

**ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DOS PROCESSOS DE APLICAÇÃO DE GELCOAT NA
PRODUÇÃO DE PÁS EÓLICAS**
**ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF GELCOAT APPLICATION PROCESSES IN
WIND BLADE PRODUCTION**

Maria Júlia Dias Ramalho¹
Verônica Cristhina de Souza Diniz²

RESUMO

A crescente demanda por fontes de energia renovável tem impulsionado o desenvolvimento e a otimização de tecnologias eólicas. Nesse contexto, a durabilidade e a eficiência das pás eólicas são essenciais para assegurar a viabilidade econômica e operacional dos parques eólicos. Este trabalho tem como objetivo analisar e otimizar a aplicação de gelcoat nas pás eólicas, investigando as formas mais eficientes de aplicação para reduzir defeitos de superfície e, conseqüentemente, diminuir o retrabalho, aumentando a durabilidade e a eficiência no processo de produção. A avaliação do desempenho foi realizada por meio de testes e análises na área produtiva, considerando aspectos como tempo de cura, aderência, defeitos e capacidade de proteção contra os elementos naturais, a fim de identificar as melhores práticas e materiais. Os resultados indicam que a escolha adequada dos parâmetros de aplicação de gelcoat pode prolongar a vida útil das pás eólicas, reduzindo a necessidade de manutenção e substituição, além de melhorar a eficiência aerodinâmica das pás ao manter uma superfície lisa e uniforme. A pesquisa também ressaltou os desafios na utilização de gelcoat, como espessura irregular, tempo de cura inadequado, adesão insuficiente, aplicação inadequada e defeitos de superfície, sugerindo soluções que incluem treinamentos operacionais e ajustes nos parâmetros das máquinas. Os resultados demonstraram que a adoção de melhores práticas na aplicação de gelcoat melhora a uniformidade da superfície, reduzindo defeitos como rachaduras, porosidade e espessura irregular. Além disso, a implementação de treinamentos operacionais e ajustes nos parâmetros de aplicação levou a uma redução significativa na necessidade de retrabalho, contribuindo para maior eficiência produtiva e aumento da vida útil das pás.

Palavras-chave: gelcoat; pás eólicas; energia renovável.

ABSTRACT

The growing demand for renewable energy sources has driven the development and optimization of wind technologies. In this context, the durability and efficiency of wind turbine blades are essential to ensure wind farms' economic and operational viability. This study aims to analyze and optimize the application of gelcoat on wind turbine blades, investigating the most efficient application methods to reduce surface defects and, consequently, minimize rework, thereby increasing durability and efficiency in the production process. Performance is evaluated through tests and analyses in the production area, considering factors such as curing time, adhesion, defects, and protection against natural elements to identify the best practices and materials. The results indicate that the proper selection of gelcoat application parameters can extend the lifespan of wind turbine blades, reducing the need for maintenance and replacement and improving the blades' aerodynamic efficiency by maintaining a smooth and

¹ Bacharelanda em Engenharia de Materiais, pela Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, 2024.

² Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Campina Grande, 2017.

uniform surface. The research also addresses challenges in applying gelcoat, such as irregular thickness, inadequate curing time, insufficient adhesion, improper application, and surface defects, suggesting solutions that include operational training and adjustments to machine parameters. The results demonstrated that adopting best practices in gelcoat application improves surface uniformity, reducing defects such as cracks, porosity, and irregular thickness. Additionally, the implementation of operational training and adjustments to application parameters led to a significant reduction in the need for rework, contributing to greater production efficiency and an increased lifespan of the blades.

Keywords: gelcoat; wind blades; renewable energy.

INTRODUÇÃO

As preocupações globais com a sustentabilidade e a necessidade de diversificação das matrizes energéticas impulsionaram o desenvolvimento e a expansão da energia eólica nas últimas décadas. A energia aerogerada se consolidou como a segunda maior fonte de geração elétrica no Brasil, atrás apenas da hidrelétrica. Em 2023, o país alcançou a sexta posição no ranking mundial de capacidade instalada, com 30,45 GW, representando um aumento de 50% em relação ao ano anterior (Brasil [...], 2024).

