



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Joana Xu

**ESTUDO DE COMPÓSITOS ESTRUTURAIS NO
PROCESSO DE PRODUÇÃO DE PÁS EÓLICAS**

**Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica na
Especialidade de Produção e Projeto orientada pela Professora Doutora Cristina
Maria Gonçalves dos Santos e pelo Engenheiro Ricardo Mendes e apresentada ao
Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologias da
Universidade de Coimbra.**

Julho de 2019

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Estudo de compósitos estruturais no processo de produção de pás eólicas

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

Study of structural composites in the wind turbine blade production process

Autor

Joana Xu

Orientadores

**Professora Doutora Cristina Maria Gonçalves dos Santos
Engenheiro Ricardo Mendes**

Júri

Presidente Professora Doutora Ana Paula Bettencourt Martins
Amaro
Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra

Orientador Professora Doutora Cristina Maria Gonçalves dos Santos
Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Doutor Fernando Jorge Ventura Antunes
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Colaboração Institucional



Ria Blades, SA-
Recursos Renováveis
e Meio Ambiente

Coimbra, julho, 2019

Aos meus pais

Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento.

Em primeiro lugar agradeço aos meus pais, pelo apoio incondicional que me deram. Sem eles nada disto seria possível.

Agradeço à minha orientadora, Professora Doutora Cristina Maria Gonçalves dos Santos, pela disponibilidade, aconselhamento e apoio prestados ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

À empresa Ria Blades, SA, pela oportunidade de colaboração.

Aos Engenheiros Marco Brandão e Ricardo Mendes, pela orientação e disponibilidade constante durante a colaboração com a empresa.

A todos os colaboradores da Ria Blades, SA, em especial à equipa de engenharia pelo acompanhamento, disponibilidade demonstrada e conhecimento transmitido.

Resumo

O tema da presente dissertação, “Estudo de compósitos estruturais no processo de produção de pás eólicas”, decorreu em ambiente industrial através da colaboração institucional da Ria Blades, SA, Vagos, Aveiro. A grande competitividade e a concorrência dos mercados incentivam as empresas à adaptação de novos desafios, promovendo uma constante evolução para serem bem sucedidas.

Os objetivos gerais propostos para este trabalho consistiram na i) otimização do processo de produção de compósitos laminados a aplicar na linha de colagem de uma pá eólica e ii) a sua implementação na linha de produção.

Para tal, foram utilizadas várias abordagens, destacando-se i) diferentes processos de impregnação das fibras (manual e mecânica); ii) compactação a vácuo com folhas poliméricas distintas (Nylon e PEBD) e ainda iii) o uso ou não de uma intercamada designada por folha desmoldante.

Os resultados obtidos permitem concluir que a impregnação mecânica do reforço conduz a uma poupança de resina epoxídica e a uma molhabilidade mais uniforme do laminado. A variação dimensional das placas a usar na linha de colagem é menor, assim como a percentagem de porosidade, quando se utiliza sacos em nylon. O efeito da folha desmoldante parece ser irrelevante no processo de produção.

Face aos resultados obtidos, a otimização da linha de colagem de pás eólicas pela Ria Blades, SA, passará pela impregnação mecânica do laminado e a exclusão da folha desmoldante assim como do saco de PEBD no *setup* de moldação de placas de compósitos estruturais.

Palavras-Chave Energia eólica, Pás eólicas, Compósitos laminados, Fibra de vidro, Resina epoxídica.

Abstract

The present dissertation, under the theme *Study of Structural Composites in the Wind Turbine Production Process*, was carried out in an industrial environment through the institutional collaboration of the Ria Blades, SA, Vagos, Aveiro. High market competitiveness and global competition encourage enterprises to adapt new challenges to be successful.

The main objectives proposed for this work were: i) optimization of the production process of composite laminate to be applied in the glue line of a wind blade and ii) its implementation in the production process line.

For that proposal, several approaches were used, namely i) highlighting different processes of fiber impregnation (manual and mechanical); ii) vacuum compaction by using different polymer sheets (nylon and LDPE); and iii) the use or not of a polymer interlayer, called release sheet in the designed setups.

The experimental results obtained in this work, allow concluding that the mechanical impregnation of the glass fibers by epoxy resin is a both economical and efficient process. In vacuum molding, it appears that the nylon bag compacts better than the LDPE ones, ensuing lower thickness and porosity values in the final composite panels. The effect of the polymer interlayer seems to be irrelevant in the production process.

Faced with these outcomes, the optimization of the wind turbine blades gluing line by the Ria Blades SA, will undergo the mechanical impregnation of the laminates and the exclusion of both LDPE bags and polymer sheets in the molding setup for structural composites.

Keywords Wind energy, Wind turbine blades, Laminated composite, Fiber glass, Epoxy resin.

Índice

Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xi
Simbologia e Siglas	xiii
Simbologia.....	xiii
Siglas	xiii
1. Introdução.....	1
2. Estado de Arte	3
2.1. Energia eólica	3
2.2. Turbinas Eólicas	5
2.3. Materiais Compósitos	7
2.3.1. Tipo de matriz.....	8
2.3.2. Tipo de reforço	10
2.4. Processos de Fabrico.....	13
3. Procedimento Experimental	19
3.1. Materiais	19
3.2. Preparação das amostras	21
3.2.1. Laminação manual.....	21
3.2.2. Laminação com a MIA	22
3.2.3. Configurações dos laminados.....	22
3.2.4. Identificação das amostras.....	24
3.3. Medição das Espessuras.....	25
3.4. Teste de Cinzas	26
3.5. Teste da Porosidade	27
4. Resultados e Discussão.....	29
4.1. Avaliação da Espessura	29
4.2. Avaliação do Teor de fibras.....	36
4.3. Avaliação da Porosidade.....	43
4.4. Avaliação de Custos.....	48
5. Conclusões e Trabalho Futuro.....	51
Referências bibliográficas	53
Anexo A.....	57
Anexo B.....	61
Anexo C.....	63
Anexo D.....	65
Apêndice A.....	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.Primeiras turbinas eólicas: (a) Falha na pá da turbina de Smith em 1941; (b) Turbina eólica Gedser [4].	4
Figura 2.2. Evolução temporal das dimensões de uma turbina eólica [adaptado de 3].	5
Figura 2.3. Evolução das características das pás com o aumento da sua dimensão [adaptado de 5].	5
Figura 2.4.a) Principais componentes da uma turbina eólica [adaptado de 7];	6
Figura 2.5.a) Principais componentes de uma pá [6]; b) Corte transversal de uma pá [6];	7
Figura 2.6.Classificação dos compósitos quanto à matriz [8].	8
Figura 2.7. Classificação dos compósitos quanto ao tipo de reforço [10].	11
Figura 2.8. Orientação das fibras num laminado [11].	11
Figura 2.9. Painel compósito em <i>sandwich</i> [adaptado de 11].	11
Figura 2.10. <i>Setup</i> de laminação manual [adaptado de 13].	13
Figura 2.11. <i>Setup</i> de moldação com saco de vácuo [adaptado de 14].	14
Figura 2.12. <i>Setup</i> do processo de infusão a vácuo [adaptado de 17].	15
Figura 2.13. Processo de infusão a vácuo [adaptado de 17].	15
Figura 2.14. Sequência de montagem de uma pá eólica [6].	16
Figura 2.15. Eixos de referência de uma pá [18].	17
Figura 2.16. Identificação do projeto [18].	17
Figura 3.1.Impregnação manual do laminado.	21
Figura 3.2. a) Fornecimento de resina pela MIA; b)Laminação das fibras com a MIA.	22
Figura 3.3. Configuração usada na linha de produção de reforços de acabamento.	23
Figura 3.4.Representação esquemática dos diferentes tipos de configurações estudadas.	24
Figura 3.5.Preparação das amostras na mesa.	24
Figura 3.6.Esquema da preparação e identificação das amostras e respetiva identificação.	25
Figura 3.7. Teste de cinzas.	26
Figura 3.8.a) Provete inicial com as amostras para analisar a porosidade; b) secção das amostras analisadas ao microscópio.	27
Figura 4.1. Espessuras das amostras laminadas manualmente para: a) STD A; b) STD P.	30
Figura 4.2.Espessuras das amostras laminadas manualmente para: a) SF A; b) SF P.	31
Figura 4.3. Valores médios da espessura para a laminação manual.	32
Figura 4.4. Espessuras das amostras laminadas pela MIA para: a) STD A; b) STD P.	34

Figura 4.5. Espessuras das amostras laminadas pela MIA para: a) SF A; b) SF P.	35
Figura 4.6. Valores médios da espessura para a laminados com a MIA.	35
Figura 4.7. Valores médios das espessuras para: a) laminação manual STD, b) laminação manual SF; c) laminação MIA STD, d) laminação MIA SF.	36
Figura 4.8. Valores de FMC da laminação manual para: a) STD A; b) STD P.	38
Figura 4.9. Valores de FMC da laminação manual para: a) SF A; b) SF P.	39
Figura 4.10. Valores médios de FMC para laminação manual.	39
Figura 4.11. Valores de FMC da laminação com a MIA para: a) STD A; b) STD P.	40
Figura 4.12. Valores de FMC da laminação com a MIA para: a) SF A; b) SF P.	41
Figura 4.13. Valores médios de FMC para a laminação com a MIA.	41
Figura 4.14. Valores médios de FMC para o método: a) STD A; b) STD P; c) SF A; d) SF P.	42
Figura 4.15. Micrografias (50x) das amostras laminadas manualmente, SF e STD, na posição 4.	45
Figura 4.16. Micrografias (50x) das amostras laminadas por MIA, SF e STD, na posição 4.	46
Figura 4.17. Produção do reforço do lado LE exterior.	48

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1.Comparação entre propriedades dos diferentes tipos de materiais [9].	8
Tabela 2.2.Características de alguns polímeros [10].	10
Tabela 2.3. Características de diferentes tipos de fibras [10].	12
Tabela 3.1.Propriedades da matriz [anexo A].	19
Tabela 3.2.. Propriedades da matriz de acordo com o fornecedor [anexo A].	19
Tabela 3.3.Características do reforço [anexo B].	20
Tabela 3.4.Características dos sacos de vácuo.	20
Tabela 3.5.Outros materiais consumíveis.	20
Tabela 3.6. Parâmetros usados na moldação com saco de vácuo.	22
Tabela 4.1. Espessuras das amostras STD laminadas manualmente.	29
Tabela 4.2. Espessuras das amostras SF laminadas manualmente.	30
Tabela 4.3. Espessuras das amostras laminadas com a MIA.	33
Tabela 4.4. Valores FMC para laminados: a) manualmente; b) com a MIA.	37
Tabela 4.5.Valores de porosidade para a laminação manual.	43
Tabela 4.6.Valores de porosidade para laminação com a MIA.	44
Tabela 4.7. Comprimento da linha de colagem coberto pela laminação.	49
Tabela 4.8. Custo dos materiais consumíveis para os diferentes modelos de pás.	49
Tabela 4.9. Redução de custos para cada método, considerando o volume de produção de 2018.	49

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

T_g – Temperatura de transição vítrea

E – Módulo de Elasticidade

σ – Desvio padrão

μ - Média

Siglas

CEMMPRE – Centro de Engenharia Mecânica, Materiais e Processos

CMC – Compósito de Matriz Cerâmica

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FMC – Quantidade Mássica de Fibra

IPCC – *Intergovernmental Panel of Climate Change*

LDPE – Polietileno de Baixa Densidade

LE – *Leading Edge*

MIA – Máquina de Impregnação Automática

MMC – Compósito de Matriz Metálica

PEBD – Polietileno de baixa densidade

PET – Politeraftalato de Etileno

PMC – Compósito de Matriz Polimérica

PS – *Pressure Side*

PVC – Policloreto de Vinilo

SF – Sem Folha desmoldante

SS – *Suction Side*

STD – *Standard*

TE – *Trailing Edge*

UC – Universidade de Coimbra

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho foi realizado na empresa Ria Blades, SA instalada no Parque Empresarial de Sousa, Vagos, Aveiro.

A Ria Blades foi fundada em 2009 e contribui ativamente para o desenvolvimento da região e do país, sendo atualmente a maior entidade empregadora do concelho de Aveiro, com mais de 1 000 colaboradores.

O reconhecimento desta empresa, a nível internacional, deve-se à sua associação ao grupo empresarial Senvion, SA, [1, 2] sediada em Hamburgo, Alemanha, na produção e comercialização de pás de rotor para aerogeradores; fabricação de equipamentos componentes para aerogeradores e para outros equipamentos destinados à produção de energias de fonte renovável. A Senvion, SA é uma das líderes mundiais na produção de aerogeradores, com a capacidade total instalada de 18, 413, 344 kW (à data de 1 de abril de 2019 correspondia, em Portugal, o valor de 559,1 kW).

A grande competitividade e a concorrência dos mercados incentivam as empresas à adaptação de novos desafios, estimulando-as a uma constante evolução para serem bem sucedidas. A eficiência operacional, através do desenvolvimento e implementação de novas metodologias, é considerada um fator crítico de sucesso e a chave para a continuidade e o crescimento sustentado das organizações. Mais ainda, atualmente, impõem-se, também, os desafios climáticos, com a crescente estímulo da substituição de energia proveniente de combustíveis fósseis por outras alternativas, renováveis e sustentáveis.

Ora a energia eólica é uma fonte de energia proveniente do aproveitamento da força do vento, e, portanto, renovável e teoricamente inesgotável. Presentemente, a energia mecânica dos ventos é convertida em energia elétrica através de turbinas eólicas, cujas pás fazem girar um eixo acoplado a um gerador elétrico. As pás eólicas são os maiores componentes das turbinas.

Um dos processos de produção de pás eólicas é através da união adesiva de várias de estruturas formando um material composto. Estas são fabricadas para serem tão leves quanto possível, mas fornecendo a resistência e a rigidez exigidas na aplicação, bem como

um tempo-vida aceitável. Assim, os materiais compósitos laminados de matriz polimérica (PMC, *Polymer Matrix Composite*) são os materiais de eleição para aplicações estruturais.

Na Ria Blades, SA, a linha de colagem das pás, necessita de um componente de reforço produzido em laminados de fibra de vidro numa matriz de resina epoxídica. Estes reforços são fundamentais na ligação com os componentes que permitem o movimento rotativo das pás na turbina eólica

Assim, o desafio lançado pela empresa conducente ao estágio, foi o de colaborar na otimização da linha de produção de pás eólicas, de modo a atingir-se os seguintes objetivos:

- i) Acompanhamento do atual processo de laminação de fibras na linha de produção;
- ii) Realização de ensaios de laminação com as condições atuais da linha de produção;
- iii) Testar novos métodos (materiais e processamento), usando como referência o atualmente implementado;
- iv) Realização de testes de caracterização de materiais compósitos, de acordo com as normas em vigor;
- v) Seleção do método mais económico que garanta o desempenho eficaz de acordo as especificações do cliente;
- vi) Implementação do método na linha de produção.

Este trabalho é apresentado em cinco capítulos, entre os quais se encontra a presente introdução, onde se fez o enquadramento do tema e se enunciaram os objetivos a atingir.

No capítulo dois encontra-se a revisão bibliográfica onde é feita uma introdução às energias renováveis com enfoque à energia eólica. Também é apresentada uma breve referência aos materiais compósitos, em especial, aos PMC reforçados com fibras.

O terceiro capítulo é dedicado ao procedimento experimental, ou seja, tipo de provetes, os materiais, assim como a descrição das técnicas de caracterização utilizadas.

No capítulo quatro são apresentados e discutidos os resultados obtidos.

O último capítulo, quinto, contempla as conclusões finais deste trabalho e sugestões para procedimentos futuros.

Esta dissertação é ainda complementada com outras informações contidas em anexos e apêndice.

2. ESTADO DE ARTE

2.1. Energia eólica

De acordo com o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) [3], o mercado mundial de energia é dominado pelo consumo de combustíveis fósseis. Este tipo de energia é o responsável pela emissão da maior parte dos gases com efeito de estufa. Uma das formas de diminuir a emissão desses gases é recorrendo às energias renováveis. Estas são uma fonte de energia segura, contribuem para o desenvolvimento económico e social e ainda reduzem os impactos negativos no ambiente e na saúde.

A energia eólica consiste na produção de energia mecânica a partir da energia cinética do vento. Essa energia mecânica é convertida em energia elétrica com recurso a geradores. Segundo o IPCC [3], a energia eólica é considerada a fonte de energia que consegue reduzir, em maior quantidade, a emissão de gases com efeito de estufa. Na última década, o mercado da energia eólica tem tido bastante desenvolvimento, tendo-se expandido sobremaneira. Estudos recentes [3] mostram que no ano 2010, países como a Dinamarca, Portugal, Irlanda e Espanha, a energia elétrica obtida através das turbinas eólicas constituía entre 10 a 20% da energia elétrica total consumida.

O aproveitamento dos ventos para produção de energia elétrica surgiu na penúltima década do séc. XIX, nos Estados Unidos da América. Em 1888, Charles F. Brush construiu a primeira turbina para produção de energia para consumo próprio, na sua habitação e laboratório. [4]. Cinquenta anos depois, em 1941, surgem os primeiros projetos de turbinas comerciais pela empresa S. Morgan-Smith at Granpa's Knob, figura 2.1a). Porém, muito havia ainda a fazer, já que este modelo, com pás eólicas fabricadas em ligas metálicas, fracassou após umas centenas de horas de funcionamento. Em 1957, Johannes Juul propõe um novo modelo que ficou conhecido como turbina eólica *Gedser* (figura 2.1(b)). Este aproxima-se bastante dos atuais, sendo constituído por três pás eólicas, produzidas a partir de materiais compósitos. Esta turbina funcionou durante 11 anos, sem manutenção. Desde então a maior parte das pás eólicas passaram a ser fabricadas com materiais compósitos [4].

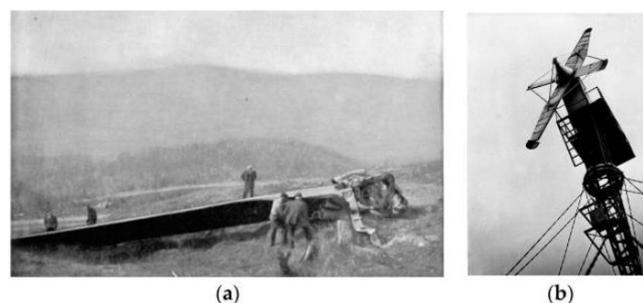


Figura 2.1. Primeiras turbinas eólicas: (a) Falha na pá da turbina de Smith em 1941; (b) Turbina eólica Gedser [4].

As pás são os elementos mais importantes de uma turbina eólica, pois são estas que estão em contato direto com o vento. Um dos principais objetivos dos fabricantes destas estruturas é a otimização da estrutura aerodinâmica da pá, para que sejam mais eficientes, aumentando assim, a quantidade de energia produzida [4]. Aliado ao impacto técnico, existe, também, o económico, sendo aceitável um tempo de funcionamento de, pelo menos, 20 anos. Como as pás têm de ser leves devido às suas dimensões e como estão sujeitos a desgaste, devido às diferentes condições meteorológicas (descargas elétricas, erosão superficial, chuva), para além das cargas cíclicas a que estão sujeitas, as pás são fabricadas com materiais compósitos [3].

Para aumentar a eficiência das turbinas eólicas, o projeto tem vindo a incluir um aumento quer da altura da torre quer das dimensões das pás, como se ilustra na figura 2.2, aliado à utilização de geradores com maior capacidade. O aumento das dimensões das pás obriga ao aumento da altura da torre, permitindo um maior rendimento, uma vez que a velocidade média do vento varia com a altura acima do solo [3]. Também o custo económico associado à produção destas pás eólicas tem vindo, obviamente, a aumentar, função da sua dimensão, como se mostra na figura 2.3. Assim, os grupos empresariais que se dedicam à produção e comercialização de turbinas eólicas têm consciência das exigências de qualidade, durabilidade e competitividade deste setor.

O presente trabalho integra-se nesta área de desenvolvimento e tem como principal objetivo colaborar na otimização do processo de produção de laminados compósitos para pás eólicas.

