

## Resíduo de Núcleo Estrutural de Pás Eólicas: do Aterro para a Reciclagem

Juliana de Almeida Yanaguizawa Lucena<sup>1</sup>, Janaina Damares da Silva<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE) – Campus Ipojuca  
Rod. PE 60 Km 14, Califórnia, Ipojuca-PE, CEP; 55500-000

julianaalmeida@ipojuca.ifpe.edu.br, jds1@discente.ifpe.edu.br

### RESUMO

O desenvolvimento da indústria eólica é uma peça chave para renovar a infraestrutura energética mundial. Este fato é verificado pelo aumento da capacidade eólica instalada globalmente a cada ano. O setor eólico *onshore* brasileiro já é bem desenvolvido e desde 2021 o país ocupa o sexto lugar entre os maiores do mundo em capacidade eólica instalada, sendo a maioria dos parques localizados na região Nordeste. Um projeto desenvolvido no Instituto Federal de Pernambuco tem constatado que uma fábrica de *kits* eólicos da região gera 28 toneladas por mês de refugo de núcleo estrutural de pás eólicas, cujo destino são os aterros sanitários. Mesmo sendo um resíduo classe-II, o volume mensal descartado chega a 155 mil litros (17 toneladas) de espuma de polietileno tereftalato (PET) e 73 mil litros de madeira de balsa (11 toneladas). Apesar de inerte, quando depositado em aterros, o PET pode levar aproximadamente 400 anos para se decompor. Nesse sentido, este trabalho objetivou estudar a viabilidade técnica de reciclagem deste resíduo por empresas em Pernambuco (de forma a minimizar os custos logísticos), utilizando três abordagens: (i) incorporação do resíduo PET em formulação de resina poliéster por uma fabricante de tintas; (ii) reprocessamento do resíduo por recicladoras de sucata para produção de plástico extrudado; (iii) moagem do resíduo para incorporação como carga em compósitos (blocos de concreto). Embora o PET pós-consumo de garrafas de bebidas seja bem conhecido no mercado de reciclagem plástica há décadas, o PET eólico neste estudo mostrou ser um material desconhecido para as recicladoras e de difícil reprocessamento, por sua baixa densidade ( $110 \text{ kg/m}^3$ ), o que dificulta sua utilização em reatores e extrusoras. No entanto, acredita-se que o resíduo de PET eólico seja valioso o suficiente para que os esforços de P&D continuem na busca de soluções atrativas financeiramente para seu reprocessamento, afinal a eólica é uma fonte limpa e renovável de energia e necessita da sustentabilidade em toda a cadeia produtiva do setor.

### Palavras-chave:

Energia eólica; Aerogerador; Espuma de PET; Madeira de balsa; Sustentabilidade.

### ABSTRACT

Wind industry development is a key choice to renew the world's energy infrastructure. This fact is verified by the increase in global installed wind capacity each year. The Brazilian onshore wind sector is already well developed and since 2021 the country has ranked sixth in the world's top countries in installed wind capacity, with most parks located in the Northeast region. A project developed at the Federal Institute of Pernambuco has found that a wind kit factory in the region generates 28 tons per month of structural core waste for wind blades, whose destination is sanitary landfills. Even though it is a class-II production waste,

the monthly volume discarded reaches 155,000 liters (17 tons) of polyethylene terephthalate (PET) foam and 73,000 liters of balsa wood (11 tons). Although inert, when deposited in landfills, PET can take approximately 400 years to decompose. In this sense, this work aimed to study the technical feasibility of recycling this waste by companies in Pernambuco (in order to minimize logistical costs), using three approaches: (i) incorporation of PET waste in the formulation of polyester resin by a paint manufacturer; (ii) waste reprocessing by scrap recyclers to produce extruded plastic; (iii) milling the residue for incorporation as filler in composites (concrete blocks). Although post-consumer PET from beverage bottles has been well known in the plastic recycling market for decades, wind PET in this study proved to be an unknown material for recyclers and difficult to reprocess, due to its low density ( $110 \text{ kg/m}^3$ ), which hinders its use in reactors and extruders. However, it is believed that wind PET residue is valuable enough for R&D efforts to continue in the search for financially attractive solutions for its reprocessing, after all wind is a clean and renewable source of energy and requires sustainability in the entire productive chain in the sector.

**Keywords:**

Wind energy; Wind turbine; PET foam; Balsa wood; Sustainability.

**1. INTRODUÇÃO**

As energias renováveis para geração de eletricidade são os pilares fundamentais da transição energética para reduzir as emissões de carbono e o aquecimento global, que já vem provocando fenômenos climáticos importantes em todo o mundo [1-3].