As pás eólicas são elementos críticos nesse processo, sendo responsáveis pela conversão da energia cinética do vento em energia mecânica, que é então transformada em eletricidade por meio de geradores. A origem das pás eólicas remonta aos moinhos de vento, que datam de mais de mil anos atrás, quando eram amplamente utilizados para tarefas como bombeamento de água e moagem de grãos (Manwell; McGowan; Rogers, 2010).

Com o advento da Revolução Industrial e o desenvolvimento de tecnologias de geração de energia, as pás evoluíram para gerar eletricidade. A primeira turbina eólica destinada à produção de eletricidade foi desenvolvida por Charles F. Brush em 1887, marcando o início de uma nova era para a tecnologia eólica (Hau, 2013). Contudo, foi a crise do petróleo nos anos 1970, que catalisou o desenvolvimento intensivo de tecnologias eólicas modernas, impulsionando melhorias

no design e na eficiência das pás eólicas (Gasch; Twele, 2011).

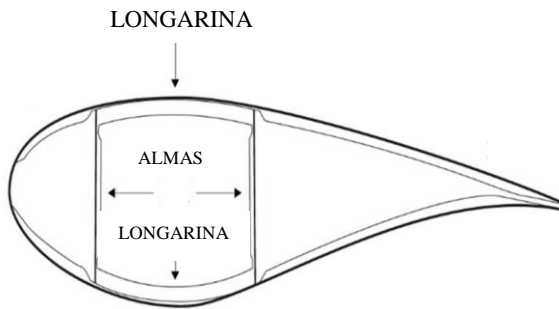
As pás eólicas são componentes fundamentais das turbinas eólicas, responsáveis pela conversão da energia do vento em movimento rotacional, que é posteriormente convertido em eletricidade. A energia eólica tem se destacado como uma das fontes de energia renovável mais promissoras e de crescimento mais rápido no mundo. De acordo com o Global Wind Report, a capacidade instalada global de energia eólica atingiu 743 GW em 2020, evidenciando a importância crescente dessa tecnologia na matriz energética global.

Uma pá eólica moderna é uma estrutura sofisticada, geralmente construída com materiais compósitos, como fibra de vidro e carbono juntas através de resinas poliméricas. Projetada para suportar condições ambientais severas e cargas mecânicas intensas, a anatomia de uma pá inclui a raiz, o corpo principal, a ponta e o revestimento externo. A raiz da pá, localizada na base, conecta-se ao cubo da turbina e é uma das partes mais robustas, capaz de suportar as forças de torção e flexão (Hau, 2013) (Figura 2).

O corpo principal, ou casca, possui um design aerodinâmico para capturar eficientemente a energia do vento. Internamente, as longarinas fornecem rigidez estrutural e ajudam a distribuir as forças ao longo da pá, garantindo sua integridade (Gasch; Twele, 2011). Além desses elementos principais, as pás eólicas incluem outros componentes críticos (Figura 1), como as almas, que reforçam a estrutura sob cargas variáveis, e os perfis

aerodinâmicos, cujo design é otimizado para maximizar a captura de energia e minimizar a resistência ao vento, sendo crucial para a eficiência geral da turbina (Manwell; McGowan; Rogers, 2010).

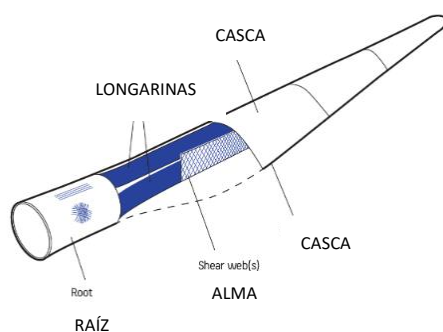
Figura 1 – Anatomia de uma pá eólica.



Fonte: adaptado de Marinho, 2021.

