânicos contendo substâncias perigosas são a segunda tipologia com maiores produções, sucedendo que a RE 59.8 produz uma quantidade ligeiramente superior à RE 40.0. A fibra de vidro é o terceiro resíduo mais produzido por pá de aerogerador, na pá de aerogerador RE 40.0 detetou-se uma menor geração deste tipo de resíduos em comparação com a RE 59.8. Os resíduos de papel e cartão e de plástico são outras tipologias que possuem uma importante produção, sendo posteriormente submetidos a operações de valorização.

Na figura 37 encontram-se ilustrados os resíduos de plásticos produzidos por pá de aerogerador (RE 40.0 e RE 59.8).

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

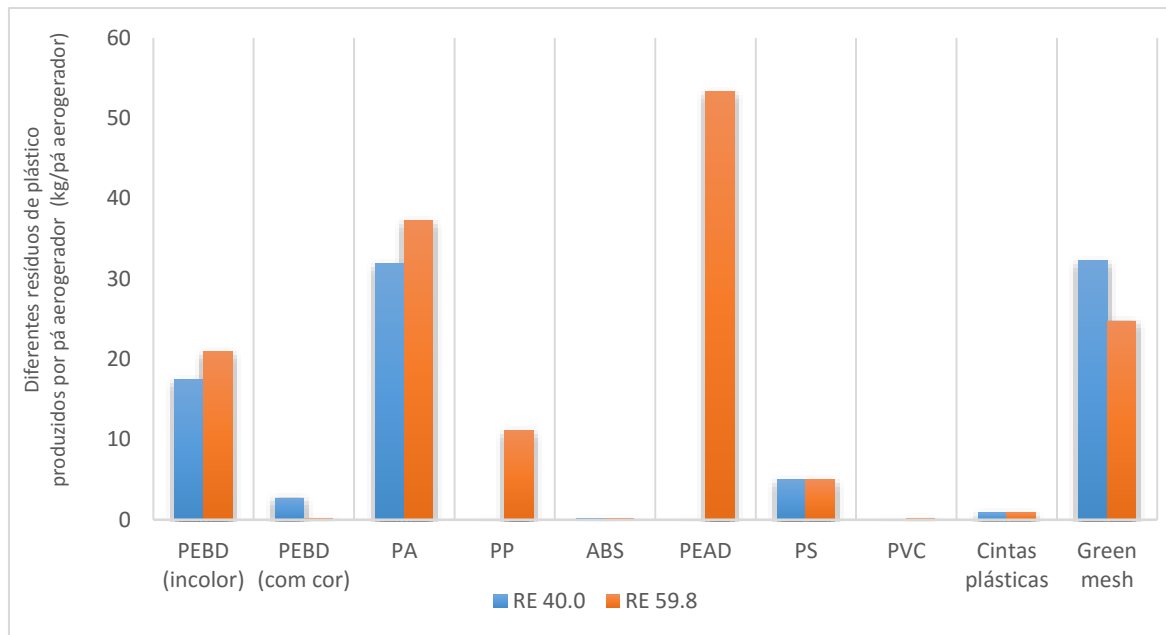


Figura 37: Resíduos de plásticos gerados numa pá de aerogerador RE 40.0 e RE 59.8.

O polietileno de alta densidade é o tipo de plástico produzido em maior quantidade, tendo origem apenas nas *Root Joints* da RE 59.8. Em relação aos resíduos plásticos que ocorrem em ambas as tipologias de pás de aerogerador, a poliamida é o tipo de plástico em que se verificou maiores produções em ambas as tipologias. No global, a produção da pá de aerogerador RE 59.8 origina mais resíduos de plástico, de todas as tipologias, que a produção da RE 40.0, com a exceção do PEBD com cor e da *green mesh*.

Na figura 38 são apresentados os resíduos produzidos em função do peso das pás de aerogerador RE 40.0 e RE 59.8.