A energia eólica é atualmente a segunda fonte de geração de eletricidade do Brasil, com mais de 13% de participação na matriz elétrica do país. São mais de 26 GW de capacidade eólica instalada (superior à capacidade da Usina Hidroelétrica de Itaipu) e a expectativa é que até o ano de 2029 ultrapasse 50 GW [4]. A energia eólica abastece cerca de 109 milhões de brasileiros e, em alguns períodos do ano, consegue suprir toda a demanda de eletricidade da região Nordeste, com sobra, durante um dia inteiro [5]. De fato, são mais de 916 usinas presentes em 12 estados do país, colocando o Brasil em 6º lugar no ranking mundial da geração eólica desde o ano de 2021 [4].

Uma turbina eólica comercial é um equipamento complexo que integra milhares de dispositivos e componentes para gerar energia a partir do vento. No estado de Pernambuco importantes fabricantes de componentes de aerogeradores estão concentrados no Complexo Industrial e Portuário de Suape, atendendo as demandas dos parques eólicos atuais e em construção principalmente na Bahia, Rio Grande do Norte e Ceará.

A madeira de balsa e a espuma de polietileno tereftalato (PET) são os materiais de núcleo estrutural mais utilizados como enchimento de pás de turbinas eólicas, por serem leves e com boa resistência mecânica.

Um projeto de extensão tecnológica desenvolvido no Instituto Federal de Pernambuco (Mulheres na Eólica) constatou que uma fábrica de kits eólicos localizada no Complexo Industrial e Portuário de Suape gera 28 toneladas por mês de resíduos de núcleo estrutural de pás eólicas, cujo destino são os aterros sanitários (resíduo classe II). São gerados 17 t/mês de resíduo de espuma de PET e 11 t/mês de madeira de balsa (Figura 1). Isso corresponde a um volume de 155 mil litros de espuma de PET e 73 mil litros de madeira de balsa.

A balsa, como toda madeira, é por definição um polímero natural. É encontrada em abundância na Floresta Amazônica, sendo o Equador o principal fornecedor para o setor eólico mundial. É um material leve ( $150 \text{ kg/m}^3$ ) e de boa resistência mecânica. Em alternativa ao descarte em aterros, a empresa em estudo busca doar este resíduo para cimenteiras, que utilizam a madeira de balsa como combustível para queima em seus fornos. Porém, estas cimenteiras estão localizadas no interior de Pernambuco ou na Paraíba, tornando altos os custos logísticos (frete) arcados pela geradora e, por este motivo, nem sempre a doação do resíduo de balsa é uma opção viável economicamente.

Figura 1. Resíduo de núcleo estrutural de pás eólicas gerados em uma fábrica de kits eólicos em Pernambuco: (a) Madeira de balsa (11 t/mês). (b) Espuma de polietileno tereftalato (PET) (17 t/mês).



Fonte: As autoras (2023).

A espuma de PET é um polímero sintético e termoplástico (que se funde com o calor), bem conhecido pela sua utilização em garrafas de bebidas. Não somente é reciclável, como também é o plástico mais reciclado em todo o mundo [6], porém de difícil biodegradação e por isso sua disposição final em aterros sanitários torna-se um problema.

De fato, os plásticos se tornaram uma ameaça ao meio ambiente devido à falta de tecnologias de reciclagem que poderiam, em vez do descarte em aterros, permitir a produção de resinas de alta qualidade a partir de sucata a um custo igual ou menor em comparação com a produção do polímero virgem a partir do petróleo bruto [7].

Sendo assim, este trabalho objetivou estudar a viabilidade técnica de reciclagem do resíduo de espuma de PET de uma fábrica de kits eólicos em Pernambuco, como alternativa ao seu descarte em aterro sanitário.

Três abordagens foram utilizadas no estudo do PET: (i) incorporação do resíduo em formulação de resina poliéster por uma fabricante de tintas; (ii) reprocessamento do resíduo por recicladoras de sucata

para produção de plástico extrudado; (iii) moagem do resíduo para incorporação como carga em compósitos. A intenção é que a reciclagem ocorra em Pernambuco de forma a minimizar os custos logísticos de transporte do material.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As pás de turbinas eólicas são fabricadas em uma variedade de formas e designs. Turbinas comerciais de grande porte normalmente têm uma configuração padrão de três pás em um eixo horizontal e usam grandes pás anguladas para capturar o vento, atingindo uma boa relação entre desempenho operacional, peso da estrutura e custos (de fabricação, instalação e operação).

Em termos de evolução tecnológica, o aumento do tamanho dos aerogeradores nos últimos anos desempenha um papel importante na maior geração de energia. De 2010 até os dias atuais, houve um crescimento considerável no tamanho das máquinas, superando a marca de 14 MW de potência nominal e 220 m de diâmetro de rotor para projetos offshore.

Em trabalhos anteriores [8, 9] foi apresentado que o formato da pá eólica é aerodinâmico e seu material rígido, leve e forte, com vida útil de 20 anos e resistente à fadiga de longo prazo em condições ambientais adversas.

