



## DETERMINAÇÃO DA PROPRIEDADE MECÂNICA EM FLEXÃO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA COM RESÍDUO CAULINÍTICO

*Paloma Suellen Lima de Sousa<sup>1</sup>  
Sarah Gabrielly Brandão de Souza<sup>2</sup>  
Joelly Vera Nascimento<sup>3</sup>  
Damares da Cruz Barbosa Nascimento<sup>4</sup>  
Alisson Clay Rios da Silva<sup>5</sup>  
Verônica Scarpini Candido<sup>6</sup>*

### Resumo

No cenário atual, existe uma demanda elevada por materiais que sejam ecologicamente corretos e apresentem bom desempenho mecânico. A utilização destes materiais torna-se de grande interesse para comunidade científica para aplicação em materiais compósitos. Os Resíduos industriais, muitas vezes não possuem um destino ambientalmente correto e são descartados de forma inadequada. Muitos estudos visam investigar a utilização desses resíduos com intuito de minimizar os impactos ambientais, além de utilizá-los como fonte de matéria-prima para aplicação em materiais. Sendo assim, este estudo tem como objetivo analisar as propriedades mecânicas em flexão de compósitos poliméricos reforçados com diferentes percentuais de resíduo de caulim. Os compósitos foram fabricados utilizando matriz polimérica de poliéster isoftálico e endurecedor MEK (ButanoxM-50), além de resíduo de caulim peneirado em 200 mesh, proveniente de bacias sedimentares em Ipixuna do Pará, variando em frações volumétricas de 5, 10 e 15% de resíduo. Os corpos de prova foram produzidos em moldes de silicone, atendendo a especificações exigidas pela norma, posteriormente ensaiados mecanicamente em flexão conforme a norma ASTM D790-18. Os resultados revelaram uma relação entre a porcentagem de resíduo e as propriedades mecânicas, incluindo módulo de elasticidade, deformação, resistência à flexão e, para validar os resultados obtidos, foi realizada a análise estatística de Variância (ANOVA). De acordo com os resultados apresentados, os compósitos com menor porcentagem de resíduo apresentaram maior resistência à flexão, na mesma sendo, o módulo de elasticidade. Não obstante, de acordo com um volume menor de resíduo na matriz, houve menor deformação. Em geral, os resultados obtidos destacam a viabilidade da incorporação como carga, contribuindo para a indústria de compósitos, sugerindo oportunidades para o desenvolvimento de materiais sustentáveis e economicamente viáveis.

**Palavras-chave:** Resíduo; Compósitos; Polímeros.

# DETERMINATION OF THE FLEXURAL MECHANICAL PROPERTY OF POLYMERIC MATRIX COMPOSITES WITH KAOLINITIC RESIDUE

## **Abstract**

In the current scenario, there is a high demand for materials that are environmentally friendly and have good mechanical performance. The use of these materials is of great interest to the scientific community for application in composite materials. Industrial waste often does not have an environmentally correct destination and is disposed of inappropriately. Many studies aim to investigate the use of these residues with the aim of minimizing environmental impacts, in addition to using them as a source of raw material for application in materials. Therefore, this study aims to analyze the flexural mechanical properties of polymer composites reinforced with different percentages of kaolin residue. The composites were manufactured using a polymeric matrix of isophthalic polyester and MEK hardener (ButanoxM-50), in addition to kaolin residue sieved at 200 mesh, coming from sedimentary basins in Ipixuna do Pará, varying in volumetric fractions of 5, 10 and 15% of residue. The test specimens were produced in silicone molds, meeting the specifications required by the standard, subsequently mechanically tested in flexion in accordance with the ASTM D790-18 standard. The results revealed a relationship between the percentage of residue and mechanical properties, including modulus of elasticity, deformation, flexural strength and, to validate the results obtained, statistical analysis of variance (ANOVA) was performed. According to the results presented, the composites with a lower percentage of residue showed greater flexural resistance, along with the elastic modulus. However, due to a smaller volume of residue in the matrix, there was less deformation. In general, the results obtained highlight the viability of incorporation as a filler, contributing to the composites industry, suggesting opportunities for the development of sustainable and economically viable materials.

