

Artigo

Recuperação e caracterização de fibra de vidro proveniente de pás de aerogeradores enquanto material de reforço de Polipropileno

German Vela, João Laranjeira, Mónica Oliveira, Sandra Sorte, Carlos Relvas, Nelson Martins
TEMA - Centro de Tecnologia Mecânica e Automação, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago

Resumo

As pás de aerogeradores em fim de vida têm-se tornado num problema com um impacto significativo ao nível da gestão de resíduos, sendo crucial encontrar uma solução para as toneladas de pás eólicas que se acumulam à espera de um destino adequado quer do ponto de vista económico quer do ponto de vista ambiental. Embora existam algumas aplicações bem-sucedidas de materiais compósitos recuperados, a reciclagem destes materiais no final do ciclo de vida é uma tarefa difícil, que resulta numa oportunidade de desenvolvimento de metodologias mais eficientes para a recuperação destes materiais. Neste estudo pretendeu-se abordar a reciclagem mecânica, seguida da incorporação das fibras recicladas numa matriz polimérica de polipropileno, produzindo um novo material compósito, tendo sido avaliadas experimentalmente as suas propriedades térmicas e mecânicas.

O estudo realizado mostrou que os materiais recuperados de aerogerador em fim de vida podem ser reciclados com sucesso através da sua incorporação como material de reforço de materiais compósitos de matriz polimérica. A análise realizada por calorimetria diferencial de varrimento indicou que a adição de fibras de vidro recicladas (rFV), dependendo da concentração de rFV e da dimensão das fibras utilizadas pode resultar num aumento significativo do grau de cristalinidade (40,8%) quando comparado com o PP virgem, permitindo melhorar as propriedades mecânicas do compósito. A análise mecânica revelou uma melhoria global da rigidez e ductilidade dos compósitos produzidos, tendo sido conseguidos módulos de elasticidade 225% superiores ao do polipropileno virgem. Apesar do estudo se revelar promissor é necessário mais investigação no sentido de melhorar procedimentos experimentais, aumentar repetibilidade e fiabilidade dos resultados e estender os limites de aplicabilidade inicialmente preconizados.

1 - Introdução

Atualmente assiste-se a um crescente desmantelamento de parques eólicos. As pás de aerogeradores em fim de vida têm-se tornado num problema crescente com a inovação tecnológica [1], sendo crucial encontrar uma solução para as toneladas de pás eólicas que se acumulam. Além das elevadas dimensões das pás eólicas, os materiais que as constituem são diversos, a sua complexidade é elevada, pois não são fáceis desagregar, reciclar e reutilizar [1]. Muitas pás de aerogeradores são constituídas por polímeros reforçados com fibra de vidro (60-70%), sendo o restante volume composto por resinas e adesivos, bem como por materiais variados tais como, balsa, aço, cobre e alumínio [2].

A União Europeia definiu como meta política obter 40% da sua energia gerada a partir de energias renováveis até 2030 [1]. Espera-se que, no período de 2022-2026, sejam instalados cerca de 18 GW, que equivale a mais de 8300 aerogeradores [3], o que pressupõe aproximadamente 176 kton de resíduos gerados pelo fim de vida e substituição dos aerogeradores mais antigos [4]. Segundo a WindEurope foram solicitadas medidas que proibem a utilização de aterros sanitários para a deposição final das pás eólicas desativadas em toda a Europa até 2025, o que obriga a indústria a reutilizar, reciclar, ou recuperar 100% do material desativado [5].

Existem diversos métodos de reciclagem para os compósitos poliméricos utilizados no fabrico das pás eólicas, nomeadamente reciclagem mecânica, química e térmica. É importante esclarecer que estes processos de reciclagem têm uma influência negativa nas propriedades do material, onde a perda de resistência mecânica nas fibras que pode variar entre os 30% e 60%, diminuindo, consideravelmente, o comprimento das fibras recuperadas [6].

Embora existam muitas aplicações bem-sucedidas de materiais compósitos recuperados, como por exemplo os produtos desenvolvidos pela Miljoscarm [7], a Rivierasca SpA [8] e da Global Fiberglass [9], a reciclagem no final do ciclo de vida é uma tarefa desafiante, o que cria uma oportunidade no desenvolvimento de metodologias mais eficientes para a recuperação destes materiais.