O revestimento das pás eólicas é essencial para garantir sua durabilidade e desempenho. O gelcoat, uma camada aplicada à superfície das pás, é composto por polímeros que oferecem resistência a fatores como corrosão, raios UV e outros elementos ambientais que podem afetar a integridade e eficiência das pás ao longo do tempo. Além de ser uma solução econômica em relação às tintas marítimas, o gelcoat desempenha um papel crucial na proteção das pás. A Alemanha se destaca na Europa pelo uso intensivo desse material na indústria eólica, evidenciando sua importância para a manutenção e desempenho das pás (Europe [...], 2021).

Figura 2 – Estrutura de uma pá eólica.



Fonte: adaptado de Marinho, 2021.

A aplicação de gelcoat nas pás eólicas é um processo meticuloso que requer precisão e controle rigoroso de diversos parâmetros, como a espessura do revestimento, o tempo de cura e a aderência. Inconsistências na aplicação podem levar a falhas prematuras, aumento da necessidade de manutenção e redução da eficiência aerodinâmica das pás. Portanto, a otimização desse processo é vital para assegurar que as pás eólicas possam operar de maneira eficaz e duradoura, reduzindo custos de manutenção e potencializando a produção de energia.

O gelcoat é aplicado em pás eólicas principalmente por duas técnicas: pulverização (spray) e aplicação manual com rolo ou pincel. A pulverização envolve o uso de pistolas que atomizam o gelcoat em pequenas partículas e o depositam sobre a superfície do molde da pá. Essa técnica oferece vantagens como maior uniformidade da camada aplicada, rapidez no processo e facilidade no controle da espessura, essencial para evitar defeitos como rachaduras ou bolhas. No entanto, requer equipamentos específicos, manutenção regular das pistolas e habilidade do operador, além de gerar desperdício de material devido ao "overspray" e necessitar de um ambiente controlado para evitar contaminações (Controlled Spraying Handbook, 2004). Por outro lado, a aplicação manual com rolo ou pincel é feita diretamente sobre o molde, oferecendo maior precisão em áreas menores ou com detalhes que exigem cuidado. Essa técnica tem um custo inicial menor, pois não exige equipamentos sofisticados, e reduz o desperdício de material. Contudo, é mais demorada e menos eficiente para grandes superfícies, além de ser mais difícil obter uma camada uniforme, o que pode comprometer a integridade da pá. O processo manual também é mais trabalhoso e pode levar ao cansaço do operador, afetando a consistência da aplicação ao longo do tempo.

A escolha entre pulverização e aplicação manual depende de vários fatores, como o tamanho da pá, a complexidade do molde, a experiência da equipe e os recursos disponíveis.

No processo estudado, a pulverização foi escolhida pela sua eficiência, mas a aplicação manual é utilizada para dar acabamento e corrigir defeitos pós moldagem.

Portanto, o objetivo deste trabalho é investigar a aplicação, desempenho e otimização de gelcoat em pás eólicas, visando melhorar a durabilidade, eficiência e sustentabilidade desses componentes na geração de energia renovável. Além disso, foram propostas melhorias na aplicação desse componente, estratégias de otimização do processo de pintura da superfície e diminuição de defeitos desse processo, realizando testes experimentais para validar as melhorias propostas no desempenho de gelcoat.

METODOLOGIA

Análise do processo de produção atual

Este estudo foi conduzido numa empresa líder em pás eólicas em Suape, Pernambuco, e envolveu observação direta na linha de produção, análise de dados quantitativos e qualitativos, e entrevistas com funcionários. Na figura 3, pode-se observar uma linha do tempo composta de cinco meses consecutivos, cada um representando uma etapa importante de um projeto voltado para a melhoria da aplicação de gelcoat. A partir de novembro, o foco está em identificar e analisar as inconsistências na aplicação de gelcoat, que é o principal problema a ser abordado. Em dezembro, ocorre uma análise de dados qualitativos e quantitativos, juntamente com entrevistas com os funcionários, para coletar informações relevantes e entender os desafios enfrentados no processo.