**Keywords:** residue; Composites; Polymers.

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de materiais compósitos tem desempenhado um papel fundamental na inovação de diversas indústrias, incluindo as indústrias automotiva, aeroespacial e de construção civil, devido à sua capacidade de combinar diferentes materiais para obter propriedades mecânicas superiores. A capacidade de personalizar as propriedades de um compósito através da variação da composição e do processamento permite o desenvolvimento de materiais com características específicas, como alta resistência à tração, rigidez e durabilidade (LIU et al., 2022).

Entretanto, a adição de novos componentes a uma matriz existente não é isenta de desafios. Um dos principais problemas enfrentados é a compatibilidade entre as fases do compósito, que pode afetar diretamente as propriedades mecânicas, como a resistência à flexão e o módulo de elasticidade. O módulo de elasticidade reflete a rigidez de um material e sua capacidade de resistir a deformações elásticas sob tensão (Favarato et al., 2019).

Reduções no módulo de elasticidade podem comprometer a integridade estrutural do compósito, limitando sua aplicação em ambientes que exigem alta resistência e durabilidade. Além disso, a resistência à flexão é uma medida essencial da capacidade do material de resistir a forças externas que tendem a dobrá-lo, sendo diretamente influenciada pela microestrutura e pela distribuição de tensões internas no material (ZHANG et al., 2022).

Neste contexto, o presente artigo busca explorar a influência da variação da composição de um material adicionado em uma matriz compósita sobre suas propriedades mecânicas, em teste de resistência à flexão e no módulo de elasticidade. A análise detalhada dessas propriedades permite uma compreensão mais profunda dos mecanismos que governam o comportamento mecânico dos compósitos e fornece resultados para a otimização de sua formulação e processamento.

## **2 DESENVOLVIMENTO**

### **2. 1 Materiais e métodos**

#### **2.1.1 Resina Poliéster ortoftálica**

A matriz polimérica utilizada para a fabricação dos compósitos foi a resina poliéster ortoftálica de alta viscosidade e pré-acelerada, fabricada pela Center Glass, denominada de Resina Cristal. O endurecedor utilizado foi o MEK (Butanox M-50), na proporção de 2% (v/v).

#### **2. 1. 2 Resíduo Caulinítico**

O resíduo caulínítico, originário de bacias sedimentares Paraenses, foi submetido a processamento no Laboratório de Práticas tecnológicas do *Campus* Ananindeua (CANAN). O resíduo foi submetido a um processo de secagem em uma estufa a 100 C°, durante um período de 24 horas. Posteriormente, foi realizada caracterização física como: determinação da massa específica do resíduo. Posteriormente direcionado para a confecção dos compósitos.

#### **2.1. 3 Fabricação de compósitos**

Os corpos de prova foram fabricados por moldagem manual utilizando-se moldes de silicone. Houve a mistura da resina com o resíduo até obter uma melhor homogeneização, posteriormente os moldes foram preenchidos. Os corpos de prova ficaram 24 horas no molde para que ocorresse o processo de cura. Houve a produção de corpo de prova de matriz plena, com 0% de carga e os compósitos com 5, 10 e 15%. A proporção de resíduo caulínítico utilizado no processamento, foi obtida pela regra da mistura. Após esta etapa, os corpos de prova foram lixados, polidos e medidos para o ensaio de flexão posteriormente, seguindo a norma ASTM D790-22.

#### **2.1.4 Teste em flexão**

A caracterização mecânica foi conduzida por meio de um ensaio de flexão, seguindo as diretrizes da norma ASTM D790-22. Para isso, foi utilizada a máquina INTERMETRIC modelo LINHA iM50, instalada no Laboratório de Caracterização de Materiais (LCMAT) da Faculdade de Engenharia de Materiais (FEMAT) da UFPA. O ensaio foi realizado com uma célula de carga de 5 kN e a uma velocidade de 2 mm/min.

