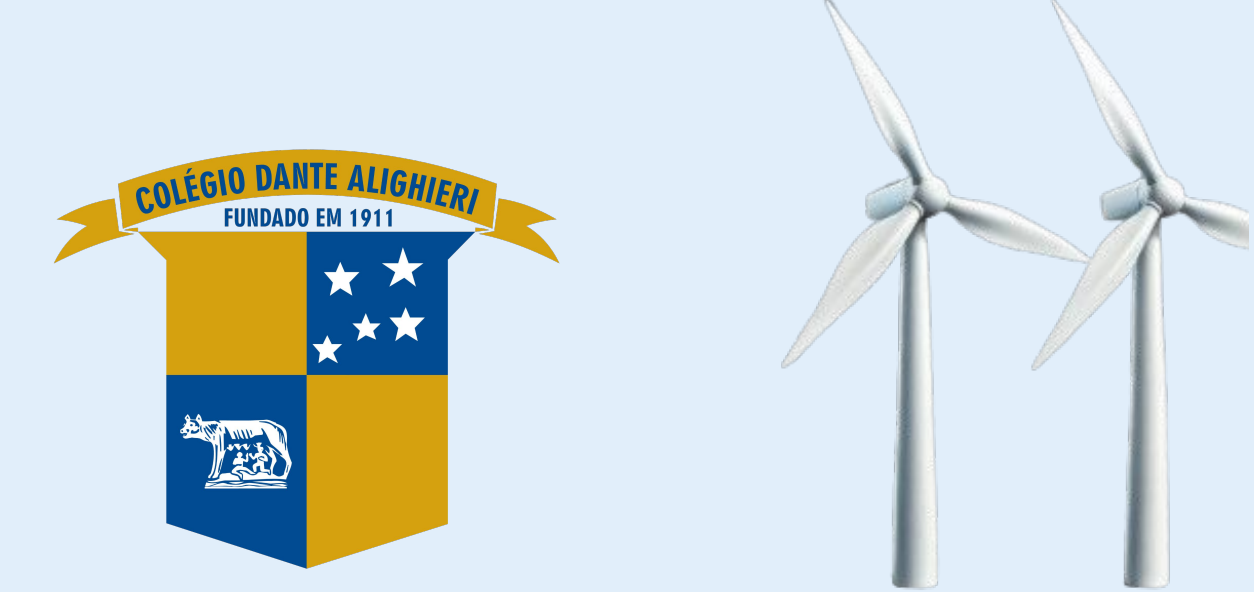




ReciclAr - Fase II



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

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 compósito: 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 foi 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**.



QUESTÃO-PROBLEMA

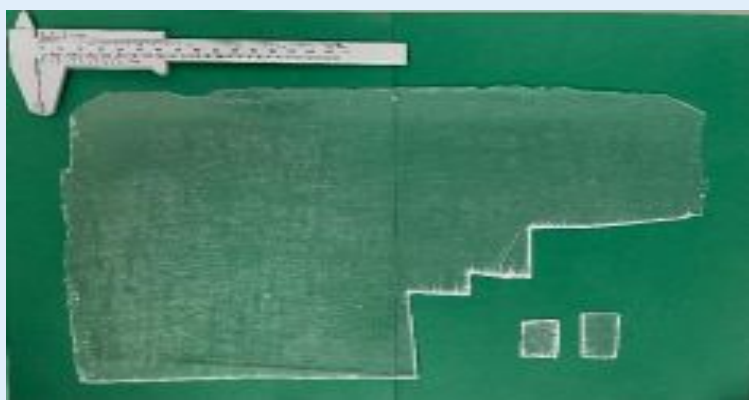
Como seria possível contribuir com a reciclagem de pás de turbinas eólicas por meio da determinação da temperatura ideal do aquecimento do composto de fibra de vidro reforçado com resina poliéster, para que se obtenha como produto final a fibra de vidro integral?

HIPÓTESE

De acordo com Feih *et al* (2015) e Shuaib e Mativenga (2016), o aquecimento de compósitos de fibra de vidro e resina 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 confecção 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



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



- Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)



- Difratomômetro de Raios-X (DRX)

