

**Resíduos sólidos industriais: compósito com resíduos de plástico reforçado com fibra de vidro**

**Industrial solid waste: Composite with glass fiber reinforced plastic waste**

**Residuos sólidos industriales: compuesto con residuos de plástico reforzado con fibra de vidrio**

Recebido: 29/07/2020 | Revisado: 11/08/2020 | Aceito: 25/08/2020 | Publicado: 29/08/2020

**Neemias Silva de Souza**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9389-4597>

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Brasil

E-mail: [neemias.souza@ifrn.edu.br](mailto:neemias.souza@ifrn.edu.br)

**Renata Carla Tavares dos Santos Felipe**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9407-995X>

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Brasil

E-mail: [renata.felipe@ifrn.edu.br](mailto:renata.felipe@ifrn.edu.br)

**Raimundo Nonato Barbosa Felipe**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6640-1278>

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Brasil

E-mail: [raimundo.felipe@ifrn.edu.br](mailto:raimundo.felipe@ifrn.edu.br)

**Nathana Luiza Pinto de Lima**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6866-5987>

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Brasil

E-mail: [nathanaluiza@yahoo.com.br](mailto:nathanaluiza@yahoo.com.br)

**Resumo**

A utilização dos compósitos poliméricos, pela indústria, se dá pela sua leveza e versatilidade em adaptarem-se a *designs* complexos. No entanto podem ser geradores de resíduos de difícil reciclagem, que muitas vezes são colocados em aterros sanitários, o que causa a necessidade de ações que venham minimizar a quantidade desses resíduos gerados. Diante disso, esse trabalho visa avaliar a resposta mecânica e física do compósito de fibra de vidro-E com a matriz poliéster, quando incorporado resíduo gerado de plástico reforçado por fibras de vidro (PRFV). Para tanto, foram fabricadas, mediante laminação manual, três placas, todas produzidas em

vidro-E/poliéster, porém, em duas delas foram incorporados, em peso de resina, 10% e 15% dos resíduos de PRFV. Os ensaios de densidade, de umidade, de tração uniaxial e de flexão em três pontos foram realizados com base nas normas ASTM D792, ASTM D5259, ASTM D3039 e ASTM D790, respectivamente, buscando a caracterização e a avaliação da resposta mecânica após inserção dos resíduos no compósito. Os resultados demonstraram que as amostras com resíduo absorveram mais umidade e tornaram-se mais leves. No entanto, houve uma perda da resistência mecânica, tanto na tração como na flexão, para as duas composições com resíduos adicionados, em comparação com amostras do compósito sem resíduo. Porém, a característica da fratura se deu de forma semelhante para os três compósitos avaliados. Destaca-se que as perdas nas propriedades não inviabilizam o uso dos resíduos nesses compósitos, uma vez se conhecendo as solicitações mecânicas e as condições de serviços em que serão expostos.

**Palavras-chave:** Reciclagem; Comportamento mecânico; PRFV; Degradação ambiental.

### **Abstract**

The use of polymeric composites by the industry is due to their lightness and versatility in adapting to complex designs. However, waste generators can be difficult to recycle, which are often placed in landfills, which causes the need for actions that will minimize the amount of this waste generated. Therefore, this work aims to evaluate the mechanical and physical response of the E-glass fiber composite with the polyester matrix, when incorporating waste generated from glass fiber reinforced plastic (GFRP). For this purpose, three plates were hand lay-up method of manufacturing, all produced in E-glass / polyester, however, in two of them, 10% and 15% of the GFRP residues were incorporated by weight of resin. The test of density, moisture, mechanical uniaxial tensile and bending in three points were performed based on the standards ASTM D792, ASTM D5259, ASTM D3039 and ASTM D790, respectively, seeking to characterize and evaluate the mechanical response after inserting the waste in the composite. The results showed that the samples with residue absorbed more moisture and became lighter. However, there was a loss of mechanical strength, both in traction and flexion, for the two compositions with added residues, compared to samples of the composite without residue. However, the fracture characteristic was similar for the three composites evaluated. It is noteworthy that losses in properties do not prevent the use of residues in these composites, once the mechanical demands and the service conditions in which they will be exposed are known.

**Keywords:** Recycling; Mechanical behavior; GFRP; Ambiental degradation.

## Resumen

El uso de composites poliméricos por parte de la industria se debe a su ligereza y versatilidad para adaptarse a diseños complejos. Sin embargo, los generadores de residuos pueden ser difíciles de reciclar, que muchas veces se depositan en vertederos, lo que genera la necesidad de acciones que minimicen la cantidad de estos residuos generados. Por tanto, este trabajo tiene como objetivo evaluar la respuesta mecánica y física del compuesto de fibra de vidrio E con la matriz de poliéster, al incorporar residuos generados a partir de plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV). Para ello, se utilizaron tres planchas con método de laminado manual de fabricación, todas producidas en vidrio E / poliéster, sin embargo, en dos de ellas se incorporó 10% y 15% de los residuos de PRFV en peso de resina. Los ensayos de densidad, humectación, tracción uniaxial mecánica y flexión en tres puntos se realizaron con base en las normas ASTM D792, ASTM D5259, ASTM D3039 y ASTM D790, respectivamente, buscando caracterizar y evaluar la respuesta mecánica luego de insertar el residuo en el composite. . Los resultados mostraron que las muestras con residuo absorbieron más humedad y se volvieron más ligeras. Sin embargo, hubo una pérdida de resistencia mecánica, tanto en tracción como en flexión, para las dos composiciones con residuos añadidos, en comparación con las muestras del composite sin residuos. Sin embargo, la característica de fractura fue similar para los tres compuestos evaluados. Es de destacar que las pérdidas en propiedades no impiden la utilización de residuos en estos composites, una vez que se conocen las demandas mecánicas y las condiciones de servicio en las que estarán expuestos.

**Palabras clave:** Reciclaje; Comportamiento mecánico; PRFV; Degradación ambiental.

## 1. Introdução

Atualmente, as questões ambientais relativas à sustentabilidade fazem com que o desenvolvimento industrial caminhe com ações sustentáveis atreladas aos seus processos. Essas ações fazem com que se minimize a degradação ambiental, uma vez que os resíduos gerados possam ser monitorados e tratados a partir da redução, do reaproveitamento ou até mesmo da reciclagem. (Kemerich, Piovesan, Bertolotti, Altmeyer, & HohmVorpapel, 2013).

O relatório da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) (2016) mostra que apenas 40,30% dos resíduos sólidos gerados pelos municípios têm seu descarte realizado de forma adequada. O descarte inadequado desses resíduos causa impactos extremamente negativos nas populações. O relatório expõe ainda que 76,5 milhões de pessoas sofrem diretamente com isso, sendo então os plásticos no Brasil

responsabilizados pela geração de 13,5% da composição gravimétrica dos resíduos urbanos (Pimentel, Xavier, & Lira, 2019).

Conforme Shuaib e Mativenga (2016) e Singh et al. (2017), é crescente a quantidade de produtos industrializados gerados a partir dos mais diferentes tipos de plásticos, sendo assim desafiador elaborar ações direcionadas ao descarte final, à reciclagem, à recuperação e à minimização da geração desses resíduos, uma vez que eles são usados em grande escala e nas mais diversas áreas.

Segundo Felipe, Felipe, Batista e Aquino (2017), os plásticos, também conhecidos por polímeros, são utilizados para a fabricação de itens na indústria de alimentos, médica, civil, mecânica, entre outras, e ainda usados para a confecção de compósitos poliméricos, que são materiais formados pela matriz (plástico) e pelo reforço. No entanto, dependendo do processo de fabricação usado para a produção desses compósitos, ocorre uma elevada geração de resíduos sólidos e de difícil reciclagem (Lima, Felipe, & Felipe, 2020).