No mês de janeiro, acontece a estruturação do projeto, o que implica o planejamento e o desenvolvimento de soluções baseadas nas análises anteriores. Em fevereiro, a etapa envolve o treinamento dos operadores nas melhorias propostas, garantindo que os operadores estejam preparados para implementar as mudanças sugeridas. Por fim, em março, o objetivo foi alcançar a estabilidade da qualidade, o que indicou a consolidação das melhorias implementadas e o controle dos processos para garantir a qualidade contínua na aplicação de gelcoat.

Figura 3 – Linha do tempo.



Fonte: elaborada pela própria autora.

Investigação dos defeitos de produção

Foram investigados os principais fatores que influenciam na criação de defeitos na superfície de gelcoat. Foram considerados aspectos como rachaduras (Figura 4), poros (Figura 5) e espessura fina de gel (Figura 6). Esta investigação foi realizada através de análises de casos documentados e por inspeção visual, após desmoldagem.

Figura 4 – Rachaduras.



Fonte: elaborada pela própria autora.

Figura 5 – Poros.



Fonte: elaborada pela própria autora.

Figura 6 – Espessura fina de gel.



Fonte: elaborada pela própria autora.

Estudos no Chão de Fábrica

Esta etapa envolveu a condução de estudos e testes no chão de fábrica. Foram avaliadas diferentes técnicas de aplicação de gelcoat nas pás eólicas, com o objetivo de identificar melhorias no processo.

Foram observados diversos parâmetros durante os testes, incluindo a uniformidade da aplicação, o tempo de cura

e a aderência do revestimento. As técnicas de aplicação de gelcoat foram avaliadas com detalhes, levando em consideração fatores como a posição do operador em relação à pá durante a aplicação, a velocidade de aplicação, a sobreposição das camadas de gelcoat, o balanço do braço do operador, o ângulo da pistola e a distância em relação ao molde. A sobreposição ideal de um leque para o outro de gelcoat deve ser entre 50% e 60%, garantindo uma cobertura uniforme sem acúmulos excessivos que possam prejudicar a eficiência do revestimento (Controlled Spraying Handbook, 2004).

Fatores ambientais também podem influenciar significativamente a aplicação e a uniformidade do gelcoat. A umidade elevada pode retardar o tempo de cura e comprometer a adesão do revestimento, enquanto temperaturas muito baixas podem aumentar a viscosidade do gelcoat, dificultando sua atomização e espalhamento adequado. Além disso, correntes de ar excessivas no ambiente de aplicação podem causar variações na espessura do filme e aumento da presença de contaminantes, resultando em defeitos como bolhas e aspereza na superfície (Controlled Spraying Handbook, 2004). Dito isso, a temperatura do galpão, que foi mantida entre 24-26°C e a aplicação era feita em ambiente totalmente fechado.

Estudos indicam que a velocidade de aplicação ideal do spray de gelcoat deve estar entre 30 e 50 cm/s, evitando o acúmulo excessivo de material e garantindo uma cobertura uniforme (Controlled Spraying Handbook, 2004). O ângulo da pistola em relação à superfície da pá deve ser mantido próximo a 90° para assegurar a deposição uniforme do revestimento e minimizar defeitos como escorrimentos e bolhas (Controlled Spray Training, 1998). Além disso, a qualidade da pintura pode ser avaliada visualmente, observando-se a ausência de porosidade, uniformidade na espessura e aderência adequada ao substrato. Testes de espessura devem

confirmar uma variação dentro da faixa especificada de 400 a 600 microns para garantir a integridade do revestimento e proteção da pá contra intempéries (Controlled Spraying Handbook, 2004).