RESULTADOS E DISCUSSÃO



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 reduziu, 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 Celsius	Tempo	Massa cad. de resina pura (g)	Massa cad. de fibra + resina (g)	Massa cad. com resina pura (g)	Massa cad. com fibra + resina (g)	Antes		Após			
							Massa de resina pura no cad. (g)	Massa de fibra+ resina no cad. (g)	Massa final do cad. com fibra + resina (g)	Massa final do cad. com resina pura (g)	Massa final fibra + resina (g)	Massa final resina (g)
1	350°	1h	39.219	39.245	41.225	41.252	2.006	2.007	39.859	39.401	0.614	0.182
2	350°	1h	42.146	39.255	44.158	41.266	2.012	2.011	39.854	42.392	0.599	0.246
3	400°	1h	40.071	39.220	42.089	41.231	2.018	2.011	39.712	40.229	0.492	0.158
4	400°	1h	41.983	42.543	43.996	44.549	2.013	2.006	43.047	42.114	0.504	0.131
5	450°	1h	42.645	48.327	44.645	50.327	2.000	2.000	48.840	42.657	0.513	0.012
6	450°	1h	42.545	39.221	44.554	41.229	2.009	2.008	39.673	42.550	0.452	0.005
7	500°	1h	41.983	42.646	43.988	44.650	2.005	2.004	43.019	41.982	0.373	0.001
8	500°	1h	39.223	39.245	41.231	41.254	2.008	2.009	39.607	39.223	0.362	0.001
9	550°	1h	40.066	42.543	42.073	44.553	2.007	2.010	42.919	40.065	0.376	0.001
Fonte: Autoria própria.												

Fonte: Autoria própria.

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

- $Mr = -0,0016T + 0,7542 \approx 471,4^{\circ}C$
- Mr = massa de resina T = temperatura

Os resultados da Tabela 1 e da Figura 14 mostram que a massa final de resina poliéster das amostras diminuiu à medida que a temperatura 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 a altas temperaturas do que a resina poliéster.

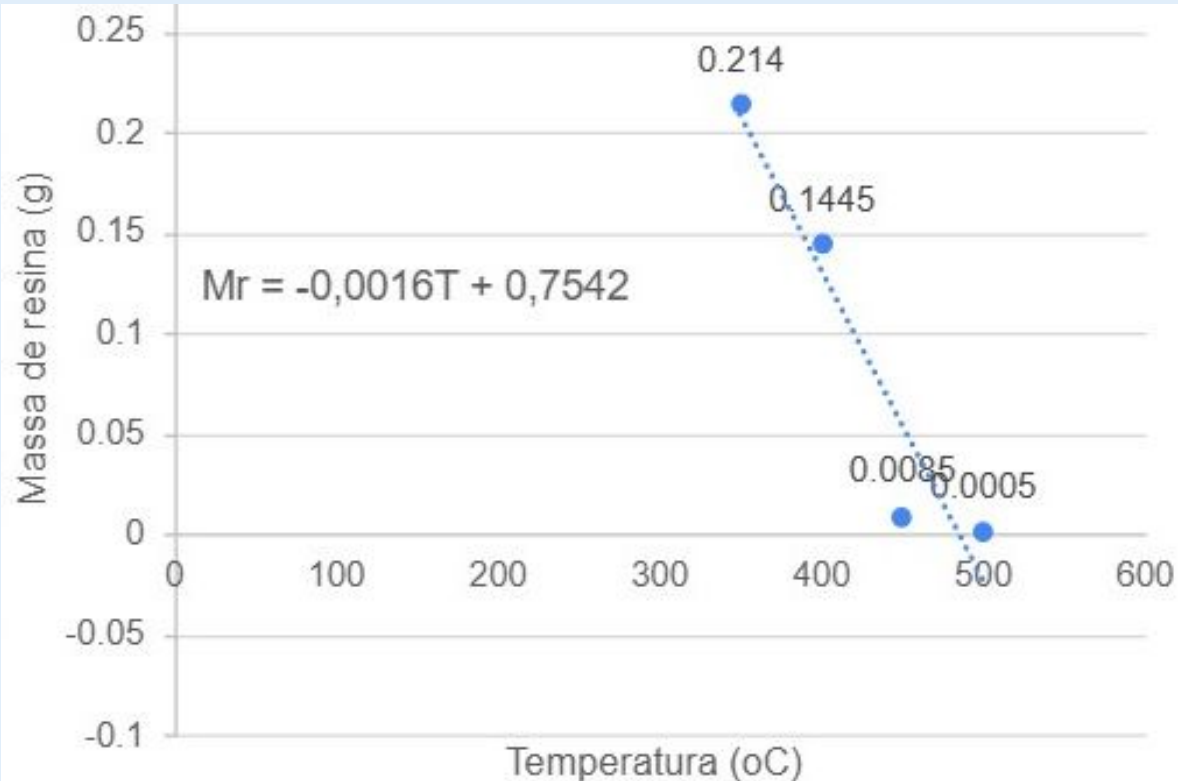


FIGURA 14 - Massa final de resina em função da temperatura de aquecimento. Fonte: Autoria própria.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

RESULTADOS DA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV):