Neste estudo pretendeu-se abordar a reciclagem mecânica, uma vez que esta apresenta um baixo custo de processamento, facilidade de implementação, menor custo energético, maior simplicidade de operação e pode ser utilizada em grande escala [10]. No processo de reciclagem mecânica os compósitos são triturados ou moídos em diferentes tamanhos de partículas, o que permite que sejam usados como enchimento ou reforço em novos materiais compósitos ou como matéria-prima para uso secundário.

São sobejamente conhecidas as vantagens do Polipropileno (PP) reforçado com Fibra de Vidro (FV) no setor da construção enquanto polímero técnico. Estes materiais têm sido especialmente estudados para aplicações que requerem alta rigidez e resistência mecânica, inclusive a temperaturas elevadas. A ligação química entre o PP e a FV garante alta resistência ao impacto e maior resistência à tração. Por vezes, dependendo do tamanho, orientação da fibra e do tipo de processamento utilizado, consegue-se, mesmo, resistência higroscópica [11].

O presente estudo, surge com o intuito de atenuar o impacto do excesso de resíduos mundiais de fibra de vidro resultantes do desmantelamento dos aerogeradores, visa, pois, introduzir o material reciclado dos aerogeradores numa matriz de polipropileno, produzindo, por recurso à técnica de processamento por fusão, um novo material compósito, aqui designado de PPrFV. Urge, no entanto, investigar as propriedades deste novo material, estabelecendo o seu potencial bem como os seus limites de aplicabilidade.

2 - Materiais e Métodos

2.1 - CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL RECICLADO DAS PÁS DE AEROGERADORES

O material de reforço de fibra de vidro utilizado no estudo foi obtido a partir da moagem do resíduo de aerogeradores em diferentes granulometrias e incorporado numa matriz de polipropileno virgem. Devido às dimensões iniciais da secção de pá do aerogerador fornecida esta foi pré-cortada em pedaços menores para facilitar a sua posterior trituração. Na Figura 1 apresentam-se as diferentes etapas de corte antes de ser triturada.



Figura 1. Resíduo de pás eólicas desativas: a) resíduo inteiro, b) resíduo em forma de tiras e c) resíduo fragmentado em pedaços

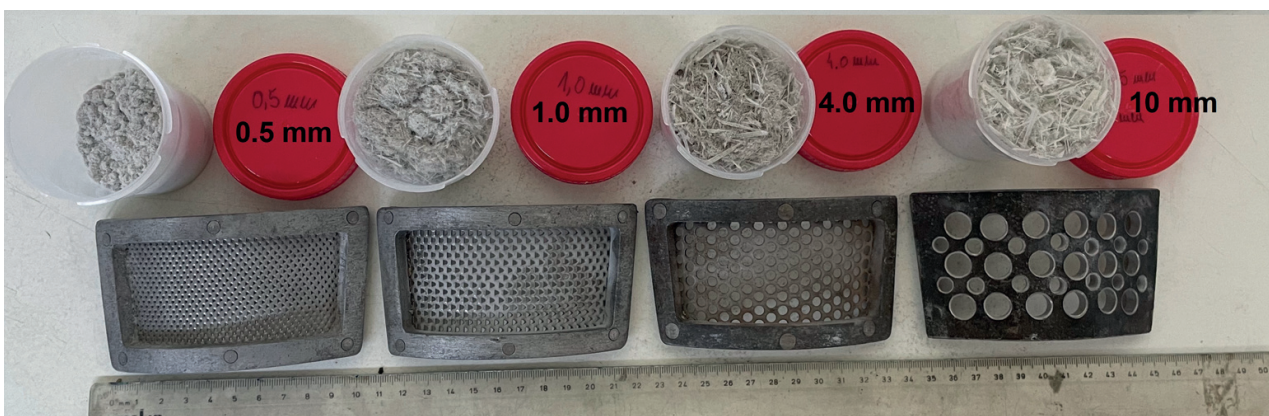


Figura 2. Dimensões dos crivos e do rFV entre 0,5 mm (esquerda) e 10 mm (direita)

Apresenta-se na Figura 1 (a) o resíduo do aerogerador, na Figura 1 (b), material recebido sob a forma de tiras, sendo, de seguida, fragmentado em pedaços de 50 x 50 mm ou inferiores (Figura 1 (C)). Para a trituração foi utilizado um moinho de lâminas (Retsch SM 100), com os crivos de 0,5, 1, 4, 10 mm, conforme se apresenta na Figura 2.