Pesquisas, apesar de muito incipientes, já estão sendo desenvolvidas objetivando a utilização dos resíduos de compósitos poliméricos, como por exemplo o plástico reforçado com fibras de vidro (PRFV) quando inseridas em compósitos, seja de origem matriz cerâmica ou polimérica. Segundo Castro et al. (2013), a reciclagem mecânica do PRFV, obtido do processo de fabricação por pultrusão, deu origem ao compósito de concreto-polímero. Araújo et al. (2003) também utilizou resíduos de PRFV na produção de novos materiais compósitos, objetivando mitigar a colocação desse resíduo em aterros sanitários. Mattar e Viana (2012) também utilizaram resíduos de materiais poliméricos triturados na confecção de blocos de concreto, e observaram que o bloco com 5% de resíduos atendeu às exigências normativas da construção civil referentes à resistência à compressão.

Dessa forma, este trabalho visa à fabricação de um novo material a partir da utilização dos resíduos de plástico reforçado com fibras de vidro (PRFV) gerados pela indústria, quando inseridos no compósito polimérico formado por matriz de poliéster e fibra de vidro, mediante o processo de laminação manual. Foram usados 10% e 15% desses resíduos com relação ao peso da resina no compósito e avaliados a densidade, a absorção de umidade e o comportamento mecânico quanto à tração e à flexão em três pontos, além da caracterização da fratura. A utilização desses resíduos irá diminuir o seu descarte em aterros sanitários, proporcionando a queda dos danos ao meio ambiente e ainda a redução do uso de fontes não renováveis.

## 2. Materiais e Métodos

Neste trabalho foram confeccionados três compósitos, utilizando-se em todos a resina poliéster ortoftálica, fabricante Novopol, além de três camadas de manta de fibras de vidro-E, picadas com gramatura de 450g/m<sup>2</sup>, fabricante Fibertex e sistema catalítico MEKP a 1% do peso de resina. Das três placas, em duas foram adicionados os resíduos de PRFV, sendo uma com 10% (PRFVCR 10%) e a outra com 15% (PRFVCR 15%) em peso com relação à resina. O resíduo, após ser triturado num moinho de facas, foi classificado, mediante peneiramento em jogos de peneira, na dimensão de partículas de 0,59mm. Na Figura 1, pode-se observar o resíduo coletado da indústria antes e após o processo de trituração.

**Figura 1:** Resíduo de PRFV (A) antes (B) após trituração.



(A)

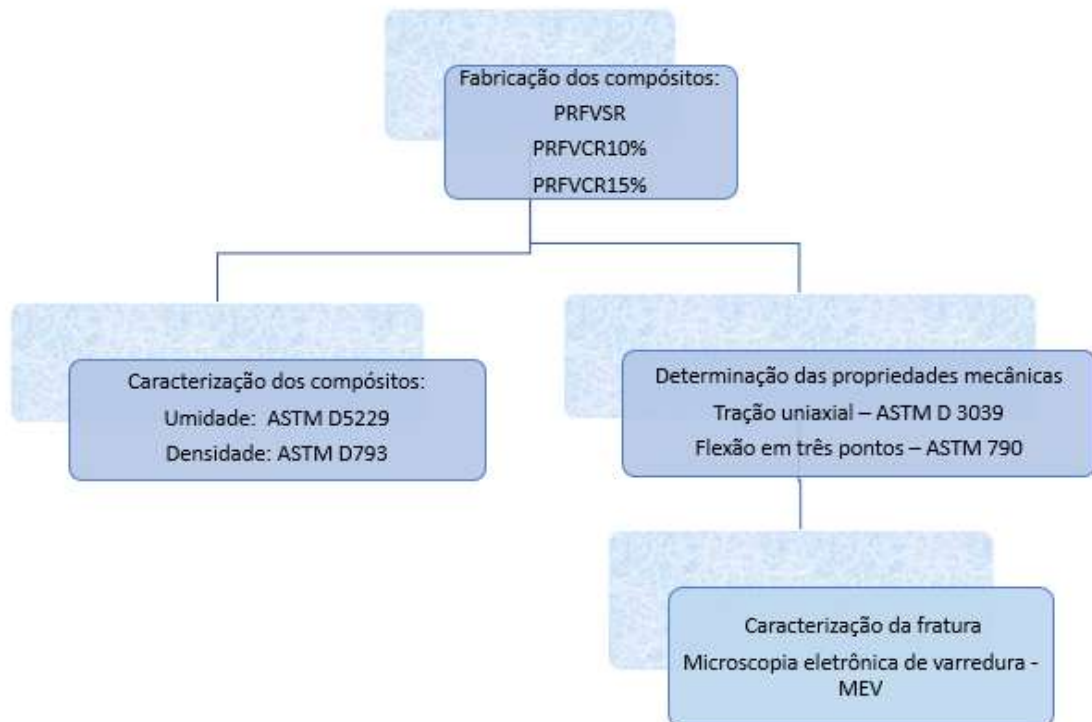


(B)

Fonte: Autoria própria (2020).

A metodologia adotada para a realização da pesquisa pode ser visualizada no fluxograma na Figura 2.

**Figura 2:** Fluxograma do procedimento metodológico após trituração do resíduo de PRFV.



Fonte: Autoria própria (2020).

Para a caracterização do resíduo de PRFV, utilizou-se o Espectrômetro de Fluorescência de Raios X por Energia Dispersiva, modelo EDX-720, da Shimadzu. A balança eletrônica digital Bioprecisa, modelo FA 210N, com resolução de 0,1mg e capacidade máxima de 210g, foi usada para a realização dos ensaios de absorção de umidade e de densidade, nos quais foram obtidos cinco corpos de prova, conforme normas ASTM D792 e ASTM D5229, respectivamente.

Já para a caracterização da fratura, utilizou-se o microscópio eletrônico de varredura (MEV), marca Tescan, resolução 3.0nm no modo SEI a 30kV com filamento de tungstênio, alto vácuo rotação total de operação 360° para todas as velocidades de varredura, em temperatura ambiente de  $23 \pm 0,5$  °C.

Os ensaios de tração uniaxial e de flexão em três pontos foram feitos para a determinação das propriedades mecânicas, sendo essas obtidas a partir da confecção de cinco corpos de prova para cada configuração dos compósitos avaliados e ensaio. Para o ensaio de tração uniaxial, a velocidade foi de 1,0mm/min, numa temperatura ambiente de  $24 \pm 2$  °C, conforme norma ASTM D3039; e, para o ensaio de flexão em três pontos, a norma utilizada foi

a ASTM D790, com velocidade de ensaio de 2mm/min. A máquina de ensaio universal foi do fabricante Shimadzu, modelo AGI-250 KN.

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1 Caracterização do resíduo

Na Tabela 1, é possível observar a composição química do resíduo de PRFV, que foi obtida a partir da espectroscopia de raio X. Os maiores percentuais foram de CaO (óxido de cálcio) e de SiO<sub>2</sub> (dióxido de silício – sílica) e o menor foi de óxido de manganês. Conhecer, então, a composição do resíduo facilitará o entendimento dos impactos ambientais que poderá gerar ao ser descartado. Com isso, a caracterização dele para a confecção desse novo material será um diferencial para o processo de gerenciamento dos resíduos, como a coleta, o transporte e a destinação; e também poderão ser encontradas alternativas que venham a minimizar custos.

**Tabela 1:** Caracterização do resíduo de PRFV.

Composição	Quantitativo (%)	Composição	Quantitativo (%)
CaO	52,359	BaO	0,300
SiO <sub>2</sub>	30,652	Co <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,195
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,110	CuO	0,109
TiO <sub>2</sub>	3,465	SrO	0,104
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,481	ZnO	0,082
K <sub>2</sub> O	0,581	MnO	0,082
SO <sub>3</sub>	0,482		

Fonte: Autoria própria (2020).