350°C

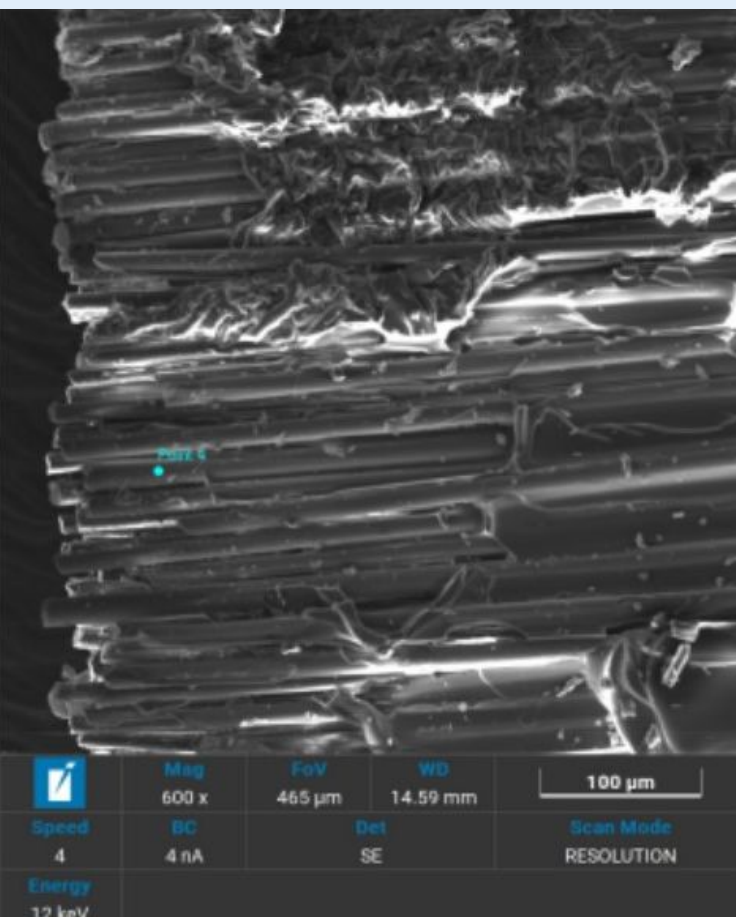


FIGURA 15 - Imagem da Fibra de Vidro com Resina a 350°C. Fonte: Autoria própria.

400°C

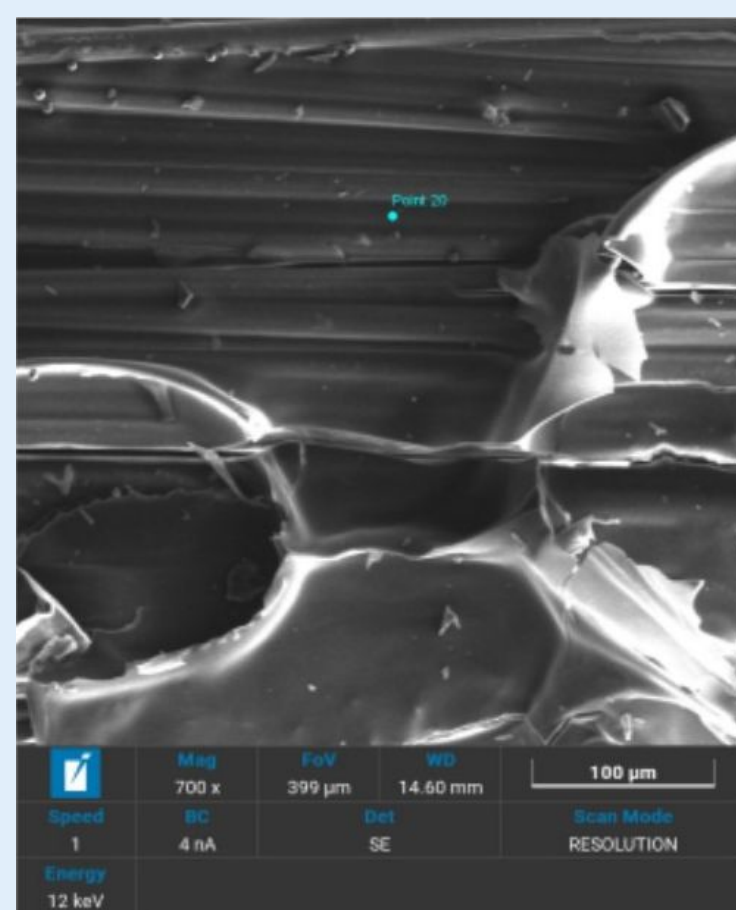


FIGURA 17 - Imagem da Fibra de Vidro com Resina a 400°C. Fonte: Autoria própria.