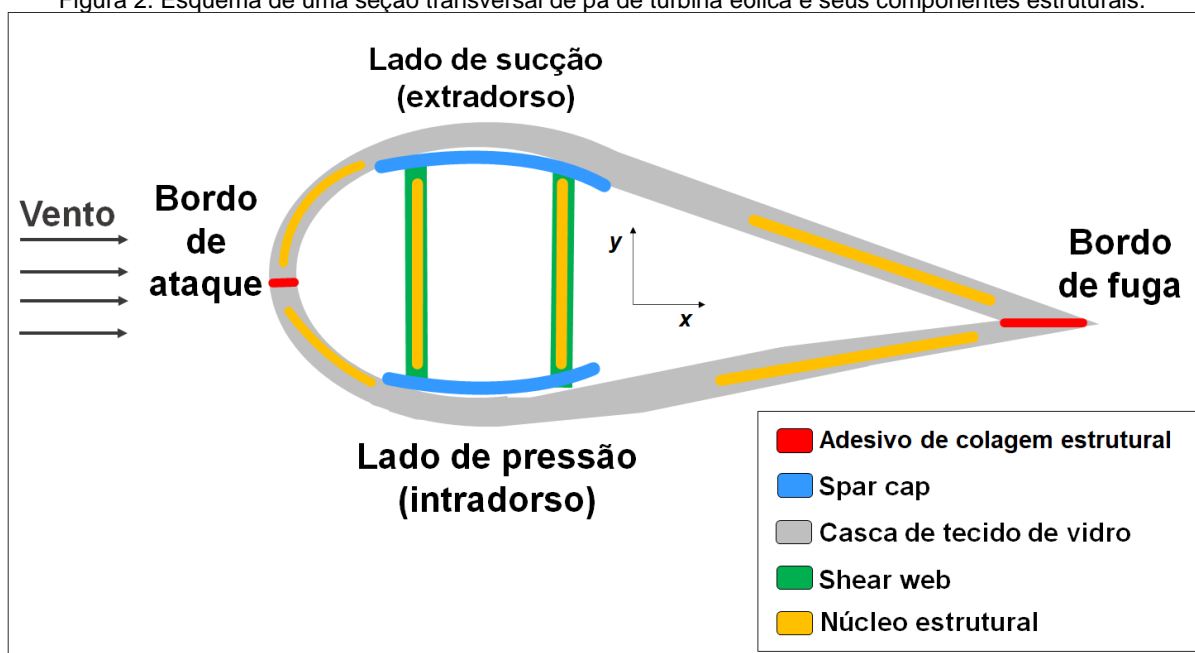
Por esta razão, pás eólicas de grande porte são feitas de material compósito – uma combinação macroscópica de materiais poliméricos e cerâmicos, possuindo uma interface reconhecível, que juntos fornecem um produto superior a qualquer um deles isolados. Desde a década de 1960, o compósito polimérico é um material avançado de engenharia amplamente utilizado em diversas aplicações de alto desempenho, como aeroespacial, civil, automobilística, naval e eólica, devido às suas excelentes propriedades mecânicas e químicas, substituindo materiais convencionais, como o aço.

### 2.1 Fabricação de pás de turbinas eólicas

A produção de pás eólicas é um sistema complexo de fabricação por projetos, possuindo muitos processos manuais que dificultam a padronização e o controle de qualidade. Armazenagem e cadeia de suprimentos também são alguns desafios na gestão da produção devido às grandes dimensões das pás exigidas nos projetos atuais. Compósitos de matriz polimérica (principalmente resina à base de epóxi ou poliéster), reforçados com fibras de vidro ou carbono, são geralmente usados para fabricar as pás [8, 9].

Placas de madeira de balsa ou de polímeros sintéticos, como cloreto de polivinila (PVC), poliuretano (PU) e, mais comumente, polietileno tereftalato (PET), são colocadas como núcleo estrutural (material de enchimento) nas cascas das pás eólicas. Esses materiais de núcleo são combinados ao tecido de vidro, à resina polimérica e aos componentes estruturais da pá (como *spar cap* e *shear webs*) em um molde aberto que definirá o formato final da pá, por um processo chamado de infusão a vácuo (Figura 2). Este processo utiliza pressão (vácuo) para conduzir a resina nos materiais secos colocados no molde devidamente preparado com agente desmoldante (cera) [8, 9].

Figura 2. Esquema de uma seção transversal de pá de turbina eólica e seus componentes estruturais.