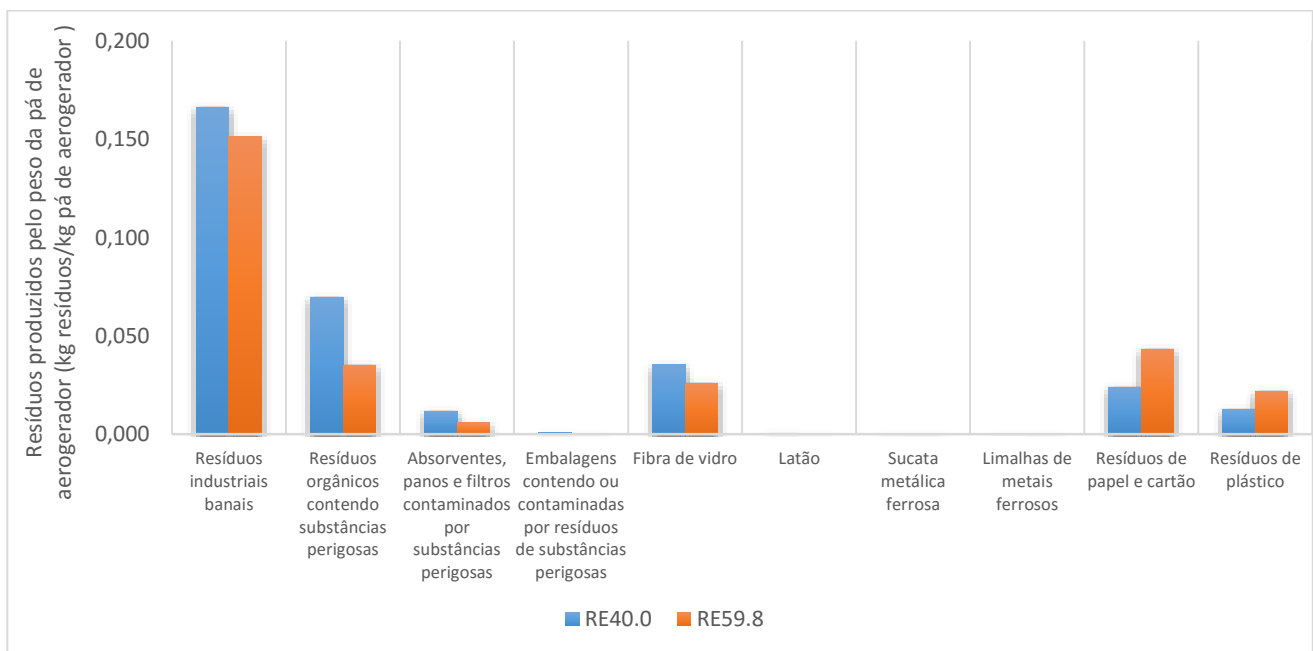


Figura 38: Resíduos gerados em função do peso de uma pá de aerogerador RE 40.0 e RE 59.8.

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

Na figura 38 é possível observar que a produção de resíduos banais, de resíduos incluídos na categoria dos RIP e de fibra de vidro, em função do peso da pá de aerogerador, são superiores nos modelos RE 59.8 relativamente ao RE 40.0. O mesmo não ocorre nos resíduos de papel, de cartão e de plástico, na qual a geração é superior na RE 59.8. A maior geração de resíduos banais, em função do peso da pá de aerogerador, na pá RE 40.0 em relação a RE 59.8, pode dever-se a menor valorização dos plásticos em função do peso deste modelo, sendo estes polímeros geridos como RIB.

Na figura 39 é apresentada a análise, em termos de percentagem, dos diferentes resíduos gerados na produção das pás de aerogerador RE 40.0 e RE 59.8.