450°C

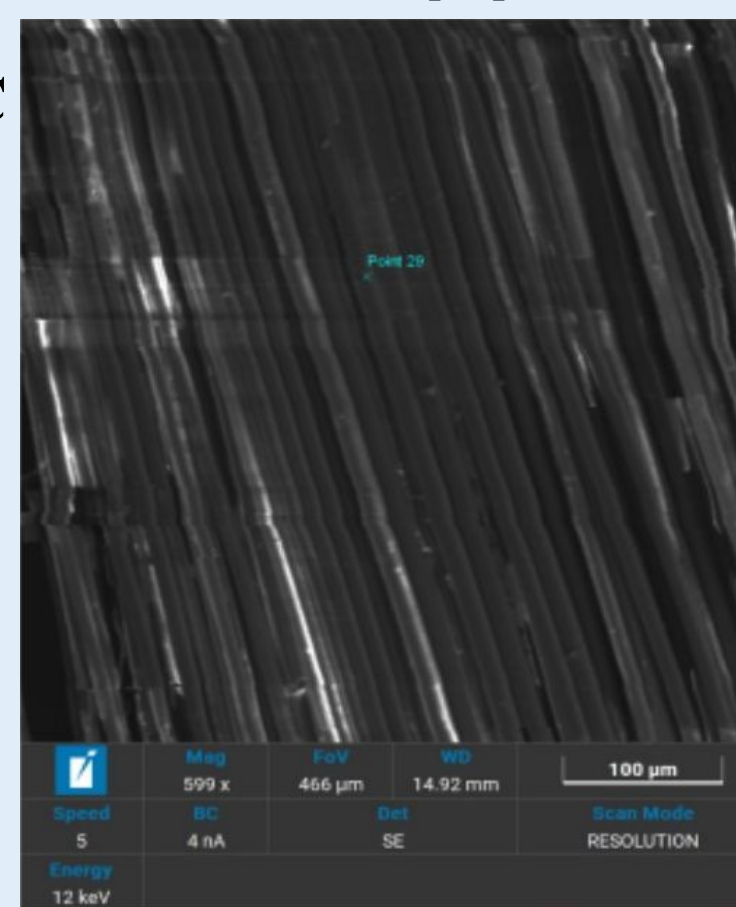


FIGURA 19 - Imagem da Fibra de Vidro com Resina a 450°C. Fonte: Autoria própria.

500°C

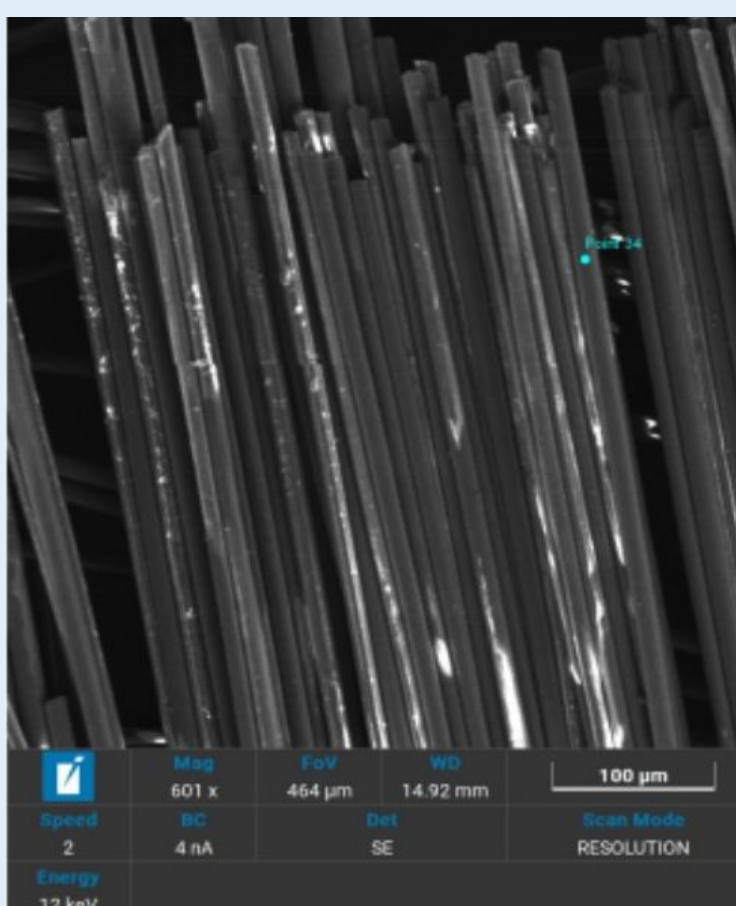
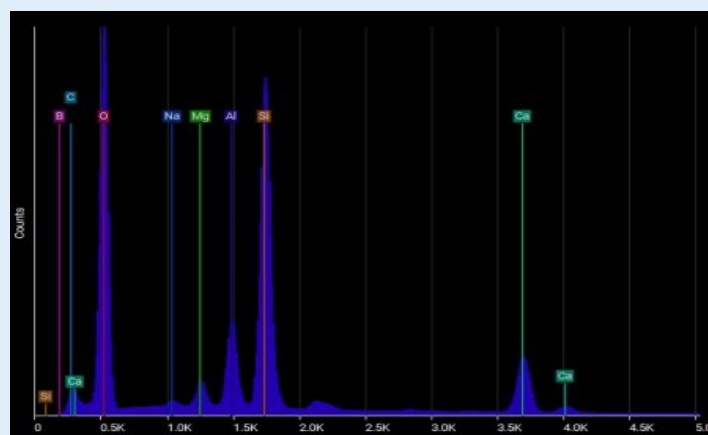
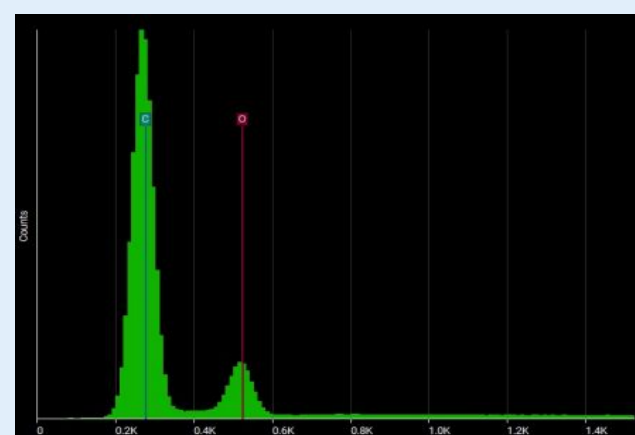