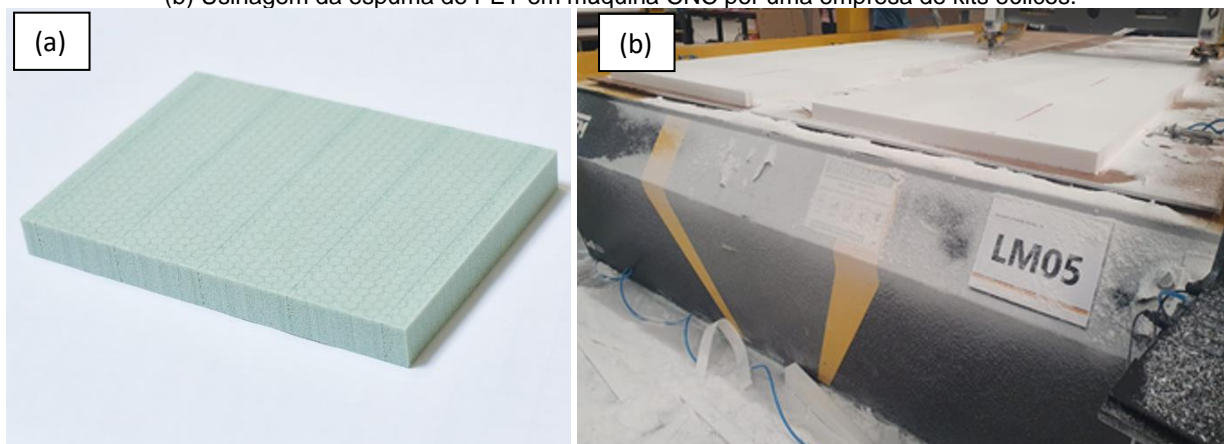
Fonte: Adaptado de [9].

## 2.2 Núcleo estrutural de PET usado em pás de turbinas eólicas

Conforme mencionado anteriormente, os núcleos estruturais de PET são combinados a outros materiais, como fibra de vidro e resinas termorrígidas, no processo de infusão a vácuo para a produção das pás eólicas. Assim, o laminado final (compósito) formado possui elevada resistência mecânica e ao mesmo tempo leveza, características necessárias para as pás de turbinas eólicas atuais (acima de 7 MW de potência nominal), que facilmente ultrapassam os 75 m de comprimento e pesam de 15t a 20t cada.

O núcleo estrutural de PET processado pela empresa de kits eólicos em estudo (Figura 3) é adquirido de dois fornecedores internacionais [10, 11] na densidade de 100 kg/m<sup>3</sup>. Um deles, inclusive, utiliza uma tecnologia patenteada de processo para a produção de espumas a partir de garrafas de bebidas PET pós-consumo (plástico PET 100% reciclado, r-PET).

Figura 3. (a) Espuma de polietileno tereftalato (PET) usada como núcleo estrutural em pás eólicas. (b) Usinagem da espuma de PET em máquina CNC por uma empresa de kits eólicos.



Fonte: (a) Adaptado de [10]. (b) As autoras (2023).

A Tabela 1 apresenta as principais propriedades físicas e mecânicas da espuma de PET, onde pode-se observar que o PET apresenta características interessantes, como: fácil processamento com todos os tipos de processos de laminação e resinas eólicas, temperatura de processamento de até 150°C, excelente resistência a fadiga, alta estabilidade química, estabilidade térmica a longo prazo, sem absorção de água, reciclado e reciclável.

Tabela 1. Principais propriedades físicas e mecânicas de espuma de PET (polietileno tereftalato) empregada como núcleo estrutural de pás de turbinas eólicas.

Característica	Tipo de espuma de PET	
	ARMAPET STRUCT GR 100	AIREX T92.100
Fornecedor	Armacell	Airex
Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	100	100
Resistência à compressão [MPa]	1,50	1,75
Módulo de compressão [MPa]	160	90
Módulo de cisalhamento [MPa]	21	23
Módulo de Young [MPa]	120	110
Tensão de tração [MPa]	2,5	2,3
Condutividade térmica a 23° C [W/(m.K)]	0,034	0,034

Fonte: Adaptado de [10, 11].

A baixa densidade dos núcleos de PET deve-se à estrutura de células fechadas resultante da injeção de um gás inerte no processamento do material plástico.

### 2.3 Reciclagem de núcleo estrutural de PET de pás eólicas

O PET é um material versátil com a capacidade de ser feito a partir de seu estado de polímero por meio de reciclagem mecânica e até mesmo de volta ao seu monômero original por meio de reciclagem avançada [6]. A escala de uso do PET permite pesquisas contínuas e aplicações em reciclagem aprimorada. Publicações sobre novos usos de PET descartado e a capacidade de limpá-lo e convertê-lo em muitas formas, incluindo materiais alternativos, estão se expandindo na tentativa de completar o uso circular ou melhorar o fim da vida útil desse material.

O PET em forma de *flake* oriundo de embalagens de garrafas pós consumo já vem sendo reciclado pela indústria de tintas imobiliárias para formulação em resinas poliéster. Vários trabalhos na literatura [12-19] relatam a obtenção de tintas à base de PET oriundo de matéria-prima virgem e recipientes de PET recuperados.