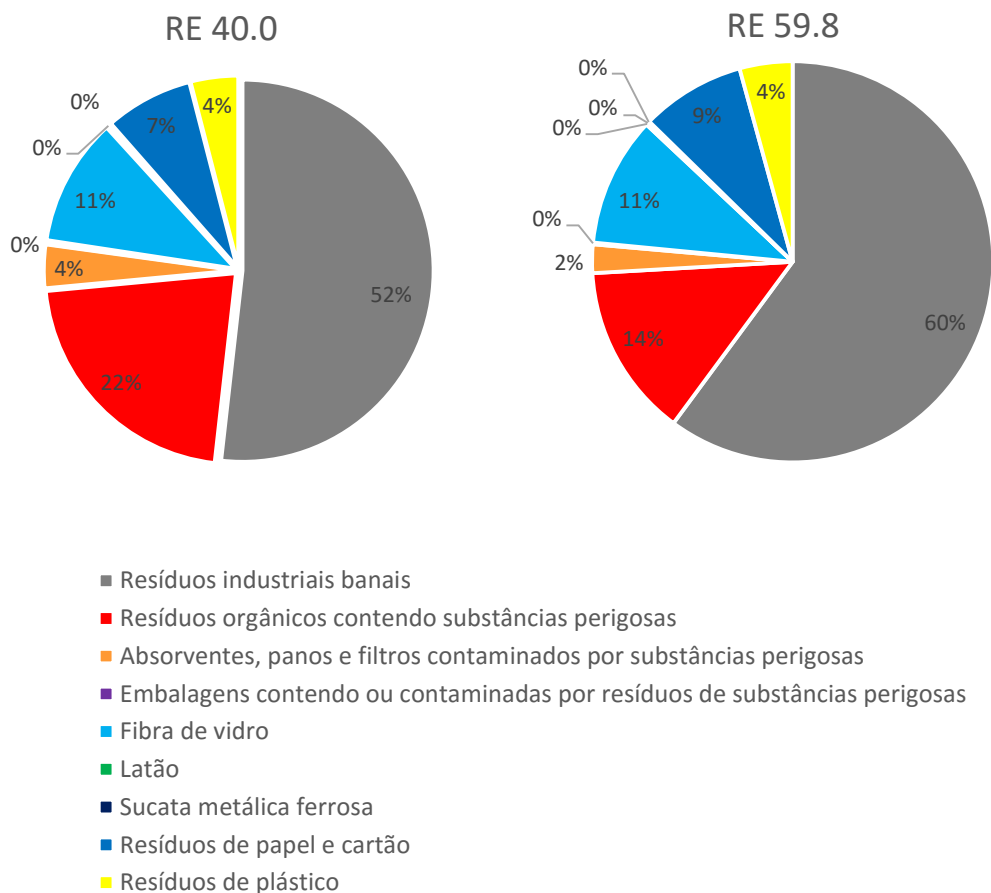


Figura 39: Percentagens dos diferentes resíduos gerados na produção da pá de aerogerador RE 40.0 e RE 59.8.

Na figura 39 é possível observar que a maior parte dos resíduos gerados no processo de manufatura de pás de aerogerador são associados aos resíduos banais, sendo importante identificar soluções que melhorem a gestão dos mesmos. Os resíduos orgânicos contendo substâncias perigosas representam a segunda maior fração gerada. A fibra de vidro é um resíduo inerte que tem como destino a deposição em aterro, ou seja, uma operação de eliminação com significativos impactos ambientais. Os resíduos encaminhados para reciclagem (papel, cartão,

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

plásticos, latão e metais ferrosos) correspondem apenas a uma pequena parte dos resíduos gerados no processo de produção de pás de aerogerador.

Capítulo VI. Soluções para os resíduos sólidos gerados na Ria Blades

Através dos indicadores de produção dos resíduos e dos conhecimentos adquiridos no contexto deste estágio é possível sugerir algumas soluções alternativas para a gestão dos resíduos sólidos gerados na Ria Blades durante a produção de pás de aerogerador.

Os resíduos banais gerados na Ria Blades são, atualmente, encaminhados para cimenteira para que ocorra a valorização energética e material. No entanto esta técnica tem impactos ambientais associados ao transporte dos resíduos e económicos devido ao pagamento de taxas exigidas pelas cimenteiras. Uma possível alternativa para a gestão dos RIB gerados nesta unidade fabril pode ser o tratamento térmico dos resíduos com a recuperação de energia em unidades integradas na fábrica, sendo a energia gerada usada para satisfazer algumas necessidades energéticas deste complexo industrial. Os moldes aplicados nos processos de produção da pá de aerogerador necessitam de ser aquecidos, causando um certo consumo de energia elétrica. A incineração com reaproveitamento de energia, num processo integrado na unidade fabril poderia reduzir os impactes ambientais associados à gestão dos resíduos e ao consumo energético. No entanto, a implementação desta solução é muito difícil, devido aos elevados custos associados.