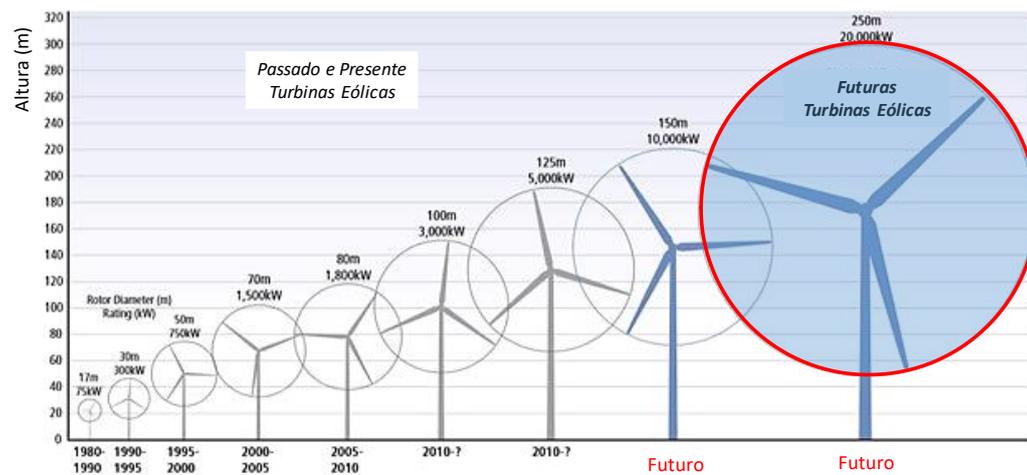


Figura 2.2. Evolução temporal das dimensões de uma turbina eólica [adaptado de 3].

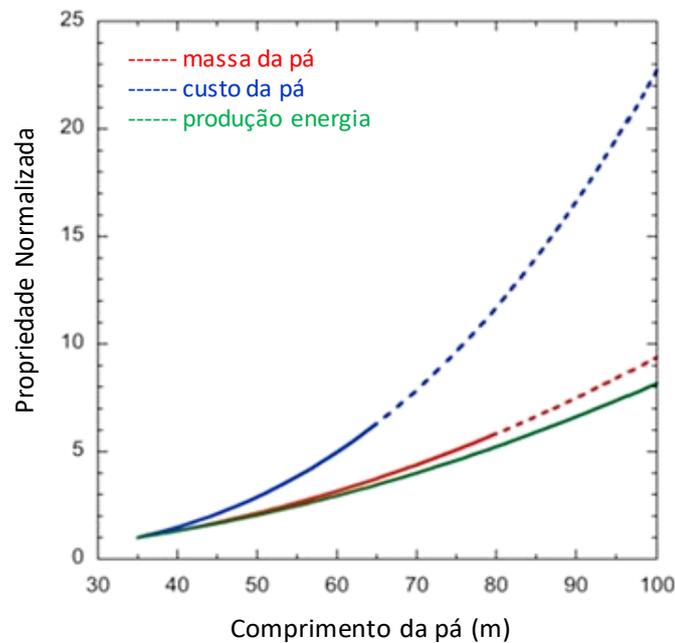


Figura 2.3. Evolução das características das pás com o aumento da sua dimensão [adaptado de 5].

2.2. Turbinas Eólicas

Tipicamente, uma turbina eólica é constituída por 3 pás, que rodam em torno de um componente designado por *hub*. Este, por sua vez encontra-se ligado a outro elemento, a *nacelle*, através de um eixo de transmissão, como se mostra na figura 2.4. As pás podem

movimentar-se com velocidades entre 0-20 rpm. A relação de transmissão entre a velocidade de rotação das pás e a caixa de velocidades é aproximadamente de 1:100. A caixa de velocidades encontra-se ligada ao gerador através de um eixo de alta rotação e o gerador produz energia elétrica a partir da energia mecânica [6].

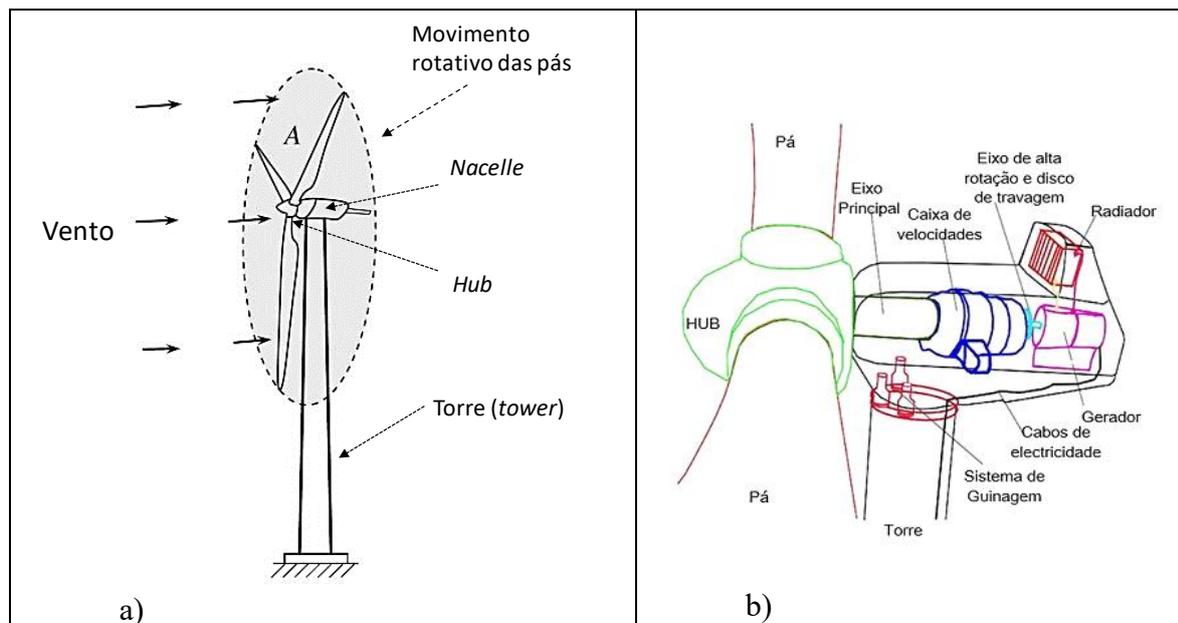


Figura 2.4.a) Principais componentes da uma turbina eólica [adaptado de 7];
 e b) componentes da Nacelle [6].

Os principais componentes de uma pá eólica estão esquematizados na figura 2.5 a). Estas são constituídas por uma estrutura exterior tipo casca, a *shell*, e por outros componentes interiores, designados por *web* e *girder* que funcionam como elementos de suporte e ligação à estrutura exterior, respetivamente. Os elementos internos são designados por pré-fabricados, por serem produzidos em moldes independentes e posteriormente englobados na pá. Como se pode observar no esquema em corte transversal da figura 2.5b), é possível identificar duas faces, a *suction side* (SS) e *pressure side* (PS). No lado PS a pá está sujeita a uma pressão local elevada devido ao fluxo de ar (vento) e no lado SS sofre uma depressão devido ao escoamento desse ar. O *leading edge* (LE) corresponde ao bordo de ataque da pá, que sofre contato com o fluxo de ar e o *trailing edge* (TE) é a aresta oposta, correspondendo ao bordo de fuga [6].

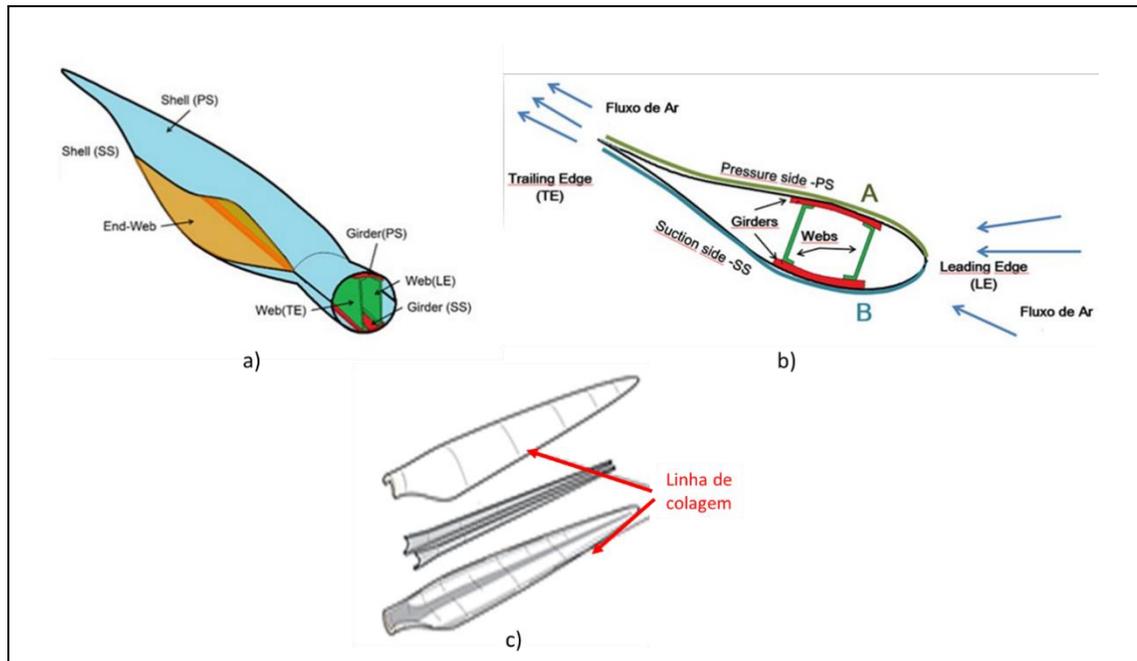


Figura 2.5.a) Principais componentes de uma pá [6]; b) Corte transversal de uma pá [6]; c) Linha de colagem da pá [4].

O presente trabalho consiste na otimização da linha de produção de laminados aplicados como reforço na linha de colagem das duas *shells*, como identificado na figura 2.5c), do lado TE e do lado LE (interior ou exterior) dependendo do projeto da pá que a Ria Blades, SA tenha em armazém.

2.3. Materiais Compósitos

Apesar de não existir uma definição universal para materiais compósitos, em termos de engenharia, são considerados todos aqueles que, à escala macro- ou micrométrica, são formados por dois ou mais constituintes, diferindo na forma e na composição química e que, na sua essência, são insolúveis uns nos outros [8]. Da combinação de materiais diferentes, pode obter-se, um outro material com propriedades melhoradas ou mesmo superiores às exibidas individualmente por cada um dos componentes.

Tratando-se de misturas heterogêneas é usual identificar nos materiais compósitos dois constituintes: o de maior teor, designado por matriz ou fase contínua e o de menor quantidade, indicado por reforço ou fase dispersa. Também é comumente aceite que a matriz é geralmente composta por um material com ductilidade/tenacidade superiores e resistência mecânica/rigidez menores; enquanto que o reforço, é, normalmente, formado por

um material mais rígido e mais resistente. A resposta mecânica final, resulta da boa transferência de cargas, na interface, entre a matriz e o reforço.

2.3.1. Tipo de matriz

A matriz dos materiais compósitos é o componente que faz a ligação entre os reforços e transmite e distribui as forças exercidas no material. Este elemento protege o reforço dos danos exteriores, como sejam as como reações químicas com o meio ambiente e serve como barreira à propagação de fendas entre os reforços, ou seja, mesmo que alguns reforços individuais apresentem fendas, o compósito não irá falhar, a não ser que o número de fendas presentes seja elevado. A ligação entre a matriz e o reforço é importante uma vez que a resistência do compósito depende da força desta ligação, daí a necessidade de uma certa compatibilidade de ligação química.

Os materiais compósitos podem ser classificados quanto ao tipo de matriz, figura 2.6, ou seja, Compósitos de Matriz Polimérica (PMC), Compósitos de Matriz Metálica (MMC) e Compósitos de Matriz Cerâmica (CMC). Comparativamente às outras classes de materiais de engenharia, os compósitos destacam-se pela excelente relação resistência à tração/peso, tabela 2.1.

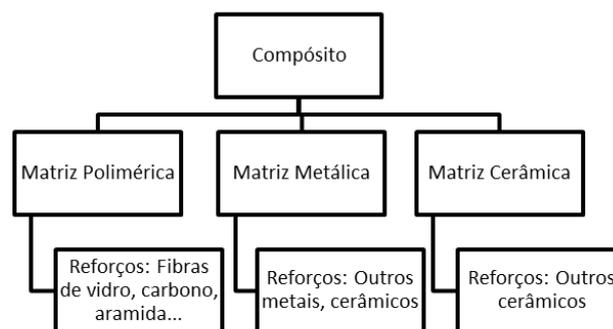


Figura 2.6. Classificação dos compósitos quanto à matriz [8].

Tabela 2.1. Comparação entre propriedades dos diferentes tipos de materiais [9].

Classe de Material	Resistência à tração	Resistência à compressão	Rigidez	Ductilidade	Temperatura de funcionamento	Densidade
Metais	Alta	Alta	Média	Alta	Alta	Alta
Cerâmicos	Baixa	Alta	Muito alta	Nula	Muito alta	Média
Polímeros	Muito baixa	Muito baixa	Muito baixa	Alta	Baixa	Baixa
PMC	Muito alta	Alta	Muito alta	Baixo	Média	Baixo
MMC	Alta	Alta	Muito alta	Baixo	Alta	Médio
CMC	Média	Alta	Muito alta	Baixo	Muito alta	Médio

Destaquem-se os PMC, que serão o foco deste trabalho.

Para além do seu baixo peso específico, podem ainda enunciar-se outras características, como sejam [10]:

- i) quimicamente inertes: permitindo tempo-de-vida longos e menor manutenção;
- ii) durabilidade: a oscilação térmica, o vento e a humidade não afetam estes materiais;
- iii) flexibilidade estrutural: os compósitos adaptam-se facilmente aos moldes com formas complexas ao contrário de outros materiais;
- iv) fácil reparação: os compósitos apresentam técnicas de reparação e manutenção simples.

Os materiais poliméricos mais utilizados no fabrico de PMC, são os plásticos, termoplásticos ou termoendurecíveis [10].

Como o próprio nome indica, os termoplásticos são aqueles que se tornam *plásticos* com o aumento da temperatura; enquanto que os termoendurecíveis tornam-se *duros* com o aumento da temperatura. Há, também, a nível estrutural uma diferenciação no tipo das cadeias. Enquanto que os termoplásticos possuem cadeias lineares ou ramificadas, os termoendurecíveis têm cadeias reticuladas, ou seja, estruturas tridimensionais rígidas. Neste último caso, além do polímero base, o seu processamento exige valores de temperaturas/pressão mais elevadas e um agente reticulador (ou de cura).

Atualmente, a maior parte dos compósitos estruturais, com grandes áreas e/ou geometrias mais complexas, são fabricados em matrizes termoendurecíveis pois oferecem, comparativamente aos termoplásticos, melhores propriedades mecânicas, térmicas e químicas, como se mostra na compilação na tabela 2.2. Além disso, uma das vantagens das resinas termoendurecíveis é a maior facilidade de impregnação do reforço, pois, antes da reação de reticulação (cura), apresentam viscosidades inferiores às dos termoplásticos. Entre os termoendurecíveis mais comuns, podem destacar-se as resinas poliéster, epoxídicas, fenólicas e poliamidas.

No caso particular das pás eólicas comerciais, as matrizes termoendurecíveis do tipo epóxido são as mais utilizadas. Tal deve-se às menores temperaturas de cura, baixando o custo de produção e ainda à baixa viscosidade, facilitando a infusão da resina e consequentemente tornando o processo mais rápido.

Tabela 2.2. Características de alguns polímeros [10].

Polímero	Tipo de material	Principais características
Termoplástico	Poliamidas (nylons)	Boa resistência mecânica Boa resistência à abrasão Baixo coeficiente de fricção Absorve líquidos
	Poliestireno	Boas propriedades elétricas Estabilidade dimensional Relativamente barato
	Poliétileno	Quimicamente resistente Isolador elétrico Baixo coeficiente de fricção Baixa resistência mecânica e às condições meteorológicas
Termoendurecível	Epóxicos	Boa combinação das propriedades mecânicas Boa resistência à corrosão Estabilidade dimensional Boa adesão Relativamente barato Boas propriedades elétricas
	Fenólicos	Boa estabilidade térmica Barato
	Poliésteres	Boas propriedades elétricas Pode ser formulado para temperaturas elevadas Barato

Todavia, como os termoplásticos são recicláveis e possuem um tempo ilimitado de armazenamento, estudos recentes na formulação de compósitos apontam para o seu reforço com nanopartículas. Os resultados obtidos mostram que pequenas adições de nano argila ou nanotubos de carbono (~ 0,5% pd) conduzem a aumentos de 30 a 80% da resistência à fadiga, ao corte, à compressão assim como à fratura do compósito [4].

2.3.2. Tipo de reforço

Quanto à fase dispersa, os materiais compósitos podem ser classificados de acordo com a geometria do reforço, ou seja, partículas, fibras, mantas/tecidos ou sandwich, figura 2.7. No caso particular deste trabalho, importam os reforços do tipo laminado (figura 2.8). Estes são constituídos por painéis tecidos com filamentos de fibras e apresentam elevada resistência na direção da fibra. Os painéis são empilhados camada a camada e a sua orientação pode ou não variar, dependendo da sua aplicação, conferindo uma resposta final anisotrópica.



Figura 2.7. Classificação dos compósitos quanto ao tipo de reforço [10].

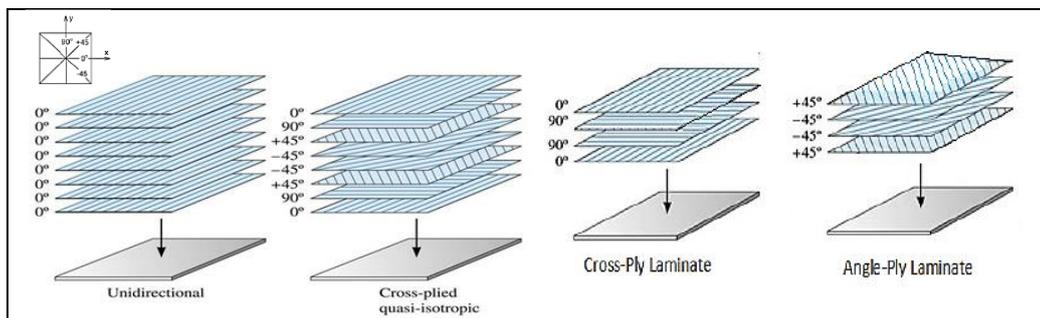


Figura 2.8. Orientação das fibras num laminado [11].

Os painéis em *sandwich* (figura 2.9) são compostos por duas faces, constituídas por um material rígido e resistente, separadas por um núcleo constituído por um material leve, com baixo módulo de elasticidade. A combinação destes elementos permite a obtenção de um material com elevada resistência mecânica e baixa densidade. As faces devem ter espessura suficiente para suportar as tensões de tração e de compressão e o núcleo deve ter resistência suficiente para suportar as tensões de corte no compósito [10].

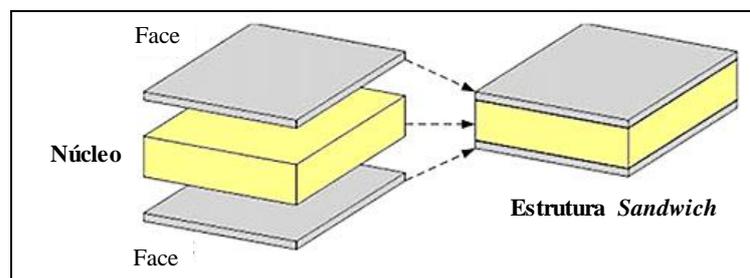


Figura 2.9. Painel compósito em *sandwich* [adaptado de 11].

É aceite a existência de 4 fatores que governam a contribuição das fibras em compósitos laminados:

- i) o tipo de fibra;
- ii) a sua orientação;

- iii) a ligação fibra – resina;
- iv) a sua quantidade (*Fiber Mass Content*, FMC).

No que concerne ao tipo de fibra, as mais comuns são as de vidro, carbono e aramida. A tabela 2.3 compara algumas características destes materiais.

A fibra de vidro E (do inglês *Electric glass*) caracterizam-se pela elevada resistência elétrica e baixo custo. Os compósitos poliméricos reforçados com fibras de vidro são quimicamente inertes, podendo ser usados em ambientes corrosivos e apresentam uma resistência específica elevada. No entanto, este tipo de fibra não é muito rígida e apresenta temperaturas de serviço baixas (abaixo de 200 °C).

Tabela 2.3. Características de diferentes tipos de fibras [10].