Um estudo [20] apontou a viabilidade de reciclagem de espumas de PET da indústria eólica apenas como material de reforço estrutural na construção civil (na forma de aglomerados).

A decomposição química do PET (reciclagem terciária) se fundamenta na reversibilidade da reação de polimerização e pode ser feita por diversos processos, sendo a glicólise o mais simples e mais antigo método de despolimerização do PET. A glicólise é a degradação do PET na presença de um solvente (glicol), sendo mais comuns o monoetilenoglicol (MEG), dietilenoglicol (DEG) e propilenoglicol (PG) [21].

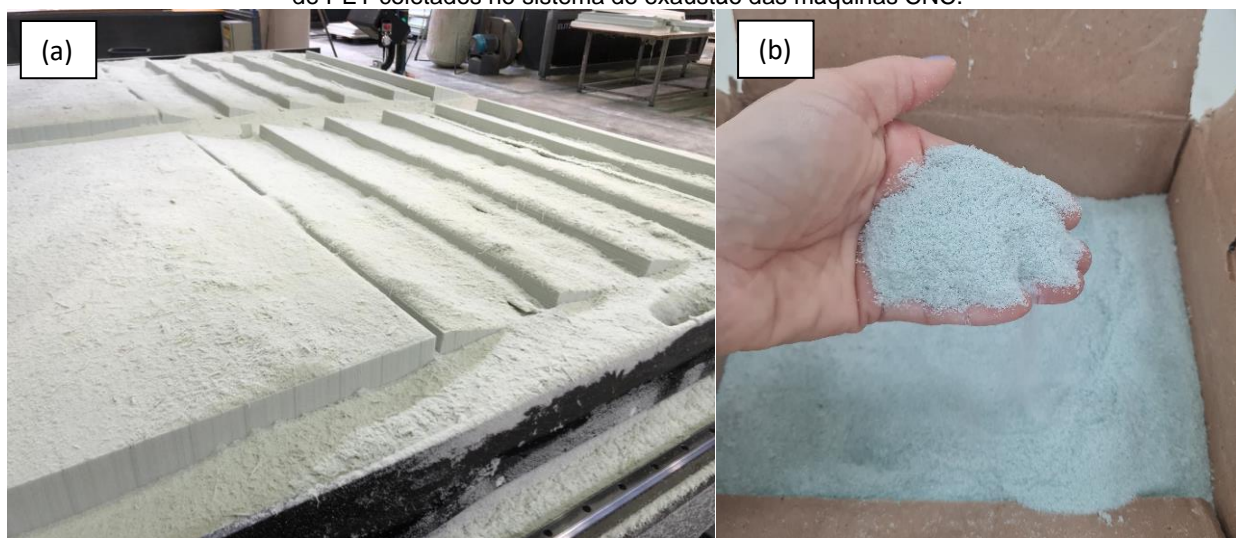
Nesse contexto, acredita-se que o resíduo de espumas de PET, uma sucata plástica da indústria eólica, possua alto potencial de reciclabilidade devido a sua alta viscosidade intrínseca e temperatura de fusão aceitável (260°C) para reprocessamento por moldagem térmica (por exemplo extrusão).

### 3. MÉTODO DO ESTUDO

O resíduo de espuma de PET foi disponibilizado por uma fabricante de kits eólicos em Suape-PE, que adquire madeira de balsa e espuma de PET em forma de placas e realiza diversas operações de usinagem em máquinas CNC (conforme foi mostrado na Figura 3.b), como cortes, furos, chanfros e sulcos, de modo a montar kits desses materiais usinados em tamanhos e quantidades segundo especificações técnicas do projeto da pá eólica de seu único cliente, também localizado em Suape.

O resíduo de PET foi coletado nas caçambas de descarte de material (em forma de placas) e também do sistema de exaustão das máquinas de usinagem CNC (em forma de pó) e entregue às três empresas que se disponibilizaram a fazer testes iniciais com o material (Figura 4).

Figura 4. (a) Retalhos de espuma de PET gerados após usinagem das placas em máquina CNC. (b) Pó da espuma de PET coletados no sistema de exaustão das máquinas CNC.



Fonte: As autoras (2023).

Para o estudo de incorporação do resíduo de PET em tintas poliéster, foram realizados testes de compatibilidade química da espuma com propilenoglicol no laboratório de química da empresa Tintas Iquine, em Pernambuco. O processo foi conduzido a 240 rpm e programado para elevação de temperatura até 230°C. Foram utilizados 1000g do reagente e 100g de resíduo de PET em pó branco (fabricante Ayrex).

Devido ao alto volume da amostra, os 400g restantes seriam adicionados mediante fundimento e abaixamento do volume inicial.

