



Autora: Júlia Ramos Genzini; Orientadora: Profa. Cristiane Tavoraro; Coorientadora: Profa. Dra. Juliana Izidoro

INTRODUÇÃO

- As **turbinas eólicas** são uma **alternativa renovável** à queima de combustíveis fósseis para a obtenção de energia, e podem evitar a liberação de gases poluentes para a atmosfera.
- A maioria das pás eólicas é feita de **fibra de vidro e resina poliéster**, formando um material **composto e difícil de reciclar** (VIEIRA; LEBRÃO, 2018).
- Entretanto, as pás das turbinas eólicas têm uma **vida útil de 20 a 30 anos** (MME, 2024) e ao final deste período são **incineradas, descartadas incorretamente no meio ambiente ou direcionadas para aterros sanitários**.
- A Universidade de Cambridge prevê que **43 milhões de toneladas** de material proveniente da **indústria eólica no mundo serão gerados até 2050** (ENEL GREEN POWER, 2021).
- Existem **três tipos de reciclagem** deste composto: mecânica, química e térmica.
- A **reciclagem térmica** funciona por meio da **quebra da estrutura polimérica da resina pelo aquecimento do composto**, sendo um caminho viável para o **reaproveitamento da fibra**.
- O **objetivo** desse projeto é contribuir para a **reciclagem das pás dos aerogeradores através de um processo térmico para separar a fibra de vidro integral da resina poliéster**.
- Desta forma, este estudo tem potencial de auxiliar na **sustentabilidade da produção de energia eólica**, colaborando, desse modo, para a **economia circular da fibra de vidro**.



FIGURA 1 - Exemplo de pás eólicas.
Fonte - Disponível em: <https://encantador.com.br/FP/mkp>. Acesso em: 10 fev 2025.



FIGURA 2 - Aterro sanitário de pás eólicas.
Fonte - Disponível em: <https://shrinklink.com/>. Acesso em: 10 fev 2025.



QUESTÃO-PROBLEMA

Qual é a temperatura ideal para separar a fibra de vidro integral da resina poliéster, de forma a contribuir para a reciclagem das pás de aerogeradores?

HIPÓTESE

De acordo com Feih *et al* (2015) e Shuaib e Mativenga (2016), o aquecimento de compostos de fibra de vidro e resinas possibilita a **eliminação da resina**, permitindo que a fibra de vidro mantenha sua integridade e, assim, possa ser **reaproveitada para a obtenção de novos produtos**, inclusive para a **confeção de novas pás**. Desse modo, acredita-se que seja possível fazer a **separação da fibra de vidro por meio do aquecimento do material a diferentes temperaturas**, contribuindo, dessa forma, com a **economia circular na indústria de energia renovável**.

METODOLOGIA

- Preparo de amostras:
 - Fibra de vidro + resina poliéster
 - Resina poliéster



FIGURA 3 - Placa de fibra de vidro e seus pedaços recortados ao lado.
Fonte: Autoria própria.



FIGURA 4 - Pedaços do corpo de prova de resina poliéster pura recortada e um corpo de prova integro.
Fonte: Autoria própria.



FIGURA 5 - Cadinho com fibra de vidro e resina poliéster (FR) e com resina pura (RP) antes do aquecimento.
Fonte: Autoria própria.

- Aquecimento das amostras na mufla (350°, 400°, 450°, 500° e 550° - referência) por 1 hora



FIGURA 6 - Cadinho contendo a amostra dentro da mufla.
Fonte: Autoria própria.

- Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)



FIGURA 7 - Microscopia eletrônica de Varredura.
Fonte - Disponível em: <https://maam.br/solucoes/microscopia-elettronica-mev>. Acesso em: 10 fev 2025.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

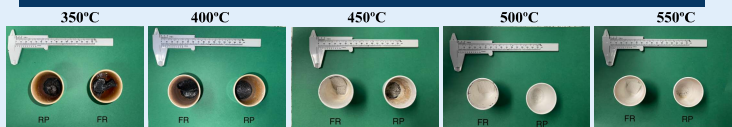


FIGURA 8 - Cadinhos com fibra de vidro e resina poliéster (FR); e com resina pura (RP) após o aquecimento a 350°C.
Fonte: Autoria própria.
FIGURA 9 - Cadinho com fibra de vidro e resina poliéster (FR); e com resina pura (RP) após o aquecimento a 400°C.
Fonte: Autoria própria.
FIGURA 10 - Cadinho com fibra de vidro e resina poliéster (FR); e com resina pura (RP) após o aquecimento a 450°C.
Fonte: Autoria própria.
FIGURA 11 - Cadinho com fibra de vidro e resina poliéster (FR); e com resina pura (RP) após o aquecimento a 500°C.
Fonte: Autoria própria.
FIGURA 12 - Cadinho com fibra de vidro e resina poliéster (FR); e com resina pura (RP) após o aquecimento a 550°C.
Fonte: Autoria própria.