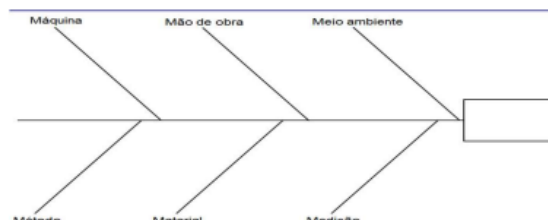
A aplicação prática de gelcoat em pás eólicas foi realizada com atenção a esses aspectos, e os resultados foram seguidos por inspeções visuais detalhadas, análises dos resultados finais e registro dos resultados. Os testes também envolveram a avaliação de fatores como o tempo de cura e a proporção do agente de cura, que são cruciais para garantir a formação adequada do revestimento. O tempo de cura está diretamente relacionado à quantidade de agente de cura utilizada, já que uma proporção inadequada pode comprometer o processo de endurecimento do gelcoat, resultando em falhas no revestimento, como baixa aderência ou resistência insuficiente a fatores ambientais. Esses parâmetros precisam ser rigorosamente controlados, pois qualquer variação pode afetar a integridade do revestimento, levando à formação de defeitos futuros, como trincas ou bolhas. A análise cuidadosa desses fatores foi fundamental para determinar as condições ideais de aplicação, assegurando a eficiência e a qualidade do revestimento e, conseqüentemente, a durabilidade das pás eólicas.

Análise e Comparação dos Resultados

Ao final, os resultados dos testes foram comparados e analisados usando Análise de Pareto e Diagrama de Ishikawa. O Diagrama foi utilizado para mapear as causas raiz dos problemas, categorizando-os em áreas como método, materiais, e mão de obra, o que permitiu uma análise detalhada das possíveis fontes dos defeitos. Essas ferramentas forneceram insights importantes para melhorar a aplicação do gelcoat e otimizar a fabricação e manutenção de pás eólicas, contribuindo para a eficiência e sustentabilidade dos parques eólicos. Foram identificadas as

melhores práticas para a aplicação de gelcoat em termos de durabilidade e desempenho.

Figura 7 – Diagrama de Ishikawa.



Fonte: elaborada pela própria autora.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica abrangente para compreender as propriedades de gelcoat, sua aplicação em pás eólicas e as estratégias de otimização disponíveis. Foram revisados manuais técnicos da Composites Fabricators Association (CFA), como o Controlled Spraying Instructors Guide e o Controlled Spraying Handbook, que forneceram uma base teórica sólida para o estudo. Esses documentos detalham as melhores práticas para a aplicação de gelcoat, destacando a importância do controle de pressão durante a pulverização, da escolha adequada do equipamento e das técnicas para minimizar defeitos como overspray e espessuras variáveis de revestimento.

O gelcoat utilizado na produção de pás eólicas é uma forma especializada de resina de poliéster, aplicada como revestimento superficial dentro do molde por meio de pulverização atomizada. Quando não controlada adequadamente, essa técnica resulta em emissões significativas de estireno, o principal composto volátil presente na resina. Essas emissões podem prejudicar a saúde dos trabalhadores, causar poluição ambiental e indicar desperdício de material. Além disso, a má aplicação de gelcoat compromete a qualidade do produto, resultando em menor

durabilidade das pás eólicas e em maiores custos de produção e manutenção. O controle da pressão de pulverização e a técnica correta são cruciais para reduzir essas emissões, além de garantir uma aplicação uniforme e de alta qualidade de gelcoat (Controlled Spraying Handbook, 2004).

Na linha de produção, observou-se inicialmente que a aplicação de gelcoat era inconsistente, resultando em uma distribuição desigual do material e em defeitos como espessuras variáveis e baixa aderência, comprometendo a durabilidade das pás eólicas. Para garantir a implementação eficaz das melhorias, foi realizado um programa de treinamento abrangente com os operadores, seguindo as diretrizes da CFA.

Esse treinamento abordou tanto aspectos teóricos quanto práticos, como a calibração do equipamento de pulverização, a técnica de aplicação e o controle de qualidade. A partir da implementação das técnicas de pulverização controlada recomendadas pela CFA, foi utilizado o formulário (Figura 8) para o treinamento dos operadores, cobrindo todos os parâmetros de aplicação e configuração da máquina.