Em paralelo, 20 kg de resíduo de espuma de PET eólico foram entregues a duas empresas da Região Metropolitana do Recife (RMR) para: (i) decomposição do material e posterior produção de plástico extrudado na empresa Pernambuco PET; (ii) moagem do resíduo para incorporação como carga em concreto pela empresa Ecológica. Foram realizados ensaios de compressão em corpos de prova cilíndricos (diâmetro 50 mm e altura 100 mm), 7 dias de cura após a moldagem, carga aplicada de 25MPa, conforme norma NBR 5739/18.

## 4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1 Testes de incorporação do resíduo de PET eólico em tinta poliéster

No teste conduzido na Tintas Iquine para verificar a compatibilidade da espuma de PET com propilenoglicol (principal componente nas resinas poliésteres), não houve fundimento e nem interação entre os materiais (Figura 5). O processo foi estável, operado a 240 rpm e programado para elevação de temperatura até 230°C. Em 187,4°C houve estabilização da temperatura, sem aquecer mais, considerado então um resultado divergente em relação ao uso de *flakes* de PET de garrafas pós-consumo, onde a interação se dá de maneira satisfatória.

Figura 5. (a) Teste de compatibilidade química de resíduo de espuma de PET eólico em propilenoglicol. (b) Mistura após 24h, processo finalizado devido a não interação entre os materiais.



Fonte: Cortesia Tintas Iquine (2023).

Resultado semelhante foi obtido com os testes de compatibilidade química conduzidos no IFPE Campus Ipojuca, utilizando monoetilenoglicol e metanol, isto é, o material não foi solubilizado pelos reagentes.



Com esse resultado, a empresa de tintas descartou a possibilidade de utilizar o resíduo de PET eólico em suas formulações de resina poliéster.

#### 4.2 Reciclagem por extrusão do resíduo de PET eólico

O teste de fusão da amostra em pó de resíduo de PET eólico conduzido na mufla do IFPE *Campus Ipojuca* fundiu o material a 260°C, conforme esperado para o PET, comprovando se tratar de um polímero termoplástico. Isso demonstra a possibilidade de reciclagem térmica do resíduo em máquinas extrusoras. De fato, o PET tem um grande potencial de reciclagem se comparado aos outros plásticos mais difundidos, podendo ser tratado das mais diversas formas [7].

O teste inicial conduzido no laboratório da empresa Pernambuco PET foi o de densidade, o parâmetro inicial de análise utilizado para verificar a adequabilidade do material nos reatores e extrusoras. A densidade da amostra foi determinada em 0,11 kg/L, considerada muito baixa densidade, o que implicaria em um tempo de residência no reator duas vezes maior do que o tempo gasto para o PET pós-consumo de garrafas que a empresa já reprocessa. Foi apontado pela recicladora que para a reciclagem do PET eólico ser economicamente viável, sua densidade deveria ser de 0,2 a 0,8 kg/L. Como as embalagens de garrafas PET tem uma disponibilidade maior no mercado de reciclagem do que o PET eólico, as linhas de produção são programadas para operar exclusivamente a resina de garrafas pós-consumo e por isso não é interessante para a empresa ajustar os parâmetros do processo para o PET eólico.

#### 4.3 Reciclagem do PET eólico para incorporação como carga em concreto

Com relação à empresa Ecológica que também recebeu amostras do material, a mesma destinou a uma fábrica de blocos de concreto na tentativa de incorporar o PET eólico em formulação para construção civil. Os resultados do ensaio de compressão realizado em corpos de prova cilíndricos (Figura 6) mostram perda de 27% de resistência mecânica quando adicionado o PET eólico como carga de reforço. Os valores de resistência à compressão foram de 22,8 MPa para blocos 100% concreto e de 16,6 MPa para blocos de concreto com PET eólico.

Figura 6. Resultado do ensaio de compressão em blocos de concreto pré-moldados.

Série: 9	fck: 25,0 MPa	Amostragem: Cliente							
Referência: Chapim Fibra - Iso Pré-Moldados - 03									
Idade	Resistência (MPa)	Repres.	Obs.	Moldagem	Ruptura	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Prep.	Prensa
7 D	16,6	(R)		05/07/2023	12/07/2023 *	50,0	100,0	Retifica	Classe 1
Série: 10	fck: 25,0 MPa	Amostragem: Cliente							
Referência: Chapim Sem Fibra - Iso Pré-Moldados - 04									
Idade	Resistência (MPa)	Repres.	Obs.	Moldagem	Ruptura	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Prep.	Prensa
7 D	22,8	(R)		05/07/2023	12/07/2023 *	50,0	100,0	Retifica	Classe 1

Fonte: Cortesia TECOMAT / Ecológica (2023).