Os resíduos banais gerados na Ria Blades são compostos, maioritariamente, por compósitos de fibra, de resina epoxídica e de madeira e por plásticos contaminados, que não apresentam condições para serem reciclados. A valorização em cimenteira ou a incineração com reaproveitamento de energia parecem ser as melhores soluções para valorizar os plásticos que não podem ser reciclados e os compósitos contendo elevados teores de madeira e de polímeros.

Uma vez que na categoria de resíduos industriais banais, gerados na Ria Blades, são englobados diversos tipos de materiais, seria benéfico realizar uma caracterização mais detalhada dos mesmos, que permita definir melhores soluções para a sua gestão. Também pode ser importante conhecer a composição elementar, o poder calorífico, a granulometria das partículas, os teores de cinzas, de humidade e de voláteis, entre outros parâmetros.

Algumas possíveis soluções para os resíduos de fibra de vidro gerados na Ria Blades passam pela redução na origem e pelo reaproveitamento noutros processos produtivos. A valorização dos resíduos de fibra de vidro gerados nos processos de produção de pás de aerogerador pode ser realizada pela criação de protocolos com unidades fabris que consigam introduzir este resíduo no seu processo produtivo de uma forma economicamente viável. Alguns produtos em que resíduos de fibra de vidro podem ser aplicados são automóveis, barcos, canos, reservatórios de armazenamento (Cameron e Rapp, 2001), capacetes, brinquedos, asfalto e argamassas de cimento.

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

No entanto, a implementação desta solução é complexa, pois os resíduos de fibra de vidro podem não possuir qualidade suficiente para serem usados na produção destes produtos.

Os resíduos perigosos gerados na Ria Blades não são submetidos a nenhum tratamento na unidade fabril, sendo encaminhados para serem geridos por entidades apropriadas. A gestão dos resíduos orgânicos contendo substâncias perigosas, na Ria Blades, pode ser melhorada através da redução na origem da quantidade e da perigosidade. A perigosidade dos resíduos pode ser reduzida através da aplicação de substâncias com menor perigosidade.

As quantidades de resíduos orgânicos contendo substâncias perigosas na Ria Blades pode ser reduzida através duma otimização das quantidades necessárias de reagentes nos processos de infusão e de colagem, evitando situações em que são aplicadas quantidades excessivas de resinas e de outras substâncias que acabam, inevitavelmente, como resíduos.

No fornecimento dos reagentes nos processos de colagem e de infusão ocorrem operações de limpeza e pré-arranque. As quantidades de resíduos gerados nestes processos são bastante significativas e, portanto, a redução das quantidades gastas seria uma mais-valia, desde que não acarrete implicações operacionais. Uma possível sugestão para melhorar a gestão dos resíduos passa pela otimização das quantidades necessárias para o pré-arranque e para limpeza, reduzindo o desperdício de recursos e diminuindo a geração de resíduos.

A separação das frações valorizáveis dos resíduos é realizada com uma eficácia relativamente elevada, no entanto, o grande número de trabalhadores e os constantes fluxos de entrada de novos contratados e de saída de colaboradores não permite uma melhor segregação. Este problema pode ser melhorado com uma maior sensibilização para a temática e com um controlo mais exigente por parte dos responsáveis de cada operação. Uma melhor separação dos resíduos pode ser fomentada através da atribuição de incentivos monetários. Refira-se a título de exemplo que existem organizações que oferecem remunerações caso a separação seja bem realizada ou reduzem os prémios dos responsáveis na eventualidade de ocorrer inconformidades na área sobre a sua responsabilidade.

Os resíduos de papel, cartão e plástico podem ser reduzidos, significativamente, através da redução na origem, comprando materiais que possuam menos embalagens.

Através das contabilizações realizadas no contexto deste trabalho verificou-se que ocorre um grande desperdício de *green mesh*. O desperdício deste tipo de plástico não representa apenas um problema para a gestão de resíduos, mas também um consumo desnecessário de recursos. Para além dos impactos ambientais associados a este desperdício existem custos económicos relativamente elevados. Com base na amostragem de um dia, estima-se que a quantidade de resíduos de *green mesh* gerados num mês seja de 938 kg.

