

# REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE FIBRAS DE VIDRO NA OBTENÇÃO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS TERMORRÍGIDOS

**Anderson Pires Fernandes (UFSCar Sorocaba )**  
andersonp.fernandes@yahoo.com.br

**Jane Maria Faulstich de Paiva (UFSCar Sorocaba )**  
jane@ufscar.br



*Os investimentos feitos em energia eólica vêm crescendo globalmente ao longo dos anos, visando alternativas sustentáveis para o segmento. Este crescimento carrega consigo o aumento no consumo de materiais e também a geração de resíduos provenientes de seus processos, que se não reutilizados ou tratados adequadamente causam impactos negativos ao meio ambiente. Dentre os resíduos gerados e descartados pela indústria eólica, um dos mais comuns é a fibra de vidro utilizada na fabricação das pás dos aerogeradores. Deste modo, o estudo propõe método alternativo de reaproveitamento destes resíduos na forma de tecidos costurados e aleatórios em novos compósitos poliméricos termorrígidos. No caso, foram confeccionados quatro tipos de compósitos com diferentes camadas e arranjos dos tecidos, e resina de poliéster por moldagem do tipo transferência de resina (R.T.M). Após as moldagens, os compósitos foram avaliados mecanicamente em flexão e tração. Por fim, a análise estatística dos resultados, realizada segundo metodologia Tukey, revelou que o número de camadas de fibra de vidro foi determinante para as propriedades mecânicas dos compósitos moldados, ao passo que a distribuição dos tecidos em seu interior não apresentou diferenças significativas.*

*Palavras-chave: Reaproveitamento, resíduos de fibra de vidro, moldagem por transferência de resina, compósitos termorrígidos*

## 1. Introdução

O uso da energia eólica vem aumentando globalmente a uma taxa acelerada (YAZDANBAKHSI et al., 2018; ANDERSEN et al., 2016). Os investimentos feitos em tecnologias avançadas na busca pela transição das matrizes energéticas implicam no desenvolvimento de novos processos de geração, bem como novos materiais e dispositivos utilizados para este fim, que se não tratados podem ser tão maléficos ao meio ambiente quanto aqueles tradicionalmente utilizados (ANDERSEN et al., 2016; GUERRERO et al., 2011).

A estrutura das pás eólicas, geralmente, é constituída de compósitos poliméricos termorrígidos reforçados com tecidos de fibras de vidro, que são materiais também denominados estruturais ou avançados (GOREN & ATAS, 2008). A gestão destes tipos de resíduos constitui um problema ainda complexo, pois são produzidas a partir de compósitos termorrígidos e de difícil reaproveitamento, considerados atualmente como não-recicláveis, (LIU, P., & BARLOW, 2017; CHERRINGTON et al., 2012A).

Neste contexto, o estudo tem como intuito investigar as possibilidades de reaproveitamento de resíduos de fibras de vidro provenientes de processos de fabricação de pás eólicas para obter um novo compósito, visando identificar possibilidades de destinação final mais adequadas que o descarte em aterros sanitários. Em geral, os estudos de reaproveitamento destes resíduos contemplam compósitos confeccionados a partir de material particulado (triturado); este trabalho, por sua vez, propõe o desenvolvimento alternativo de confecção dos compósitos, utilizando resíduos na forma de mantas de tecido de fibras de vidro descartadas pela indústria, aplicadas em camadas como reforço de compósito de resina polimérica do tipo termorrígida, o que os tornam semelhantes aos compósitos aplicados na própria fabricação de pás eólicas.

## 2. Materiais e métodos

O estudo contempla a utilização de resíduos de mantas de fibras de vidro costurada e manta de fibras de vidro do tipo aleatória oriundos de descarte do processo de fabricação de pás eólicas, representadas na Figura 1.

O sistema de matriz polimérica escolhido para a confecção dos compósitos foi uma resina poliéster do tipo insaturado (Arazyn 13.0), indicada para aplicação em processos de moldagem por transferência de resina (R.T.M. – Resin Transfer Moulding). Para a polimerização da resina foi utilizado um tipo de catalisador (Butanox 1150) como agente de “cura”, na proporção de 1,2% (em massa) na mistura.