Diversos estudos sobre a substituição de agregados minerais convencionais em concreto de cimento Portland estão sendo realizados atualmente [22], entre eles a utilização de resíduos de PET pós-consumo como uma alternativa viável para dar uma destinação mais nobre aos mesmos, agregando valor e reduzindo impactos ambientais para a obtenção de concretos com propriedades otimizadas para uma aplicação específica. No entanto, a trabalhabilidade de concretos de cimento Portland é alterada quando se substitui os agregados convencionais por resíduos de PET (maiores teores de substituição provocam maiores perdas de abatimento). Além disso, o PET apresenta baixa resistência a álcalis. Entretanto, não se detectou qualquer problema durante a utilização das fibras em concretos normais.

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Embora a eólica seja uma fonte limpa e renovável de energia, é necessário que toda a cadeia produtiva do setor seja sustentável. Isso significa que a indústria de pás eólicas precisa destinar o refugo de seus processos de fabricação de forma a minimizar os impactos ambientais de uma possível poluição causada pelas matérias primas de origem fóssil, como é o caso dos núcleos estruturais de PET das pás.

Mesmo sendo um resíduo classe II, vale lembrar que este estudo identificou um volume mensal de 155 mil litros de espuma de PET descartados na natureza por apenas uma empresa fornecedora de kits para pás eólicas no Brasil.

Apesar da resina PET de garrafas pós-consumo ser um material bem conhecido no mercado de reciclagem plástica há muitos anos, o PET eólico mostrou neste estudo ser um material desconhecido e de difícil reprocessamento para as empresas que se disponibilizaram a reutilizá-lo, por sua baixa densidade, o que dificulta sua utilização em reatores e extrusoras. Também não se conseguiu até o momento resultado promissor na incorporação do PET eólico em resinas poliéster e em blocos de concreto. No entanto, espera-se que o PET eólico seja valioso o suficiente para que os esforços de P&D continuem na busca de soluções atrativas financeiramente para seu reprocessamento.

E pensando nas dezenas de turbinas eólicas que estão chegando ao final de sua vida útil em parques no Brasil, pela sua história de mais de 20 anos de energia eólica no país, este trabalho traz uma contribuição para o estudo da reciclagem de pás que brevemente estarão sendo descomissionadas. Seguirão para os cemitérios de turbinas eólicas? Ou haverá uma legislação, a exemplo da Europa, que obrigue os proprietários dos parques a reciclar seus componentes?

Se os próximos resultados desta investigação apontarem para uma viabilidade técnica e comercial para incorporação do resíduo de PET como carga de reforço em compósitos da construção civil, como argamassas e cimentos, este será o caminho promissor para que o resíduo de núcleo estrutural de pás eólicas seja reciclado em alternativa ao caminho atual dos aterros sanitários.

## REFERÊNCIAS

[1] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Renewables 2021: analysis and forecast to 2026**. 2021. Disponível em: <<https://iea.blob.core.windows.net/assets/5ae32253-7409-4f9a-a91d-1493ffb9777a/Renewables2021-Analysisandforecastto2026.pdf>>. Acesso em: 25 jun. 2023.