Para observar a morfologia das amostras de rFV nas diferentes granulometrias (0,5, 1, 4, 10 mm) foi utilizado um Microscópio Eletrónico de Varrimento (*Scanning Electron Microscope - SEM*) (*Hitachi, modelo SU-70*), podendo os resultados ser observados na Figura 3.

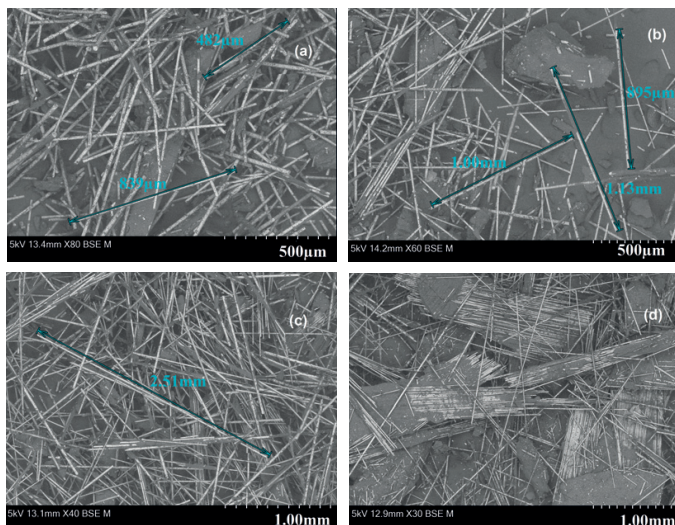


Figura 3. Imagens de SEM do rFV nas granulometrias: a) 0,5 mm, b) 1 mm, c) 4 mm e d) 10 mm

As imagens revelam que a rFV contém tanto fibras soltas como fibras agregadas por resíduos de resina. Pode-se ainda observar na Figura 3 que na maior granulometria (10 mm), a quantidade de feixes de fibras é maior comparativamente com as granulometrias inferiores a 4 mm. Conforme apresentado na Figura 3 (a), para a menor granulometria, existe uma menor quantidade de resíduos da resina na superfície da fibra, parecendo resultar do facto da fibra arrastar uma maior quantidade de resina durante a trituração, quando forçada a passar no crivo de menor dimensão (0,5 mm).

A composição química das amostras de rFV foi determinada por recurso a espectroscopia de energia dispersiva (*Energy Dispersive Spectroscopy* - EDS) (Bruker, modelo QUANTAX 400) sendo, assim, possível obter informações qualitativas e quantitativas da composição da amostra. Analisaram-se as amostras quanto à presença de elementos como C, O, Si, N, Al e S. Os resultados dos elementos químicos presentes nas amostras são apresentados na Tabela 1.

Os resultados da Tabela 1 mostram a percentagem de massa para cada elemento detetado nos testes EDS. Para a amostra de rFV de 1 mm, foi registado um teor de carbono mais elevado, consistente com a maior quantidade de resíduos de resina, lembrando que a resina tem carbono como constituinte. Além disso, foi encontrada uma maior concentração de Si na amostra de 4 mm, o que sugere uma maior quantidade de fibras de vidro presente na amostra. Foram encontrados alguns vestígios de alumínio, podendo ser uma consequência do processo de moagem, uma vez que o bloco do moinho é feito neste material.

Tabela 1. Composição química da rFV

Massa Normalizada da fibra [%]			
Elementos	0,5 mm	1 mm	4 mm
C	55,8	63,5	52,5
O	32,5	27,5	31,9
Si	8,6	6,6	11,3
N	3,1	2,4	2,2
Al	-	-	2,0
S	-	-	0,2

2.2 - CARACTERIZAÇÃO DO POLIPROPILENO UTILIZADO COMO MATRIZ

No presente caso de estudo foi usada uma matriz de PP, um copolímero de impacto da marca LyondellBasell da referência Moplen EP448T. É um copolímero heterofásico nucleado com aditivação anti estática utilizado em aplicações de moldação por injeção. Trata-se, pois, de uma poliolefina, com um índice de fluidez (*Melt flow Index* - MFI) alto (48g/10min), ou seja, uma viscosidade baixa e, à partida, um bom candidato para aditivação por recurso a fibras [12]. A Tabela 2 apresenta um sumário das propriedades mais relevantes deste material [13].