Propriedades \ Tipo de fibra	Fibra de vidro E	Fibra de carbono	Fibra de aramida (Kevlar 49™)
Peso específico	2,58	1,78 - 2,15	1,44
Resistência específica (GPa)	1,34	0,7 - 2,7	2,5 - 2,85
Módulo de elasticidade (GPa)	72,5	228 - 724	131
Resistência à tração (GPa)	3,45	1,5 - 4,8	3,6 - 4,1

As fibras de carbono são as que apresentam maior resistência específica e maior módulo de elasticidade. É um material de alto desempenho, sendo bastante usada na indústria aeroespacial e automóvel, no entanto, apresenta oxidação a altas temperaturas e é bastante dispendioso. No que concerne as fibras de aramida apresentam uma boa relação entre resistência e peso, sendo mais elevada que a dos metais. Este tipo de fibra apresenta elevada rigidez, boa estabilidade a altas temperaturas, boa resistência ao impacto e à fadiga. No entanto, estas fibras degradam na presença de ácidos, apresentam baixa resistência à compressão, absorvem humidade, degradam com os raios ultravioleta e apresentam baixa adesão aos polímeros [10].

O fator orientação, é importante na medida em que as fibras são projetadas para responder a carregamentos longitudinais. As principais orientações são: unidirecional, 0° ou 90°, multiaxial ou outras configurações aleatórias (ver figura 2.8). No presente trabalho as fibras apresentam uma orientação bidirecional, -45°/+45°.

Relativamente à adesão fibra-matriz, são as condições de processamento que criam as interfaces entre os materiais inerentemente diferentes. É, portanto, um requisito primário para o desempenho de um compósito. A natureza e as propriedades da interface (espessura, continuidade, química, força e aderência) são determinadas por fatores intrínsecos à fibra e à matriz (química, cristalografia, conteúdo do defeito), além de condições extrínsecas (tempo, temperatura, pressão, atmosfera e outras variáveis do processo) [12].

2.4. Processos de Fabrico

As propriedades dos materiais compósitos dependem, além do design e das características individuais de cada componente, do modo como são processados.

Os processos de fabrico comumente utilizados em componentes de elevadas dimensões, como cascos de barcos, painéis para veículos e pás de turbinas eólicas, são os de molde aberto, como a laminagem manual ou por vácuo.

A laminagem manual (*hand lay-up*) é das tecnologias de processamento mais utilizadas, embora esteja associada a uma taxa de produção (cadência) baixa. Neste processo (figura 2.10) o reforço é colocado no interior do molde e a resina é introduzida à mão. O auxílio de pincéis permite a distribuição da resina, podendo o processo ser repetido até se ter o número de camadas necessárias, enquanto que os rolos asseguram a impregnação das fibras e a extração de bolhas de ar. O laminado é deixado a curar em condições atmosféricas e, após a cura, a peça final é retirada.

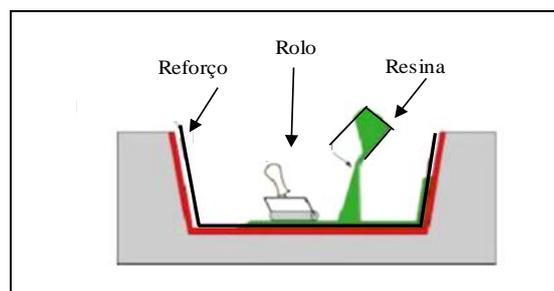


Figura 2.10. Setup de laminagem manual [adaptado de 13].

Este processo pode ser complementado com a moldação com saco de vácuo (figura 2.11), permitindo obter materiais de melhor qualidade [14,15]. Por cima do laminado é colocado uma camada *peel ply* (para conferir rugosidade à superfície), folha desmoldante (para facilitar a desmoldação do felpo), felpo (para facilitar a extração de ar) e saco de vácuo,

sendo o laminado isolado do exterior com *tacky tape*. O ar no interior do laminado é extraído através de uma bomba de vácuo. A cura pode ser feita com aquecimento ou à temperatura ambiente. A este processo de fabrico podem apontar-se como principais vantagens, o baixo custo dos equipamentos, a versatilidade na forma e tamanho do molde, a fácil configuração dos laminados e ainda as elevadas frações em volume de resina. Este último fator contribui para uma elevada resistência à corrosão dos compósitos e a uma melhor incorporação de insertos. Porém, sendo o processamento em molde aberto, não se pode descuidar o efeito da libertação de compostos orgânicos nos riscos de saúde do operador. Mais ainda, sendo um processo manual, a influência do desempenho do operador na qualidade final do produto é óbvia. A reprodutibilidade fica dependente de erros sistemáticos como a fração elevada de poros, se a impregnação não for bem feita, e uso excessivo de resina, com o aumento de custos. O presente trabalho, estuda várias variáveis introduzidas neste processo.

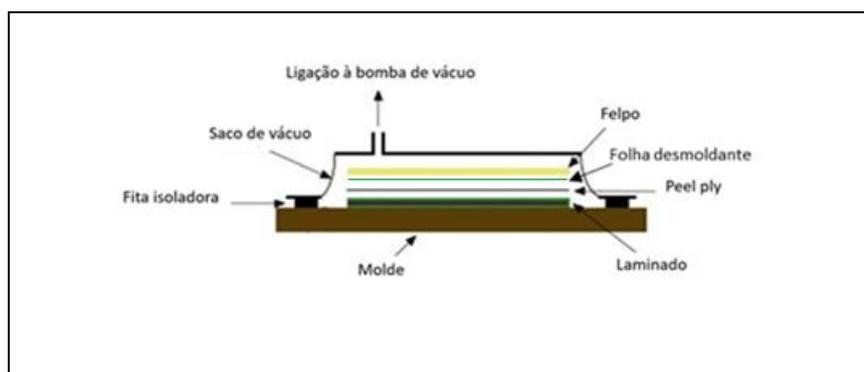


Figura 2.11. Setup de moldação com saco de vácuo [adaptado de 14].

O processo de infusão a vácuo [16] (figura 2.12) é um processo semelhante ao da moldação com saco de vácuo, no entanto, as fibras colocadas no molde estão secas. A resina é inserida recorrendo à pressão do vácuo (figura 2.13). Este método permite a obtenção de peças com elevado desempenho, de grandes dimensões e com geometrias complexas. As desvantagens deste processo são a baixa cadência de produção e a probabilidade ocorrer falhas durante impregnação das fibras, nos produtos de grande dimensão. Durante o processo de infusão, também podem ocorrer fugas de ar, se a montagem não for bem feita, sendo este um processo muito dependente da experiência do operador.

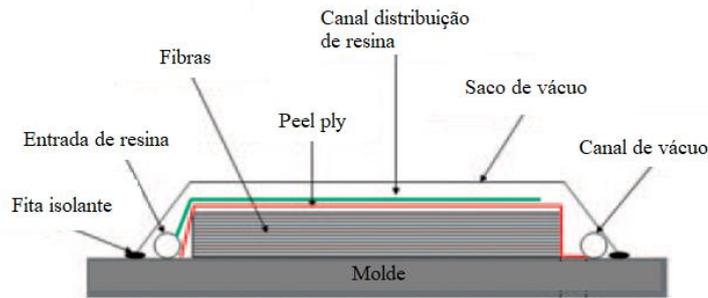


Figura 2.12. Setup do processo de infusão a vácuo [adaptado de 17].

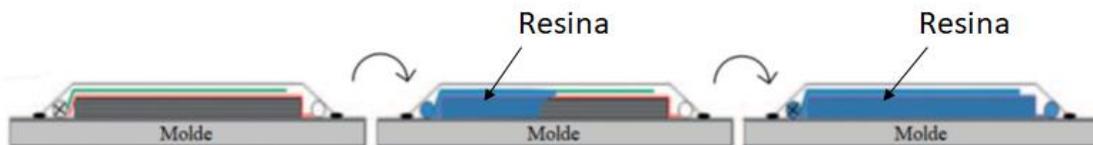


Figura 2.13. Processo de infusão a vácuo [adaptado de 17].

Os principais elementos que constituem as pás são fabricados pelo processo de infusão a vácuo (figura 2.12). A empresa atualmente produz pás de matriz epoxídica com reforço de fibra de vidro E. Estas apresentam estrutura em painel de sandwich (figura 2.9) sendo que o material de enchimento pode ser madeira de balsa, espuma de politeraftalato de etileno (PET) ou policloreto de vinilo (PVC). Os reforços de fibra de vidro podem ter diferentes orientações (figura 2.8), dependendo do tipo de solicitações mecânicas a que cada elemento da pá está sujeito durante o seu funcionamento. Por exemplo, na superfície da *shell* é aplicada uma maior quantidade de fibras uniaxiais (as fibras estão orientadas numa só direção), devido aos esforços de tração/compressão a que este componente está sujeito. Já na zona de acoplamento da pá à *hub* onde existem esforços segundo vários eixos, a aplicação de fibras quadriaxiais (fibras com 4 orientações) é mais adequada, para que o compósito apresente um comportamento quase isotrópico.

Embora o tipo de reforço mais usado no fabrico de pás seja a fibra de vidro do tipo E, nos últimos anos têm sido feitas investigações para usar outros tipos de materiais, como as fibras de carbono [4]. Este último apresenta uma resistência mecânica muito superior à fibra de vidro e menor densidade, o que permite obter pá mais resistentes, com menor espessura e mais leves. No entanto, estas fibras apresentam baixa resistência à compressão,

baixa tolerância ao impacto e são muito mais dispendiosas que as de vidro. Pequenos desalinhamentos e ondas no fabrico de compósitos reforçados com fibras de carbono levam a uma grande redução da resistência à fadiga e a tensões de compressão do produto final. Uma das alternativas é o uso de compósitos híbridos, em que consiste no uso de dois tipos de reforços diferentes como por exemplo fibra de vidro E e fibra de carbono. O uso de compósitos híbridos permite um aumento da resistência ao impacto, à tração, à fadiga da pá e uma redução significativa do seu peso, embora o custo de produção possa ser superior.

A Ria Blades onde decorreu o estágio, encontra-se dividida fisicamente em duas grandes seções, o pavilhão de moldes e o dos acabamentos. No edifício de moldes são fabricados os principais componentes das pás (*shells*, *girders*, *webs* e *endweb*) e é feita a montagem tal como se mostra na figura 2.14. As *girders* e as *webs* são feitos em moldes independentes e são coladas numa *shell*. Por fim é colada a outra *shell*, fechando assim uma pá.

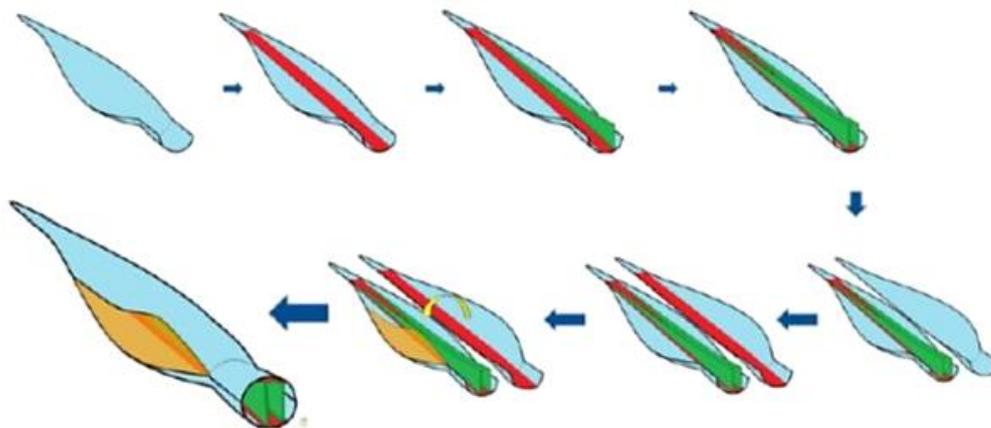


Figura 2.14. Sequência de montagem de uma pá eólica [6].

Depois de fechada, a pá é transferida para o edifício dos acabamentos. Numa primeira fase, é realizado o corte de excesso de material no contorno da pá seguido da colocação de reforços nas linhas de colagem das *shells* (figura 2.5c)). De seguida, à superfície da pá é lhe conferida rugosidade para uma melhor adesão da pintura. Posteriormente são introduzidos outros elementos, como o sistema de proteção contra raios e a tampa de vedação ao interior da pá e implementação de dispositivos de redução de ruído. No fim é realizada a calibração

para um conjunto de 3 pás, sendo que são adicionadas massas nas duas mais leves, em sítios designados para esse efeito.

Com base na especificação fornecida pela Senvion, o eixo Z, define o comprimento longitudinal da pá (figura 2.15). O início do eixo ($Z=0$) corresponde à raiz da pá.

A Ria Blades produz atualmente 6 tipos de pás e a identificação de cada modelo é feita tal como está ilustrada na figura 2.16. A sigla RE refere-se ao proprietário do projeto, REpower (Senvion) e é seguido do comprimento nominal da pá. Os projetos que estão a ser produzidos pela Ria Blades são: RE45.2, RE55.8, RE59.8, RE63.7, RE68.5 e RE74.4.

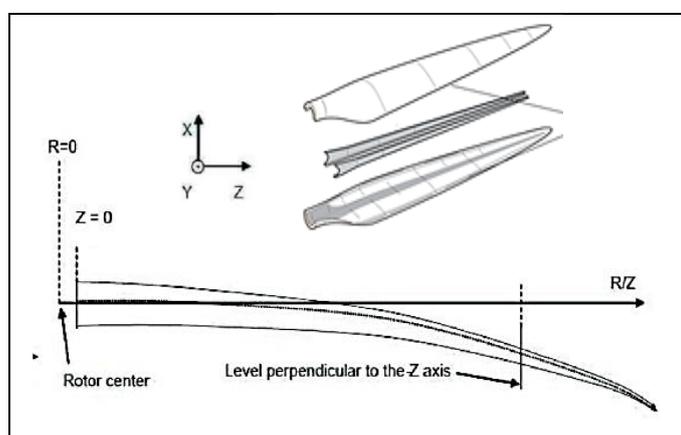


Figura 2.15. Eixos de referência de uma pá [18].

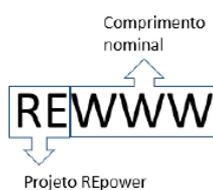


Figura 2.16. Identificação do projeto [18].

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este trabalho consiste na validação de novos métodos de produção de laminações fibras de vidro impregnadas com resina epoxídica. Para tal, é necessário verificar vários parâmetros das amostras preparadas e analisar se estas cumprem com as normas dadas pelo cliente. Na secção seguinte são apresentados os materiais e equipamentos usados no processo e diferentes métodos de produção.

3.1. Materiais

A tabela 3.1 apresenta as principais características dos materiais-base utilizados na obtenção da matriz. A mistura resina-catalisador foi efetuada numa proporção de 100:35 (em peso) e, de acordo com o fornecedor, corresponde às propriedades resumidas na tabela 3.2. O endurecedor usado possui um tempo de cura entre 6 a 12 horas, à temperatura ambiente.

Tabela 3.1. Propriedades da matriz [anexo A].

Material	Denominação	Fornecedor	Densidade (g/cm ³)	Viscosidade (mPa.s)
Resina Epóxi	EPIKOTE™ MGS LR 135	Hexion B.V. Roterdão, Holanda	1,14 - 1,18	2,30 - 2,90
Agente de cura	EPIKURE™ MGS LH 135		0,90 - 1,02	50 - 150

Tabela 3.2.. Propriedades da matriz de acordo com o fornecedor [anexo A].

Material	Densidade (g/cm ³)	E (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Resistência à compressão (MPa)	Temperatura de funcionamento
Resina com endurecedor	1,10 - 1,20	2,9 -3,2	68 - 80	80 - 100	[-60;+80] °C após tratamento térmico

Como havia sido mencionado anteriormente, o reforço selecionado foram as fibras de vidro (tipo E) encontram-se sumariadas na tabela 3.3 as suas principais características.

Tabela 3.3. Características do reforço [anexo B].

Reforço	Orientação	Referência	Densidade superficial (g/m ²)	Fornecedor	Dimensão (mm)
Fibra de vidro E (ETX 600)	-45°/+45°	2AX-45-G1	830	SAERTEX - Lanheses, Portugal	250 x 1000

Um dos objetivos deste estágio passou por aferir o efeito da utilização de diferentes tipos de saco de vácuo durante o processamento dos compósitos. Assim, manteve-se o usado atualmente pela empresa na linha de produção, sacos em nylon de cor azul e selecionou-se, como alternativa, sacos economicamente mais acessíveis, em polietileno de baixa densidade (PEBD) reciclado de cor preta. Estes sacos, cujas principais propriedades se encontram resumidas na tabela 3.4, serão designados nesta dissertação pela cor que apresentavam.

Tabela 3.4. Características dos sacos de vácuo.

Saco de vácuo	Fornecedor	Referência	Espessura (µm)	Tensão de rotura (MPa)	Alongamento (%)	Preço (€/m)	Tg (°C) [10]
Azul [anexo C]	Umeco Process Materials Ltd,	VACFILM4 65B	75	65,0	350	0,229	57
Preto [anexo D]	---	---	35	27,3	735	0,138	-110

Por fim, na tabela 3.5, resumem-se os materiais consumíveis usados na configuração dos laminados, cuja função foi já anteriormente descrita (sub-capítulo 2.4).

Tabela 3.5. Outros materiais consumíveis.

Materiais	Felpo	<i>Peel Ply</i>	Folha desmoldante (0,077€/m)	<i>Tacky tape</i>
Função	Facilita a passagem do ar	Confere rugosidade à superfície do laminado	Facilita a desmoldação do felpo	Evita a entrada de ar (isolante)

3.2. Preparação das amostras

As amostras usadas neste estudo combinam dois métodos de impregnação, a saber: a laminação manual e a laminação com a Máquina de Impregnação Automática (MIA) e ainda quatro modelos de configuração.

3.2.1. Laminação manual

No processo de laminação manual, tal como o nome indica, a aplicação da resina é feita por deposição manual. A mistura de resina com endurecedor, misturadas manualmente num balde, numa razão de 100:35 em peso, foram aplicadas alternadamente entre as camadas de fibra de vidro, com um rolo. O operador faz tantas passagens quanto as necessárias, observando a “olho nu” se as fibras já se encontram impregnadas (figura 3.1) e simultaneamente a passagem do rolo remove o ar que possa ficar aprisionado.



Figura 3.1. Impregnação manual do laminado.

Obtido o laminado, construíram-se 2 setup, como se mostrará posteriormente, e fez a compactação recorrendo ao processo de moldação com saco de vácuo. O processo de cura foi feito com recurso a um termo ventilador. Este procedimento foi usado pela empresa desde a sua fundação, sendo bastante dispendioso, uma vez que a quantidade de resina a usar na impregnação dependia da sensibilidade e da experiência do operário.

Na tabela 3.6 encontram-se os parâmetros usados no processo de compactação, previamente definidos pela Senvion para a produção dos laminados. Atualmente na linha de produção, os laminados são compactados com uma pressão de vácuo de 6 mbar e curados a uma temperatura de 70 °C, durante 6 horas.

Tabela 3.6. Parâmetros usados na moldação com saco de vácuo.

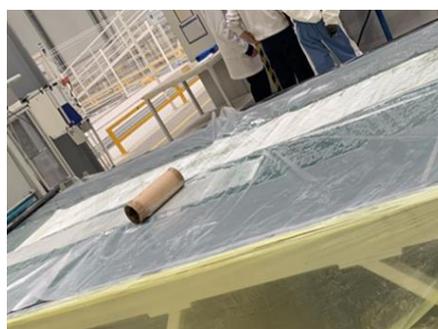
Método de impregnação	Pressão de vácuo (mbar)	Temperatura de cura (°C)	Tempo de cura (h)	Fluxo de resina com endurecedor (g/m ²)
Manual	6	70	6	----
MIA				500

3.2.2. Laminação com a MIA

A Ria Blades adquiriu um equipamento de impregnação automático (figura 3.2 a)) que debita uma certa quantidade de resina com endurecedor num tapete rolante. A fibra é posteriormente colocada por cima da resina, permanecendo o tempo suficiente para uma boa molhabilidade/impregnação (figura 3.2b)). As amostras também foram compactadas recorrendo ao processo de moldação com saco de vácuo e posteriormente curadas com mantas térmicas. Este método de impregnação é o mais económico, sendo a impregnação mais rápida e de menor desperdício. Os parâmetros usados neste processo foram os mesmos da laminação manual (tabela 3.6).



a)



b)

Figura 3.2. a) Fornecimento de resina pela MIA; b) Laminação das fibras com a MIA.

3.2.3. Configurações dos laminados

Obtidos os pré-impregnados a partir de 4 camadas de 2AX-45-G1, em modo manual ou automático, estes foram colocados sobre uma mesa para se construir diferentes configurações de moldação.

Na atual linha de produção, os materiais usados estão representados no esquema da figura 3.3. Como se pode observar, estes são constituídos por 4 camadas, ou seja, imediatamente adjacente ao pré-laminado coloca-se uma camada de *peel ply*, seguida de uma camada de folha desmoldante, uma tira de felpo a cobrir a área toda do laminado e, por fim, o saco de vácuo azul.