#### 3.2 Caracterização dos compósitos

##### 3.2.1 Densidade

Conforme pode ser observado na Tabela 2, a adição de resíduo de PRFV no compósito o tornou mais leve. Os valores das densidades, tanto do compósito com 15% (PRFVCR 15%), como do compósito com 10% de resíduo (PRFVCR 10%), deram inferiores ao compósito sem

resíduo (PRFVSR). Esse comportamento é importante principalmente quando se deseja estruturas mais leves. Caracterização semelhante foi obtida no trabalho apresentado por Asokan, Osmani e Price (2009) ao se utilizar o mesmo material como resíduo. Os valores das densidades foram obtidos a partir da média de cinco corpos de prova.

Tabela 2: Densidade dos compósitos.

Compósito	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
PRFVSR	1,47 ± 0,01
PRFVCR 10%	1,33 ± 0,01
PRFVCR 15%	1,42 ± 0,04

Fonte: Autoria própria (2020).

### 3.2.2 Absorção de umidade

Os corpos de prova (CP's) foram imersos em água destilada, com tempo de saturação de umidade de 2568h, aproximadamente 86 dias, e seus valores calculados a partir da média de cinco corpos de prova, sendo os resultados apresentados na Tabela 3. Segundo Raymundo, Ribeiro, Carvalho e Domingos (2012) e Domingos, Felipe, Felipe e Fernandes (2019), esse tipo de ensaio pode sinalizar vários comportamentos físicos no material, como variação dimensional devido à migração do fluido para dentro do material e fissuras superficiais, aspectos que podem comprometer mecanicamente esse elemento estrutural.

Tabela 3: Percentuais de absorção de umidade.

Absorção de Umidade (%)	Compósitos		
	PRFVSR	PRFVCR 10%	PRFVCR 15%
	0,54 ± 0,03	1,69 ± 0,04	1,12 ± 0,99

Fonte: Autoria própria (2020).

A diminuição da absorção de umidade ocorrida no PRFVCR 15% quando comparado ao PRFVCR 10% ocorreu provavelmente devido ao processo de fabricação utilizado, pois é provável que tenha havido uma maior compactação entre as camadas, já que o processo utilizado foi o de laminação manual. No entanto, de uma maneira geral, a inserção do resíduo no compósito fez com que ocorresse um aumento do percentual de absorção de umidade. Esse



acrécimo favorece a criação de micro pontos que fazem com que a umidade penetre, por capilaridade, entre o resíduo e a interface do compósito, podendo assim essa partícula ficar ancorada na fibra ou na resina, formando um canal; e daí ele ser um ponto de fragilidade do material. Conhecendo-se o comportamento do material quando exposto a essa condição de serviço, poderão ser tomadas algumas decisões durante a execução do projeto, como mecanismos de proteção de barreira a partir da colocação de uma camada extra de resina (matriz), uma pintura, entre outras possibilidades.

### 3.3 Avaliação do desempenho mecânico

#### 3.3.1 Ensaio de tração uniaxial

Na Tabela 4, é possível verificar as propriedades mecânicas de resistência à tração, o módulo de elasticidade, que foi calculado a 50% da deformação, e a deformação de ruptura, sendo todos os valores calculados a partir da média de cinco corpos de prova. A partir dos resultados obtidos, verifica-se que o PRFVCR 10% e o PRFVC 15% sofreram uma perda de 21,03% e 35,69%, respectivamente, ao se comparar os valores com o do PRFVSR.

**Tabela 4:** Comparativo entre as propriedades de tração uniaxial.

Compósito	Limite de resistência (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação de ruptura (%)
PRFVSR	90,45 ± 11,87	1,89 ± 0,13	4,78 ± 0,43
PRFVCR10%	71,42 ± 4,46	2,21 ± 0,04	4,81 ± 0,32
PRFVCR15%	58,16 ± 11,55	1,18 ± 0,01	5,40 ± 0,28

Fonte: Autoria própria (2020).

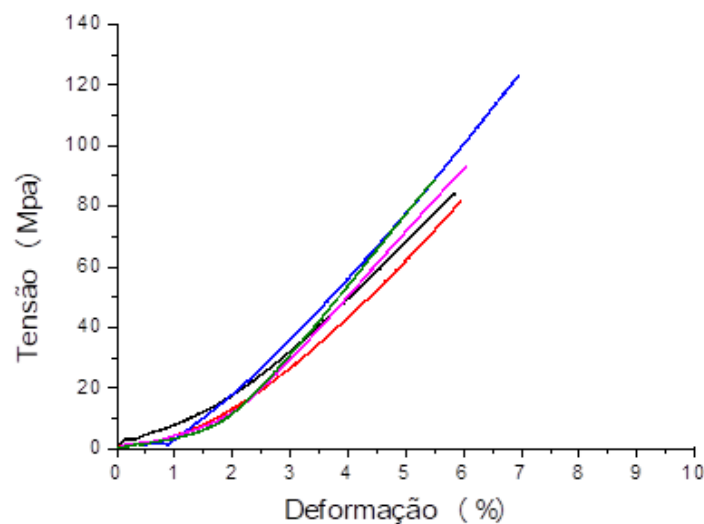
É possível observar, então, que houve variação no limite de resistência e que os compósitos com adição de resíduos de 10% e 15% sofreram uma redução de 21,03% e 35,69%, respectivamente, em relação ao compósito sem adição de resíduo. Dessa forma, conclui-se que, mesmo com a diminuição do limite de resistência, os materiais com adição de resíduos continuam com propriedades aceitáveis para inúmeras aplicações na engenharia, conforme atestam, com resultados semelhantes, os trabalhos de Silva et al. (2012) e Milani (2015). Com relação ao módulo de elasticidade, também houve variação. No entanto, o compósito com 10%

de resíduo apresentou um aumento de 16,93% em relação à rigidez do compósito de PRFV sem resíduos.

Para a deformação de ruptura, os compósitos com 10% e 15% de resíduos apresentaram um acréscimo de 0,62% e de 13% em relação à deformação do compósito de PRFV sem resíduo; isso é explicado uma vez que houve diminuição da rigidez do material. Portanto, os resultados apresentados no ensaio de tração foram aceitáveis para o compósito com a adição de 10% de resíduos de PRFV. De igual forma, os resultados nas pesquisas de Hugo (2011), Ribeiro et al. (2013) e Milani (2015) sobre a incorporação de resíduos em compósito de PRFV observaram o aumento do módulo, com a diminuição da tensão de ruptura.

Na Figura 3, apresenta-se a curva tensão x deformação dos corpos de prova do compósito de PRFV sem resíduo no ensaio de tração unidirecional. Nela, se pode observar que os CP's apresentaram comportamento mecânico semelhante quanto à região elástica da curva antes da deformação de ruptura, mostrando dessa forma uma uniformidade do material e, conseqüentemente, do processo de fabricação utilizado. Comportamento semelhante é apresentado no compósito polimérico híbrido de fibra de vidro e kevlar ensaiado no trabalho de Felipe, Felipe, Batista e Aquino (2019).

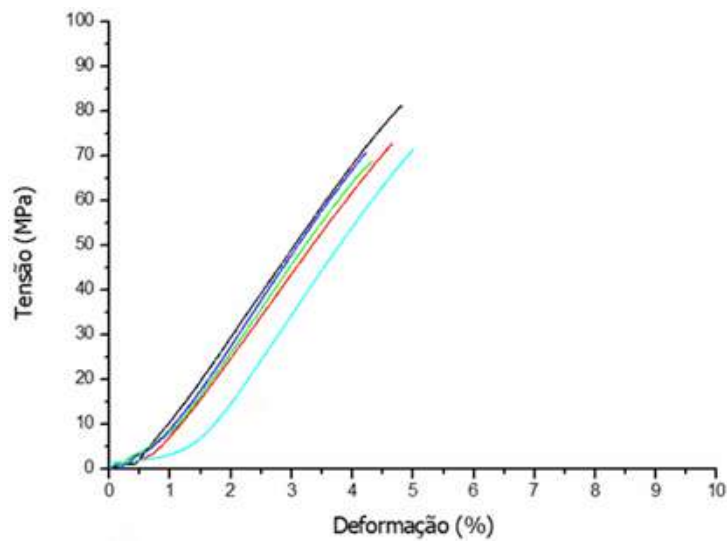
**Figura 3:** Tensão x Deformação – PRFVSR.