Os operadores foram treinados para identificar a pressão de pulverização ao nível mais baixo que ainda permitisse um padrão de spray aceitável, reduzindo a atomização excessiva e as emissões de estireno. As técnicas de manuseio da pistola incluíam manter a pistola perpendicular à superfície do molde, ajustar a distância da pistola para a superfície em 50 a 100cm, e a velocidade da pulverização de acordo com a geometria da pá, iniciando a aplicação pelas bordas da peça para garantir cobertura uniforme e minimizar o overspray.

Também foram instruídos sobre a importância da medição precisa da espessura de gelcoat utilizando medidores de filme molhado, garantindo a conformidade com as especificações técnicas e a durabilidade das pás (Figura 9).

Como resultado, houve uma melhoria significativa na uniformidade da aplicação de gelcoat, contribuindo para a durabilidade e a qualidade das pás eólicas.

Figura 8 – Formulário de treinamento.

Controlled Spraying Performance Evaluation		
Employee Name: _____		
Company: _____		Facility: _____
Instructor: _____ Date: _____		
Qualification For: Gel Coat Application [] Resin or Chop Application [] Both []		
Parameter	Performance Rating	
	Unsatisfactory	Satisfactory
Fluid Pressure Setting		
Air Pressure Setting		
Body Position		
Spray Gun Angle		
Gun Stroke		
Gun Distance		
Gun Speed		
Overlap		
Edge Control		
Spray Sequence		
Gun Triggering		
Thickness Gauging		

The employee named above has demonstrated satisfactory performance in demonstrating proficiency in each of the essential elements of controlled spraying.

Yes [] No []

If "No" re-training and evaluation will be scheduled on: Date _____

Instructor: _____ Date: _____

CFA Controlled Spraying Program - Instructor Guide 13

Fonte: CFA, 2003.

Figura 9 – Medidor de filme molhado.



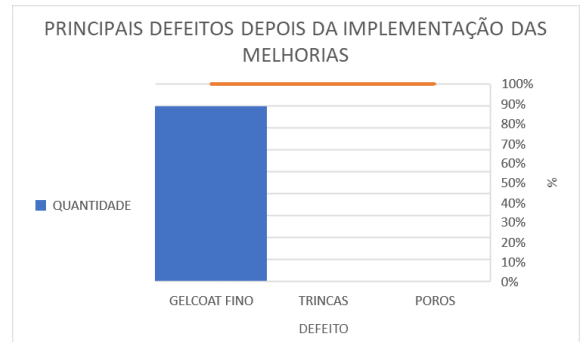
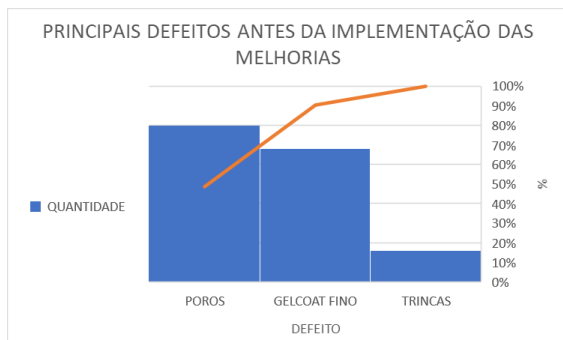
Fonte: Tecnoferramentas, 2024.

A análise dos defeitos foi conduzida com base em um caderno detalhado mantido pelo time de produção, onde cada defeito encontrado nas cascas das pás era registrado com precisão, incluindo sua posição exata no eixo longitudinal, a casca em que estava localizado e o tamanho do defeito.