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

Tendo em conta os desperdícios elevados de *green mesh* foi criado um plano de ação, que se encontra em fase de implementação. Este plano é baseado nas seguintes ações:

- ❖ Revisão e atualização das quantidades (largura e comprimento) necessárias para todos os projetos ao nível da *Main Shell*;
- ❖ Elaboração de planos para o corte da *green mesh* aplicadas nas *Webs* e nas *End Web* para que os rolos tenham as dimensões apropriadas;
- ❖ Alocação clara dos carros de abastecimento aos projetos de *pre-fabs*;
- ❖ Identificação dos metros em excesso nos rolos de *green mesh* que são devolvidos ao armazém;
- ❖ Elaboração de um teste para avaliar a exequibilidade do abastecimento desenvolvido com base no sistema de *Kanban*. A premissa do sistema de *Kanban* é que o material não irá ser produzido ou movido até que seja enviado um sinal (por exemplo, cartões *kanban*) para o fazer. Esta técnica permite reduzir os desperdícios e os resíduos gerados (Rahman *et al.*, 2013). Neste caso, a *green mesh* apenas será fornecida as equipas responsáveis pela produção das peças quando for enviado um sinal, indicando que este material é necessário.

Capítulo VII. Síntese conclusiva

A Ria Blades encontra-se certificada segundo a NP EN ISO 14001, sendo a melhoria contínua um dos pilares dos sistemas de gestão ambiental concordantes com esta norma. A melhoria contínua do desempenho ambiental é um dos compromissos assumidos pela organização, recorrendo ao investimento em tecnologias e em processos ambientalmente adequados, nomeadamente à capacidade de valorização dos resíduos gerados.

A um Sistema de Gestão Ambiental estão associados indicadores de desempenho, que devem monitorizados numa perspetiva de melhoria continua. No âmbito deste estágio propuseram-se e avaliaram-se indicadores relacionados com a produção de resíduos.

A Ria Blades tem desenvolvido esforços para aplicar os materiais, as técnicas produtivas e as soluções de gestão ambiental que permitam reduzir os impactos ambientais associados à sua atividade industrial. Este esforço é visível na gestão dos resíduos, através da trituração dos resíduos industriais banais, das operações de prensar os consumíveis (papel, o cartão e os plásticos), da reutilização de alguns rejeitados, da sensibilização dos colaboradores para a correta separação dos resíduos, do encaminhamento para operações de valorização dos resíduos valorizáveis, no empenho na redução na origem e na melhoria contínua.

Através das contabilizações verificou-se que as composições dos resíduos variam de acordo com as dimensões das pás de aerogerador produzidas. As pás de aerogerador RE 40.0 (com 40 metros) e RE 59.8 (com 59.8 metros) geram resíduos de acordo com as distribuições seguintes, respetivamente: 52% e 60% de resíduos industriais banais, 22% e 14% de resíduos orgânicos contendo substâncias perigosas, 11% e 11% de fibra de vidro, 7% e 9% de papel e cartão, 4% e 4% de plástico e 4% e 2% de outros resíduos.

Através dos indicadores criados conclui-se que os RIB são a tipologia gerada em maior quantidade por pá de aerogerador na unidade fabril, esta produção deve-se à diversidade de matérias não perigosas incluídas nesta categoria. Devido à produção significativa destes resíduos seria muito interessante atuar de forma a melhorar o desempenho ambiental.

Os resíduos orgânicos contendo substâncias perigosas são o segundo grupo de resíduos produzidos em maior quantidade. Uma vez que este tipo de resíduos tem riscos significativos para o ambiente e para a saúde humana, é essencial aplicar medidas que visem a sua redução na origem. Através dos indicadores criados foi possível verificar que as quantidades produzidas variam muito de acordo com a equipa de trabalho em cada operação, existindo um grande potencial para otimização do processo.

Os absorventes, panos e filtros contaminados por substâncias perigosas são constituídos, maioritariamente, por equipamentos de proteção individual usados. Em diversas ocasiões

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

constatou-se que eram depositados nos recipientes destinados a esta categoria equipamentos de proteção individual novos, que não estavam contaminados por qualquer substância. Parece essencial que ocorra uma maior sensibilização dos trabalhadores de forma a evitar o consumo de recurso e a geração de resíduos.