Figura 1 – Resíduos de mantas de fibras de vidro: (a) costurada; (b) aleatória



Fonte: Próprio autor (2019)

Durante o processo de RTM foram utilizados moldes de liga de alumínio para moldar placas de compósitos para posterior corte de corpos de prova para ensaios mecânicos dos tipos flexão e tração.

As mantas de fibras de vidro costuradas e aleatórias foram cortadas nas dimensões internas de dois moldes (19,0cm x 16,5cm e 30,0cm x 30,0cm) e arranjadas dentro dos moldes do tipo RTM, conforme critérios estabelecidos neste trabalho (Tabela 1). Assim, as mantas foram posicionadas nos moldes em camadas intercaladas, em quatro conformações distintas, cada formação representando um compósito diferente.

Tabela 1 – Distribuição (arranjo) das mantas de fibras de vidro no compósito moldado

Tipo	Nº camadas	1ª camada	2ª camada	3ª camada	4ª camada
Arranjo 1 (A1)	3	costurada	Aleatória	costurada	---
Arranjo 2 (A2)	4	costurada	Aleatória	costurada	aleatória
Arranjo 3 (A3)	4	costurada	Aleatória	aleatória	costurada
Arranjo 4 (A4)	4	aleatória	Costurada	costurada	aleatória

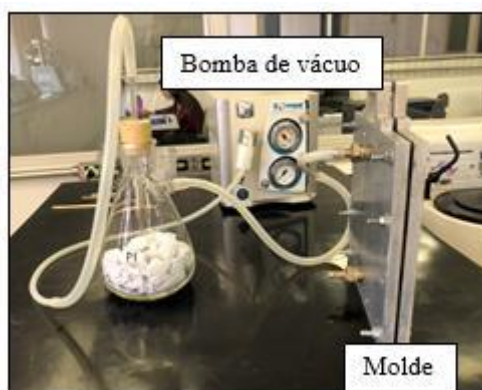
Fonte: próprio autor (2019)

Estes arranjos (Tabela 1) foram dispostos dentro dos moldes e fechados para a realização da moldagem por RTM. A proporção da matriz polimérica, constituída pela resina poliéster e catalisador, ambos na forma líquida, foram pesados considerando o volume útil dos moldes. Durante a moldagem a matriz polimérica é transferida para dentro do molde, com auxílio da bomba de vácuo, conforme o processo do tipo RTM (Figura 2), que consiste na injeção da resina polimérica infiltrando o reforço fibroso (laminado) disposto dentro do molde. O tempo

de polimerização (“cura”) dos compósitos foi de 24h dentro do molde fechado em temperatura ambiente.

Cada tipo de compósito foi moldado a fim de se analisar, posteriormente, o comportamento mecânico do material mediante variação do posicionamento dos tecidos dentro dele, bem como o desempenho no processo de moldagem por RTM.

Figura 2 – Esquema da montagem do processo por RTM realizado



Fonte: próprio autor (2019)

Após as moldagens, as placas dos compósitos foram cortadas em corpos de prova para a realização de ensaios mecânicos. No caso, para a realização de ensaios mecânicos de flexão, foram cortados 9 corpos de prova nas dimensões de 127mm x 12,7mm x 3,9mm. O ensaio de flexão foi realizado na máquina universal da marca EMIC, modelo DL 10000, com célula de carga de 500 kgf e velocidade de ensaio de 1,65mm/min.

Para a realização dos ensaios de tração, foram cortados 7 corpos de prova nas dimensões de 250mm x 25mm x 4,7mm. Os ensaios foram realizados na máquina universal da marca EMIC, modelo DL 30000, com célula de carga de 2000 kgf e velocidade de ensaio de 2mm/min.

O tratamento estatístico dos resultados dos ensaios mecânicos de flexão e tração foi feito conforme a análise de variância ANOVA, com metodologia Tukey e confiança de 95% no software Minitab.