Tabela 2. Propriedades do PP[14]

Propriedades	Valor Nominal	Unidades
Reológicas		
Índice de Fluidez (MFI), (230 °C/2,16 kg)	48	g/10 min
Mecânicas		
Módulo de elasticidade	1250	MPa
Tensão de cedência	27	MPa
Deformação na rutura	>50	%
Deformação na cedência	5	%
Impacto		
Força de Impacto Charpy – com entalhe		
(23 °C, Tipo 1, Longitudinal, Entalhe A)	5	kJ/m ²
(0 °C, Tipo 1, Longitudinal, Entalhe A)	3,5	kJ/m ²
(-20 °C, Tipo 1, Longitudinal, Entalhe A)	2,5	kJ/m ²
Térmicas		
Temperatura de fusão, (A50)	151	°C
Temperatura de Distorção sob Calor B, (0,45 MPa)	90	°C

2.3 - DESENHO DE EXPERIÊNCIAS

A fim de avaliar as propriedades mecânicas e térmicas do PPrFV foram preparados os provetes. Na Tabela 3 são apresentadas as configurações estabelecidas para a composição dos materiais utilizados no âmbito do trabalho experimental. Em cada teste experimental realizaram-se 5 réplicas, obtendo-se um total de 85 provetes.

Tabela 3. Concentração de rFV (% mássica) por granulometria (0,5 a 10 mm) para cada PPrFV

Provetes	Concentração de rFV (% mássica)			
	1	5	10	30
PP-Virgem	-	-	-	-
PP-rFV 0,5 mm	X	X	X	X
PP-rFV 1 mm	X	X	X	X
PP-rFV 4 mm	X	X	X	X
PP-rFV 10 mm	X	X	X	X

2.4 - PREPARAÇÃO E REALIZAÇÃO DOS PROVETES DE ENSAIO

A preparação dos provetes de PPrFV começou com a pesagem do material de rFV nas diferentes granulometrias, para ser introduzido na matriz de PP, nas suas diferentes percentagens em massa tal como referido na Tabela 3. Posteriormente, procedeu-se à mistura por fusão, com condições de mistura otimizadas, a uma temperatura de 200 °C, velocidade de 120 rpm,

durante 3 minutos. Para o efeito recorreu-se à misturadora Plastograph EC D-47055 (Brabender, USA).

Os provetes foram produzidos de acordo com a norma ISO 527-2 e obtidos por moldação por injeção numa Haake MiniJet II, Thermo Scientific, (Massachusetts, USA). A temperatura do cilindro da injetora foi ajustada a 210 °C, com uma temperatura do molde de 40 °C, pressão de injeção de 350 bar por 3 segundos, pressão de compactação de 300 bar durante 15 segundos.

3 - Análise de resultados

3.1 - CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA

Ao integrar rFV na matriz de PP é expectável que as propriedades termomecânicas dos compósitos sofram alterações relativamente às da matriz. Deste modo, urge proceder a uma caracterização completa no que concerne as suas principais propriedades térmicas e mecânicas.

No sentido de avaliar as principais transições térmicas do compósito, bem como a sua estabilidade térmica procedeu-se a análise por calorimetria, recorrendo-se ao Calorímetro Diferencial de Varimento, Discovery 250, (TA Instruments, New Castle, Delaware, USA). As análises foram conduzidas de acordo com a norma ASTM D3418-03/D3895-14. A amostra, com massa inferior a 10 mg, foi sujeita a um ciclo de aquecimento desde a temperatura de 20 a 250 °C, a uma taxa de aquecimento de 10 °C.min⁻¹, seguida de um ciclo de arrefecimento, até à temperatura ambiente, à mesma velocidade. Cada amostra foi exposta a dois ciclos de aquecimen-

to/arrefecimento, tendo o primeiro ciclo o objetivo de apagar o histórico térmico do material. Deste modo, apenas se analisam e consideram os dados recolhidos durante o segundo ciclo.