Fonte: Autoria própria (2020).

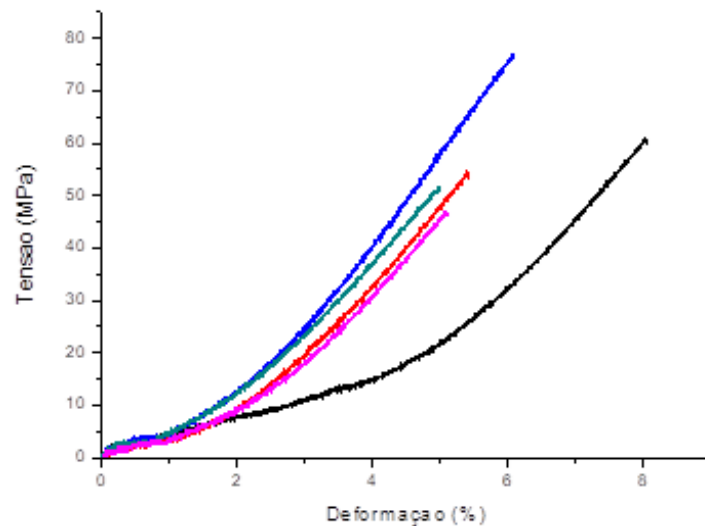
Nas Figuras 4 e 5, observa-se as curvas tensão x deformação para os corpos de prova de PRFV com 10% e 15% de resíduos. Os resultados demonstram que a inclinação da região linear das curvas se tornou ligeiramente mais acentuada, o que refletiu na melhoria do módulo de elasticidade do material, principalmente o com 10% de resíduos.

**Figura 4:** Tensão x Deformação – PRFVCR 10%.



Fonte: Autoria própria (2020).

**Figura 5:** Tensão x Deformação – PRFVCR 15%.



Fonte: Autoria própria (2020).

É importante analisar as Figuras 3, 4 e 5 para que se possa mostrar a repetibilidade dos resultados. A partir disso, verifica-se também que, analisando cada configuração separada, é possível observar que para o compósito com 10% de resíduos e o sem resíduo as curvas tiveram inclinações bem próximas umas das outras, já que cada curva representa um corpo de prova, o que mostra a uniformidade do material após fabricação. Quando se analisa o comportamento do PRFVCR 15%, observa-se que as inclinações das curvas estão mais afastadas entre si, formando ângulos bem diferentes; à vista disso, pode-se concluir que durante a fabricação do

material o processo de compactação pode ter variado, de forma que o material não ficou uniforme, tanto no que se refere à espessura quanto ao material de resíduo adicionado.

### 3.3.2 Ensaio de flexão em três pontos

Os valores dos parâmetros mecânicos de tensão máxima, do módulo de elasticidade e de deflexão máxima no ensaio de flexão foram obtidos a partir da média entre cinco corpos de prova. Na Tabela 5, observa-se que a tensão máxima à qual os CP's com adição de 10% e 15% de resíduos foram submetidos foi diminuída em aproximadamente 46% e 50,5%, respectivamente, em relação à tensão máxima aplicada ao compósito de PRFV sem resíduo.

Para o módulo de elasticidade houve uma variação bastante considerável, o que significou uma perda de 68,5% e de 75,5% da rigidez nos compósitos com 10% e 15% de resíduos, em relação ao módulo do compósito de PRFV sem resíduo. Contudo, a diminuição da rigidez contribuiu significativamente para o aumento da flecha máxima nos compósitos com resíduos, com o aumento de até 70% no compósito com 10% de resíduos. Na pesquisa de Lokesh (2019), também se confirma o aumento da deflexão devido à perda considerável de rigidez.

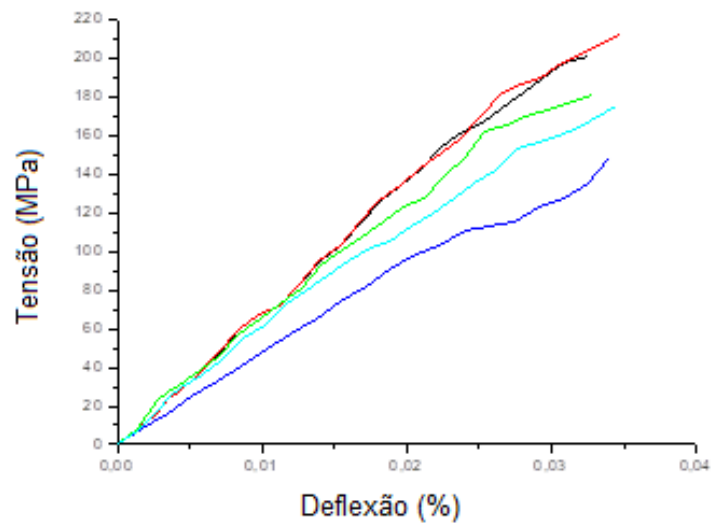
**Tabela 5:** Comparativo entre as propriedades de flexão em três pontos.

Compósito	Tensão máxima (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deflexão máxima (%)
PRFVSR	214,9 ± 18,29	10,94 ± 2,38	2,00 ± 0,40
PRFVCR10%	115,9 ± 7,51	3,44 ± 0,18	3,40 ± 0,30
PRFVCR15%	106,3 ± 6,08	2,68 ± 0,16	4,00 ± 0,001

Fonte: Autoria própria (2020).

Na Figura 6, observa-se o comportamento mecânico com relação à flexão dos compósitos de PRFVSR, o que configurou resultados bastante significativos para a tensão máxima e o módulo de elasticidade.

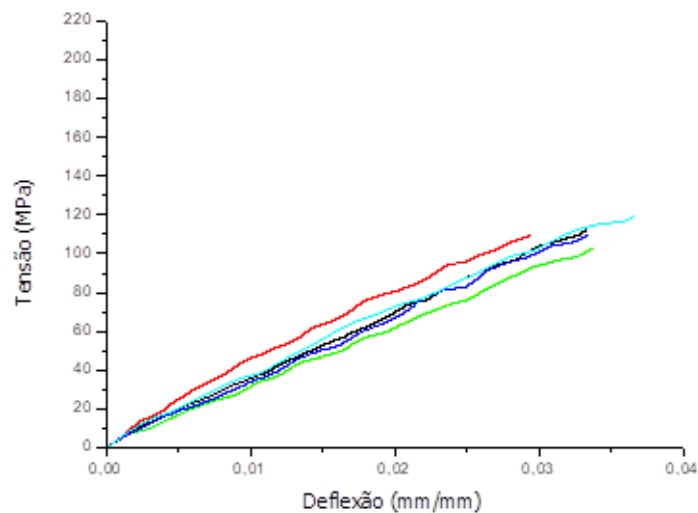
**Figura 6:** Ensaio de flexão PRFVSR.



Fonte: Autoria própria (2020).