FIGURA 21 - Imagem da Fibra de Vidro com Resina a 500°C. Fonte: Autoria própria.

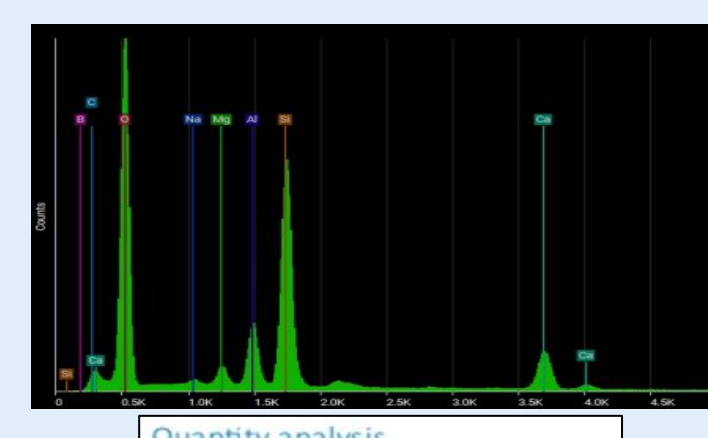


Element	Atomic %	Weight %
Aluminum	2.52	4.23
Boron	30.09	20.21
Calcium	3.87	9.64
Carbon	20.56	15.35
Magnesium	0.82	1.24
Oxygen	32.12	31.93
Silicon	9.82	17.14
Sodium	0.19	0.27

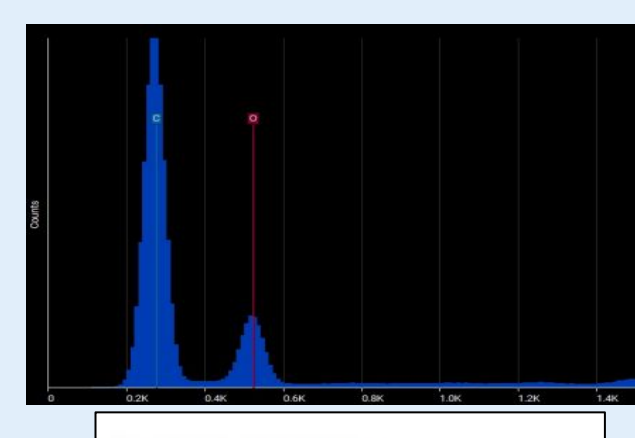


Element	Atomic %	Weight %
Carbon	87.57	84.09
Oxygen	12.43	15.91

FIGURA 16 - Composição da Fibra de Vidro com Resina a 350°C - Espectrometria de raios X. Fonte: Autoria própria.

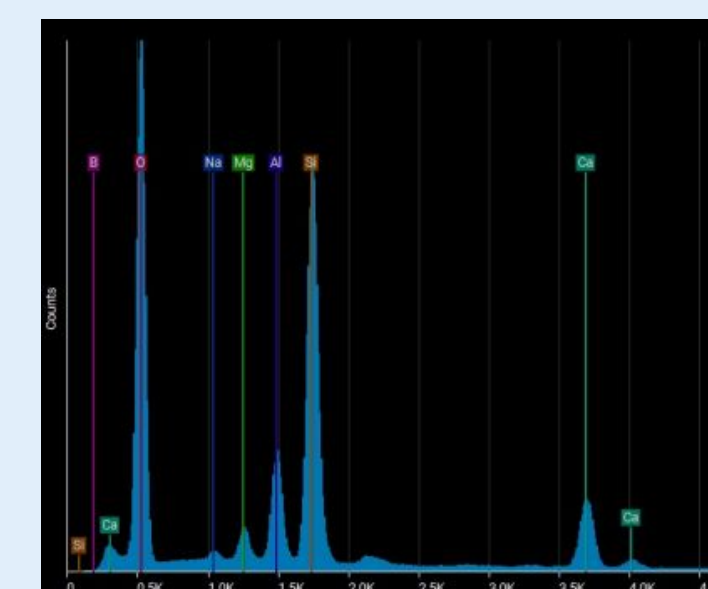


Element	Atomic %	Weight %
Aluminum	3.39	5.08
Boron	7.65	4.60
Calcium	4.83	10.76
Carbon	20.46	13.66
Magnesium	1.18	1.59
Oxygen	49.34	43.89
Silicon	12.77	19.93
Sodium	0.38	0.49