Apresentam-se os resultados no que concerne temperatura de cristalização (T_c) e de fusão (T_f), assim como dos respetivos calores latentes de cristalização (ΔH_c) e de fusão (ΔH_f). Calcula-se o grau de cristalinidade (x_c), de acordo com a Equação 1 [15], onde ΔH₀ = 207 J/g para o PP^{100%} cristalino [16], em função da concentração do reforço, rFV% mássica.

$$x_c = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_c - \left(1 - \frac{rFV\%mássica}{100}\right)} \times 100\% \quad \text{Equação 1}$$

Os termogramas permitem verificar que não se registam quaisquer alterações relevantes no comportamento térmico do material, nem durante o aquecimento, nem durante o arrefecimento, sendo possível identificar as mesmas transições de fase típicas de um polímero semicristalino, tanto no PP virgem, como na totalidade dos PP rFV testados. No entanto, há a registar pequenas alterações no valor da T_c em todos os compósitos testados (quase sempre variações pontuais inferiores a 2%). Deve, contudo, referir-se o acréscimo mais notório registado em todas as concentrações nas granulometrias superiores testadas, 4 e 10 mm (ver Tabela 4), consistente com uma melhor adesão da fibra à matriz polimérica e atuando, esta, como agente de nucleação [17].

No que à T_f diz respeito pode dizer-se que a introdução de reforço implica sempre uma redução ligeira nesta transição de fase, sendo a mesma superior nos compósitos aditivados com partículas de menor

Building Information Modeling



BIM

imperialum

Biblioteca BIM IMPERALUM no apoio técnico aos projetistas

*Representação tridimensional e parametrizada,
de produtos e soluções de:*

- impermeabilização com tecnologia **APP avance**
- Isolamento térmico e acústico
- Drenagens geotêxteis

APP somos nós




✕ Mistura betuminosa potenciada para altas temperaturas


✓


✕


✓


✕


✓

Membranas APP avance

- elevada plasticidade
- aderência ao suporte
- elevada robustez
- sem deformações
- alta durabilidade

**POLYPLAS
POLYSTER
POLYXIS**



granulometria e consistente, neste caso em particular, com o aumento da concentração em massa, dentro dessa categoria. Essa tendência parece ser consistente com o maior teor de carbono existente nessas amostras como previamente identificado, de algum modo associado à presença de maior resíduo de resina. No entanto, os valores observados, relativamente à referência, não ultrapassaram os 3%, não constituindo, portanto, tendência notória ou relevante por forma a postular diferenças significativas no que concerne alterações ao desempenho mecânico do material.

A cristalinidade dos polímeros é um fator estrutural muito importante pois está diretamente relacionado com diversas propriedades, entre elas as mecânicas.

Da análise dos resultados obtidos, durante esta campanha experimental, tornou-se evidente que, para todas as granulometrias testadas, a variação do grau de cristalinidade, face ao valor de referência do PP virgem de 39%, só tem algum significado para as concentrações mássicas superiores testadas (PPrFV30%). Para essas concentrações, o grau de cristalinidade varia para a granulometria de 0,5 mm - 22%; 1 mm - 17%; 4 mm - 17% e 10 mm - 17%, sendo essa variação sempre inferior a 5% nos restantes casos. Tais resultados parecem ser consistentes com as variações de T_c acima já mencionadas, indicando alguma falta de nucleação homogênea nas concentrações superiores que, devido à mistura por processamento por fusão seguida de moldação por injeção para obter as amostras, pode ser indicativo de alguma degradação térmica. Seria, portanto, interessante, em estudos futuros proceder a análise termogravimétrica no sentido de descartar esta suposição, aferindo possíveis alterações às temperaturas de degradação térmica.

De seguida analisar-se-ão as propriedades mecânicas dos PPrFV produzidos.

Tabela 4. Sumário das transições de fase relevantes obtidas por calorimetria para os diferentes PPrFV testados