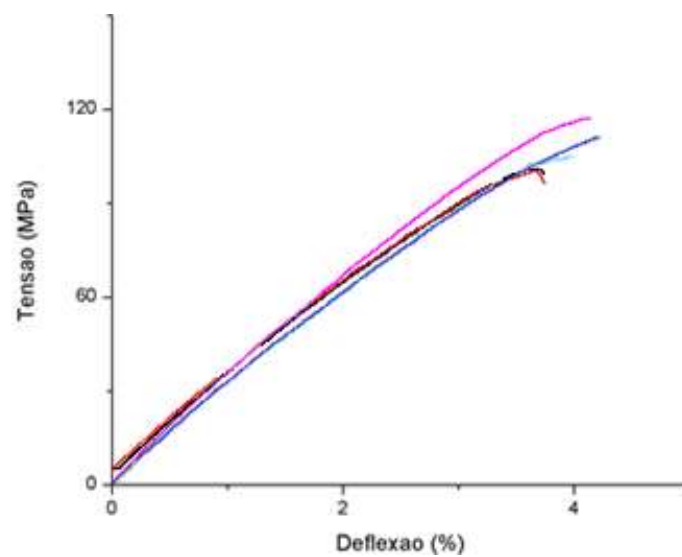
As curvas apresentadas nas Figuras 7 e 8 são relativas ao comportamento mecânico quanto à flexão dos compósitos de PRFV com 10% e 15% de resíduos. Os CP's ensaiados apresentaram comportamentos semelhantes, mas trouxeram resultados que implicaram em perdas no módulo de elasticidade, quando comparados aos compósitos de PRFV sem resíduos.

**Figura 7:** Ensaio de flexão PRFVCR 10%.



Fonte: Autoria própria (2020).

**Figura 8:** Ensaio de flexão PRFVCR 15%.



Fonte: Autoria própria (2020).

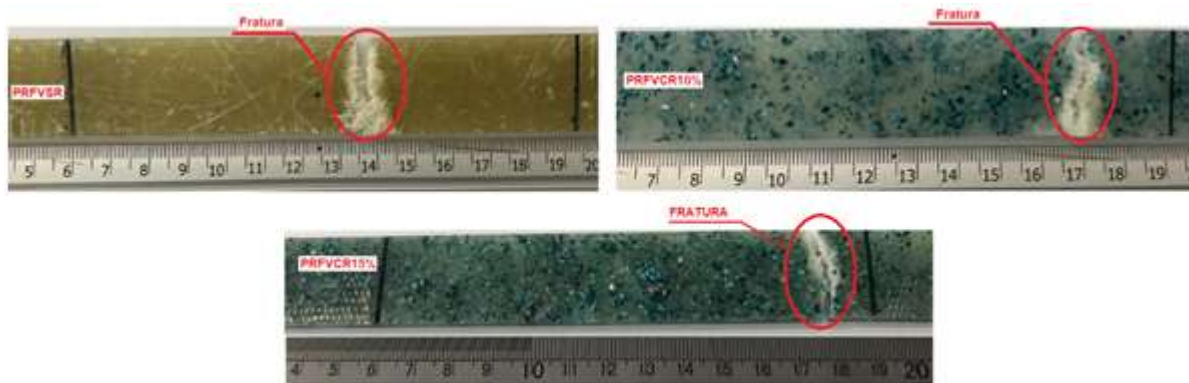
Portanto, os resultados apresentados sobre o comportamento mecânico dos compósitos de PRFV com e sem resíduos habilitam os materiais com resíduos testados a várias aplicações industriais, apesar da perda considerável de rigidez, desde que sejam obedecidas as solicitações máximas admitidas para cada finalidade.

### 3.4 Caracterização da fratura final

#### 3.4.1 Ensaio de tração uniaxial

Na Figura 9, verifica-se a característica da fratura final dos corpos de prova tracionados. A partir da norma ASTM D3039 (2014), elas são classificadas como *Angled gage middle* (AGM), ou seja, são fraturas angulares dentro da área útil do corpo de prova.

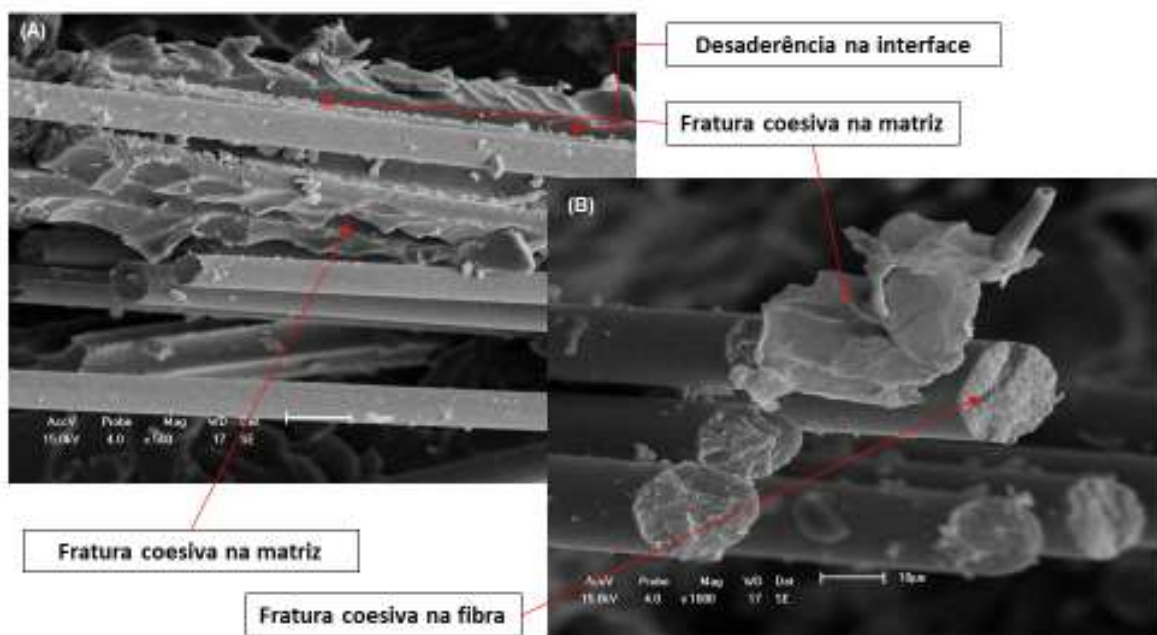
**Figura 9:** Caracterização da fratura - Ensaio de tração.



Fonte: Autoria própria (2020).

Nas Figuras 10, 11, e 12, as imagens foram obtidas através da microscopia eletrônica de varredura (MEV), sendo elas retiradas dos corpos de prova nas regiões lateral e frontal da fratura, após realização do ensaio de tração uniaxial. Logo na Figura 9, verifica-se o corpo fraturado do compósito PRFVSR, sendo possível observar a fratura coesiva tanto na fibra como na matriz; e a fratura adesiva na interface fibra/matriz, o que se evidencia pela superfície da fibra apresentar-se limpa e por causa do canal formado pela mesma interface, mesmo tipo de comportamento apresentado no trabalho realizado por Felipe et al. (2017) e Domingos, Felipe, Felipe e Fernandes (2019).