#### **2.1.6 Realização de Análise de variância (ANOVA)**

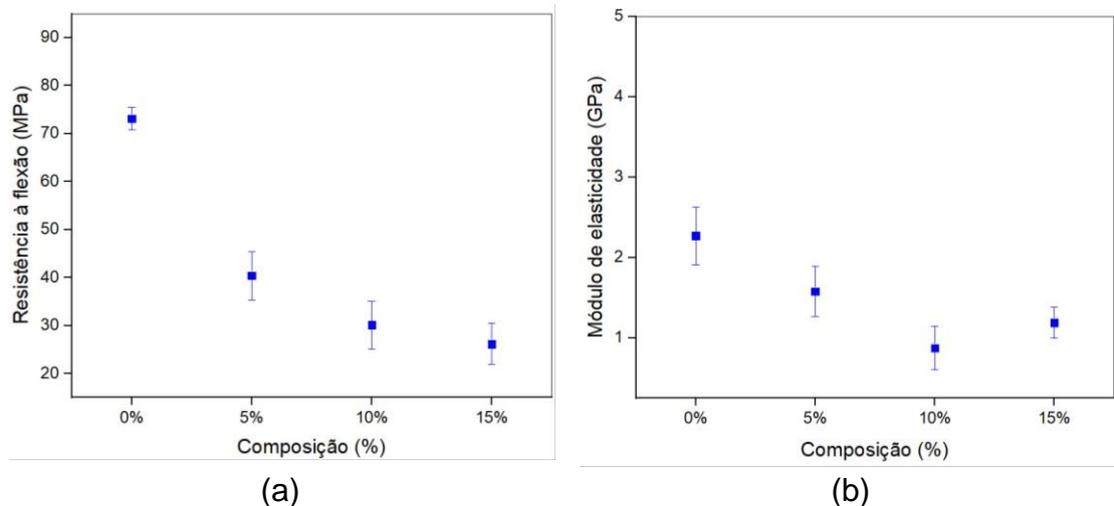
A partir dos dados obtidos, conforme o ensaio mecânico em tração, será realizado o tratamento estatístico pela análise de variância (ANOVA).

Comparando as médias de diferentes grupos de amostras para determinar se há diferenças significativas entre eles, pelo teste de tukey, com um nível de confiabilidade elevado.

## 2.2 Resultados e discussão

### 2.2.1 2.2.3 Propriedades em Flexão

Na figura 1, apresenta se um gráfico que mostra a resistência à flexão e módulo de elasticidade de compósito de matriz polimérica com carga de resíduo caulínico, variando o seu percentual.



**Figura 3.** Resistência à flexão (a) e módulo de Elasticidade (b).

Na tabela 1, é apresentado os dados acerca dos testes de flexão.

**Tabela 1.** Dados de resistência à flexão, módulo de elasticidade.

Amostras	Resistência à flexão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
0%	73,12 ( $\pm$ 2,38)	2,27( $\pm$ 0,36)
5%	40,41 ( $\pm$ 5,02)	1,57( $\pm$ 0,30)
10%	30,12 ( $\pm$ 4,94)	0,87 ( $\pm$ 0,26)
15%	26,17 ( $\pm$ 4,26)	1,19 ( $\pm$ 0,19)

A análise dos dados apresentados revela uma clara tendência de redução da resistência à flexão com o aumento da composição percentual do material adicionado. A resistência inicial, em torno de 75 MPa para 0% de adição, cai para cerca de 40 MPa ao alcançar 5% de adição, com subseqüentes diminuições para aproximadamente 30 MPa e 26 MPa, respectivamente, para 10% e 15% de composição.