Os resíduos de fibra de vidro são a terceira tipologia de rejeitados gerados em maior quantidade na Ria Blades. Atualmente, como têm como destino a eliminação, qualquer solução que permita a sua valorização é uma mais-valia. No entanto, a valorização é complexa devido ao baixo valor económico desta matéria-prima.

Na Ria Blades existe um grande esforço no sentido de encaminhar para valorização os resíduos que tem potencial para serem submetidos a estas operações, mas existem alguns problemas relacionadas com a incorreta segregação por parte dos operadores.

Uma que vez na Ria Blades são usadas duas técnicas distintas para produzir as *Root Joints* das pás de aerogerador, foi possível realizar uma comparação dos resíduos gerados em ambos os processos. Conclui-se que na técnica de *prepregs* ocorre um maior produção de resíduos banais e de subprodutos associados aos consumíveis que podem ser valorizados. Pelo contrário nas técnicas de infusão ocorre a produção de uma maior quantidade de resíduos perigosos. Apesar dos processos *prepregs* não gerarem quantidades significativos de resíduos perigosos, produzem grandes quantidades de outras tipologias de resíduos que necessitam de ser submetidos a algum nível de tratamento.

No futuro haverá a necessidade de realizar novas monitorizações dos processos que permitam acompanhar a evolução do processo produtivo e identificar novas oportunidades de melhoria.

A realização deste estágio curricular permitiu a aquisição de conhecimentos técnicos não só nas áreas abrangidas no presente relatório, mas também em várias áreas relacionadas com a Engenharia do Ambiente. Através deste estágio foi possível constatar a importância de uma adequada gestão dos resíduos numa grande unidade industrial, não só para reduzir os impactes ambientais negativos, mas também para alcançar vantagens económicas.

Referências bibliográficas

- Achilias, D. S., Roupakias, C., Megalokonomos, P., Lappas, A. A., & Antonakou, E. V. (2007). Chemical recycling of plastic wastes made from polyethylene (LDPE and HDPE) and polypropylene (PP). *Journal of Hazardous Materials*, 149(3), 536–42.
- Azapagic, A., Emsley, A., & Hamerton, I. (2003). *Polymers: The Environment and Sustainable Development*. London: John Wiley & Sons Ltd.
- Baidya, R., Ghosh, S. K., & Parlikar, U. V. (2016). Co-processing of Industrial Waste in Cement Kiln – A Robust System for Material and Energy Recovery. *Procedia Environmental Sciences*, 31, 309–317.
- Busby, R. L. (2012). *Fundamentals of Windpower*. Tulsa: PennWell.
- Cameron, N. M., & Rapp, C. F. (2001). *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*. Elsevier.
- Castro, A., & Amico, S. (2009). Utilização de fibras de vidro picadas oriundas de resíduos na substituição parcial de mantas de fibra de vidro em compósitos. In Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Ed.), *10º Congresso Brasileiro de Polímeros* (p. 9). Foz do Iguaçu, Brasil.
- Cherrington, R., Goodship, V., Meredith, J., Wood, B. M., Coles, S. R., Vuillaume, A., ... Kirwan, K. (2012). Producer responsibility: Defining the incentive for recycling composite wind turbine blades in Europe. *Energy Policy*, 47, 13–21.
- Conradie, A. E., & Kröger, D. G. (1996). Performance evaluation of dry-cooling systems for power plant applications. *Applied Thermal Engineering*, 16(3), 219–232.
- Cortada Mut, M. del M., Nørskov, L. K., Frandsen, F. J., Glarborg, P., & Dam-Johansen, K. (2015). Review: Circulation of Inorganic Elements in Combustion of Alternative Fuels in Cement Plants. *Energy & Fuels*, 29(7), 4076–4099. American Chemical Society.
- Det Norske Veritas, & Risø National Laboratory. (2002). *Guidelines for Design of Wind Turbines*. Copenhagen: DNV;Risø.
- Dhir, R. K., Limbachiya, M. C., & Newlands, M. D. (2001). *Recovery and Recycling of Paper* (1st ed.). London: Thomas Telford.
- Ervasti, I., Miranda, R., & Kauranen, I. (2016). Paper recycling framework, the “Wheel of Fiber”. *Journal of Environmental Management*, 174, 35–44.