### 3. Resultados e discussão

#### 3.1. Ensaio de flexão

A Tabela 2 apresenta os resultados médios encontrados nos ensaios de flexão dos compósitos. Cada compósito foi confeccionado com quatro combinações diferentes denominadas de Arranjo, conforme descritos na Tabela 1. Os compósitos representados por letras iguais (Tabela 2) não apresentaram variação significativa de resultados, portanto podem ser considerados pertencentes a um mesmo grupo.

Tabela 2 – Resultados médios do ensaio de flexão realizado em 9 corpos de prova dos compósitos

Compósito	Resistência máxima (MPa) em flexão	Módulo de Elasticidade (MPa) na flexão
A1	140,7 ± 27,1; b	7.431 ± 317,6; c
A2	205,4 ± 16,8; a	8.456 ± 491,8; b
A3	208,1 ± 11,6; a	11.230 ± 624,4; a
A4	223,4 ± 14; a	8.157 ± 338,3; b

Fonte: próprio autor (2019)

De acordo com os resultados (Tabela 2) a análise de variância dos 4 tipos de compósitos testados e comparados revela a presença de 2 grupos (A e B) em decorrência das medidas de tensão máxima em flexão encontradas. O grupo A contém os compósitos A2, A3 e A4 (todos com 4 camadas de reforço), enquanto que o grupo B contém apenas o compósito A1, de 3 camadas de reforço. Isso infere que a quantidade de camadas de reforço presente nos compósitos é determinante para suas propriedades mecânicas, em contrapartida, a forma como são dispostos nestes não teve muita representatividade nas propriedades, isto porque os resultados de resistência à flexão dos compósitos estão próximos no grupo A.

Em um estudo realizado por PEREIRA (2012), foi realizado ensaio de flexão em amostras de compósitos de resina poliéster reforçados com fibras de vidro na proporção de 15% em massa, e a resistência à flexão encontrada foi de 93,2 MPa, este valor é inferior aos resultados encontrados neste estudo, cuja menor medida foi 140,7 MPa. Fato similar ocorreu com o módulo de elasticidade, pois no trabalho da literatura (PEREIRA, 2012) foi encontrado um módulo de, aproximadamente, 5500 MPa.

### 3.2. Ensaio de tração

A Tabela 3 apresenta os resultados médios encontrados nos ensaios de tração dos compósitos. Cada compósito foi confeccionado com quatro combinações diferentes denominadas de Arranjo, conforme descritos na Tabela 1. O tratamento estatístico utilizou a mesma metodologia ANOVA.

Tabela 3 – Resultados médios do ensaio de tração realizado em 7 corpos de prova dos compósitos

Compósito	Resistência máxima (MPa) em tração	Deformação (mm)	Módulo de Elasticidade (MPa) em tração
A1	37,3 ± 1,7; b	4,75 ± 0,8; b	1968 ± 642,4; b
A2	127,3 ± 11,8; a	7,7 ± 0,7; a	2904 ± 125,9; a
A3	115,3 ± 7,5; a	7,1 ± 0,4; a	2788 ± 91,8; a
A4	117,2 ± 9,6; a	7,6 ± 0,6; a	2706 ± 129,7; a

Fonte: próprio autor (2019)

A análise de variância dos 4 tipos de compósitos testados e confrontados revela a presença de 2 grupos (A e B) em decorrência das medidas de tensão máxima encontradas. O grupo A contém o compósito A2, A3 e A4 (4 camadas de reforço), enquanto que o grupo B contém apenas o compósito A1 (3 camadas). A análise feita aqui é similar à análise do ensaio de flexão, visto que os resultados sugerem que a quantidade de camadas de reforço presente nos compósitos é determinante para suas propriedades mecânicas, em contrapartida, a forma como são dispostos nestes não teve muita influência nos valores obtidos das propriedades, isto porque as medidas são bem próximas no grupo A.