Em um levantamento de dados, foi notado que os principais defeitos eram espessura fina da camada de gelcoat, causado principalmente pela aplicação antecipada da fibra, ou seja, pela colocação antes da cura total do gel, e também por aplicação incorreta devido à velocidade inadequada e à distância da pistola durante a aplicação do revestimento. Outro defeito comum era a porosidade, que é a impressão do molde no gelcoat, criando pequenos “poros” na estrutura, e as rachaduras, causadas principalmente pela sobreposição inadequada entre o fim de uma camada de gelcoat e o início de outra. Idealmente, essa sobreposição deve ser de 50%, mas ela está diretamente relacionada à velocidade de aplicação do operador e à região da aplicação, o que frequentemente não era observado antes do treinamento.

Essa abordagem permitiu correlacionar diretamente as condições de aplicação com os defeitos observados. A investigação revelou que esses defeitos estavam frequentemente relacionados ao controle inadequado dos parâmetros de aplicação e à falta de uniformidade na espessura de gelcoat, destacando a necessidade de ajustes rigorosos na técnica de sobreposição e na velocidade de aplicação para garantir a qualidade do produto final. (Figura 10).

Figura 10 - Comparação dos defeitos de produção em um molde antes e depois das melhorias implementadas.



Fonte: elaborada pela própria autora.

Um gráfico de Pareto é interpretado analisando a distribuição dos dados em ordem decrescente, onde as barras representam as diferentes causas ou problemas, e sua altura indica a frequência ou impacto de cada um. A linha cumulativa, geralmente sobreposta ao gráfico, mostra a soma acumulada das ocorrências, permitindo identificar rapidamente as causas que mais contribuem para o problema. O princípio 80/20 pode ser observado quando uma pequena porcentagem das causas (geralmente 20%) resulta na maior parte dos efeitos (cerca de 80%), ajudando a priorizar ações corretivas nas áreas mais impactantes (Juran, 1999; Pareto, 1896).

Os resultados das análises comparativas confirmaram que a aplicação de gelcoat seguindo as melhores práticas resultou em superfícies significativamente melhores. Essa melhoria reduziu o tempo de retrabalho pós-moldagem em cerca de 2 a 3 horas, uma vez que as superfícies apresentaram menos defeitos que demandaria tempo para correção.

A importância de se ter uma boa superfície de gelcoat em pás eólicas é crucial, pois ela garante uma maior resistência às condições climáticas adversas, como radiação UV, umidade e abrasão. A adoção das técnicas de pulverização controlada e o treinamento adequado dos operadores proporcionaram uma significativa melhoria na qualidade do produto final, evidenciada pela redução de defeitos e pela uniformidade do

revestimento (Figura 11). Além disso, a redução das emissões de estireno contribuiu para um ambiente de trabalho mais seguro e para a sustentabilidade da produção.

Essa investigação demonstrou que o controle rigoroso dos parâmetros de aplicação é essencial para garantir a qualidade e a longevidade das pás eólicas, validando as mudanças implementadas e destacando a importância de um treinamento contínuo e da aplicação de tecnologias avançadas na fabricação de componentes de energia renovável.

Figura 11- Superfície adequada.



Fonte: elaborada pela própria autora.

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

A conclusão do estudo reforça a importância da otimização dos processos de aplicação de gelcoat na produção de pás eólicas, destacando o impacto direto na durabilidade e eficiência dos produtos finais. Através da análise detalhada da linha de produção e dos testes realizados tanto em laboratório quanto no chão de fábrica, ficou evidente que a aplicação controlada de gelcoat, seguindo as melhores práticas, não só reduz significativamente as emissões de estireno como também melhora a uniformidade do revestimento, crucial para a resistência às condições ambientais adversas. Além disso, o treinamento de certificação dos operadores, abrangendo aspectos teóricos e práticos, mostrou-se fundamental para garantir a correta execução dos procedimentos e a conformidade com os padrões de qualidade estabelecidos.

Com a implementação das melhorias propostas, a empresa não apenas obteve uma redução nos custos

operacionais e ambientais, mas também elevou a qualidade de suas pás eólicas, contribuindo para a sustentabilidade e competitividade no mercado de energia renovável. Assim, este estudo destaca a relevância de investir em técnicas de aplicação avançadas e no treinamento contínuo dos operadores como pilares para a inovação e excelência na fabricação de compósitos.