350°C e 400°C: a resina poliéster, ainda presente na fibra, obteve cor escura, bolhas de ar e aspecto poroso.
450°C: a cobertura de resina visível na fibra reduz, enquanto a resina pura ficou escura e menos porosa.
500°C e 550°C: a fibra ficou completamente descoberta de resina à olho nu e ela foi completamente convertida em compostos gasosos.

TABELA 1 - Resultados das massas de fibra de vidro e resina poliéster para as nove amostras analisadas, antes e após cada aquecimento

T	Tempo	Antes				Depois			
		Massa cad. de resina pura (g)	Massa cad. de fibra + resina (g)	Massa cad. com resina pura (g)	Massa cad. com fibra + resina (g)	Massa final do cad. com resina (g)	Massa final do cad. com resina + fibra (g)	Massa final de resina (g)	Massa final de fibra (g)
1	350°	39,219	39,245	41,225	41,252	2,006	2,007	39,659	0,182
2	350°	42,146	39,255	44,156	41,266	2,012	2,011	39,854	0,599
3	400°	40,071	39,220	42,089	41,231	2,018	2,011	39,712	0,492
4	400°	41,983	42,543	45,956	44,549	2,013	2,006	43,047	0,504
5	450°	42,645	48,327	44,645	50,357	2,000	2,000	48,840	0,513
6	450°	42,545	39,221	44,554	41,229	2,009	2,006	39,673	0,452
7	500°	41,983	42,646	43,988	44,650	2,005	2,004	43,019	0,373
8	500°	39,223	39,245	41,231	41,254	2,008	2,009	39,607	0,362
9	550°	40,066	42,543	42,073	44,653	2,007	2,010	42,919	0,376

Fonte: Autoria própria.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

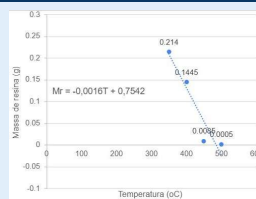


FIGURA 13 - Massa final de resina em função da temperatura de aquecimento.
Fonte: Autoria própria.

Estimativa da temperatura para a qual a resina é eliminada da fibra de vidro:

$$M_r = -0,0016.T + 0,7542$$

M_r = massa de resina
 T = temperatura

$$\approx 471,4^\circ\text{C}$$

Os resultados da Tabela 1 e da Figura 13 mostram que a massa final de resina poliéster das amostras diminuiu à medida que a temperatura também aumentou. Nesse sentido, a variação da massa da amostra de resina poliéster evidencia a **decomposição do material**, sendo uma referência para ser comparada à amostra de fibra de vidro com resina. Essa última variou menos, em decorrência da **decomposição exclusiva da resina**, com a **permanência da fibra de vidro no cadinho**, já que a fibra possui maior resistência à altas temperaturas do que a resina poliéster.

RESULTADOS DA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV):

350°C

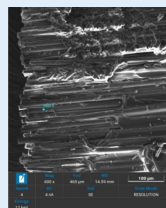


FIGURA 14 - Imagem da Fibra de Vidro com Resina a 350°C.
Fonte: Autoria própria.

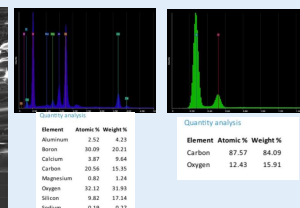


FIGURA 15 - Composição da Fibra de Vidro com Resina a 350°C - Espectrometria de Raio X.
Fonte: Autoria própria.

Temperaturas: 350°C e 400°C.

Tamanho de cada fibra de vidro: 12,16 µm.

Alinhamento das fibras de vidro: foi mantido.

Resina poliéster: houve presença de resina residual na fibra de vidro, evidenciada pela Espectrometria de Raios X, que identificou presença de silício (fibra de vidro) e de carbono e oxigênio (resina).