Em estudo da literatura YOO et al (2011), encontrou tensão de ruptura de aproximadamente 120 MPa utilizando 20% de reforço de fibras curtas de vidro no material analisado. No caso, o compósito foi confeccionado a partir de matriz polimérica de Nylon 6 misturada com argila organofílica montmorilonita (na proporção de 5% em massa). Estes valores aproximam-se dos resultados encontrados nos compósitos do grupo A (115 MPa a 127 MPa). No entanto, os módulos de elasticidade encontrados no trabalho da literatura (YOO et al, 2011) apresentaram valores de 6000 a 8000 MPa. Já no trabalho de PEREIRA (2012), os compósitos de resina poliéster reforçados com fibras de vidro, na proporção de 15% em massa, apresentaram resistência à tração de 31,90 MPa, resultado semelhante ao grupo B deste estudo (37,3 MPa).

#### 4. Considerações finais

Este trabalho atingiu o objetivo propondo uma alternativa de reaproveitamento de resíduos de manta de fibra de vidro (costurada e aleatória), provenientes da produção de pás eólicas, resultando no desenvolvimento de novos compósitos. Tais compósitos foram obtidos por meio de processo de moldagem por transferência de resina (R.T.M.), cujo diferencial foi a aplicação das fibras de vidro residuais no formato de mantas e não partículas, como é comum se encontrar em relação à reutilização de resíduos industriais.

As placas de compósitos moldadas foram divididas em quatro categorias, diferenciando-se pelo número de camadas e posição das fibras dentro do arranjo. Cada tipo foi avaliado mecanicamente em flexão e tração. Os resultados mecânicos avaliados estatisticamente revelaram a presença de 2 grupos de compósitos A e B, identificados segundo metodologia Tukey, onde o Grupo A contém os compósitos com 4 camadas de fibra de vidro e o Grupo B, 3 camadas. Isso infere que a quantidade de camadas é determinante para as propriedades mecânicas do material, pois aqueles pertencentes ao Grupo A apresentaram resistência mecânica superiores ao Grupo B. Em contrapartida, a posição dos tecidos nos compósitos não afetou significativamente tais propriedades, já que os resultados apresentados entre os compósitos do Grupo A são próximos.

Dependendo da aplicação dos compósitos, se requer maior ou menor resistência mecânica, outros arranjos podem ser analisados a fim de obterem-se as propriedades desejadas. Esta é uma sugestão para trabalhos futuros e complementares a esta pesquisa.

## 5. Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Às empresas Wobben Windpower Indústria e Comércio Ltda. e Ashland Polímeros do Brasil S.A., pelo fornecimento dos materiais.

## REFERÊNCIAS

- ANDERSEN, N., ERIKSSON, O., HILLMAN, K., WALLHAGEN, M. Wind Turbines' End-of-Life: Quantification and Characterisation of Future Waste Materials on a National Level. **Energies**, v. 9999, p. 1-24, 2016.
- CHERRINGTON, R., GOODSHIP, V., MEREDITH, J., WOOD, B. M., COLES, S. R., VUILLAUME, A., KIRWAN, K. Producer responsibility: Defining the incentive for recycling composite wind turbine blades in Europe. **Energy Policy**, v. 47, p. 13–21, 2012.



GOREN, A., ATAS, C. Manufacturing of polymer matrix composites using vacuum assisted resin infusion molding. **Archives of Materials Science and Engineering**, v. 34(2), p. 117–120, 2008.

GUERRERO, P. C., MANCINI, S. D., TOUBIA, C. M. Caracterização E Reciclagem Química Via Pirólise De Resíduos Da Fabricação De Pás Eólicas. **HOLOS Environment**, v. 147(112), p. 1519–8634, 2011.

LIU, P., BARLOW, C. Y. Wind turbine blade waste in 2050. **Waste Management**, v. 62, p. 229–240, 2017.

PEREIRA, N.C. Caracterização de compósitos de resina poliéster, fibra de vidro e wollastonita moldados pelo processo RTM light. **Revista Mackenzie de Engenharia e Computação**, v. 11, n.1, p. 23-37, 2012.

YAZDANBAKHS, A., BANK, L. C., RIEDER, K. A., TIAN, Y., CHEN, C. Concrete with discrete slender elements from mechanically recycled wind turbine blades. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 128, p. 11–21, 2018.

YOO, Y., SPENCER, M.W., PAUL, D.R. Morphology and mechanical properties of glass fiber reinforced Nylon 6 nanocomposites. **Polymer**, v. 52, p. 180-190, 2011.