- [2] GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (GWEC). **Capturing Green Recovery Opportunities from Wind Power in Developing Economies**. 2022. Disponível em: <<https://gwec.net/embracing-a-green-recovery-from-the-covid-19-pandemic-could-add-2-2-million-energy-jobs-in-key-developing-economies-report-finds/>>. Acesso em: 18 mar. 2023.
- [3] GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (GWEC). **Global Wind Report 2023**. 2023. Disponível em: <<https://gwec.net/globalwindreport2023/>>. Acesso em: 01 jun. 2023.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA E NOVAS TECNOLOGIAS (ABEEólica). **Infovento nº 31**. Jun 2023. Disponível em: <<https://abeeolica.org.br/energia-eolica/dados-abeeolica/>>. Acesso em: 25 jun. 2023.
- [5] AGÊNCIA BRASIL. **Geração instantânea de energia eólica no Nordeste tem novo recorde**. Brasília, 2022. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2022-07/geracao-instantanea-de-energia-eolica-no-nordeste-tem-novo-recorde>>. Acesso em: 26 jun. 2023.
- [6] SARDA, P.; HANAN, J.C.; LAWRENCE, J. G.; ALLAHKARAMI, M. Sustainability performance of polyethylene terephthalate, clarifying challenges and opportunities. **Journal of Polymer Science**, v. 60, 2022, pp.7-31. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/pol.20210495>>. Acesso em: 28 jun. 2023.
- [7] BRIVIO, L.; TOLLINI, F. PET recycling: Review of the current available technologies and industrial perspectives. **Advances in Chemical Engineering**, v. 60, 2022, pp. 215-267. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/bs.ache.2022.09.003>>. Acesso em: 26 jun. 2023.
- [8] LUCENA, J.A.Y.; LUCENA, K.A.A. Wind energy in Brazil: an overview and perspectives under the triple bottom line, **Clean Energy**, v. 3, n. 2, 2019, p. 69-84. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/ce/zkz001>>. Acesso em: 29 jun. 2023.
- [9] LUCENA, J.A.Y. Recent advances and technology trends of wind turbines. In: **Recent Advances in Renewable Energy Technologies**, Academic Press, 2021, p. 177-210, ISBN 9780323910934. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91093-4.00009-3>>. Acesso em: 29 jun. 2023.
- [10] ARMACELL. **ArmaPET Sctruct GR**. Technical data. 2021. Disponível em: <[www.armacell-core-foams.com](http://www.armacell-core-foams.com)>. Acesso em: 25 mar. 2023.
- [11] 3ACOMPOSITES. **Airex T92**. Core materials. Data sheet. 2022. Disponível em: <<https://www.3acorematerials.com/>>. Acesso em: 25 mar. 2023.
- [12] TSUBUKU, Y. **Powder coating prepared from PET resin-products as raw material and process for the preparation thereof**. United States Patent, 2004. Disponível em: <<https://patentimages.storage.googleapis.com/5c/10/3e/3470cd90140438/EP0990684B1.pdf>>. Acesso em: 24 jun. 2023.
- [13] CORSO, D.; BIRRIEL, E. J.; ZATTERA, A. J.; SCIENZA, L. C. **Efeito da adição de PET pós-consumo em uma tinta em pó comercial base poliéster**. Congresso Brasileiro de Polímeros, 10, 2009. Disponível em: <<https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbpol/2009/PDF/626.pdf>>. Acesso em: 11 mar. 2023.
- [14] RUECKER, C. G. et al. **Síntese de resinas alquílicas com reciclagem química de PET pós-consumo in situ**. Congresso Brasileiro de Polímeros, 8, 2009. Disponível em: <<https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbpol/2005/PDF/530.pdf>>. Acesso em 04 fev. 2023.
- [15] ALVES, N.S.M. et al. **Estudo do teor de PET pós-consumo na síntese de resinas alquílicas**. Congresso Brasileiro de Polímeros, 9, 2010. Disponível em: <<https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbpol/2007/PDF/393.pdf>>. Acesso em: 04 fev. 2023.
- [16] FERRARINI, F.; SCIENZA, L.C.; PIAZZA, D.; OLIVEIRA, G.R.; ZATTERA, A.J.; PAGNUSATI, J.C.; NEUWALD, O.A. **Reuso de PET pós-consumo em uma tinta em pó base poliéster**. Congresso Brasileiro de Polímeros, 12, 2013. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/319244472\\_Reuso\\_de\\_PET\\_pos-consumo\\_em\\_uma\\_tinta\\_em\\_po\\_base\\_poliester](https://www.researchgate.net/publication/319244472_Reuso_de_PET_pos-consumo_em_uma_tinta_em_po_base_poliester)>. Acesso em: 25 jun. 2023.

- [17] NEUWALD, O. A.; PAGNUSATI, J. C.; PIAZZA, D.; ZATERRA, A. J.; SCIENZA, L. C. **Efeito da adição de PET pós-consumo em tintas comerciais.** In: INTERCORR, 4, 2014. Disponível em: <[https://abraco.org.br/src/uploads/intercorr/2014/INTERCORR2014\\_031.pdf](https://abraco.org.br/src/uploads/intercorr/2014/INTERCORR2014_031.pdf)>. Acesso em: 23 jun. 2023.
- [18] RODRIGUES, K. S. **Reciclagem de PETpc na incorporação da formulação de uma tinta em pó.** Dissertação (Engenharia de Processos) – Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ucs.br/handle/11338/1394>>. Acesso em: 22 jun. 2023.
- [19] ROMÃO, W.; SPINACÉ, M. A. S.; PAOLI, M. A. Poli (tereftalato de etileno), PET: uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismos de degradação e sua reciclagem. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 19, n. 2, p. 121-132, 2009. Disponível em: <<https://www.revistapolimeros.org.br/journal/polimeros/article/doi/10.1590/S0104-14282009000200009>>. Acesso em: 22 fev. 2023.
- [20] DIGNÉ, J. **Defining requirements of PET scrap for open loop recycling of post-industrial waste.** Lund University. Department of Chemical Engineering, 2020.
- [21] SOUZA, L.; TORRES, M.C.M.; RUVOLLO FILHO, A. C. Despolimerização do poli (tereftalato de etileno) - PET: efeitos de tensoativos e excesso de solução alcalina. **Polímeros**, v. 18, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0104-14282008000400013>>. Acesso em: 28 jun. 2023.
- [22] MODRO, N.L.R.; MODRO, N.R.; OLIVEIRA, A.P.N. Avaliação de concreto de cimento Portland contendo resíduos de PET. **Matéria**, v. 14, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1517-70762009000100007>>. Acesso em: 30 jun. 2023.