400°C

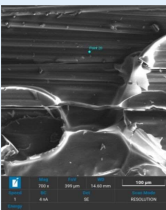


FIGURA 16 - Imagem da Fibra de Vidro com Resina a 400°C.
Fonte: Autoria própria.

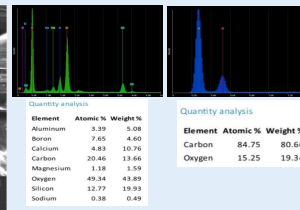


FIGURA 17 - Composição da Fibra de Vidro com Resina a 400°C - Espectrometria de Raios X.
Fonte: Autoria própria.

Temperaturas: 450°C e 500°C.

Tamanho de cada fibra de vidro: 12,16 µm.

Alinhamento das fibras de vidro: foi mantido.

Resina poliéster: houve uma redução significativa da resina poliéster na fibra de vidro, comprovada pela Espectrometria de Raios X, a qual identificou presença de silício (fibra de vidro).

500°C

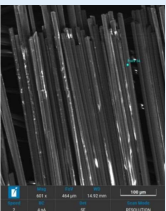


FIGURA 18 - Imagem da Fibra de Vidro com Resina a 500°C.
Fonte: Autoria própria.

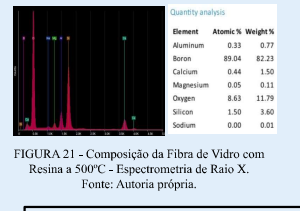


FIGURA 19 - Composição da Fibra de Vidro com Resina a 500°C - Espectrometria de Raios X.
Fonte: Autoria própria.

A partir da análise dos resultados obtidos e de acordo com Alves (2019) e Vanderlei (2016), quanto mais alinhadas estiverem as fibras no composto, maior será a **preservação das propriedades mecânicas**, com destaque para a **resistência à tração e à ruptura**. Ademais, as fibras com menor presença de resina residual após o processo de reciclagem garantem que a fibra estabeleça **ligações interfaciais mais fortes** com a matriz ao compor novos produtos compostos, como exposto por Shuaib e Mativenga (2016).

CONCLUSÃO

Este estudo permitiu a avaliação do processo de decomposição da resina poliéster (material presente na maioria das pás eólicas) em função do aumento da temperatura. Sendo assim, a hipótese deste estudo foi parcialmente aceita. Por um lado, foi possível eliminar a resina da fibra de vidro, mantendo o seu alinhamento, por meio do aquecimento do composto no intervalo de temperatura de 450°C a 500°C. Entretanto, acredita-se que não seja viável que a fibra de vidro resultante do processo seja reincorporada em novas pás eólicas, pois para ser reciclado, o composto de fibra de vidro com resina deve ter o seu tamanho reduzido, o que poderia implicar na diminuição de suas propriedades mecânicas. Mesmo assim, o sucesso parcial desta pesquisa demonstra que ao aplicar o método de aquecimento, **pode-se reciclar a fibra de vidro e destiná-la para finalidades que exijam menos de suas propriedades mecânicas**, e evitando que ela seja descartada no meio ambiente, contribuindo, desse modo, com a **economia circular** do setor energético. Cabe ressaltar que pretende-se aplicar a técnica de difratometria de raios X (DRX) nas amostras remanescentes, a fim de se avaliar como cada composto está estruturado nos materiais finais.

REFERÊNCIAS

- ENEL GREEN POWER. Nova vida e novos materiais: a história da inovação e sustentabilidade do vento. Disponível em: <https://www.enelgreenpower.com.br/midia/area7011/01/visualizacao-arquivos/>. Acesso em: 25 mai 2024.
- PELL, Sefiane; MOURITZ, A. F.; KANG, S. W. Determining the mechanisms controlling glass fibre strength loss during thermal recycling of waste composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. v. 76, p. 255-261, 2015.
- MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/wp-content/uploads/2022/02/relatorio-energia-em-brasil-2022-anuário-de-energia-eletrica-e-energetica->. Acesso em: 06 ago 2024.
- SHUAIB, Noshah Aziz; MATIVENGA, Paul Terence. Effect of process parameters on mechanical recycling of glass fibre filament composite. *Processia Corp.*, v. 8, p. 136-139, 2016.
- VIEIRA, William Zan; LEBRÃO, Guilherme Wolf. Caracterização Dos Subprodutos da Reciclagem de Resina Poliéster com Fibra de Vidro, 2018.