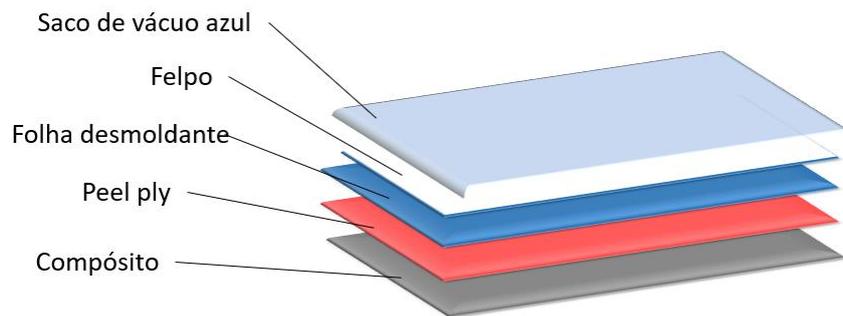


Figura 3.3. Configuração usada na linha de produção de reforços de acabamento.

Para além da modificação do método de impregnação, este trabalho contempla, também, o efeito do tipo de material usado no processo de compactação do laminado.

Tal como está apresentado na figura 3.4, foram feitas 4 abordagens diferentes, correspondentes às configurações exibidas.

Assim, as amostras STD A apresentam os mesmos materiais m que estão a ser usados na linha de produção, no entanto, neste caso, o felpo apenas se encontra na zona central do laminado, ou seja, não cobre a área total. O modelo STD P representa o mesmo tipo de materiais que as amostras anteriores, STD A, substituindo o saco de vácuo azul (base nylon) pelo preto (base polietileno). No que concerne as amostras SF, estas são as que não apresentam folha desmoldante, sendo o sufixo A (SF A) refere ao uso do saco de vácuo azul e o P (SF P) ao do saco de vácuo preto.

As amostras em estudo foram preparadas numa mesa, como se mostra na figura 3.5. Foram preparados quatro laminados (com as configurações da figura 3.4) para cada método de impregnação (manual e mecânica).

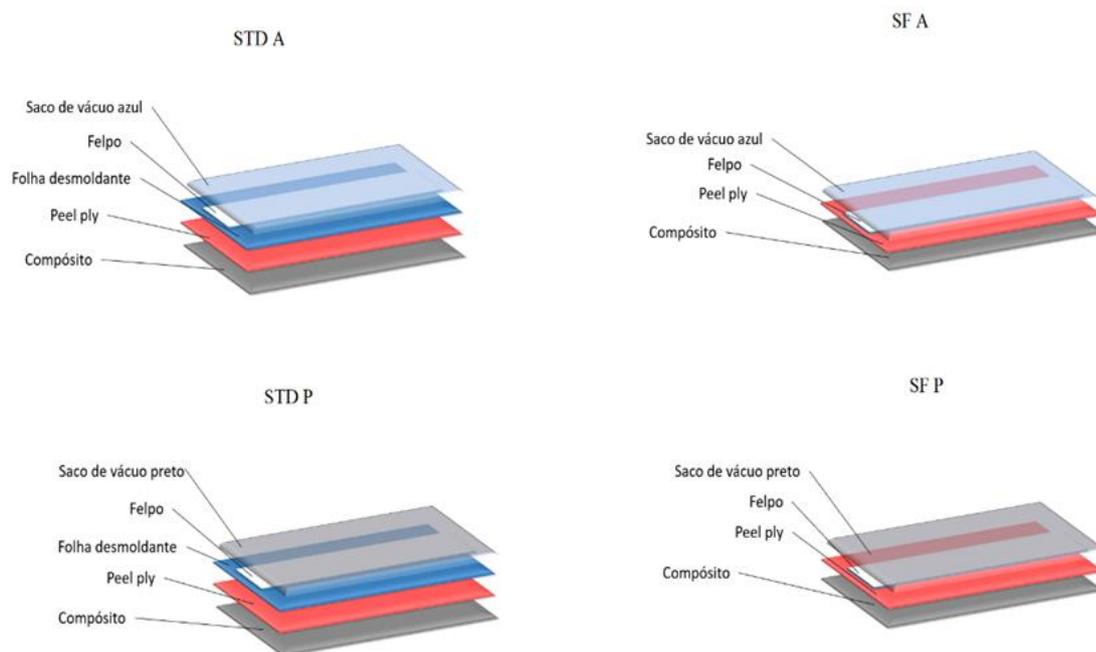


Figura 3.4.Representação esquemática dos diferentes tipos de configurações estudadas.

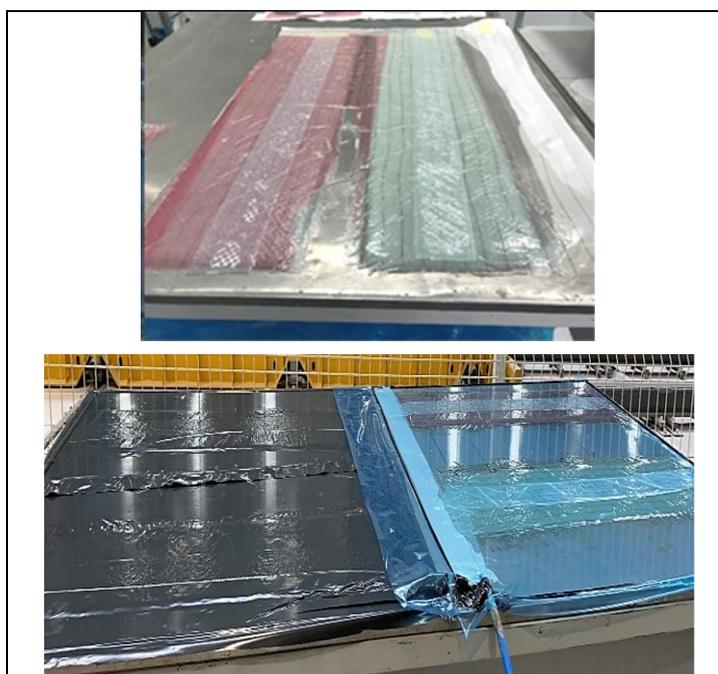


Figura 3.5.Preparação das amostras na mesa.

3.2.4. Identificação das amostras

Tal como se ilustra na figura 3.6, as amostras foram cortadas em 5 tiras. De referir, de acordo com o processamento, que as amostras 5 são as que se encontram mais

próximas do vácuo, enquanto as amostras 1 são as mais afastadas. De seguida cada tira foi dividida em 3 partes, E, C e D, sendo que a posição C refere-se à zona do laminado onde se encontra o felpo

Foram obtidas 120 amostras.

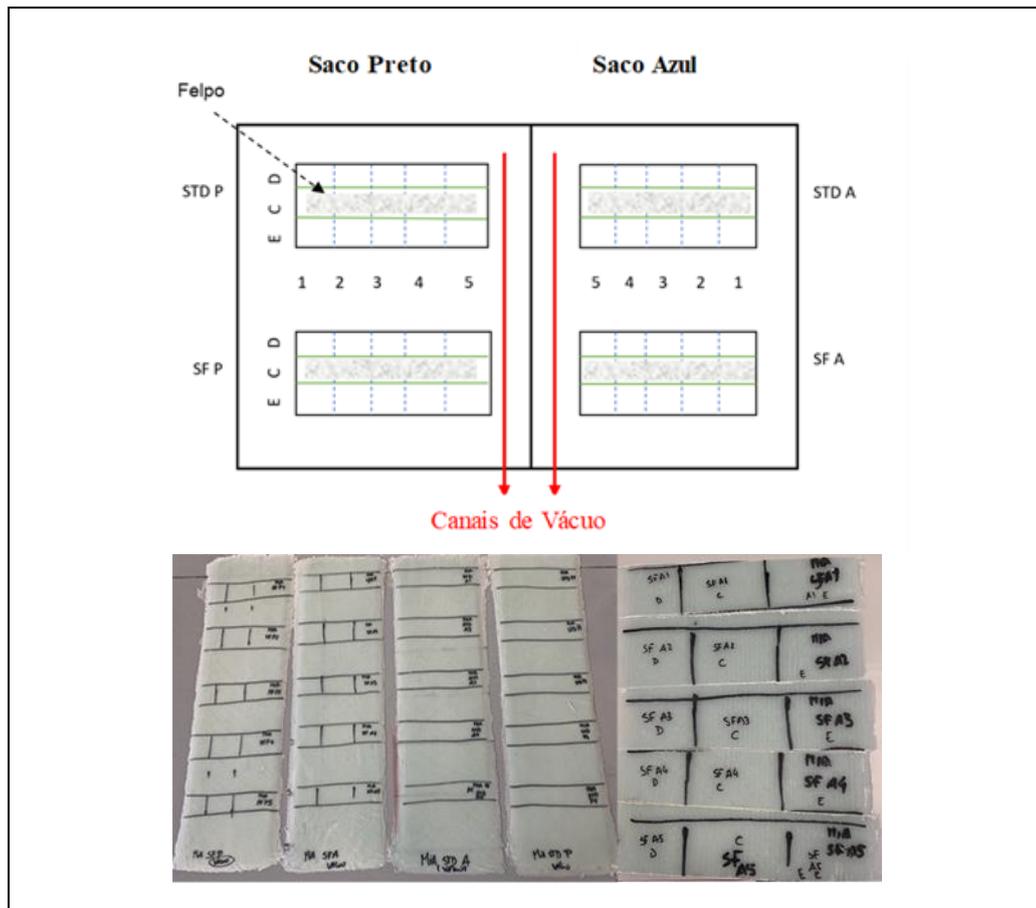


Figura 3.6. Esquema da preparação e identificação das amostras e respetiva identificação.

3.3. Medição das Espessuras

Para cada amostra, foram medidas as espessuras para cada posição, E, C e D (figura 3.6), com recurso a um paquímetro. No total, foram analisadas 120 amostras.

3.4. Teste de Cinzas

Este ensaio foi conduzido seguindo o procedimento fornecido pela Senvion, “*Determination of Fiber Mass Content os Pre Pregs and Laminates*” [19]. O teste de cinzas consiste no método de decomposição térmica da amostra, processo segundo o qual a resina presente na amostra evapora, ficando apenas a fibra seca. Isto permite a determinação da quantidade mássica de fibra (*Fiber Mass Content*, FMC) presente na amostra. Para este teste foram utilizadas as mesmas amostras usadas na medição de espessuras.

As amostras são colocadas em forno de altas temperaturas (figura 3.7) cujo ciclo térmico corresponde ao aquecimento até 625 °C, manutenção durante 3 horas e arrefecimento.

Numa balança de alta precisão, começou-se por pesar o cadinho (m_1), pesando de seguida o cadinho com a amostra (m_2). De seguida colocou-se o cadinho com a amostra na mufla. Depois de as retirar da estufa, voltou-se a pesar a amostra (m_3).

A percentagem de FMC presente na amostra foi avaliada por recurso à equação (1).

$$FMC = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100 \quad (1)$$

Segundo as especificações dadas, o valor de FMC para os laminados deve situar-se na gama 56-72%.

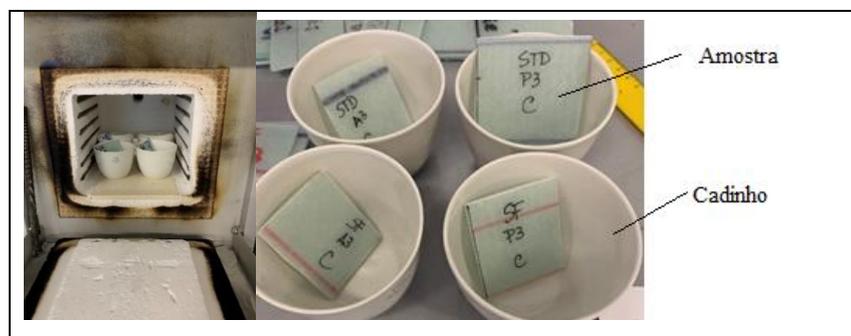


Figura 3.7. Teste de cinzas.

3.5. Teste da Porosidade

O teste de porosidade consiste na obtenção de imagens microscópicas das amostras e posterior análise dessas imagens. Segundo a especificação, “Visual Determination of Porosity Using Microsections”, a zona a observar deve ter pelo menos 20 mm de comprimento.

Numa primeira etapa, preparou-se um provete cilíndrico em resina (resina epoxídica MA2+, combinado com o catalisador MA2+ (Presi, França)) que continha várias amostras dispostas paralelamente, tal como se ilustra na figura 3.8 a). Os provetes são polidos mecanicamente antes da visualização ótica.

A determinação da percentagem de porosidade é obtida por recurso ao programa ImageJ, seguindo as especificações da norma V-0.0-BL.0030-A-B: “*Visual determination of porosity using microsections*” [20].

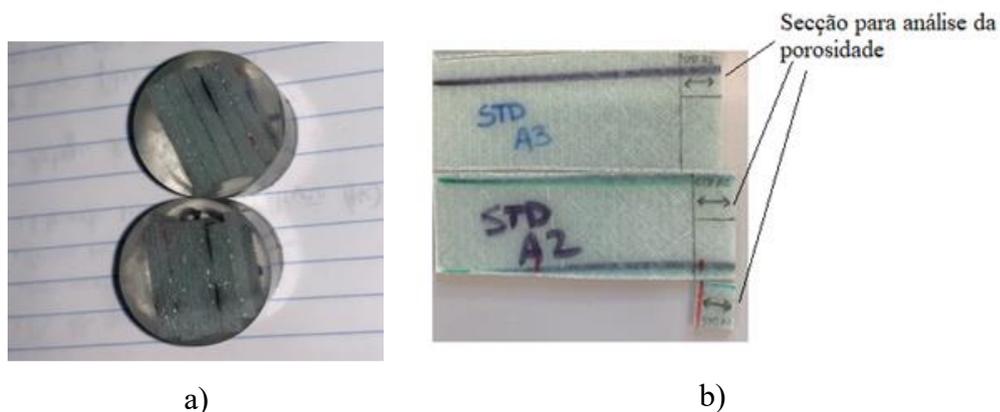


Figura 3.8.a) Provete inicial com as amostras para analisar a porosidade; b) secção das amostras analisadas ao microscópio.

Esta tentativa ficou frustrada devido à presença de ar na montagem que não permitia a distinção entre os poros reais das amostras e os do provete. Por isso, a obtenção de imagens foi feita analisando a secção transversal individual de cada amostra (figura 3.8b)) num microscópio ótico (por gentileza do CEMMPRE - Grupo de Tecnologia do DEM-UC). As amostras foram preparadas metalograficamente com um disco de polimento SiC (P4000) e as micrografias foram obtidas com uma ampliação de 50x. A norma obriga a que as imagens obtidas estejam identificadas, com escala e os poros devem estar realçados, para que a sua identificação visual seja mais fácil.

Para cálculo da porosidade, foi medida em primeiro lugar, a área total da superfície a analisar, com o programa ImageJ. De seguida foram selecionados manualmente os poros que se encontravam visíveis na fotografia e o próprio programa mede a área selecionada. O cálculo da fração de porosidade existente na amostra foi feito a partir da seguinte equação:

$$\% \text{ Porosidade} = \frac{\text{Área dos poros}}{\text{Área total}} \times 100 \quad (2)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Optou-se por apresentar, em primeiro lugar, os dados obtidos para as amostras laminadas manualmente, seguidos dos resultados das amostras produzidas por impregnação com a MIA. Posteriormente será feita a comparação entre os diferentes métodos. De relembrar que o objetivo deste trabalho é a validação do processo de produção mais económico e que cumpra com todos os requisitos do cliente.

4.1. Avaliação da Espessura

Os valores obtidos para as amostras laminadas manualmente estão organizados nas tabelas 4.1 e 4.2. É importante relembrar as arquiteturas estudadas foram as mostradas anteriormente na figura 3.6.

Tabela 4.1. Espessuras das amostras STD laminadas manualmente.

Método manual	Espessura [mm]		
	E	C	D
STD A1	3,22	2,81	3,08
STD A2	3,12	2,85	3,21
STD A3	3,24	2,85	3,20
STD A4	3,31	3,20	3,15
STD A5	3,00	2,94	3,38
Média STD A	3,18±0,11	2,93±0,14	3,20±0,10
$\sigma/\mu \times 100$ (%)	3,4	4,8	3,1
STD P1	3,38	3,06	3,41
STD P2	3,39	3,36	3,47
STD P3	3,63	3,39	3,54
STD P4	3,57	3,30	3,56
STD P5	3,39	3,11	3,29
Média STD P	3,47±0,11	3,24±0,13	3,45±0,10
$\sigma/\mu \times 100$ (%)	3,1	4,1	2,8

Para uma melhor visualização destes resultados, optou-se pela sua representação gráfica, figuras 4.1 e figuras 4.2, correspondendo às amostras laminadas manualmente STD e SF, respetivamente.

Tabela 4.2. Espessuras das amostras SF laminadas manualmente.

Método manual	Espessura [mm]		
	E	C	D
SF A1	3,34	2,86	3,27
SF A2	3,18	3,01	3,42
SF A3	3,40	2,99	3,35
SF A4	3,34	2,99	3,38
SF A5	3,31	2,80	3,18
Média SF A	3,31±0,07	2,93±0,08	3,32±0,09
$\sigma/\mu \times 100$ (%)	2,2	2,9	2,6
SF P1	3,85	3,40	3,82
SF P2	3,50	3,44	3,81
SF P3	3,54	3,32	3,65
SF P4	3,83	3,46	3,84
SF P5	3,14	2,85	3,10
Média SF P	3,57±0,26	3,29±0,23	3,64±0,28
$\sigma/\mu \times 100$ (%)	7,3	6,9	7,7

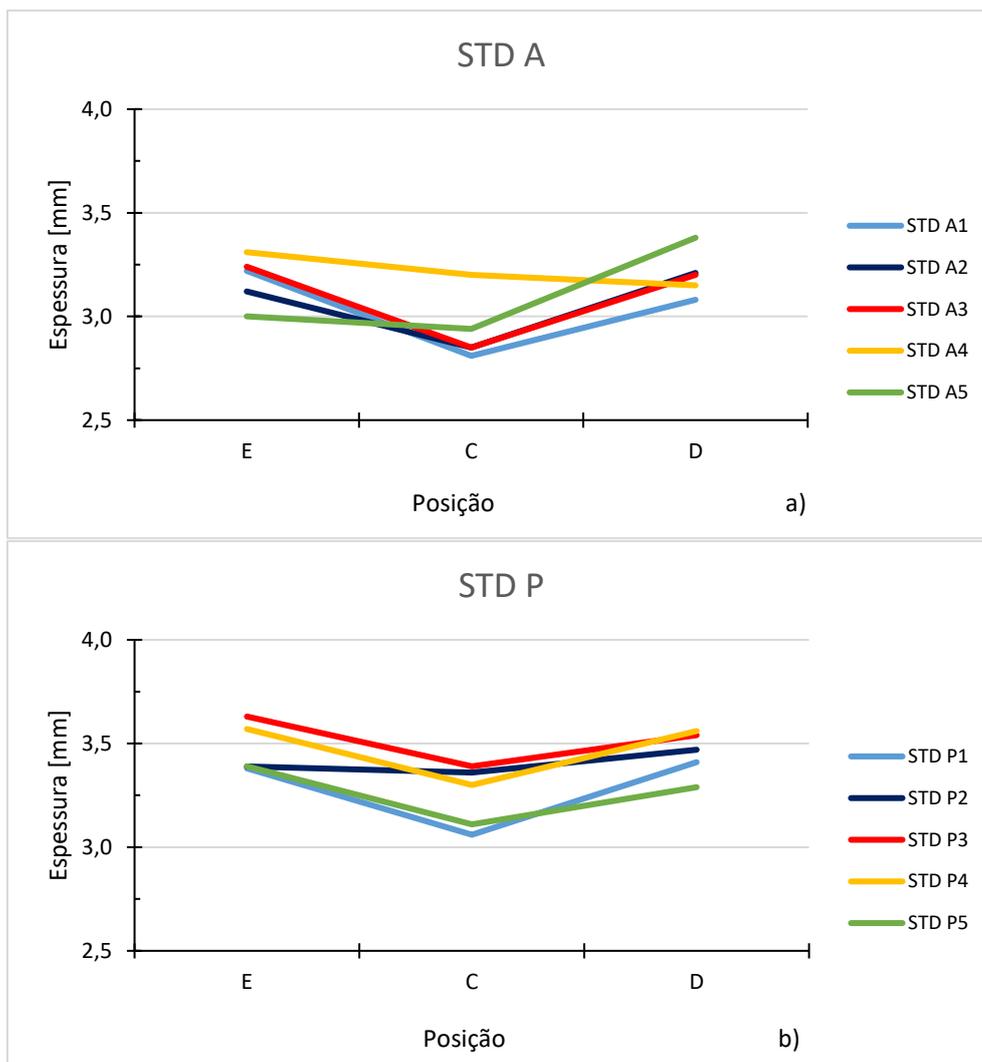


Figura 4.1. Espessuras das amostras laminadas manualmente para: a) STD A; b) STD P.