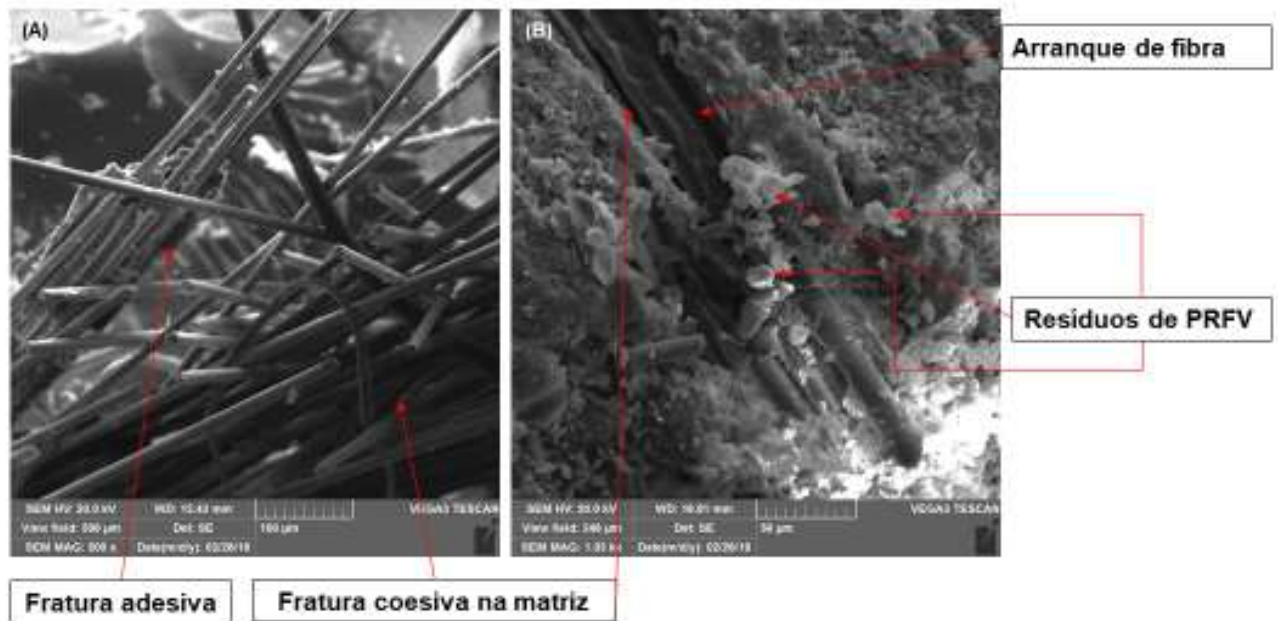
**Figura 10:** Imagem (A) lateral e (B) frontal – Ensaio de tração (PRFVSR).



Fonte: Autoria própria (2020).

Na Figura 11, no corpo de prova do compósito PRFVCR 10% fraturado após ensaio de tração uniaxial, destaca-se o arranque de fibras evidenciado pela presença de sulcos na matriz, e ainda a presença de resíduos, além da fratura coesiva na matriz e a adesiva na sua interface. Esses tipos de danos também foram apresentados nos trabalhos desenvolvidos por Santos et al. (2020) e Felipe et al. (2019).

**Figura 11:** Imagem (A) frontal e (B) lateral – Ensaio de tração (PRFVCR 10%).

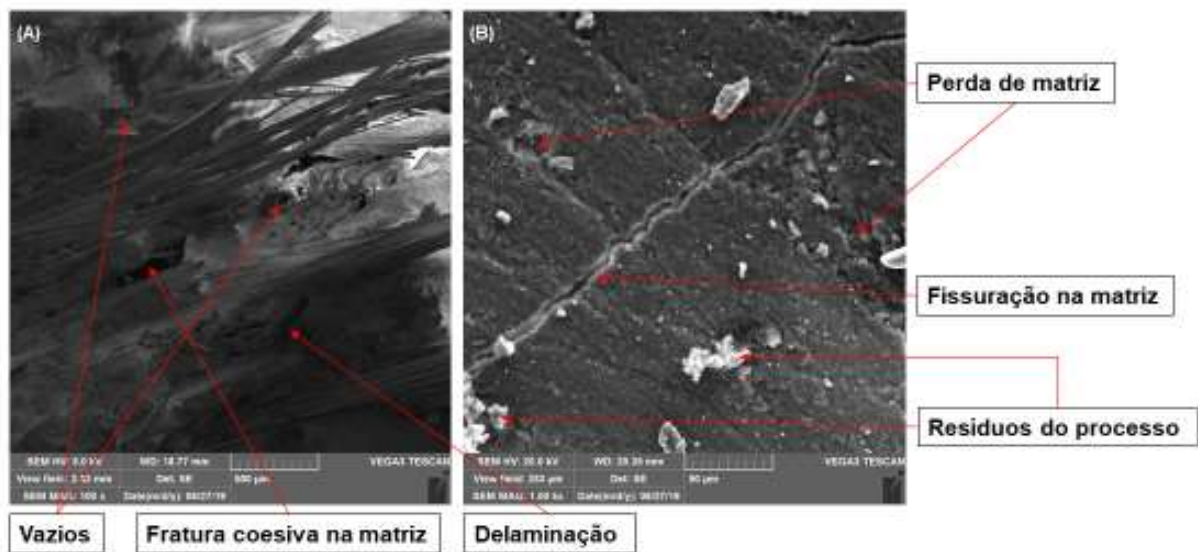


Fonte: Autoria própria (2020).

Verificando-se a Figura 12, referente ao corpo de prova após ruptura no ensaio do compósito de PRFVCR 15%, fica explícita a presença de fissura matriz, de resíduos do processo, de desaderência fibra/matriz e de fissuração na matriz em direção ao material de reforço.



**Figura 12:** Imagem (A) frontal e (B) lateral – Ensaio de tração (PRFVCR 15%).



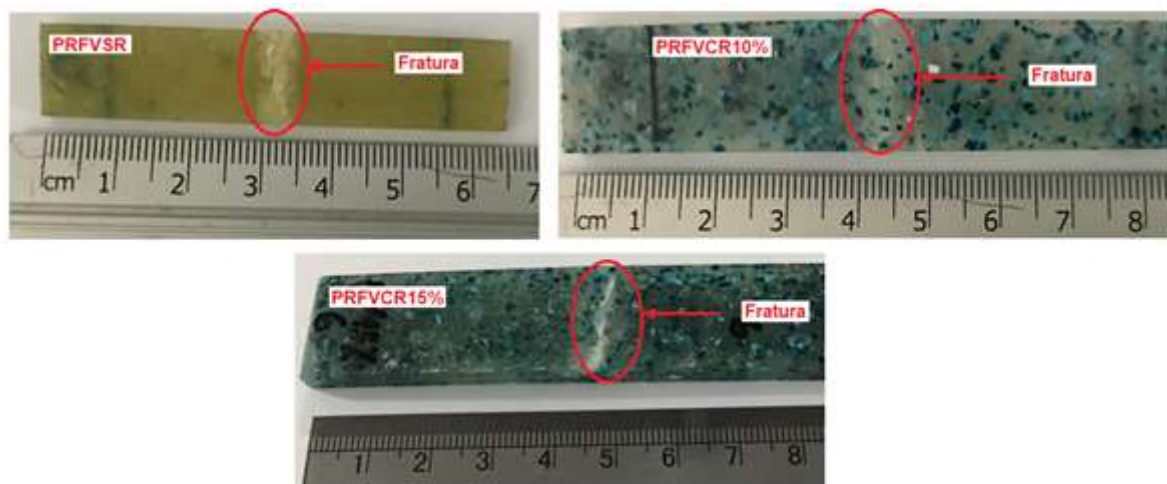
Fonte: Autoria própria (2020).

Diante das análises dos corpos de prova fraturados após ensaio de tração uniaxial, evidencia-se que os danos ocorridos foram os mais diversos, sendo apresentados em todos os compósitos analisados. Percebe-se, assim, que para esse tipo de carregamento a composição não influenciou na característica da fratura final do compósito.

### 3.4.2 Ensaio de flexão em três pontos

Na Figura 13, observam-se os CP's utilizados no ensaio de flexão em três pontos e suas respectivas fraturas mecânicas. As falhas apresentadas não seccionaram os CP's completamente, característica da fratura dos compósitos reforçados com fibras.