- Feih, S., Mouritz, A. P., & Case, S. W. (2015). Determining the mechanism controlling glass fibre strength loss during thermal recycling of waste composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 76, 255–261.
- Ferrotti, G., Canestrari, F., Pasquini, E., & Virgili, A. (2012). Experimental evaluation of the influence of surface coating on fiberglass geogrid performance in asphalt pavements. *Geotextiles and Geomembranes*, 34, 11–18.
- Hau, E., & von Renouard, H. (2006). *Wind Turbines*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Keleştemur, O., Arıcı, E., Yıldız, S., & Gökçer, B. (2014). Performance evaluation of cement mortars containing marble dust and glass fiber exposed to high temperature by using Taguchi method. *Construction and Building Materials*, 60, 17–24.
- Kruse, T. M., Wong, H. W., & Broadbelt, L. J. (2003). Mechanistic modeling of polymer pyrolysis: Polypropylene. *Macromolecules*, 36(25), 9594–9607.
- LaGrega, M. D., Buckingham, P. L., & Evans, J. C. (2010). *Hazardous Waste Management* (2nd ed.). Long Grove: Waveland Press.
- Larsen, K. (2009). Recycling wind turbine blades. *Renewable Energy Focus*, 9(7), 70–73.
- López, F. A., Martín, M. I., Alguacil, F. J., Rincón, J. M., Centeno, T. A., & Romero, M. (2012). Thermolysis of fibreglass polyester composite and reutilisation of the glass fibre residue to obtain a glass–ceramic material. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 93, 104–112.
- Mallick, P. K. (2007). *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing and design*. New York: Marcel Dekker.
- Miranda, M. (2009). *Reciclagem Termoquímica de Resíduos de Plásticos e de Pneus por Pirólise* (doctoral thesis, Universidade de Aveiro). Universidade de Aveiro.
- Oliveux, G., Bailleul, J.-L., & Salle, E. L. G. La. (2012). Chemical recycling of glass fibre reinforced composites using subcritical water. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43(11), 1809–1818.
- Panda, A. K., Singh, R. K., & Mishra, D. K. (2010). Thermolysis of waste plastics to liquid fuel A suitable method for plastic waste management and manufacture of value added products—A world prospective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 233–248.
- Papadakis, N., Ramírez, C., & Reynolds, N. (2010). Designing composite wind turbine blades for disposal, recycling or reuse. In V. Goodship (Ed.), *Management, Recycling and Reuse of Waste*

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

- Composites (pp. 443–457). Cambridge, United Kingdom: Woodhead Publishing Limited.
- Pavlas, M., Touš, M., Bébar, L., & Stehlík, P. (2010). Waste to energy – An evaluation of the environmental impact. *Applied Thermal Engineering*, 30(16), 2326–2332.
- Pickering, S. J. (2006). Recycling technologies for thermoset composite materials-current status. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(8), 1206–1215.
- Pimenta, S., & Pinho, S. T. (2011). Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook. *Waste Management*, 31(2), 378–392.
- Rahman, N. A. A., Sharif, S. M., & Esa, M. M. (2013). Lean Manufacturing Case Study with Kanban System Implementation. *Procedia Economics and Finance*, 7, 174–180.
- Reynolds, N., & Pharaoh, M. (2010). An introduction to composites recycling. In V. Goodship (Ed.), *Management, Recycling and Reuse of Waste Composites* (pp. 3–19). Cambridge, United Kingdom: Woodhead Publishing Limited.
- Ria Blades. (2016). *Manual de Acolhimento*. Aveiro: Ria Blades.
- Ribeiro, M. A. V. (2012). *Análise do Value Stream Mapping na Produção de Pás Eólicas : o caso Riablades* (Master's thesis, Universidade de Aveiro). Universidade de Aveiro.
- Samanlioglu, F. (2013). A multi-objective mathematical model for the industrial hazardous waste location-routing problem. *European Journal of Operational Research*, 226(2), 332–340.
- Song, Y. S., Youn, J. R., & Gutowski, T. G. (2009). Life cycle energy analysis of fiber-reinforced composites. *Composites Part A*, 40(8), 1257–1265.
- Spinacé, M. A. da S., & De Paoli, M. A. (2005). A tecnologia da reciclagem de polímeros. *Química Nova*, 28(1), 65–72.
- Tchobanoglous, G., & Kreith, F. (2002). *Handbook of Solid Waste Management. Waste Management Research* (2nd ed., Vol. 13). New York: McGraw-Hill Companies.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. (1993). *Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues*. (McGraw-Hill, Ed.). New York: McGraw-Hill Companies.
- Trezza, M. A., & Scian, A. N. (2000). Burning wastes as an industrial resource. *Cement and Concrete Research*, 30(1), 137–144.
- Vanguilder, C. (2012). *Hazardous Waste Management: An Introduction*. Boston: Mercury Learning and Information.