Granulometrias	Amostras	T_c (°C)	T_f (°C)	ΔH_c (J/g)	ΔH_f (J/g)	x_c (%)
0,5 mm	PP virgem	121,8	164,2	80,48	74,07	38,88
	PP-rFV 1%	119,3	159,8	84,11	74,80	40,63
	PP-rFV 5%	121,9	160,7	78,53	70,82	37,94
	PP-rFV 10%	126,0	162,8	80,76	77,00	39,01
	PP-rFV 30%	122,4	161,7	63,13	52,04	30,50
1 mm	PP-rFV 1%	119,6	159,4	83,47	76,67	40,32
	PP-rFV 5%	122,9	162,2	78,04	70,98	37,70
	PP-rFV 10%	123,2	162,7	80,86	74,74	39,06
	PP-rFV 30%	124,7	161,9	67,17	58,83	32,45
4 mm	PP-rFV 1%	120,0	159,3	84,48	76,13	40,81
	PP-rFV 5%	123,2	161,9	84,67	78,10	40,90
	PP-rFV 10%	123,7	163,5	79,43	72,72	38,37
	PP-rFV 30%	123,0	163,0	66,54	57,89	32,14
10 mm	PP-rFV 1%	122,1	161,6	86,00	80,38	41,54
	PP-rFV 5%	124,1	163,0	83,38	75,80	40,28
	PP-rFV 10%	122,9	162,8	78,77	70,75	38,05
	PP-rFV 30%	123,5	163,1	66,85	56,02	32,29

3.2 - CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

Os provetes obtidos por injeção foram submetidos a testes na máquina de ensaios mecânicos Shimadzu AGS-X-10kN. O teste foi realizado de acordo com a norma ISO 527-1, em duas fases. A primeira, a uma velocidade de 1 mm/min, por forma a permitir a determinação do módulo de elasticidade do material e, numa segunda fase, por recurso à velocidade de 50 mm/min até à rutura, de modo a permitir determi-

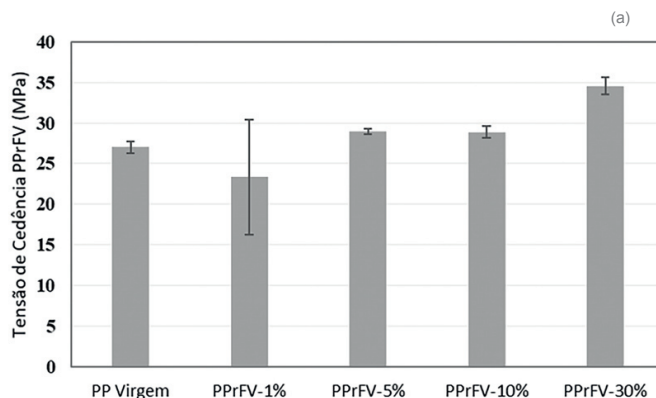
nar parâmetros como: tensão de cedência (σ_y), tensão de rutura (σ_u) e deformação na rutura (ϵ_b).

Os resultados obtidos para todos os PPrFV testados encontram-se sumarizados na Tabela 5. Pela análise de resultados, pode dizer-se que a introdução dos aditivos do tipo rFV promovem a rigidez do material, sendo esse efeito mais notório nas maiores granulometrias e para as percentagens superiores de aditivação. O valor máximo de Módulo de Elasticidade regista-se para o PPrFV30% - 10 mm, representando um acréscimo de 225% relativamente à referência (PP virgem). No que concerne a tensão de cedência, regista-se um ligeiro decréscimo relativamente à referência, nas granulometrias e concentrações mais baixas, consistente com o observado na análise térmica, está-se em crer, devido à cisão das cadeias moleculares na fase amorfa e redução das suas interligações com as regiões cristalinas, provavelmente, promovida pela presença da resina [18].

A introdução de rFV promove a ductilidade do material, em todas as granulometrias e para todas as concentrações testadas. A resistência mecânica aumenta 101% no PPrFV30%-10 mm, denotando o estudo como promissor (ver Figura 4). É, contudo, necessário, afinar procedimentos experimentais, no sentido, de diminuir os erros, essencialmente associados ao processo de mistura e processamento dos compósitos, não só para aumentar a fiabilidade e repetibilidade do estudo, como para estender os seus limites de aplicabilidade.