Element	Atomic %	Weight %
Carbon	84.75	80.66
Oxygen	15.25	19.34

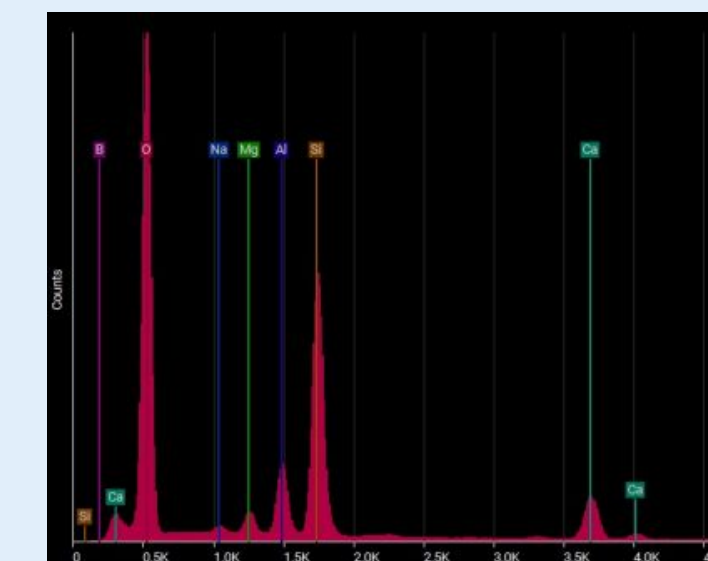
FIGURA 18 - Composição da Fibra de Vidro com Resina a 400°C - Espectrometria de raios X. Fonte: Autoria própria.



Element	Atomic %	Weight %
Aluminum	0.50	1.14
Boron	88.31	80.07
Calcium	0.75	2.53
Magnesium	0.10	0.19
Oxygen	8.16	10.95
Silicon	2.17	5.12
Sodium	0.00	0.01



FIGURA 20 - Composição da Fibra de Vidro com Resina a 450°C - Espectrometria de raios X. Fonte: Autoria própria.



Element	Atomic %	Weight %
Aluminum	0.33	0.77
Boron	89.04	82.23
Calcium	0.44	1.50
Magnesium	0.05	0.11
Oxygen	8.63	11.79
Silicon	1.50	3.60
Sodium	0.00	0.01

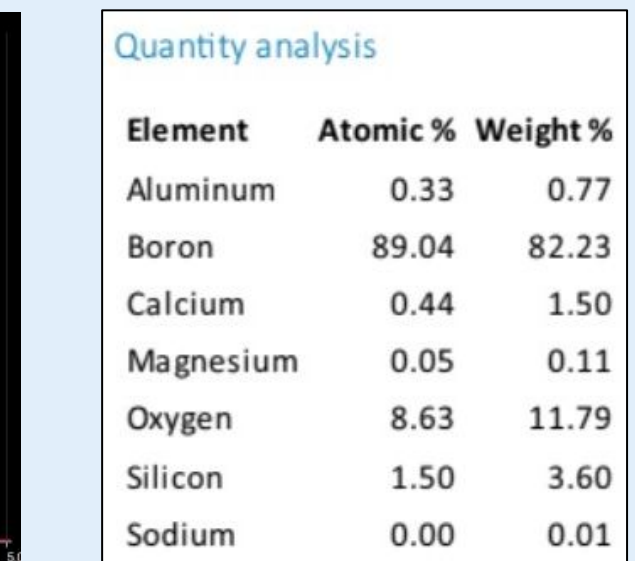


FIGURA 22 - Composição da Fibra de Vidro com Resina a 500°C - Espectrometria de raios X. Fonte: Autoria própria.

A partir da análise dos resultados obtidos e de acordo com Alves (2019) e Vanderlei (2016), quanto mais alinhadas estiverem as fibras no compósito, 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).