REFERÊNCIAS

- BRASIL permanece em 6º lugar no ranking mundial de energia eólica. [S. l.]: ABEEólica, 2024. Site. Disponível em: https://abeeolica.org.br/brasil-permanece-em-6o-lugar-no-ranking-mundial-de-energia-eolica/?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 12 ago. 2024.
- CONTROLLED spraying handbook: Composites Open Molding Resin & Gel Coat Application. Arlington, VA: American Composites Manufacturers Association, 2004. Disponível em: https://airknowledge.gov/ILT/TOXC228/Current/CI/03TOXC228_Handout_Controlled_Spray_Handbook.pdf. Acesso em: 12 dez. 2024.
- CONTROLLED Spraying: instructors guide. Arlington, VA: Composites Fabricators Association, set. 1998. Disponível em: <https://acmanet.org/wp-content/uploads/2024/02/controlled-spray-training.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2023.
- EUROPE gelcoat market: industry trends and forecast to 2028. [S. l.]: Data Bridge Market Research, 2021. Site. Disponível em: <https://www.databridgemarketresearch.com/reports/europe-gelcoat-market>. Acesso em: 14 abr. 2024.

GASCH, Robert; TWELE, Jochen. **Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation**. 2. ed. [S. l.]: Springer, 2011.

GAUTHIER, Michele (ed.). **Engineered Materials Handbook**. 2. ed. [S. l.]: ASM International, 1995. Disponível em: <https://dl.asminternational.org/handbooks/edited-volume/48/Engineered-Materials-Handbook-Desk-Edition>. Acesso em: 8 jun. 2024.

HAU, Erich. **Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics**. 2. ed. [S. l.]: Springer Science & Business Media, 2013.

ISHIKAWA, Kaoru. **Guide to Quality Control**. Tokyo: Asian Productivity Organization, 1976. Disponível em: <https://archive.org/details/guidetoqualityco00ishi/mode/2up>. Acesso em: 19 mar. 2025.

JURAN, J. M. **Juran's Quality Control Handbook**. 5th ed. [S. l.]: McGraw-Hill, 1999.

MANWELL, James F.; MCGOWAN, Jon G.; ROGERS, Anthony L. **Wind Energy Explained: Theory, Design and Application**. 2. ed. [S. l.]: Wiley, 2010.

MORAIS, Adriano Átima de. **Turbinas Eólicas: Uma análise estrutural em pás de rotores eólicos**. 1. ed. [S. l.]: Novas Edições Acadêmicas, 2018.

SOARES, Vitor. **Diagrama de Ishikawa: o que é, para que serve e como usar**. [S. l.]: Na Prática, 25 jun. 2024. *Blog*. Disponível em: <https://napratica.org.br/diagrama-de-ishikawa/>. Acesso em: 3 jul. 2024.

AGRADECIMENTOS

Expresso minha gratidão a Deus, cuja presença constante tem sido a base que me sustentou e me guiou ao longo de toda a minha jornada acadêmica e profissional, permitindo-me superar desafios e alcançar realizações.

À minha família, com especial carinho aos meus pais e à minha querida avó Maria, que sempre foram fontes inabaláveis de amor, apoio e motivação. Sem o afeto e a confiança de vocês, não estaria aqui comemorando mais esta conquista.

Aos meus amigos, Olga e Matheus Higo, que estiveram presentes em cada etapa da minha vida, agradeço por compartilharem risadas, momentos inesquecíveis e por serem meu porto seguro.

Minha gratidão também vai para toda a equipe de produção da LM Wind Power, que me forneceu as ferramentas, o conhecimento e o entusiasmo necessários para o desenvolvimento deste TCC.

E, finalmente, à minha orientadora, Verônica, por aceitar o desafio de desenvolver este trabalho comigo em tão pouco tempo.

A todos os mencionados e àqueles que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão deste trabalho, o meu sincero agradecimento. Deixo aqui uma parte do meu coração e todo o meu reconhecimento.