Esses resultados sugerem uma deterioração das propriedades mecânicas, especificamente da resistência à flexão, com o incremento do material adicionado. Tal comportamento pode ser atribuído a diversos fatores

intrínsecos à microestrutura e à interface entre os componentes do compósito. A adição de um segundo componente na matriz original pode introduzir defeitos, como interfaces mal aderidas ou áreas de fraca coesão, que atuam como focos de tensão e potenciais pontos de início de fratura. Este fenômeno é suportado por estudos recentes que destacam a importância das interações interfaciais e da homogeneidade microestrutural na determinação das propriedades mecânicas de compósitos (FAN et al., 2021; ZHANG et al., 2022).

Além disso, a diminuição da resistência à flexão pode estar relacionada a alterações na rigidez global do material. A inclusão de um material com propriedades mecânicas inferiores ou incompatíveis com a matriz pode resultar em um compósito menos rígido, que, por sua vez, apresenta maior susceptibilidade à deformação sob carga. Este efeito foi observado por LI et al. (2020), que relataram a queda da resistência à flexão em compósitos híbridos devido à redução da rigidez decorrente da adição de materiais de menor resistência.

O gráfico mostra que, na ausência do material adicionado (0%), o módulo de elasticidade é em torno de 2,30 GPa. À medida que a composição aumenta para 5%, 10%, e 15%, o módulo de elasticidade diminui progressivamente para cerca de 1,5 GPa, 1 GPa e aproximadamente 0,8 GPa, respectivamente.

A adição de um material que não possui uma compatibilidade adequada com a matriz original pode resultar em uma interface fraca, que não contribui efetivamente para a rigidez do compósito. Isso se reflete na diminuição do módulo de elasticidade, pois a fase adicionada não suporta adequadamente a carga aplicada. Este comportamento é suportado pela literatura recente, onde a má interação interfacial é identificada como um fator crítico para a redução das propriedades mecânicas em compósitos (WANG et al., 2020; ZHAO et al., 2021). Com o aumento da composição do material adicionado, é possível que a distribuição de tensão dentro do compósito se torne mais heterogênea. Zonas de concentração de tensão podem se formar, resultando em uma diminuição na resistência global do material a deformações elásticas. Essa distribuição desigual é frequentemente observada em compósitos mal projetados, onde a fase adicionada não se distribui de forma uniforme (YU et al., 2021). A diminuição do módulo de elasticidade também pode ser resultado de uma menor coesão interna no material à medida que a composição do material adicionado

aumenta. Isso pode ocorrer devido à presença de porosidade, microfissuras ou outras imperfeições introduzidas durante o processo de fabricação ou como resultado da incompatibilidade entre os materiais (LIU et al., 2022).

Os resultados apresentados no gráfico indicam que o aumento da composição do material adicionado prejudica significativamente a rigidez do compósito, refletido na queda do módulo de elasticidade. Estes achados são consistentes com estudos recentes que mostram que a introdução de componentes que não se integram bem com a matriz original pode levar à degradação das propriedades mecânicas, especialmente da rigidez (ZHANG et al., 2022).

### 2.2.6 ANOVA para resistência à flexão

Na tabela 2, tem-se o tratamento estatístico de dados para flexão.

**Tabela 2.** Dados de flexão.

Resistência à tração (MPa)						
Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média dos Quadrados	F (calculado)	p-Valor	F Crítico
Entre os grupos	8171,224	3	2723,741	123,4159	4,5 × 10 <sup>-5</sup>	3,098
Dentro do grupo	441,3922	20	22,06961			
Total	8612,616	23				
Módulo de elasticidade (GPa)						
Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média dos Quadrados	F (calculado)	valor p	F crítico
Entre os grupos	6,511	3	2,170	21,685	1,69 × 10 <sup>-5</sup>	3,09
Dentro do grupo	2,001	20	0,100			
Total	8,513	23				

Na tabela 3, tem-se a análise de Tukey, para testes de flexão.