RESULTADOS DA DIFRATOMETRIA DE RAIOS X (DRX):

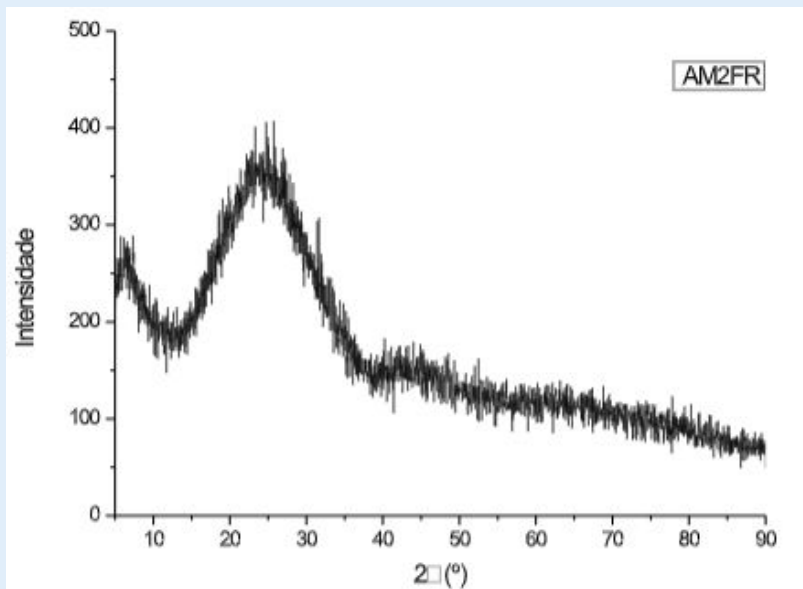


FIGURA 23 - Difratograma de raios X da amostra de fibra de vidro com resina aquecida a 350°C. Fonte: Autoria própria.

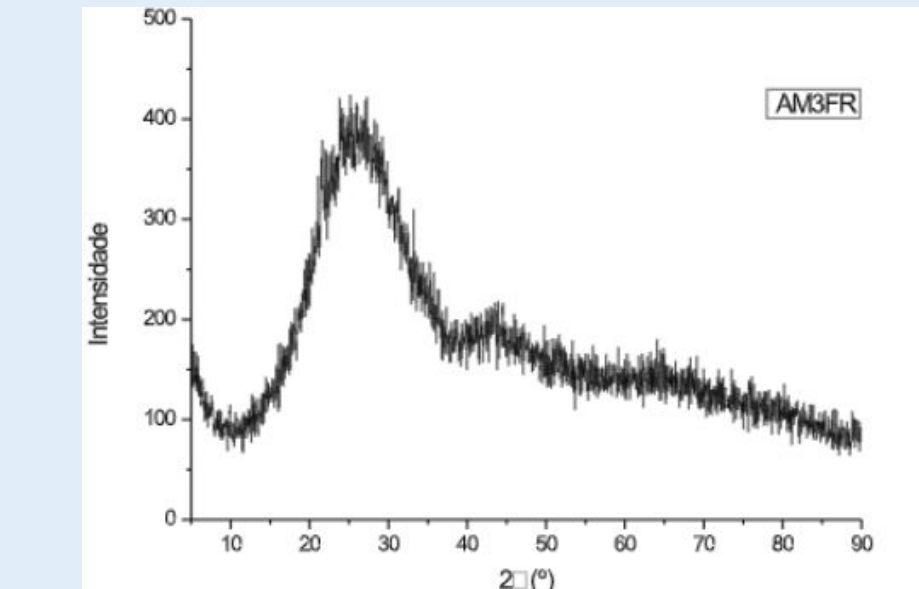


FIGURA 24 - Difratograma de raios X da amostra de fibra de vidro com resina aquecida a 400°C. Fonte: Autoria própria.

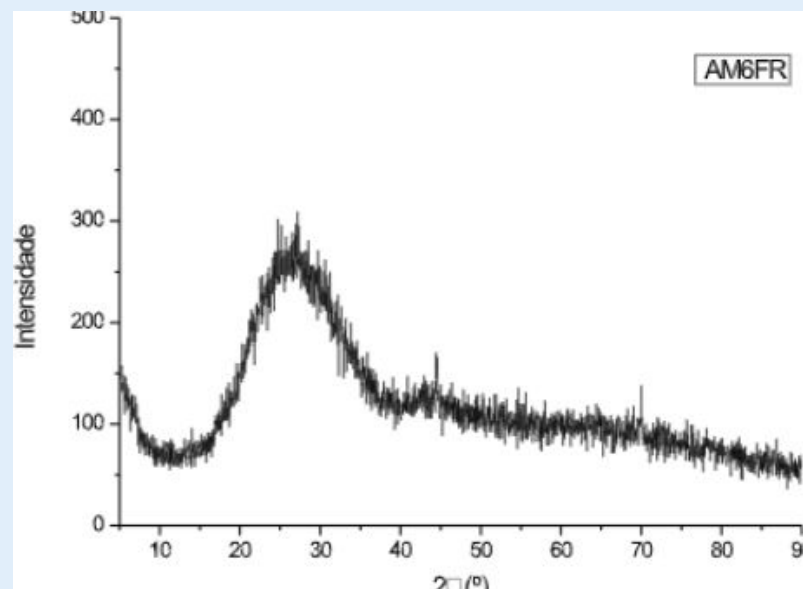


FIGURA 25 - Difratograma de raios X da amostra de fibra de vidro com resina aquecida a 450°C. Fonte: Autoria própria.