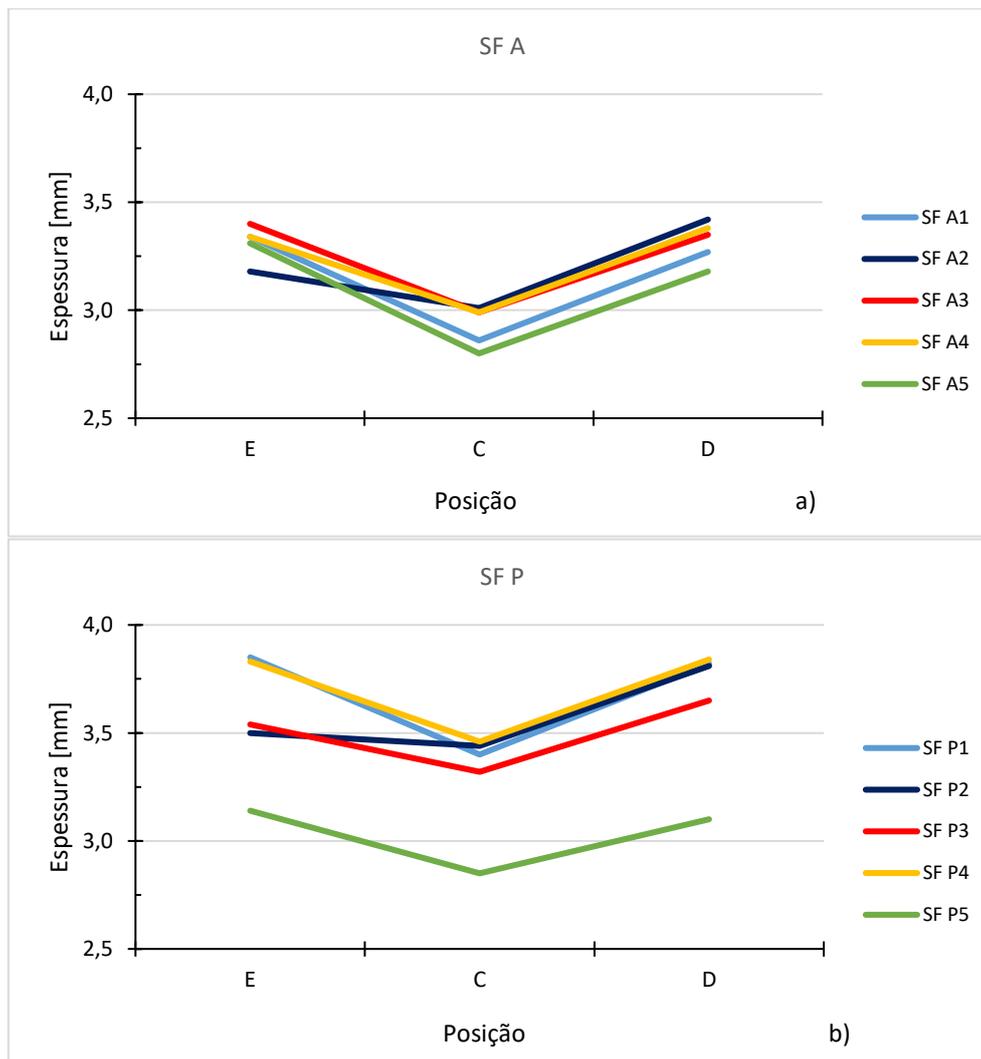


Figura 4.2. Espessuras das amostras laminadas manualmente para: a) SF A; b) SF P.

A análise das figuras 4.1 e 4.2, permite concluir, genericamente, que o conjunto formado pelas camadas, após laminação manual e moldação com saco de vácuo preto ou azul apresenta menor espessura na posição C, que contém a camada do felpo (ver figura 3.6).

Em relação à distância a partir do vácuo, posições 1 a 5, destaque-se o andamento das amostras SF P5 (ver figura 4.2 b)) que apresentam menores valores de espessura nas posições selecionadas E, C e D. Todavia, a posição imediatamente a seguir, SF P4 (evolução amarela figura 4.2b)) é a que exhibe maiores valores de espessura. Assim, não é possível aferir uma relação entre a espessura e a distância ao vácuo.

Relativamente ao efeito da camada de folha desmoldante, as evoluções mostradas nas figuras 4.1 e 4.2, parecem indicar que a espessura do laminado é independente deste fator. Os valores de espessura obtidos com e sem folha, são muito similares.

Optou-se ainda neste trabalho por apresentar a média dos andamentos das espessuras em função da posição avaliada para as amostras STD A, STD P e as amostras SF com o mesmo tipo de saco de vácuo. As evoluções estão ilustradas na figura 4.3.

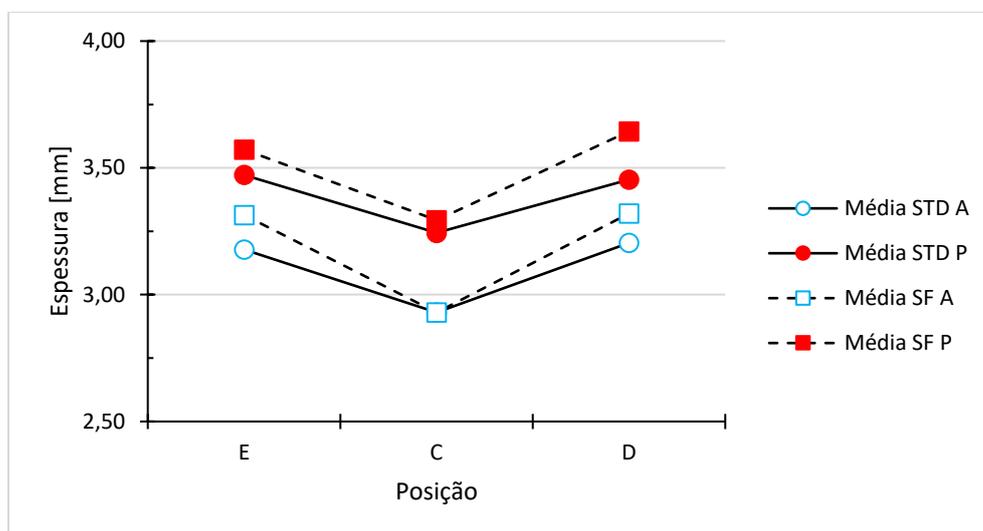


Figura 4.3. Valores médios da espessura para a laminação manual.

Analisando a figura 4.3, pode concluir-se que os compósitos produzidos com saco de vácuo azul são os que apresentam valores de espessura média mais baixos. De entre estas 4 evoluções, destaca-se a do SF P, por exibir a maior diferença de espessura entre as posições E e D, com todos os outros valores muito semelhantes. Há também coincidência com os valores da espessura para a posição C. Assim, quando se usa saco de vácuo preto os valores médios de espessura são coincidentes (aproximadamente 3,3 mm) e o mesmo acontece para o saco azul com espessuras ligeiramente inferiores (aproximadamente 2,93 mm).

Relativamente às amostras obtidas com laminação MIA, as variações de espessura em relação às 3 posições (E, C e D) encontram-se compiladas na tabela 4.3. A designação das amostras é a mesma usada nos laminados manualmente.

Para uma melhor visualização dos resultados, fez-se a sua representação gráfica, figuras 4.4 e 4.5.

Genericamente, observa-se o mesmo tipo de andamento que a obtida na laminação manual, ou seja, existe um ponto de inflexão na posição C. Com este método de impregnação há, no entanto, uma menor dispersão de valores. Também, neste caso, a presença ou não da folha desmoldante, é indiferente na espessura final do compósito.

Tabela 4.3. Espessuras das amostras laminadas com a MIA.

Método MIA	Espessura [mm]		
	E	C	D
STD A1	3,03	2,74	2,86
STD A2	2,89	2,76	2,92
STD A3	2,94	2,68	2,84
STD A4	2,97	2,68	2,86
STD A5	2,91	2,63	2,88
Média STD A	2,95±0,05	2,70±0,05	2,87±0,03
$\sigma/\mu \times 100$ (%)	1,7	1,7	0,9
STD P1	3,04	2,75	3,14
STD P2	2,97	2,82	3,10
STD P3	2,79	2,81	3,08
STD P4	3,03	2,79	2,96
STD P5	2,75	2,69	2,9
Média STD P	2,92±0,12	2,77±0,05	3,04±0,09
$\sigma/\mu \times 100$ (%)	4,19	1,71	2,99
SF A1	3,07	2,77	3,23
SF A2	2,86	2,57	2,86
SF A3	2,90	2,63	2,97
SF A4	3,00	2,65	2,95
SF A5	2,90	2,52	2,91
Média SF A	2,95±0,08	2,63±0,08	2,98±0,13
$\sigma/\mu \times 100$ (%)	2,6	3,2	4,3
SF P1	3,05	2,94	3,28
SF P2	3,10	2,91	3,12
SF P3	2,92	2,87	3,07
SF P4	2,93	2,78	3,03
SF P5	2,85	2,70	2,91
Média SF P	2,97±0,09	2,84±0,09	3,08±0,12
$\sigma/\mu \times 100$ (%)	2,8	2,6	2,3

A distância a que se encontra o vácuo (posição 5 a 1) também não parece afetar a espessura do laminado. Observando a figura 4.5 a), a amostra com maior espessura é a SF A1 enquanto que posição logo a seguir, SF A2, apresenta espessuras mais baixas. Calculando o valor médio para as espessuras das amostras laminadas pela MIA, obtém-se as evoluções

representadas na figura 4.6. Analisando esta figura, a variação entre as zonas E e D (onde não existe felpo) é menor para as amostras compactadas com saco azul.

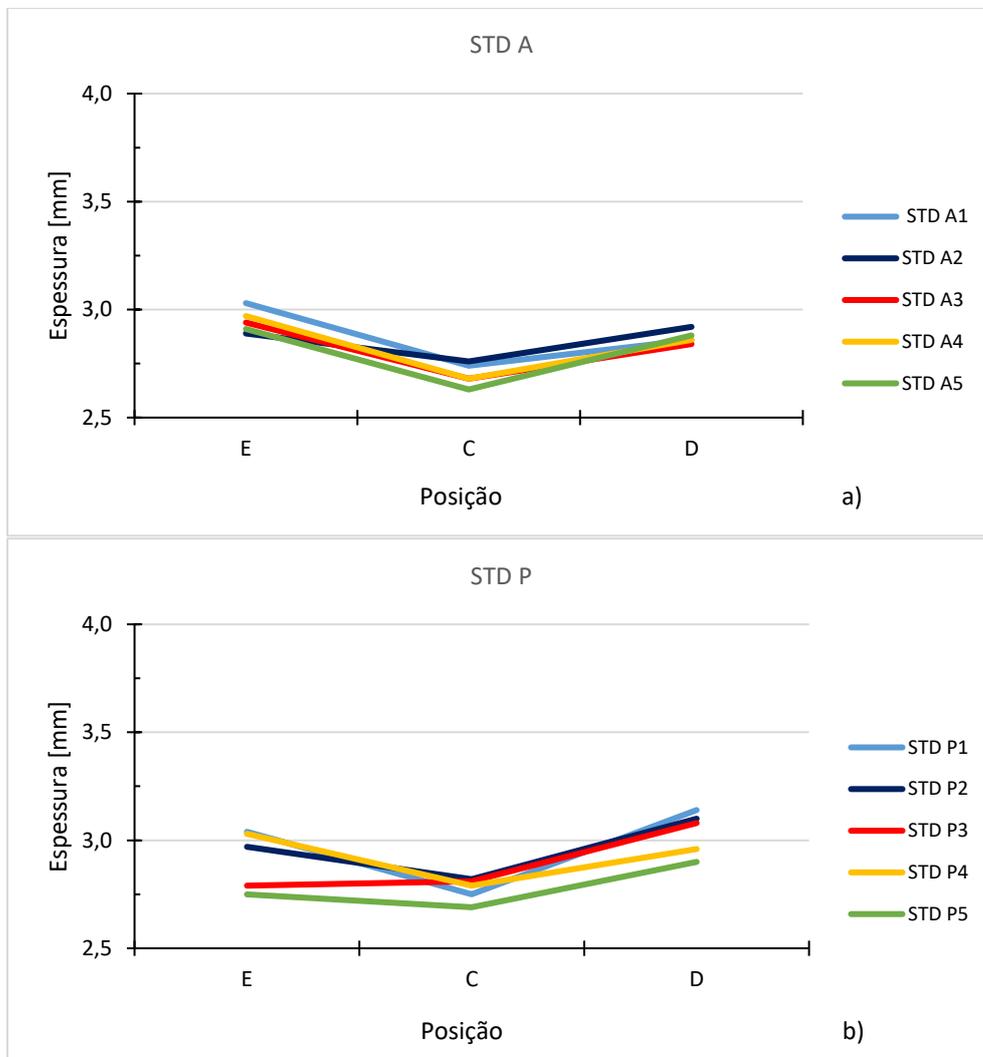


Figura 4.4. Espessuras das amostras laminadas pela MIA para: a) STD A; b) STD P.

O efeito do tipo de saco de vácuo na presença ou não da folha desmoldante exibe-se na figura 4.7. Comparando os gráficos dos valores médios para a laminação manual (figura 4.7 a) e b)) com a laminação mecânica (figura 4.7 c) e d)) verifica-se que a impregnação das fibras com a MIA permite obter valores mais baixos.

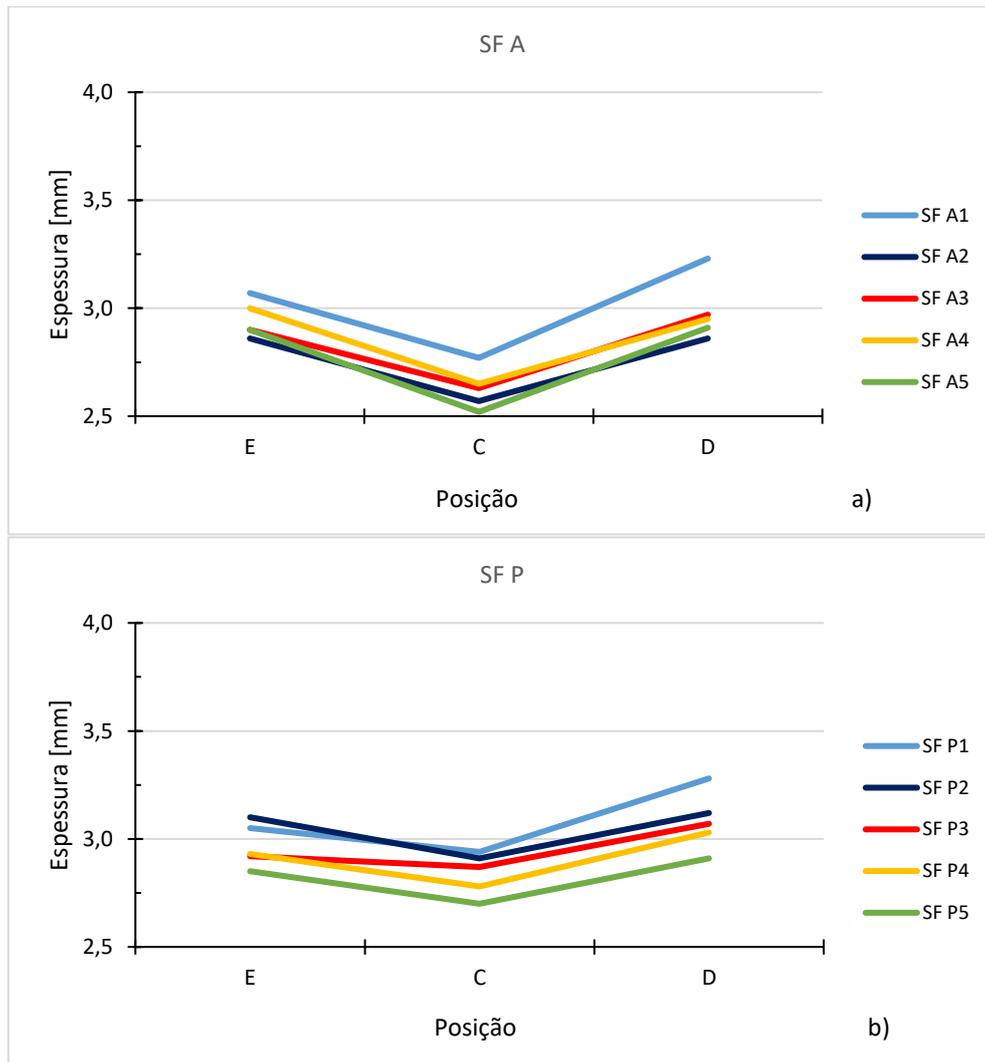


Figura 4.5. Espessuras das amostras laminadas pela MIA para: a) SF A; b) SF P.

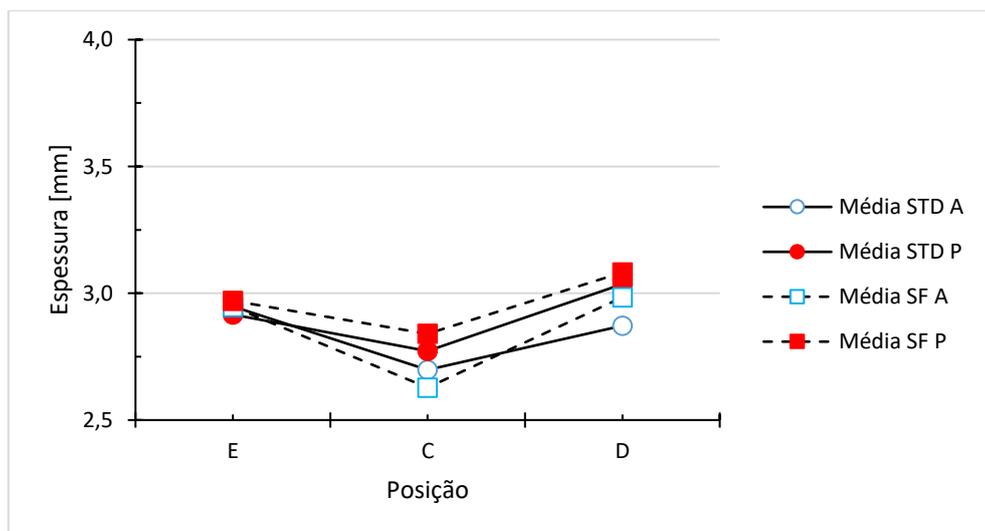


Figura 4.6. Valores médios da espessura para a laminados com a MIA.