**Tabela 3.** Análise de Tukey para resistência à flexão (MPa)

Q	0%	5%	10%	15%
---	----	----	-----	-----

<b>0%</b>	<b>0</b>	<b>37,7133</b>	<b>43,0023</b>	<b>46,94763</b>
<b>5%</b>	<b>32,7133</b>	<b>0</b>	<b>10,289</b>	<b>14,23433</b>
<b>10%</b>	<b>43,0023</b>	<b>10,289</b>	<b>0</b>	<b>3,945333</b>
<b>15%</b>	<b>46,94763</b>	<b>14,23433</b>	<b>3,945333</b>	<b>0</b>

Na análise de variância em flexão, para resistência e módulo de elasticidade, o valor de F calculado, é maior que o valor crítico de F. Este resultado vem a indicar uma variação significativa entre os grupos em relação à resistência. Sendo o valor-p, menor, corroborando que as diferenças observadas não são devidas ao acaso e são estatisticamente significativas. Assim, conclui que os diferentes tratamentos ou condições aplicados têm um efeito significativo nos dados do material testado.

### **Agradecimentos**

Os autores deste trabalho agradecem a Universidade Federal do Pará (UFPA), e ao suporte financeiro para auxiliar este trabalho: CNPQ (Conselho Nacional de Pesquisa de Desenvolvimento Científico e Tecnológico).

### **CONCLUSÃO**

A queda observada na resistência à flexão com o aumento da composição percentual destaca a necessidade de uma cuidadosa consideração da compatibilidade entre os componentes ao projetar compósitos. A otimização da adesão interfacial e a distribuição homogênea das fases são fundamentais para garantir que as propriedades mecânicas sejam mantidas ou melhoradas, ao invés de comprometidas, com a adição de novos materiais. A análise dos dados sugere que a adição do material avaliado compromete a rigidez do compósito, como evidenciado pela redução do módulo de elasticidade. Para melhorar as propriedades do compósito, seria essencial considerar tanto a compatibilidade dos materiais quanto a otimização das condições de processamento para minimizar defeitos e melhorar a coesão interna. Estudos adicionais são necessários para entender completamente o impacto das interações interfaciais na rigidez e para explorar possíveis estratégias de mitigação.

1. LIU, H.; CHEN, Z.; TANG, X. (2022). Impact of microstructure and phase distribution on the mechanical properties of composite materials. *Materials Science and Engineering: A*, 835, 142685.
2. FAVARATO, L. F., ROSÁRIO, C. V. S., ALZUGUIR, J. P. C., et al. (2019). Avaliação teórico-experimental da resistência à compressão de concretos através de ensaios não destrutivos. *Revista Matéria*, 24(4), 1-10.
3. ZHAO, Y.; WANG, Z.; CHEN, Y. (2021). Mechanical performance and failure analysis of composite laminates: The role of interfacial adhesion. *Composite Structures*, 270, 113236.
4. ZHANG, L.; WANG, J.; MA, W. (2022). The role of microstructure in determining the mechanical properties of multi-phase composites. *Materials Today Communications*, 32, 104098.
5. FAN, Z.; LIU, Y.; HAN, Q.; ZHANG, X. (2021). The effect of interfacial adhesion on the mechanical properties of polymer composites: A review. *Composites Science and Technology*, 208, 108738.
6. LI, X.; DING, Y.; SUN, G. (2020). Influence of microstructure on the flexural strength of hybrid composite materials. *Materials & Design*, 196, 109102.
7. ZHANG, L.; WANG, J.; MA, W. (2022). The role of microstructure in determining the mechanical properties of multi-phase composites. *Materials Today Communications*, 32, 104098.
8. WANG, J.; ZHAO, H.; LIU, F. (2020). The influence of interfacial properties on the mechanical performance of fiber-reinforced polymer composites. *Journal of Composite Materials*, 54(12), 1575-1586.
9. YU, M.; ZHANG, Q.; LI, H. (2021). The effect of particle dispersion on the elastic properties of polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 222, 109049. ZHANG, L.; WANG, J.; MA, W. (2022). The role of microstructure in determining the mechanical properties of multi-phase composites. *Materials Today Communications*, 32, 104098.