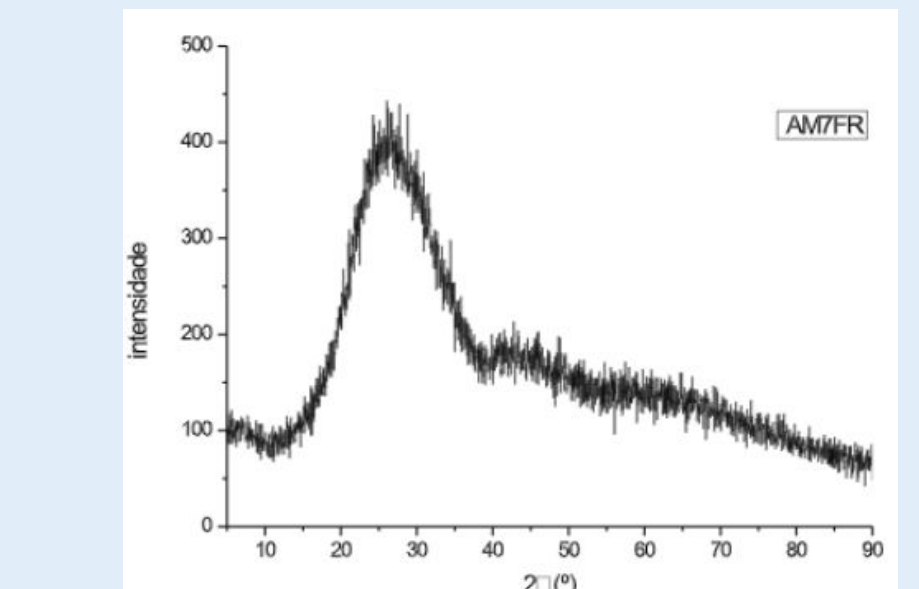


FIGURA 26 - Difratograma de raios X da amostra de fibra de vidro com resina aquecida a 500°C. Fonte: Autoria própria.

Conforme observado nas Figuras de 23 a 26, todas as amostras apresentaram curvas características de compostos amorfos, comprovados nos gráficos pela ausência de picos de difração, ou seja, não foi identificada a presença de nenhum composto cristalino, o que indica que o material é formado por compostos sem um arranjo periódico e ordenado. De acordo com os difratogramas de raios X de compósitos de matriz epóxi contendo 1 e 2% em massa de hidróxidos duplos lamelares, sem fibra de vidro, realizados por Herter (2010), a ausência de picos de difração pode sugerir uma esfoliação total, ou seja, perda do registro estrutural do empilhamento de lamelas. Com base nisso, a ausência de picos nos difratogramas das amostras de fibra de vidro (Figuras 23, 24, 25 e 26) comprova a eliminação da resina poliéster.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

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 compósito de fibra de vidro com resina deve ter o seu tamanho reduzido, o que implicaria 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 evitar que ela seja descartada no meio ambiente, contribuindo, desse modo, com a economia circular do setor energético.

REFERÊNCIAS

- ALVES, Felipe Lima. Análise da influência da orientação do ângulo de fibra na resistência à tração do compósito laminado de fibra de vidro e resina poliéster. 2019.
- ENEL GREEN POWER. Nova vida e novos materiais: o desafio da inovação e sustentabilidade do vento. Disponível em: <https://www.enelgreenpower.com/pt/midias/news/2021/03/reciclagem-turbinas-eolicas>. Acesso em: 25 mai 2024.
- FEIH, Stefanie; MOURITZ, A. P.; CASE, S. W. Determining the mechanism controlling glass fibre strength loss during thermal recycling of waste composites. Composites Part A: *Applied Science and Manufacturing*. v. 76, p. 255-261, 2015.
- HERTER, F. Desempenho de compósitos tri-componente epóxi/fibra de vidro/hidróxidos duplos lamelares. p. 35-36, jun. 2010. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/25806/000751608.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 02/06/2026
- MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/epe-publica-nota-tecnica-empresendimentos-eolicos-ao-fim-da-vida-util-situacao-atual-e-alternativas-futuras>. Acesso em: 06 ago 2024.
- SHUAIB, Norshah Aizat; MATIVENGA, Paul Tarisai. Effect of process parameters on mechanical recycling of glass fibre thermoset composites. *Procedia Cirp*. v. 48, p. 134-139, 2016.
- VANDERLEI, Rafael Marques. Confeção e caracterização mecânica de compósitos de matriz epoxídica reforçada com fibras de rami. 2016. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufpr.edu.br/jspui/bitstream/112179/2/D_LD_COEMA_2016_2_15.pdf>. Acesso em: 04/02/2025.
- VIEIRA, William Zam; LEBRÃO, Guilherme Wolf. Caracterização Dos Subprodutos Da Reciclagem De Resina Poliéster com Fibra de Vidro. 2018.