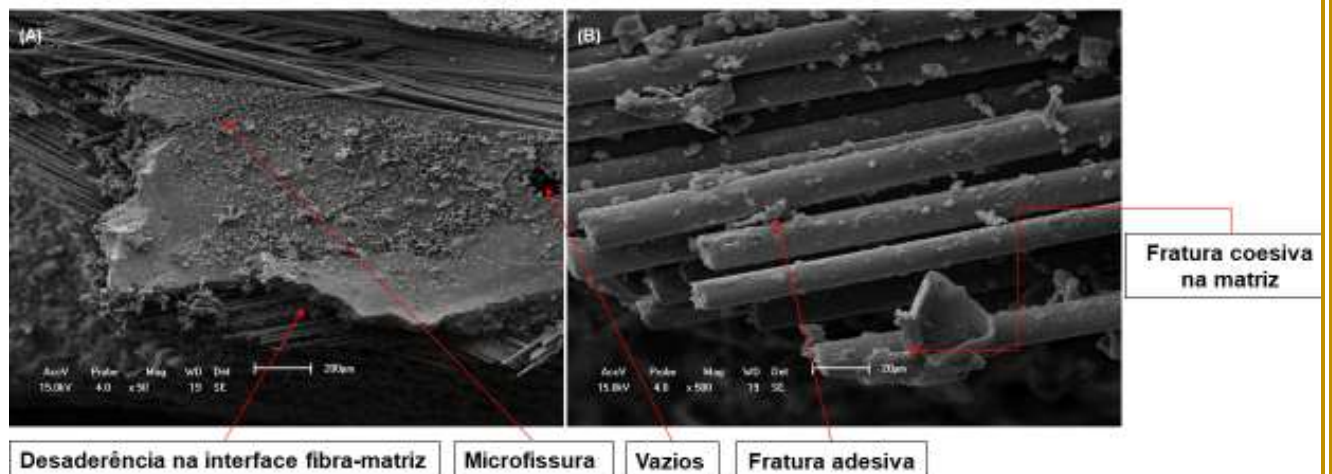
**Figura 13:** Fraturas nos CP's submetidos ao ensaio de flexão.



Fonte: Autoria própria (2020).

Nas Figuras 14, 15 e 16, serão apresentadas as fraturas dos três compostos, mediante captura de imagens do MEV, após ensaio de flexão em três pontos, sendo todas elas obtidas na fratura final correspondente às regiões lateral e frontal dos corpos de prova. Diante disso, na Figura 14, verifica-se microfissura na matriz, desaderência fibra/matriz, vazios e fratura coesiva na matriz; esses danos são todos bem característicos desse tipo de composto (PRSVSR).

**Figura 14:** Imagem (A) frontal e (B) lateral – Ensaio de flexão (PRFVSR).

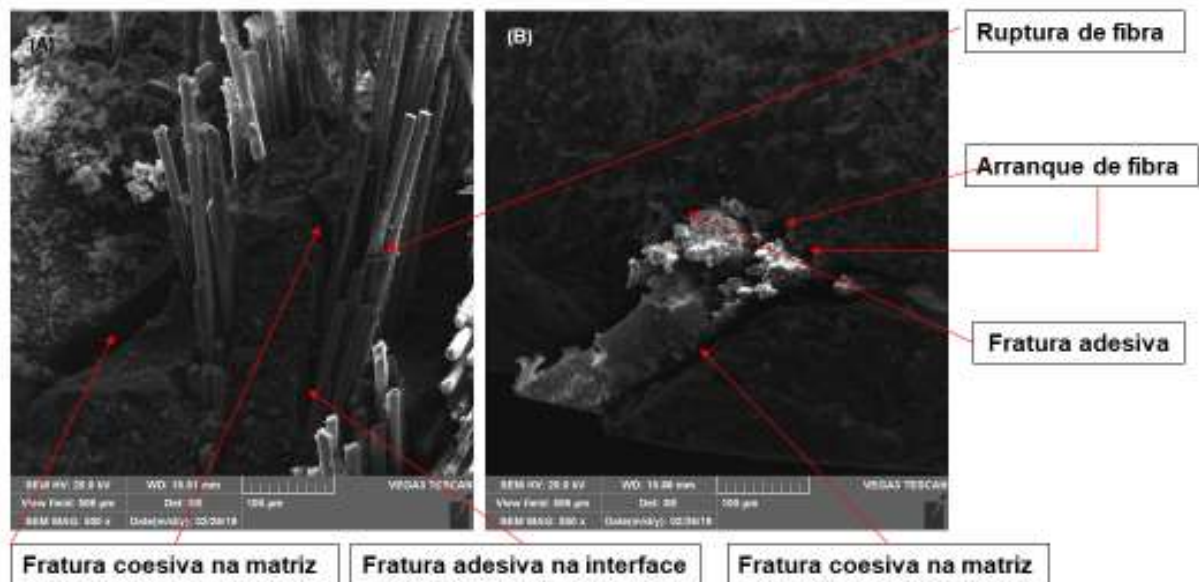


Fonte: Autoria própria (2020).

Na Figura 15, pode-se observar que o composto PRFVCR 10% apresentou ruptura de fibra; arranque de fibras - evidenciado pela presença de vazios; fratura coesiva na matriz -

representada pela fissura na matriz; além da desaderência fibra/matriz - evidenciada pois a superfície da fibra apresenta-se limpa.

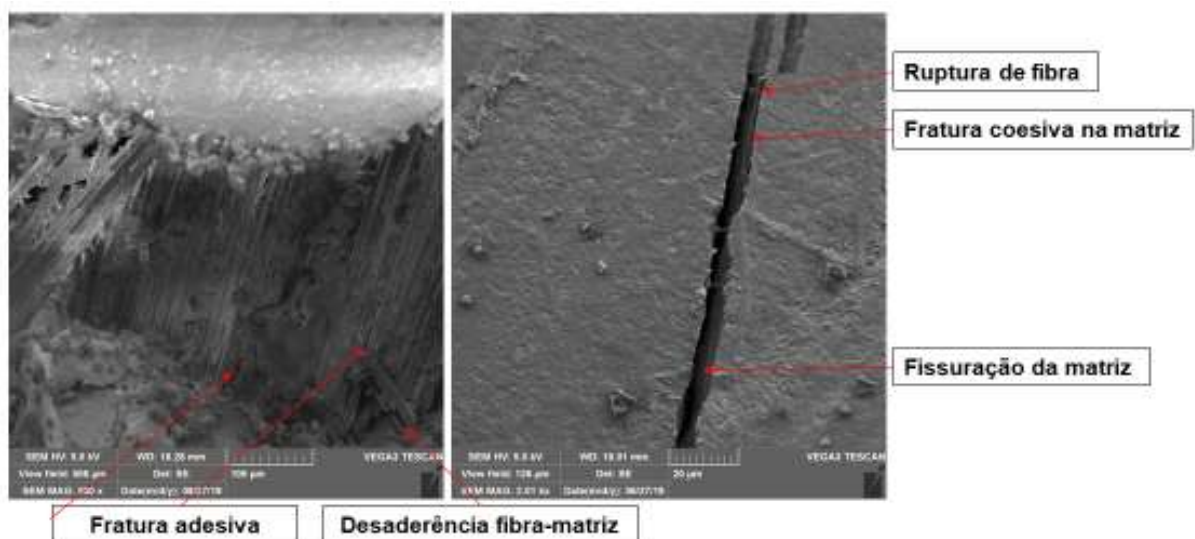
**Figura 15:** Imagem (A) frontal e (B) lateral – Ensaio de flexão (PRFVCR 10%).



Fonte: Autoria própria (2020).

Na Figura 16, referente ao compósito PRFVCR 15%, verifica-se a fratura coesiva na matriz bem acentuada, a ruptura de fibras e a desaderência fibra/matriz.

**Figura 16:** Imagem (A) frontal e (B) lateral – Ensaio de flexão (PRFVCR 15%).



Fonte: Autoria própria (2020).