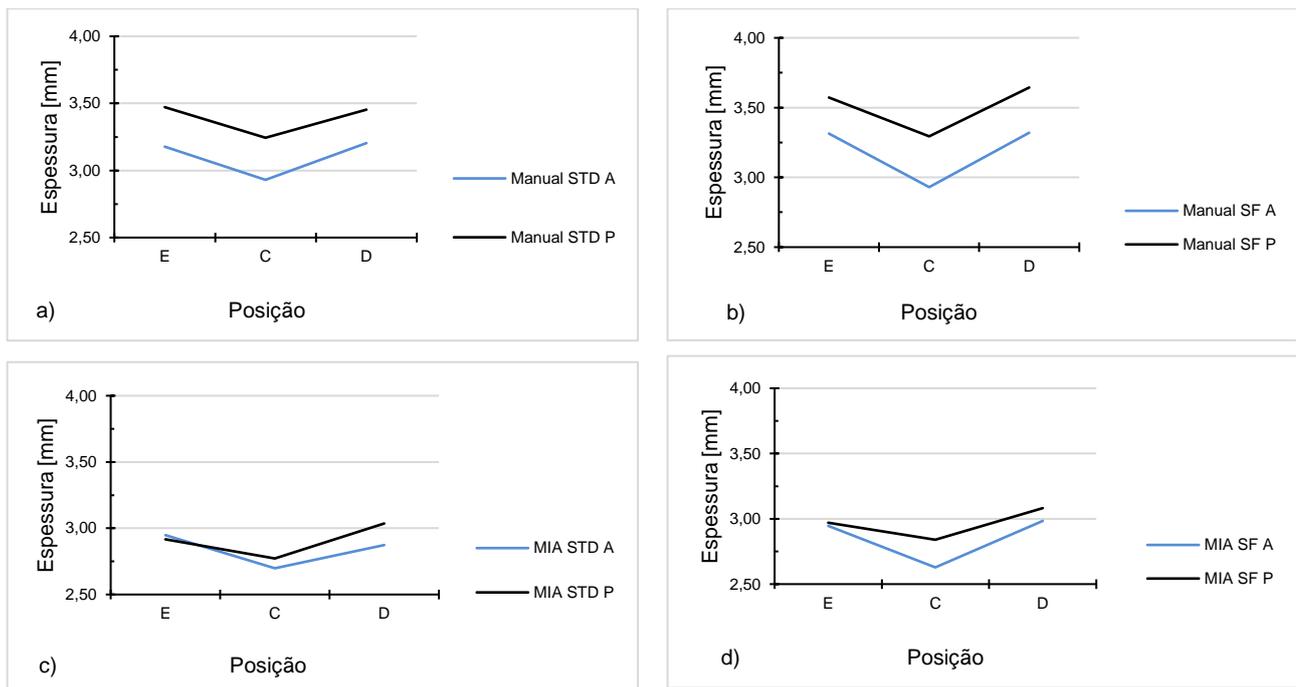


Figura 4.7. Valores médios das espessuras para: a) laminação manual STD, b) laminação manual SF; c) laminação MIA STD, d) laminação MIA SF.

Analisando os gráficos da figura 4.7, conclui-se que o saco de vácuo azul permite obter valores médios de espessura mais baixos. A presença ou não da folha desmoldante não parece afetar a compactação do laminado como um todo.

4.2. Avaliação do Teor de fibras

A avaliação do teor em fibra foi feita por recurso à norma V-0.0-BL.00.10-A-EN-H: “Senvion- General Product Specification for RE Rotor blades” [18]. Para que o método seja validado, os valores de FMC devem situar-se no intervalo 56-72 %. Relembrando o esquema da figura 3.6, os valores de FMC obtidos, para cada posição, estão compilados na tabela 4.4.

Genericamente, pode afirmar-se que se obtiveram bons resultados, já que a grande maioria dos valores FMC se situa na gama pré-estabelecida. Apenas um resultado ficou fora do limite da especificação (célula a vermelho) e três no limite (células a laranja) inferior.

Tabela 4.4. Valores FMC para laminados: a) manualmente; b) com a MIA.

a)	FMC(%)			b)	FMC (%)		
Manual	E	C	D	MIA	E	C	D
STD A1	63	67	66	STD A1	65	68	65
STD A2	63	66	66	STD A2	65	68	65
STD A3	62	65	67	STD A3	65	68	65
STD A4	61	62	66	STD A4	66	69	66
STD A5	62	64	67	STD A5	65	70	67
Média STD A	62,2±0,7	64,8±1,7	66,4±0,5	Média STD A	65,2±0,4	68,6±0,8	65,6±0,8
$\sigma/\mu \times 100$ (%)	1,2	2,7	0,7	$\sigma/\mu \times 100$ (%)	0,6	1,2	1,2
STD P1	63	65	60	STD P1	63	67	63
STD P2	58	62	61	STD P2	64	67	64
STD P3	59	61	57	STD P3	64	68	64
STD P4	59	60	57	STD P4	65	68	63
STD P5	62	64	60	STD P5	66	72	68
Média STD P	60,2±1,9	62,4±1,9	59,0±1,7	Média STD P	64,4±1,0	68,4±1,9	64,4±1,9
$\sigma/\mu \times 100$ (%)	3,2	3,0	2,8	$\sigma/\mu \times 100$ (%)	1,6	2,7	2,9
SF A1	64	65	61	SF A1	64	68	63
SF A2	59	64	62	SF A2	67	70	68
SF A3	61	65	60	SF A3	67	70	66
SF A4	61	63	62	SF A4	66	70	65
SF A5	63	67	62	SF A5	68	71	65
Média SF A	61,6±1,7	64,8±1,3	61,4±0,8	Média SF A	66,4±1,4	69,8±1,0	65,4±1,6
$\sigma/\mu \times 100$ (%)	2,8	2,0	1,3	$\sigma/\mu \times 100$ (%)	2,0	1,4	2,5
SF P1	62	60	55	SF P1	63	66	62
SF P2	56	59	57	SF P2	64	65	63
SF P3	56	62	59	SF P3	63	66	63
SF P4	59	58	60	SF P4	65	67	63
SF P5	66	68	68	SF P5	67	69	65
Média SF P	59,8±3,8	61,4±3,6	59,8±4,4	Média SF P	64,4±1,5	66,6±1,4	63,2±1,0
$\sigma/\mu \times 100$ (%)	6,4	5,8	7,4	$\sigma/\mu \times 100$ (%)	2,3	2,0	1,6

Para uma melhor análise destes dados, fez-se a sua representação gráfica. As figuras 4.8 e 4.9 mostram os valores de FMC para as amostras laminadas manualmente em função das posições E, C e D. Foram ainda incluídas duas linhas horizontais (tracejado) correspondentes aos teores máximo e mínimo do teor em fibras.

Analisando as figuras, observa-se que o valor de FMC, para as amostras STD P e SF A, tende a ser superior na área da amostra coberta com felpe (posição C) e mais baixo nas posições E e D.

A amostra STD A (figura 4.8 a)) tem valores de FMC mais elevados para a posição D, apresentando uma evolução crescente da posição E para a D.

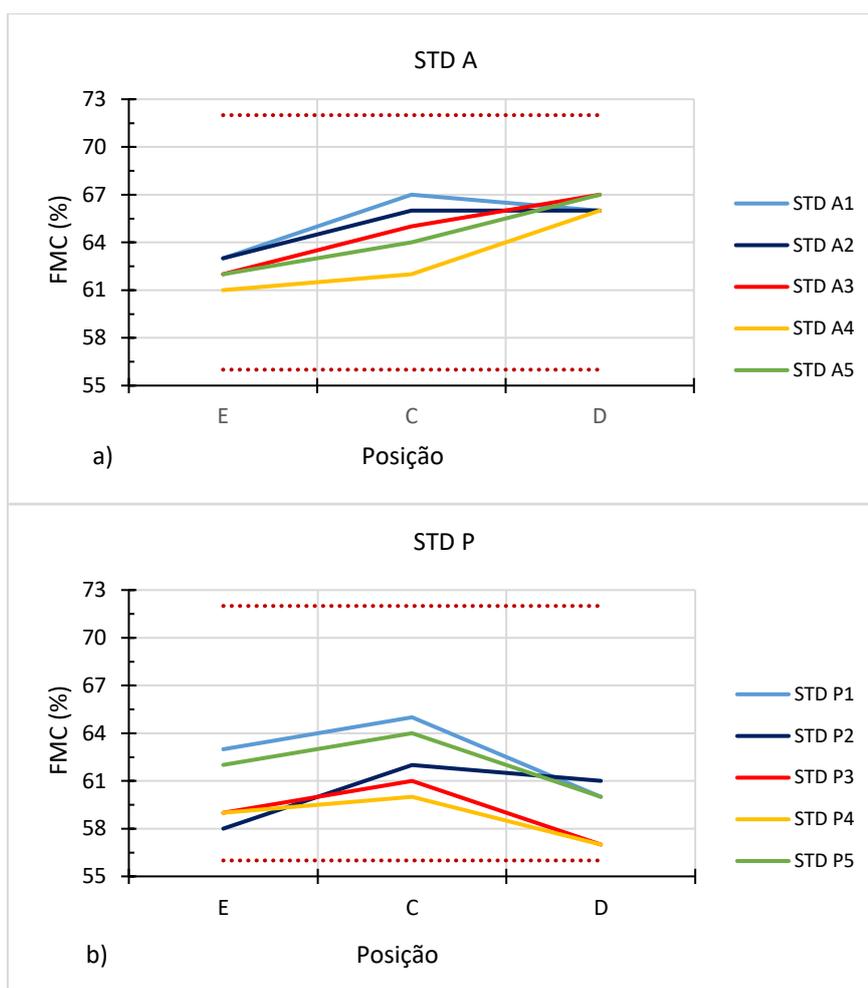


Figura 4.8. Valores de FMC da laminação manual para: a) STD A; b) STD P.

A amostra sem folha desmoldante e com saco preto (SF P), figura 4.8 b), é o que apresenta maior dispersão de valores e mais próximos da percentagem mínima exigida pela norma, não seguindo o mesmo padrão de comportamento que os outros. A única amostra que está fora do intervalo dado é a SF P1.

A presença ou não da folha desmoldante parece não afetar a quantidade de fibra presente no compósito.

Fazendo uma média das evoluções dos valores de FMC para a laminação manual, obteve-se a figura 4.10. A média dos andamentos mostra que as amostras com saco de vácuo azul apresentam uma maior quantidade média de fibra. Todavia na posição C, é a mais favorável à obtenção da mesma percentagem em fibras. O laminado STD A tem uma evolução crescente da posição E para a D, com uma diferença maior na quantidade de fibra entre E e D.

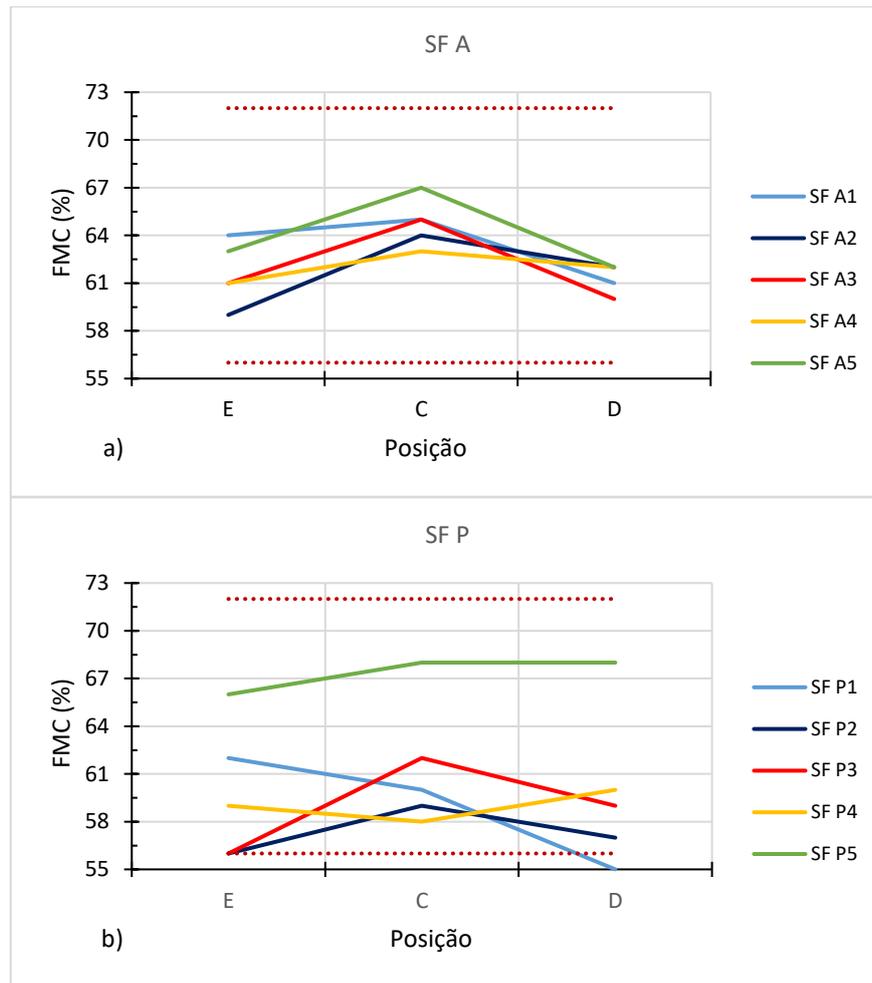


Figura 4.9. Valores de FMC da laminação manual para: a) SF A; b) SF P.

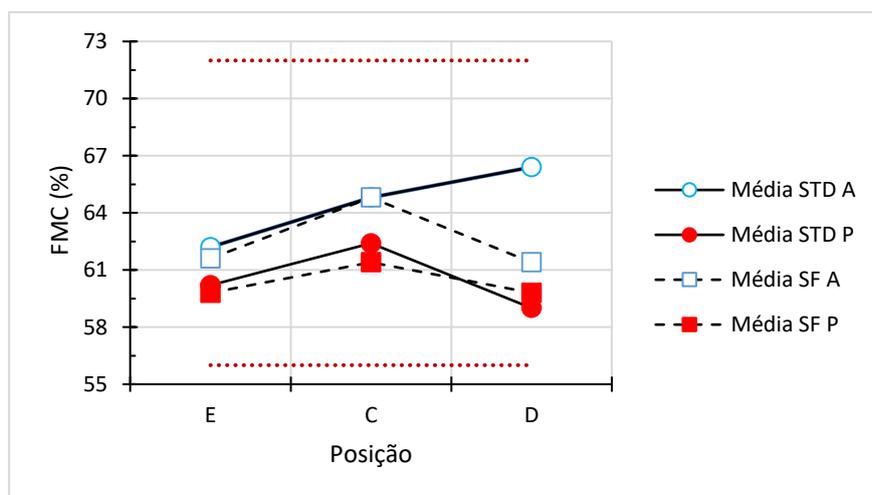


Figura 4.10. Valores médios de FMC para laminação manual.

Os valores da tabela 4.3b) do teor em fibra das amostras laminadas mecanicamente encontram-se representados nas figuras 4.11 e 4.12.

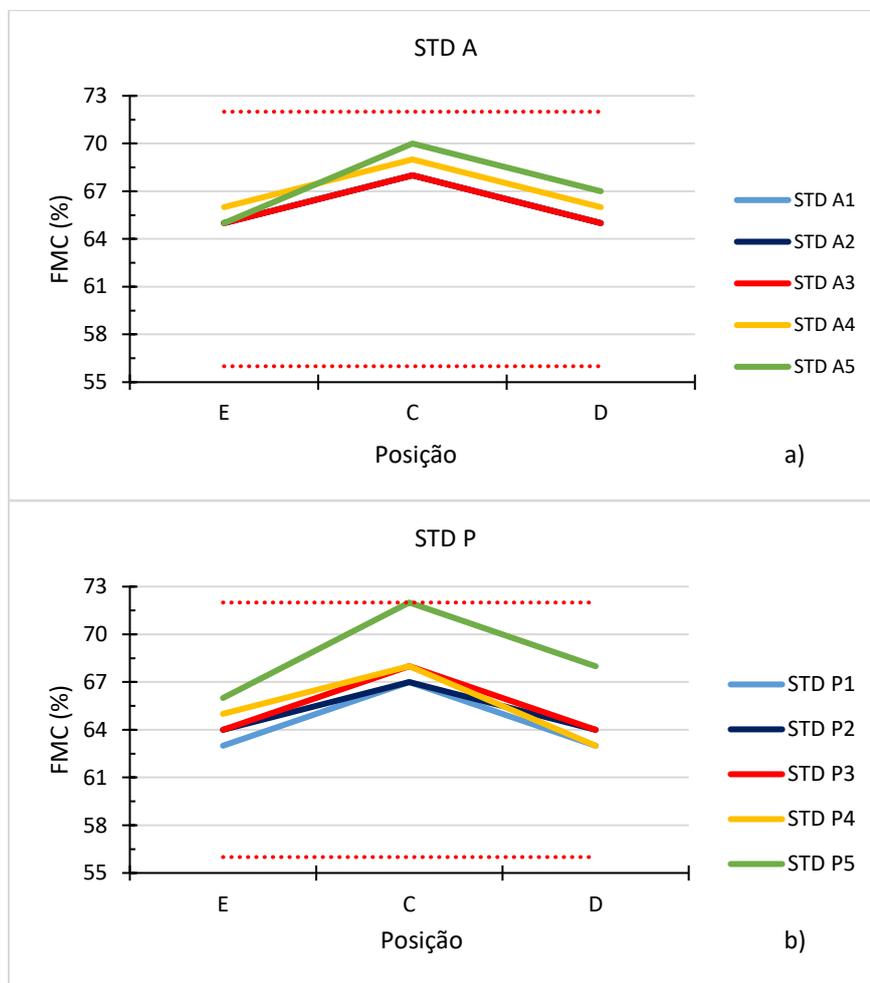


Figura 4.11. Valores de FMC da laminação com a MIA para: a) STD A; b) STD P.

No processo de impregnação das fibras por recurso a MIA, todas as 4 arquiteturas estudadas seguem o mesmo padrão de comportamento. Isto é, os valores de FMC são mais elevados na zona com felpe (zona C) e mais baixos nas extremidades das amostras (posições E e D). Neste caso, todos os resultados obtidos se situam na gama 56-72 % de fibras. Mais ainda, os valores são mais estáveis em relação à laminação feita por processo manual. A amostra SF A é que a tem valores médios mais elevados (aproximadamente $69,8 \pm 1,0$ %) e a SF P tem os mais baixos (aproximadamente $66,6 \pm 1,4$ %).

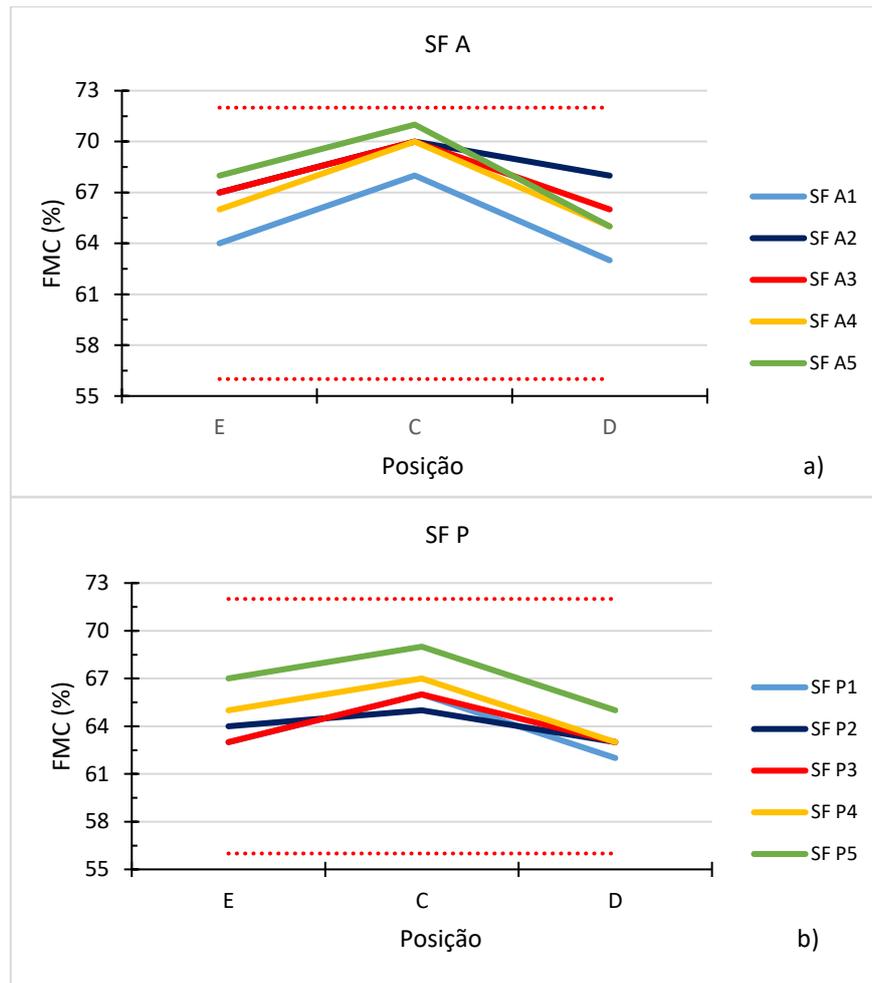


Figura 4.12. Valores de FMC da laminação com a MIA para: a) SF A; b) SF P.