Tabela 5. Propriedades mecânicas dos PPrFVs analisados

Granulometria	Amostras	E (MPa)	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	ϵ_b
0,5 mm	PP virgem	898,9 (± 289)	27,1 ($\pm 0,74$)	17,20 ($\pm 0,92$)	395,70 (± 296)
	PP-rFV 1%	999,7 (± 134)	23,2 ($\pm 0,04$)	23,21 ($\pm 0,04$)	13,30 ($\pm 0,94$)
	PP-rFV 5%	1092,3 (± 288)	23,5 ($\pm 2,59$)	23,54 ($\pm 2,59$)	3,21 ($\pm 0,84$)
	PP-rFV 10%	1316,5 (± 437)	26,2 ($\pm 0,41$)	26,16 ($\pm 0,41$)	3,13 ($\pm 0,18$)
	PP-rFV 30%	1425,4 (± 336)	28,3 ($\pm 0,78$)	28,34 ($\pm 0,78$)	6,56 ($\pm 5,99$)
1 mm	PP-rFV 1%	1029,2 (± 175)	23,6 ($\pm 2,14$)	23,58 ($\pm 2,14$)	3,85 ($\pm 1,12$)
	PP-rFV 5%	1241,4 (± 220)	24,9 ($\pm 1,43$)	24,96 ($\pm 1,43$)	2,45 ($\pm 0,51$)
	PP-rFV 10%	1414,9 (± 436)	28,7 ($\pm 0,42$)	28,67 ($\pm 0,42$)	2,40 ($\pm 0,34$)
	PP-rFV 30%	2163,9 (± 757)	30,9 ($\pm 2,70$)	30,99 ($\pm 2,70$)	1,49 ($\pm 0,34$)
4 mm	PP-rFV 1%	1147,4 (± 75)	24,7 ($\pm 1,66$)	24,71 ($\pm 1,67$)	4,21 ($\pm 0,73$)
	PP-rFV 5%	1336,1 (± 305)	27,6 ($\pm 0,43$)	27,60 ($\pm 0,43$)	3,09 ($\pm 0,19$)
	PP-rFV 10%	1462,9 (± 360)	28,8 ($\pm 1,07$)	28,79 ($\pm 1,07$)	2,53 ($\pm 0,31$)
10 mm	PP-rFV 30%	1995,7 (± 375)	33,5 ($\pm 0,88$)	33,49 ($\pm 0,88$)	1,52 ($\pm 0,14$)
	PP-rFV 1%	1032,2 (± 179)	23,3 ($\pm 7,11$)	25,88 ($\pm 0,68$)	6,48 ($\pm 2,31$)
	PP-rFV 5%	1231,3 (± 326)	28,9 ($\pm 0,29$)	28,75 ($\pm 0,20$)	3,89 ($\pm 0,10$)
	PP-rFV 10%	1502,2 (± 278)	28,9 ($\pm 0,69$)	28,42 ($\pm 0,33$)	2,93 ($\pm 0,59$)
	PP-rFV 30%	2924,3 (± 855)	34,6 ($\pm 1,03$)	34,51 ($\pm 1,01$)	1,37 ($\pm 0,17$)



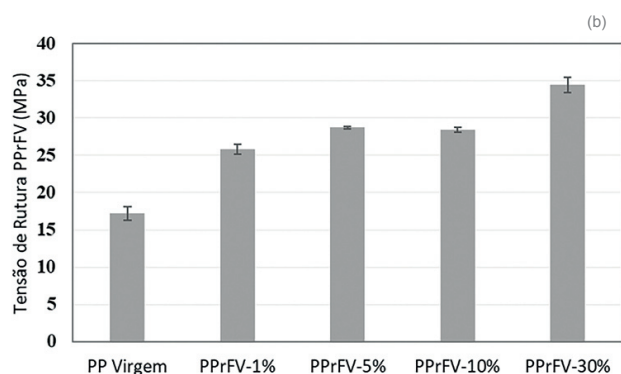


Figura 4. Propriedades mecânicas dos PPrFV para a granulometria de 10 mm, com os rFV entre 1 e 30% (base mássica): a) tensão de cedência e b) tensão de ruptura

4 - Conclusões

O estudo realizado mostrou que os materiais recuperados de pás de aerogerador em fim de vida podem ser reciclados com sucesso atra-

vés da sua incorporação como material de reforço de materiais compósitos de matriz polimérica. A análise realizada por calorimetria diferencial de varrimento indicou que a adição de rFV pode permitir obter um efeito de nucleação mais destacado nos compósitos de PPrFV, resultando num aumento do grau de cristalinidade significativo (40,8%) em relação ao PP virgem, permitindo melhorar as propriedades mecânicas do compósito. No entanto, este valor decresce com concentrações de rFV superiores de 10% e granulometrias acima de 4 mm, denotando alguma preocupação e necessidade de maior investigação no que à estabilidade térmica dos compósitos diz respeito, nessas condições em particular.