Diante das análises dos corpos de prova fraturados após ensaio de flexão em três pontos, observa-se que os danos foram semelhantes em todos os compósitos. Porém, o dano no PRFVCR 15% referente à fratura coesiva na matriz, evidenciado pela fissura, foi especialmente marcante, sendo provavelmente causado pelo aumento do resíduo no compósito. Com isso, após as análises aqui apresentadas, ficou evidente que adicionar o resíduo de PRFV provocou uma perda de resistência à flexão e à rigidez, já que essas partículas podem se aglomerar e com isso interferir no comportamento mecânico do compósito.

#### **4. Conclusões**

A partir dos resultados apresentados, pode-se concluir que adicionar os resíduos de PRFV ao compósito fez com que o material ficasse mais leve, o que foi evidenciado pela diminuição da densidade. No que se refere ao percentual de umidade, o acréscimo de resíduo fez com que o compósito absorvesse mais umidade, devido às partículas que serviram de caminho para que a água entrasse por capilaridade no compósito. Quando analisado o comportamento mecânico, verifica-se que tanto na tração como na flexão houve perdas nas propriedades mecânicas, porém isso não descarta o uso do compósito para fins estruturais, uma vez que se levem em consideração quais as solicitações que ele deve suportar. Quanto às características das fraturas ocorridas, elas se deram de forma semelhante em todos os corpos de prova, para cada tipo específico de carregamento.

Por fim, ressalta-se a importância do estudo aqui apresentado sobre o uso do resíduo em PRFV quando incorporado ao compósito de poliéster com fibras de vidro, mesmo com as perdas das propriedades mecânicas do material. Pois o descarte desse compósito no meio ambiente minimizará os danos ambientais, e também implicará em um menor custo com a sua colocação em aterros sanitários, além de proporcionar a diminuição do uso de fontes não renováveis.

#### **Referências**

American Society for Testing and Materials. (2010). *ASTM D790: standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials*. West Conshohocken, PA: ASTM International.

American Society for Testing and Materials. (2013). *ASTM D792: standard test methods for density and specific gravity (relative density) of plastics by displacement*. West Conshohocken, PA: ASTM International.

American Society for Testing and Materials. (2014). *ASTM D5229/ D5229M: Standard test method for moisture absorption properties and equilibrium conditioning of polymer matrix composite materials*. West Conshohocken, PA: ASTM International.

American Society for Testing and Materials. (2014). *ASTM D3039: standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials*. West Conshohocken, PA: ASTM International.

Araújo, T. J. A., Mélo, L. H., Carvalho, K. G. B., Alves, R. S., Carvalho, K. D., Araújo, T. L. F., Souza, J. P., & Santos. (2003). Aproveitamento de resíduos de fibra de vidro provenientes de indústrias da Paraíba na produção de compósitos. *Congresso Brasileiro de Extensão Universitária*, João Pessoa, Paraíba, Brasil, 1.

Asokan, P., Osmani, M., & Price, A. D. F. (2009). Assessing the recycling potential of glass fiber reinforced plastic waste in concrete and cement composites. *Journal of Cleaner Production*, 17(9), 821-829. DOI: 10.1016/j.jclepro.2008.12.004.

Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2016). *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil*. São Paulo: Autor.

Castro, A. M., Carvalho, J., Ribeiro, M., Meixedo, J., Silva, F., Fiúza, A., & Dinis, M. (2014). An integrated recycling approach for GFRP pultrusion wastes: Recycling and reuse assessment into new composite materials using Fuzzy Boolean Nets. *Journal of Cleaner Production*, 66(C), 420-430. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.10.030.

Domingos, Y. S., Felipe, R. C. T. S., Felipe, R. N. B., & Fernandes, G. J. T. (2019). Evaluation of the environmental aging of the glass fiber-reinforced polymer composite when in contact with the effluent of a treatment plant. *Journal of Composite Materials*, 54(11), 1385-1402. DOI: 10.1177/0021998319878766.

Felipe, R., Felipe, R., Batista, A., & Aquino, E. (2017). Polymer Composites Reinforced with Hybrid Fiber Fabrics. *Materials Research*, 20(2), 555-567. DOI: 10.1590/1980-5373-mr-2016-0587.

Felipe, R. C. T. S., Felipe, R. N. B., Batista, A. C. M. C., & Aquino, E. M. F. (2019). Influence of environmental aging in two polymer-reinforced composites using different hybridization methods: glass/Kevlar fiber hybrid strands and in the weft and warp alternating Kevlar and glass fiber strands. *Composites Part B: Engineering*, 174. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.106994.

Kemerich, P. D. C., Piovesan, M., Bertolotti, L. L., Altmeyer, S., & HohmVorpapel, T. (2013). Glass fiber: characterization, disposal and environmental impact generated. *Revista eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, 10(10), 2112-2121. DOI: 10.5902/223611707590.

Lima, N. L. P., Felipe, R. N. B., & Felipe, R. C. T. S. (2020). Cement mortars with use of polyethylene tereftalate aggregate: a review on its sustainability. *Research, Society and Development*, 9(8). DOI: 10.33448/rsd-v9i8.5640. e513985640.

Lokesh K. S. (2019). Preparation and mechanical testing of e-waste glass filled polymer composites. *International Journal of Scientific Research in Mechanical and Materials Engineering*, 3(1), 18-23.

Mattar, D. C., & Viana, E. (2012). Utilização de resíduos poliméricos da indústria de reciclagem de plástico em blocos de concreto. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, 8(8), 1722-1733. DOI: 10.5902/223611706471

Milani, C. (2015). *Influência da incorporação de resíduos de policarbonato em compósitos fibra de vidro/poliéster*. Monografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

Pimentel, F. S., Xavier, T. P., & Lira, T. S. (2019). Uma revisão bibliométrica sobre a copirólise de biomassa e resíduo plástico. *Research, Society and Development*, 8(2). DOI: 10.33448/rsd-v8i4.861. e1282585.

Raymundo, E. A., Ribeiro, R. B., Carvalho, E. F., & Domingues, B. S. M. (2012). Análise de absorção de água em compósito de polímero reforçado com fibras naturais. *Cadernos UniFOA*, 7(1).

Ribeiro, M. C. S., Fiúza, A., Castro, A. C. M., Silva, F. G., Dinis, M. L., Meixedo, J. P., & Alvim, M. R. (2013). Mix design process of polyester polymer mortars modified with recycled GFRP waste materials. *Composite Structures*, 105, 300-310. DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.05.023.

Santos, J. K. D., Cunha, R. D., de Amorim Junior, W. F., Felipe, R. C. T. S., Braga Neto, J. L., & Freire Júnior, R. C. S. (2020). The variation in low speed impact strength on glass fiber/Kevlar composite hybrids. *Journal of Composite Materials*, 54(21), 3009–3019. <https://doi.org/10.1177/0021998320906205>.

Shuaib, N., & Mativenga, P. (2016). Energy demand in mechanical recycling of glass fibre reinforced thermoset plastic composites. *Journal of Cleaner Production*, 120, 198-206. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.01.070.

Silva, A. S., Nacif, G. C. L., Panzera, T., Christoforo, A. L., Batista, F., & Mano, V. (2012). Incorporation of rubber wastes into thermorigid polymeric matrix composites. *Matéria*, 17, 1158-1165. DOI: 10.1590/S1517-70762012000400006.

Singh, N., Hui, D., Singh, R., Ahuja, I. P. S., Feo, L., & Fraternali, F. (2017). Recycling of plastic solid waste: A state of art review and future applications. *Composites Part B*, 115(C), 409-422. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.09.013.

#### **Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito**

Neemias Silva de Souza – 50%

Renata Carla Tavares dos Santos Felipe – 20%

Raimundo Nonato Barbosa Felipe – 15%

Nathana Luiza Pinto de Lima – 15%