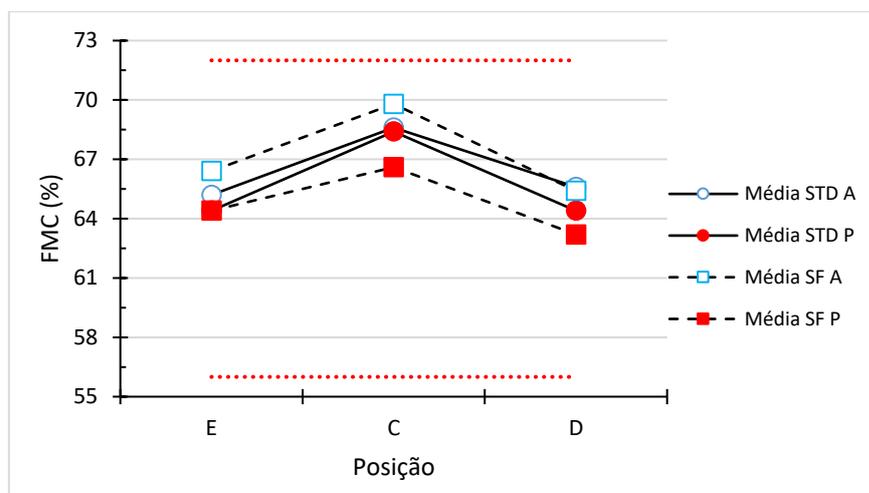


Figura 4.13. Valores médios de FMC para a laminação com a MIA.

A presença da camada de folha desmoldante parece não afetar a quantidade de fibra presente no laminado.

Na figura 4.13, podem visualizar-se os valores médios de FMC dos laminados por recurso a máquina de impregnação automática, em função das 3 posições seleccionadas.

A conclusão que se pode retirar é a de que, tal como no caso da laminação manual, os compósitos obtidos utilizando o saco de vácuo azul possuem valores mais elevados de FMC. Ora a percentagem de FMC do compósito depende, obviamente, da quantidade de resina presente (equação (1)), fixando a variável fibras de vidro. Assim, é importante comparar estes dois meios de produção, de forma a atingir os objetivos propostos. A figura 4.14 mostra a variação da percentagem de FMC para o método manual e automático.

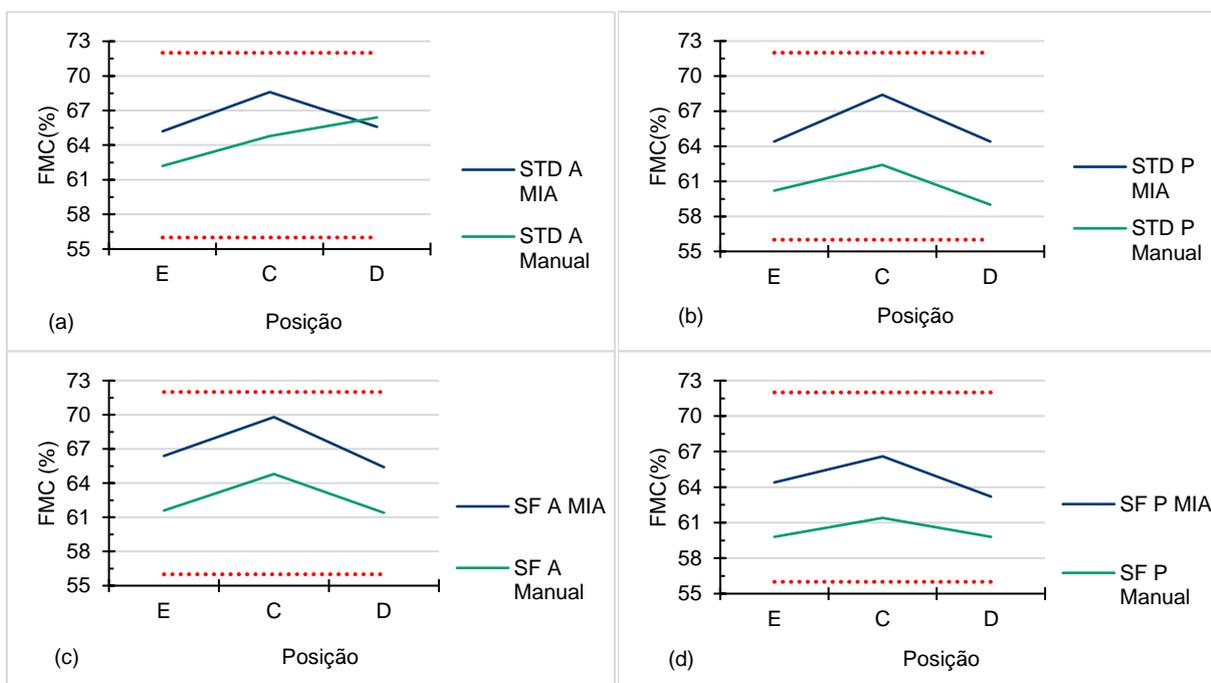


Figura 4.14. Valores médios de FMC para o método: a) STD A; b) STD P; c) SF A; d) SF P.

Pode concluir-se que o processo de impregnação das fibras por MIA permite atingir valores mais elevados de FMC, próximos do valor limite normalizado. Este comportamento deve-se ao facto de o fluxo de resina ser controlado comparativamente ao manual, havendo na extensão do compósito um menor teor em resina para molhar eficazmente todas as fibras.

Face a estes resultados, decidiu-se manter o felpo a cobrir a área toda do laminado, uma vez que este elemento permitia obter valores de FMC mais elevados.

4.3. Avaliação da Porosidade

O valor máximo de porosidade admissível em laminados é de 3%, de acordo com a norma V-0.0-BL.0010-A-EN-H: “*General Product Specification for RE Rotor Blades*” [18].

Com base nos resultados mostrados anteriormente relativos ao teor em fibra, foi decidido manter-se a camada de felpo no laminado (a cobrir área total), já que este componente ajuda a atingir os valores de FMC desejados. Assim, a análise da porosidade foi feita apenas na área coberta com felpo, ou seja, na posição C (ver figura 3.6). Os resultados obtidos por laminação manual estão sumariados na tabela 4.5 e correspondendo às posições mais perto do vácuo (posições 4 e 5). Para os laminados por MIA, foi feita uma medição aproximada da porosidade em todas as amostras. Os resultados estão condensados na tabela 4.6.

Como foi referido anteriormente (sub-capítulo 3.5) a identificação dos poros foi feita por recurso a um microscópio ótico e a posterior avaliação das áreas (zonas vermelhas) pelo uso de software específico. As micrografias obtidas para avaliação desta propriedade encontram-se compiladas no Apêndice A, sendo as figuras 4.15 e 4.16 alguns exemplos ilustrativos.

Tabela 4.5. Valores de porosidade para a laminação manual.

Método	Amostra	Área total (mm ²)	Área c/ porosidade (mm ²)	% Porosidade
Manual	STD A4 C	56,532	2,843	5,03
	STD A5 C	53,145	1,485	2,79
	Média			3,91±1,12
	$\sigma/\mu \times 100$ (%)			28,6
	STD P4 C	64,940	3,304	5,09
	STD P5 C	59,271	4,379	7,39
	Média			6,24±1,15
	$\sigma/\mu \times 100$ (%)			18,4
	SF A4 C	56,346	2,061	3,66
	SF A5 C	53,588	2,702	5,04
	Média			4,35±0,69
	$\sigma/\mu \times 100$ (%)			15,9
	SF P4 C	54,385	5,505	10,12
	SF P5 C	56,851	6,282	11,05
Média			10,59±0,46	
$\sigma/\mu \times 100$ (%)			4,4	

Devido à limitação no tempo, só foram avaliadas algumas amostras laminadas manualmente (tabela 4.5) no que concerne a porosidade. Assim, selecionaram-se as amostras mais perto do vácuo (posições 4 e 5), sendo que algumas delas apresentavam menores valores de espessura. Para os laminados por MIA, foi feito em todas as amostras uma medição aproximada da porosidade. Os resultados obtidos para esta propriedade estão inseridos na tabela 4.5.

Tabela 4.6. Valores de porosidade para laminação com a MIA.

Método	Amostra	Área total (mm ²)	Área c/ porosidade (mm ²)	% Porosidade
MIA	STD A1 C	55,638	1,498	2,69
	STD A2 C	56,962	1,054	1,85
	STD A3 C	53,723	1,622	3,02
	STD A4 C	48,336	1,046	2,16
	STD A5 C	50,098	1,433	2,86
	Média			2,52±0,44
	σ/μ×100 (%)			17,5
	STD P1 C	55,313	1,584	2,86
	STD P2 C	50,802	1,04	2,05
	STD P3 C	56,756	2,792	4,92
	STD P4 C	56,283	3,463	6,15
	STD P5 C	48,176	1,552	3,22
	Média			3,84±1,49
	σ/μ×100 (%)			38,7
	SF A1 C	53,340	1,254	2,35
	SF A2 C	51,123	0,99	1,94
	SF A3 C	50,256	1,392	2,77
	SF A4 C	51,139	1,546	3,02
	SF A5 C	48,190	1,286	2,67
	Média			2,55±0,37
	σ/μ×100 (%)			14,7
	SF P1 C	56,709	1,458	2,57
	SF P2 C	58,975	1,192	2,02
SF P3 C	56,068	1,401	2,50	
SF P4 C	54,726	4,054	7,41	
SF P5 C	47,810	1,754	3,67	
Média			3,63±1,96	
σ/μ×100 (%)			54,0	

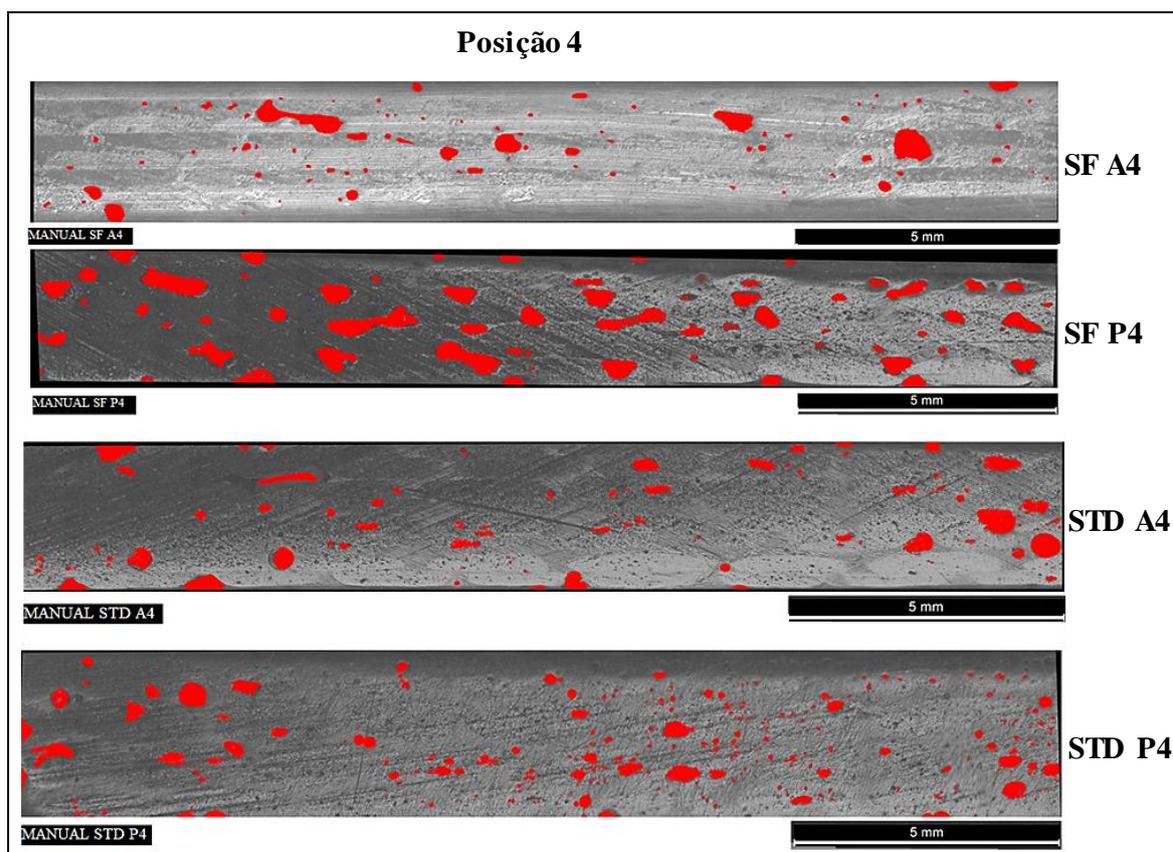


Figura 4.15. Micrografias (50x) das amostras laminadas manualmente, SF e STD, na posição 4.

A percentagem de porosidade obtida pelo processo de laminação manual (tabela 4.5), é, em média, muito elevada, excedendo o limite máximo de 3%. As amostras sem folha desmoldante, SF, são as que possuem maiores áreas vazias (figura 4.15). Este resultado pode ser atribuído a fatores como:

- existência de maior número de poros no pré-laminado, ou seja, pior molhabilidade do laminado pela resina;
- elevado teor em resina, que durante o processo de cura origina maior libertação de gases, com o seu conseqüente aprisionamento, principalmente se o vácuo for ineficaz.

O uso de saco de preto (P) durante a compressão por vácuo parece piorar a variação desta propriedade. De notar que as amostras compactadas por recurso a saco de vácuo azul apresentam, em média, frações de porosidade mais baixas que as de saco de vácuo PEBD, para os dois métodos de impregnação.

As amostras laminadas automaticamente (MIA) possuem, em média, valores de porosidade aceitáveis, mas muito próximos do limite máximo permissível de 3%. (Tabela 4.6).

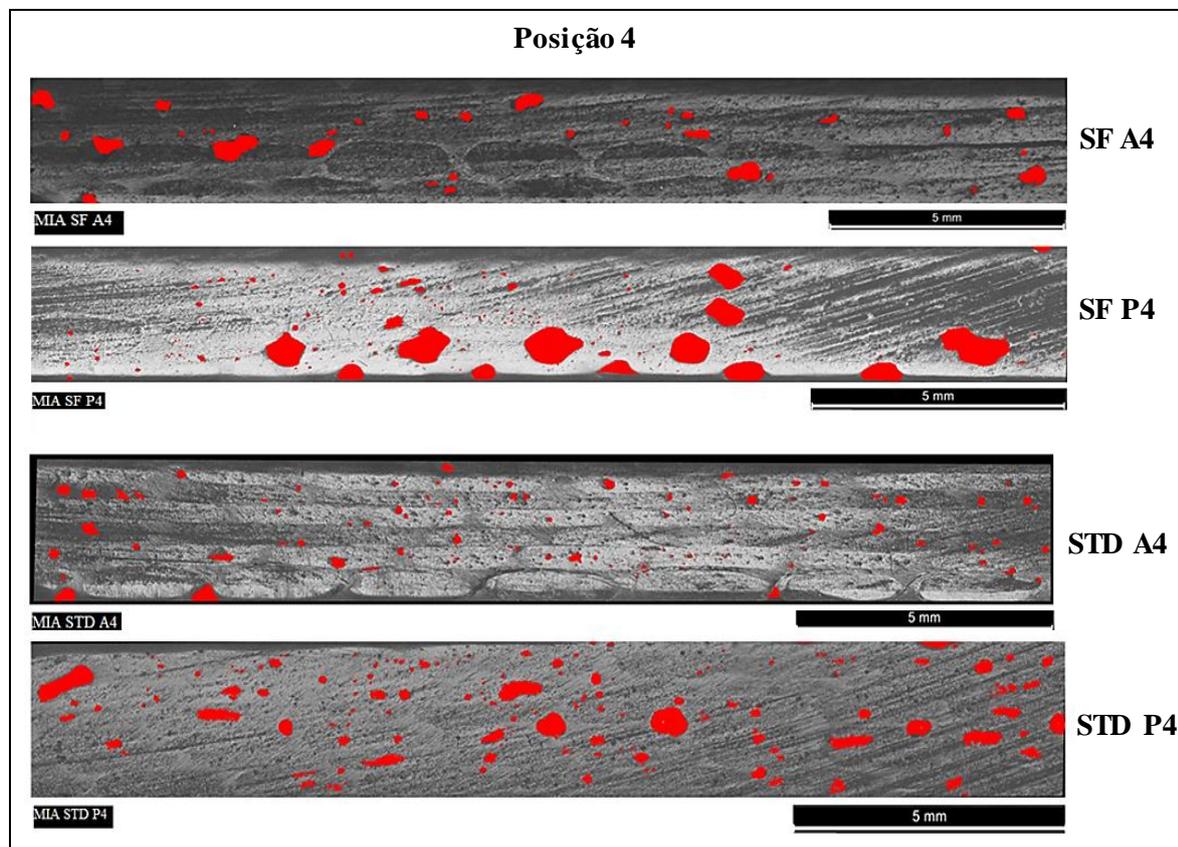


Figura 4.16. Micrografias (50x) das amostras laminadas por MIA, SF e STD, na posição 4.

De facto, a análise comparativa das figuras 4.15 e 4.16, mostra um menor número de vazios nas amostras obtidas por MIA. Todavia, o seu tamanho parece ser superior ao das amostras laminadas manualmente, principalmente quando o saco utilizado na compressão por vácuo foi o de PEBD (amostras P).

Mais ainda, os pré-laminados por via automática possuem menor teor em resina que poderá conduzir a uma pior permeabilidade, principalmente, se houver retração das fibras e compactação por vácuo ineficiente. O uso de saco de vácuo em PEBD conduz a resultados mais dispersos, com variações de grande amplitude entre as posições 1 e 5 (distância das amostras em relação ao vácuo), sendo que alguns são muito superiores a 3%.

Em ambos os casos, o saco em nylon apresenta percentagens de porosidade mais baixas, uma vez que este material compacta melhor que o de PEBD, sendo a extração de ar no laminado mais eficiente. Uma outra desvantagem que também pode ser apontada é a

diferença de propriedades óticas. O saco preto ao ser opaco, torna mais difícil a própria inspeção visual da presença de ar no laminado.

A boa impregnação está relacionada ao processo de moldação e da boa permeabilidade, molhagem da matriz para com o reforço. Estes fatores são determinantes para alcançar boas propriedades mecânicas e manter a integridade do compósito final. Nas figuras 4.15 e 4.16, observa-se a existência de vazios, provenientes da falha no processo de laminação (impregnação) e estes podem comprometer a qualidade do laminado, diminuindo assim suas propriedades mecânicas.

Face aos resultados anteriormente expostos, pode-se concluir que:

- i. A compactação não é uniforme.
- ii. Há maior teor de fibra na laminação mecânica.
- iii. A percentagem de poros é maior na laminação manual.

A variação final da espessura da peça é difícil de controlar, sendo sensível a uma variedade de fatores, tais como:

- Espessuras iniciais diferentes – é expectável que o gradiente de espessuras no processo de impregnação manual seja superior ao do mecânico.
- As condições de compactação por vácuo foram as mesmas, apesar de os sacos possuírem características distintas (o saco à base de nylon apresenta uma temperatura de transição vítrea de 57 °C enquanto que o de PEBD é de -110 °C).
- O processo de cura usado para cada método de impregnação foi diferente.

De acordo com outros autores [21, 22] a compactação não uniforme pode ser atribuída a vários fatores, destacando-se:

- Relaxamento das fibras durante o estágio de descompactação.
- Gradientes de pressão (e, portanto, da pressão de compactação) localizados.
- Retração da resina durante a cura (que pode atingir 5% [23]).
- Tensões de origem térmica, devido à diferença dos coeficientes de expansão térmica entre a matriz ($50 \text{ a } 80 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [23]) e as fibras de vidro ($19 \text{ a } 23 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, na direção transversal [24]).

4.4. Avaliação de Custos

Um dos objetivos deste estágio, na Ria Blades, era a seleção do método mais económico que garantisse o desempenho eficaz da linha de colagem.

Recordando que foram utilizados 2 métodos distintos de impregnação de resina, a autora considera o método de impregnação, o método MIA é, claramente, menos dispendioso. Com este processo, a impregnação das fibras tornou-se mais rápida pois a impregnação manual exigia um maior esforço do operador e demorava mais tempo devido ao grande comprimento das fibras. Como a máquina de impregnação automática debita quantidades de resina controladas, o desperdício de resina é menor.

A quantidade de materiais consumíveis a usar na produção de laminações de reforço depende do modelo da pá. Os reforços são aplicados nas linhas de colagem em LE e TE, podendo ser interiores ou exteriores. Na tabela 4.7 encontram-se os valores de comprimento da linha de colagem a ser coberto pelo reforço, para cada tipo de projeto. Estes valores são medidos a partir da raiz da pá, ou seja, a partir de $Z=0$ (figura 4.17).

Considerando uma tolerância por excesso de 10 cm para a folha desmoldante e 20 cm para os sacos de vácuo, pois estes têm de cobrir totalmente a área do laminado, as quantidades de material gasto e o custo, para cada pá, estão compilados na tabela 4.8.



Figura 4.17. Produção do reforço do lado LE exterior.