A análise mecânica levada a efeito revela uma melhoria global da rigidez e ductilidade dos compósitos produzidos, com valores de módulo de elasticidade com acréscimos de 225% e resistência mecânica de 101%. Há, contudo, alguma preocupação no que concerne a quantificação efetiva da fragilidade induzida em algumas condições de teste, especificamente devido a possível degradação térmica. Apesar do estudo se revelar promissor, carece, contudo, de mais investigação, no sentido de melhorar procedimentos experimentais, aumentar repetibilidade e fiabilidade dos resultados e, eventualmente, estender os limites de aplicabilidade inicialmente preconizados.

Bibliografia

- [1] P. G. Leahy, "End-of-life Options for Composite Material Wind Turbine Blades: Recover, Repurpose or Reuse?," 14th SWE-DES Conf., no. October, pp. 1–9, 2019, [Online]. Available: https://static1.squarespace.com/static/5b324c409772ae52fecb6698/t/5dab2848c20b461ef175cdcb/1571498056954/Leahy_SDEWES_Paper2019_v2.pdf.
- [2] A. Cooperman, A. Eberle, and E. Lantz, "Wind turbine blade material in the United States: Quantities, costs, and end-of-life options," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 168, no. November 2020, pp. 1–10, 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105439.
- [3] C. Europeia, "2030 climate & energy framework," Climate Action, 2021. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2030-climate-energy-framework_pt.
- [4] R. Barnes, "Adding Perspective to the Wind Turbine Waste Debate," Medium, 2020. <https://medium.com/climate-conscious/wind-turbine-end-of-life-waste-perspective-a561913-dcbd9>.
- [5] Wind Europe, "How to build a circular economy for wind turbine blades through policy and partnerships," pp. 1–13, 2020, [Online]. Available: <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/policy/position-papers/WindEurope-position-paper-how-to-build-a-circular-economy.pdf>.
- [6] R. Fonte and G. Xydis, "Wind turbine blade recycling: An evaluation of the European market potential for recycled composite materials," *J. Environ. Manage.*, vol. 287, no. October 2020, p. 112269, 2021, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112269.
- [7] Miljoskarm, "Noise barriers reduce traffic noise," 2022. <https://miljoskarm.dk/en/products/#barriers> (accessed Oct. 11, 2022).
- [8] Euronews, "A reciclagem dos materiais compósitos na UE," Futuris, 2019. <https://pt.euronews.com/next/2019/03/11/a-reci-clagem-dos-materiais-compositos-na-ue> (accessed Aug. 08, 2022).
- [9] G. F. Solutions, "ECOPOLY MATERIALS," 2020. <https://www.globalfiberglassinc.com/aboutus>.
- [10] J. Chen, J. Wang, and A. Ni, "Recycling and reuse of composite materials for wind turbine blades: An overview," *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 38, no. 12, pp. 567–577, 2019, doi: 10.1177/0731684419833470.
- [11] P. Zhou et al., "Durability study on the interlaminar shear behavior of glass-fibre reinforced polypropylene (GFRPP) bars for marine applications," *Constr. Build. Mater.*, vol. 349, no. July, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128694.
- [12] Z. L. Yan et al., "Composites : Part B Reinforcement of polypropylene with hemp fibres," *Compos. Part B*, vol. 46, pp. 221–226, 2013, doi: 10.1016/j.compositesb.2012.09.027.
- [13] C. A. Harper and E. M. Petrie, *Plastics materials and processes: a concise encyclopedia*. John Wiley & Sons, 2003.
- [14] I. Copolymer, "Moplen EP448T," pp. 3–5, 2022.
- [15] T. A. Instruments, "Thermal analysis application brief determination of polymer crystallinity by DSC," Number TA-123.
- [16] R. L. Blaine, "Thermal applications note," *Polym. Heats Fusion*, 2002.
- [17] Equistar-Lyndell/Company, "Additives: Nucleating and Clarifying Agents As," Tech.topic, pp. 3–5, 2018.
- [18] K. Wang et al., "Constitutive modeling of the tensile behavior of recycled polypropylene-based composites," *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 15, pp. 1–14, 2019, doi: 10.3390/ma1215-2419.