Caracterização dos resíduos sólidos produzidos no fabrico de pás de aerogerador

Yuhazri, M., Sihombing, H., Abidin, M., & Nilson, G. (2015). A review on gelcoat used in laminated composite structure. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 4(3), 49–58.

Yuyan, L., Guohua, S., & Linghui, M. (2009). Recycling of carbon fibre reinforced composites using water in subcritical conditions. *Materials Science and Engineering: A*, 520(1-2), 179–183.

Webgrafia

- [1] GWEC. (2016). *GLOBAL WIND STATISTICS 2015*. Bruxelas. Retrieved from http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC-PRstats-2015_LR_corrected.pdf
- [2] Gurit Holdings AG. (2013). Blade Manufacturing Processes. In Gurit (Ed.), *Wind Energy Handbook*. Gurit. Retrieved from http://www.gurit.com/files/documents/4_Blade_Processes.pdf
- [3] Epoxy Resin Committee. (2015). Epoxy resins in wind energy applications. Retrieved April 17, 2016, from http://www.epoxy-europe.eu/uploads/Modules/Resources/epoxy_erc_bpa_whitepapers_wind-energy-2.pdf
- [4] EWEA. (2015). *Research note outline on recycling wind turbines blades Contents*. Brussels, Belgium: European Wind Energy Association. Retrieved from http://www.ewea.org/fileadmin/files/our-activities/policy-issues/environment/research_note_recycling_WT_blades.pdf

Anexo I

Tipologias de resíduos													
	Resíduos Industriais Banais						Resíduos orgânicos contendo substâncias perigosas						
	20 01 99						16 03 05 (*)						
PROCESSO	Peso 1	Data	Peso 2	Data	Peso 3	Data	Peso 1	Data	Peso 2	Data	Peso 3	Data	
Preparação do molde	38	11-04-2016	26	12-04-2016	28	16-04-2016							
Aplicação Gel Coat							2	11-04-2016	3	12-04-2016	2	13-04-2016	
Layup													
Infusão							32	11-03-2016	46	14-03-2016	36	15-03-2016	
Pré-arranque							6	11-03-2016	10,12	14-03-2016	7,1	15-03-2016	
Limpeza							1,9	11-03-2016	2,9	14-03-2016	3	15-03-2016	
Ripagem	409	11-03-2016	405	14-03-2016	407	15-03-2016							
Colagem							165	11-03-2016	189	14-03-2016	210	15-03-2016	
Pré-arranque							12,8	11-03-2016	14,3	14-03-2016	15	15-03-2016	
Limpeza							10	11-03-2016	9,9	14-03-2016	10	15-03-2016	
Calibradores	1	16-03-2016	2	17-03-2016	0,4	18-03-2016	1	16-03-2016	2	17-03-2016	0,4	18-03-2016	
Desmoldagem	43	11-04-2016	40	12-04-2016	43	13-04-2016							
P0	179	20-04-2016	187	21-04-2016	184	22-04-2016							
P1	22	20-04-2016	23	21-04-2016	19	22-04-2016	57	20-04-2016	42	21-04-2016	44	22-04-2016	
P2	60	26-04-2016	75	27-04-2016	62	03-04-2016	73	26-04-2016	77	27-04-2016	101	03-04-2016	
P3	3	26-04-2016	4	27-04-2016	10	28-04-2016	7	26-04-2016	12	27-04-2016	5	28-04-2016	
P4													

Figura A.1: Excerto da base de dados criada no âmbito do estágio.