Tabela 4.7. Comprimento da linha de colagem coberto pela laminação.

Modelo	Comprimento coberto pela laminação (m)				Total
	LE ext	TE ext	LE int	TE int	
RE 45,2	3,50	3,50	3,50	3,50	14,00
RE 55,8	16,00	18,00	3,90	----	37,90
RE 59,8	16,00	23,00	3,90	----	42,90
RE 63,7	18,00	31,50	6,40	6,40	62,30
RE 68,5	17,90	27,60	7,70	7,10	60,30
RE 74,4	16,00	39,60	4,84	8,73	69,17

Na tabela 4.9 estão apresentadas a redução de custos para cada método, considerando o volume de produção do ano 2018. Na conceção dos modelos, se o saco de vácuo azul fosse substituído pelo preto havia uma redução de custos em 3 239,86 €. Se nesta avaliação fosse só retirada a folha desmoldante o valor seria de 2 358,53 € e se fosse usado o saco preto sem a folha desmoldante a redução seria em 5 598,39 €. Esta última hipótese, embora economicamente mais viável tem de ser descartada, devido aos piores resultados experimentais obtidos.

Tabela 4.8. Custo dos materiais consumíveis para os diferentes modelos de pás.

Modelo	Quantidades gastas (m)			Custo dos materiais (€)		
	Saco azul	Saco preto	Folha desmoldante	Saco azul (0,229€/m)	Saco preto (0,124€/m)	Folha desmoldante (0,077/m)
RE 45,2	14,20	14,20	14,10	3,25	1,76	1,08
RE 55,8	38,10	38,10	38,00	8,72	4,73	2,91
RE 59,8	43,10	43,10	43,00	9,87	5,35	3,29
RE 63,7	62,50	62,50	62,40	14,31	7,76	4,77
RE 68,5	60,50	60,50	60,40	13,85	7,51	4,62
RE 74,4	69,37	69,37	69,27	15,89	8,62	5,30

Tabela 4.9. Redução de custos para cada método, considerando o volume de produção de 2018.

Modelo	Unidades produzidas em 2018	Redução de custos (€)/ano		
		STD P	SF A	SF P
RE 45,2	255	379,48	275,06	654,54
RE 55,8	295	1177,90	857,57	2035,46
RE 59,8	125	564,61	411,19	975,80
RE 63,7	3	19,65	14,32	33,98
RE 68,5	109	691,10	503,65	1194,75
RE 74,4	56	407,12	296,75	703,87
	Total	3 239,86	2 358,53	5 598,39

Tendo em conta todos os dados obtidos neste trabalho, as amostras que cumprem com os requisitos fornecidos pelo cliente são as compactadas com saco de vácuo azul (STD A e o SF A) previamente laminadas pelo processo MIA.

Assim, a configuração do modelo mais económica é a SF A, com a impregnação das fibras feita por MIA. Para a posição C, zona com o felpo, o modelo apresenta, em média, uma espessura de $2,63 \pm 0,08$ mm, um FMC de $69,8 \pm 1,0$ % e uma porosidade de $2,55 \pm 0,37$ %. Considerando o volume de vendas da empresa em 2018 e retirando apenas o custo de materiais consumíveis como o da folha desmoldante do processo (o custo inicial de investimento do equipamento MIA não foi considerado) poderá obter-se uma redução de custos que ronda os dois mil euros anuais.

5. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

Este estágio consistiu na realização de ensaios para a validação ou não de novos métodos de produção de compósitos laminados estruturais, a utilizar na linha de colagem de uma pá eólica.

Neste trabalho procedeu-se à impregnação das fibras de duas formas distintas (manual e mecânica), compactação com folhas poliméricas distintas (Nylon e PEBD) a ainda o uso ou não de uma intercamada designada por folha desmoldante.

As principais conclusões a retirar são as seguintes:

- A impregnação das fibras com a MIA permite obtenção de valores de FMC mais elevados e estáveis;
- O saco de nylon compacta melhor que o de PEBD, obtendo-se valores de espessura e de porosidade mais baixas;
- A presença da folha desmoldante não parece afetar o processo de compactação;
- A posição a que se encontra o vácuo parece, também, não afetar o modelo final do laminado;
- As configurações que cumprem com todas as normas exigidas são a STD A e a SF A, com laminação mecânica.
- O método mais económico e que cumpre com as especificações requeridas é o SF A, com a impregnação das fibras feita com a MIA.

Finalmente sugere-se para futuros trabalhos o melhoramento do processo MIA e a substituição do atual saco de vácuo em nylon por um outro com propriedades similares, ou seja, um termoplástico de engenharia, mas mais económico. Pode ainda optar-se, se for possível, pela utilização de medidores de pressão colocados ao longo das placas de modo a controlar e a monitorizar *in situ* a variação de pressão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] “Senvion Wind Energy Solutions”- Acedido em 30 de abril de 2019, disponível em:
<https://www.senvion.com/global/en/>
- [2] “Senvion Portugal” - Acedido em 30 de abril de 2019, disponível em:
<https://www.senvion.com/senvion-portugal/pt/>
- [3] Wisser, R., Yang, Z., Hand, M., Hohmeyer, O., Infield, D., Jensen, P. H., Zervos, A. (2011). Wind Energy. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change. IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Acedido em 8 de abril de 2019, disponível em:
<https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/Chapter-7-Wind-Energy-1.pdf>
- [4] Mishnaevsky, L., Branner, K., Petersen, H. N., Beauson, J., McGugan, M., & Sørensen, B. F. (2017). Materials for Wind Turbine Blades: An Overview. *Materials*, 10(11), 1–24. <https://doi.org/10.3390/ma10111285>
- [5] Willis, D. J., Niezrecki, C., Kuchma, D., Hines, E., Arwade, S. R., Barthelmie, R. J., Rotea, M. (2018). Wind energy research: State-of-the-art and future research directions. *Renewable Energy*, 125, 133–154. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2018.02.049>
- [6] Brandão, M - Powerpoint de formação da Ria Blades
- [7] Tong Wei (2010), “Wind Power Generation and Wind Turbine Design”, WIT Press UK, 1-10.
- [8] Smith, William F. (1998), “Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais”, McGRAW-HILL de Portugal, Lda. 3ª Edição, 767-830.
- [9] Campbell, F.C. (2006), “Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials”, Elsevier Ltd, 1ª Edição, 1-13.
- [10] Callister, William D. (2007), “Materials Science and Engineering: An Introduction”, John Wiley & Sons, Inc., 7ª Edição. 489-620

- [11] R.T. Durai Prabhakaran, G.A. Ormondroyd, Guan Zhongwei, 4th Brazilian Conference on Composite Materials. Rio de Janeiro, July 22nd-25th, 2018.
- [12] Materials Processing and Manufacturing Science, Elsevier Science & Technology Books, 2005.
- [13] “NetComposites, Ltd-Wet/hand layup” – Acedido em 12 março de 2019 disponível em:
<https://netcomposites.com/guide/manufacturing/wet-hand-lay-up/>
- [14] Abdurohman, K., Satrio, T., Muzayadah, N. L., & Teten. (2018). A comparison process between hand lay-up, vacuum infusion and vacuum bagging method toward e-glass EW 185/lycal composites. *Journal of Physics: Conference Series*, 1130(1).
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1130/1/012018>
- [15] “NetComposites, Ltd-Vacuum Bagging Guide” - Acedido em 12 março de 2019, disponível em:
<https://netcomposites.com/guide-tools/guide/manufacturing/vacuum-bagging>
- [16] “Vacuum Infusion Processing (VIP)” - Acedido em 8 março de 2019, disponível em:
<http://www.moldedfiberglass.com/processes/processes/closed-molding-processes/vacuum-infusion-molding>
- [17] Govignon, Q., Bickerton, S., & Kelly, P. A. (2013). Experimental investigation into the post-filling stage of the resin infusion process. *Journal of Composite Materials*, 47(12), 1479–1492.
<https://doi.org/10.1177/0021998312448500>
- [18] V-0.0-BL.00.10-A-EN-H: “Senvion- General Product Specification for RE Rotor blades”.
- [19] Procedimento para a determinação de FMC para laminados: “Determination of Fiber Mass Content of Pre Preps and Laminates”
- [20] V-0.0-BL.0030-A-B: “Visual determination of porosity using microsections”

- [21] Park, C. H., Lebel, A., Saouab, A., Bréard, J., & Lee, W. II. (2011). Modeling and simulation of voids and saturation in liquid composite molding processes. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(6), 658–668. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.02.005>
- [22] Yenilmez, B., Senan, M., & Murat Sozer, E. (2009). Variation of part thickness and compaction pressure in vacuum infusion process. *Composites Science and Technology*, 69(11–12), 1710–1719. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.05.009>
- [23] Santos Reis, Ricardo Alberto – “Avaliação da influência do meio ambiente na integridade estrutural de placas de vidro epóxico submetidas a impacto” (2013). Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra
- [24] Carneiro, L. A. V., & Teixeira, A. M. A. J. (2008). Propriedades e características dos materiais compósitos poliméricos aplicados na Engenharia de Construção. *Revista Militar de Ciência e Tecnologia*, XXV, 54–66.

ANEXO A

Ficha técnica da resina e do agente de cura.



Technical Data Sheet

EPIKOTE™ Resin MGS™ LR 135 and EPIKURE™ Curing Agent MGS™ LH 133-138

CHARACTERISTICS

Approval	DNV-GL SE (Germanischer Lloyd)
Application	Rotor blades for wind turbines, boatbuilding, as laminating and adhesive resins (wood-epoxy construction), sporting goods, moulds, tools and other devices
Operational temperature	-80 °C up to +50 °C without heat treatment -80 °C up to +80 °C after heat treatment
Processing	Generally at temperatures between 15°C and 50°C, all common processing methods
Features	Pot life from approx. 10 min to 10hrs Limited irritation potential
Special modifications	LR 135 LV: low viscosity LR 135 T: thixotropic
Storage	Shelf life of 24 months in originally sealed containers

APPLICATION

EPIKOTE™ Resin MGS™ LR135 laminating resin system approved by the German Lloyd. It contains no solvents and fillers and is available for different pot lives. The system is used for processing of glass, carbon and aramide fibres, featuring high static and dynamic loadability. This system has very good adhesive properties with wood and other materials.

The range of pot lives is between approx. 10 min. and more than 10 hours. This enables a selection of the optimum system for all processing methods. After precuring at room temperature, the manufactured components are workable and demouldable. The final properties, however, will only be obtained after postcuring at temperatures of more than 40°C. At room temperature, the fast hardeners LH 133 - 135 are processable and demouldable after 6 - 12 hours, while the very slow hardeners LH 136 - 138 have curing periods of 2 - 4 days at room temperature.

Laminates produced with this system result in high-gloss and non-tacky surfaces, even with unfavourable curing conditions, e. g. lower temperatures and/or high humidities. The mixing viscosity guarantees a fast and complete impregnation of the reinforcement fibres, however, the resin will not drain out of the fabrics on vertical surfaces.

Due to the chemical characteristics of this system we do not expect any problems concerning compatibility

EPIKOTE Resin MGS LR 135 and EPIKURE Curing Agent MGS LH 133-138

SPECIFICATIONS

Laminating resin LR135		
Density ¹⁾	[g/cm ³]	1,14 – 1,18
Viscosity ¹⁾	[mPa·s]	2.300 – 2.900
Refractory index ¹⁾		1,558 – 1,562

Curing agent				
		LH133	LH134	LH135
Density ¹⁾	[g/cm ³]	1,04 – 1,08	1,03 – 1,07	0,98 – 1,02
Viscosity ¹⁾	[mPa·s]	400 – 650	150 – 300	50 – 150
Refractory index ¹⁾		1,555 – 1,565	1,564 – 1,570	1,509 – 1,513
Potlife ²⁾	[min]	app. 15 min.	app. 15 min.	app. 30 min.
T _{g pot}	[°C]	80 – 90 °C unconditioned 65 – 75°C conditioned ³⁾		

Curing agent					
		LH136	LH1364	LH137	LH138
Density ¹⁾	[g/cm ³]	0,94 – 0,98	0,94 – 0,98	0,94 – 0,98	0,93 – 0,96
Viscosity ¹⁾	[mPa·s]	20 – 100	10 – 50	10 – 50	10 – 50
Refractory index ¹⁾		1,470 – 1,480	1,460 – 1,470	1,450 – 1,470	1,457 – 1,459
Potlife ²⁾	[min]	app. 2 h	app. 2,5 h	app. 7 h	app. 10 h
T _{g pot}	[°C]	80 – 90 °C unconditioned 65 – 75°C conditioned ³⁾			

Measuring conditions:

- 1) measured at 25°C
- 2) measured at 20°C
- 3) conditioned at 40 °C / 90% r.H.

MIXING RATIOS

LR135 : All curing agents	
Parts by weight	100 : 35 ± 2
Parts by volume	100 : 41 ± 2

The mixing ratio stated must be observed very carefully. Adding more or less curing agent will not result in a faster or slower reaction – but in incomplete curing which cannot be corrected in any way. Resin and curing agent must be mixed very thoroughly. Mix until no clouding is visible in the mixing container. Pay special attention to the walls and bottom of the mixing container.

All curing agents have blue colour to distinguish between resin and curing agents, and for easier identification of a correct mixing process. Although unlikely, deviations in colour are possible (e.g. due to UV radiation after longer exposure to sun light), but however have no effect on the processing and final properties of the material

EPIKOTE Resin MGS LR 135 and EPIKURE Curing Agent MGS LH 133-138

MECHANICAL DATA OF NEAT RESIN

Mechanical data		
Density DIN EN ISO 1183-1	[g/cm ³]	1,10 – 1,20
Flexural strength DIN EN ISO 178	[MPa]	110 – 130
Modulus of elasticity DIN EN ISO 178	[GPa]	2,9 – 3,2
Tensile strength DIN EN ISO 527-2	[MPa]	68 – 80
Compressive strength DIN EN ISO 604	[MPa]	80 – 100
Elongation at break DIN EN ISO 527-2	[%]	7,0 – 10,0
Impact strength ISO 179-1	[kJ/m ²]	30 – 50
Water absorption at 23°C DIN EN ISO 175	24h [%] 7d [%]	0,10 – 0,50 0,20 – 0,80
Curing: 24h at 23°C + 15h at 60°C		

Advice:

Mechanical data are typical for the combination of laminating resin LR135 with curing agent LH135. Data can differ in other applications.

® and ™ Licensed trademarks of Hexion Inc.

DISCLAIMER

The information provided herein was believed by Hexion Inc. ("Hexion") to be accurate at the time of preparation or prepared from sources believed to be reliable, but it is the responsibility of the user to investigate and understand other pertinent sources of information, to comply with all laws and procedures applicable to the safe handling and use of the product and to determine the suitability of the product for its intended use. All products supplied by Hexion are subject to Hexion's terms and conditions of sale. HEXION MAKES NO WARRANTY, EXPRESS OR IMPLIED, CONCERNING THE PRODUCT OR THE MERCHANTABILITY OR FITNESS THEREOF FOR ANY PURPOSE OR CONCERNING THE ACCURACY OF ANY INFORMATION PROVIDED BY HEXION, except that the product shall conform to Hexion's specifications. Nothing contained herein constitutes an offer for the sale of any product.

PDS-8119- (Rev.12/21/2016 2:44:40 AM)

ANEXO B

Ficha técnica das fibras de vidro 2AX-45-G1.



TECHNICAL DATASHEET

SAP No. 30000562 Article Description X-E-830g/m²-1260mm

Textile Structure 7000478 SAERTEX®

ARTICLE CONSTRUCTION (in accordance with EN 13473-1)

Layer	Construction	Areal weight	Tolerance	Material
4	45 °	401 g/m ²	+/- 5,0 %	E-glass 600 TEX
3	90 °	21 g/m ²	+/- 5,0 %	E-glass 68 TEX
2	0 °	1 g/m ²	+/- 5,0 %	E-glass 68 TEX
1	-45 °	401 g/m ²	+/- 5,0 %	E-glass 600 TEX
Stitching		6 g/m ²	+/- 1 g/m ²	PES [Polyester] 76 dtex

Fiber input can be determined individually

FURTHER CHARACTERISTICS

Gauge	5,0	Stitching pattern	warp	Width (nominal)	1.260 mm
Stitch length	2,60 mm	Total tolerance	5,1 %	Total areal weight	830 g/m ²

Tracer yarn¹ 2 PC blue & tracer yarn 2 PC yellow & tracer yarn 2 PC dark green

¹Position can be determined individually

Labelling (Standard)	Every roll is equipped with a label in the core. A further label is located outside on the foil or on the box.
Packaging (Standard)	Every roll is wound on a cardboard core and wrapped in foil. Further packaging options can be determined individually.
Storage recommendation	With original packaging: Temperature 15-35 °C and 20-80% humidity. No moisture and direct sunlight. To avoid problems with humidity and electrostatic charge, fabrics to be conditioned 24 hours prior to processing, independent of storage conditions.

SAERTEX Portugal, Unipessoal Lda, has been certified in accordance with ISO 9001:2015.

REINFORCING YOUR IDEAS

ANEXO C

Ficha técnica do saco de vácuo azul.

VACFILM465B Vacuum Bagging Film



High strength, high elongation yet stiff vacuum bagging film.

Ideally suited for use with medium temperature epoxy pre-pregs.

Multi layer, heat stabilised co-extruded film with excellent resistance to polyester, vinylester and epoxy resins.

Ideal for use in the production in large components such as marine and wind energy structures, especially in conjunction with prepreg systems.

TYPICAL PRODUCT DATA

		Method
- Maxi. Use Temperature	165°C	
- Colour	Blue	
- Elongation at break	MD 350% TD 370%	ASTM D882
- Tensile strength at break	MD 65N/mm ² TD 65N/mm ²	ASTM D882
- Yield	55µ : 15.38 m ² /kg	

AVAILABILITY & PACKAGING

- Standard widths	up to 6m (Contact us for larger widths)
- Standard thicknesses	55µ and 75µ (Other thicknesses on request)
- Formats	Sheet, tube, v-sheet

STORAGE & HANDLING

All nylon-based films absorb water. Recommended use and storage of this product is in relative humidity environment between 55% and 65% and around 20°C.

Do not store rolls vertically on their ends.

No shelf life limitation.

No skin irritation problems experienced.

Umeco
Process Materials Ltd.
UK
T +44 (0) 1274 550500
F +44 (0) 1274 550501
process-uk@umeco.com
www.umeco.com

Umeco
Process Materials Sarl
France
T +33 (0) 5 61 37 89 89
F +33 (0) 5 61 37 89 88
process-fr@umeco.com
www.umeco.com

Umeco
Composites S.r.l.
Italia
T +39 (0) 039 6892987
F +39 (0) 039 6894351
process-it@umeco.com
www.umeco.com

Umeco
Process Materials Inc.
USA
T +1 562 906-3300
F +1 562 941-9505
process-usa@umeco.com
www.umeco.com

Umeco
SPA
Italia
T +39 0174 552551
F +39 335 7775332
ipm@prn-umeco.com
www.umeco.com

All statements, technical information and recommendations contained in this publication are based on tests believed to be reliable, but their accuracy and/or completeness are not guaranteed. The user shall determine the suitability for this particular purpose and shall assume all risk and liability in connection herewith.

Publication date : 13/04/2011
Updating : 13/06/2012

ANEXO D

Ficha técnica do saco de vácuo preto.



SC PRETO LIXO 800X900 5RL10UN

FICHA TÉCNICO / COMERCIAL

FTC1584/01.00
01/09/2011

Produto

Saco Preto Lixo Baixa Densidade 800x900x0,035 5 Rolo 10un

Descrição

Produto composto por 100% de PEBD reciclado.

Características

Gerais

Largura total	800mm ± 5%	
Altura total	900mm ± 5%	
Espessura	35µm ± 5%	

Propriedades mecânicas

	Valor (Mpa)	Tolerância (MPa)
Tensão de ruptura Longitudinal	27,3	>15
Transversal	18,9	>15
Soldadura	19,0	>10

Propriedades mecânicas

	Valor (%)	Tolerância (%)
Deformação à ruptura Longitudinal	735	>200
Transversal	290	>200
Soldadura	250	>150

Logísticas

Embalagem primária		
Nº de sacos por rolo	10	
Nº de rolos por caixa	5	

APÊNDICE A

Nesta secção encontram-se as imagens usadas para determinar a fração de porosidade presentes nas amostras. A seleção dos poros de cada imagem foi feita manualmente, usando o programa ImageJ, uma vez que as imagens obtidas não foram as mais nítidas, logo os cálculos efetuados são aproximados.

