

# **DESEMPENHO ESTRUTURAL DE COMPÓSITOS DE PU VEGETAL COM RESÍDUOS MINERAIS: UMA ABORDAGEM SUSTENTÁVEL**

## **STRUCTURAL PERFORMANCE OF BIO-BASED PU COMPOSITES WITH MINERAL RESIDUES: A SUSTAINABLE APPROACH**

**Pedro Afonso de Moraes Paes**

Graduando Engenharia de Materiais, 10º período, FCEE/UERJ

Bolsista de IC - CNPq, setembro de 2024 até agosto de 2025

pedromoraespaes@gmail.com

**Roberto Carlos da Conceição Ribeiro**

Orientador, Engenheiro Químico, D.Sc.

rcarlos@cetem.gov.br

**Daniele Cruz Bastos**

Coorientadora, Engenheira Química, D.Sc.

daniele\_cruz@yahoo.com.br

### **RESUMO**

O uso de resina de poliuretano vegetal associado a resíduos de rochas ornamentais configura uma solução técnica e ambientalmente viável para aplicações em construção civil, mobiliário, elementos arquitetônicos e outros setores que demandam materiais sustentáveis e de alto desempenho. Neste trabalho foram avaliados compósitos contendo resíduos de pegmatito com duas diferentes granulometrias (abaixo e acima de 0,212 mm) e resina de poliuretano (PU), por moldagem a frio. As seguintes formulações foram preparadas e posteriormente caracterizadas PU/Pegmatito (% m/m): 20/80 e 50/50 (<0,212 mm) e 30/70 e 50/50 (>0,212 mm). Foram avaliadas as seguintes propriedades: densidade (ASTM D792), dureza Shore D (ASTM D2240) e resistência ao Impacto Izod (ASTM D256). Conclui-se que a formulação 40/60 (<0,212 mm) mostrou-se a mais promissora tecnicamente, oferecendo um equilíbrio eficiente entre rigidez, resistência mecânica e estabilidade dimensional. Por outro lado, teores de resíduo superiores a 60%, especialmente com partículas finas, tendem a comprometer a integridade do material, exigindo ajustes no processamento para evitar porosidade excessiva e perda de desempenho.

**Palavras-chave:** Poliuretano; pegmatito; construção civil; materiais sustentáveis.

### **ABSTRACT**

The use of bio-based PU combined with stone residues presents a technically and environmentally viable solution for applications in civil construction, furniture, architectural elements, and other sectors that demand high-performance and sustainable materials. In this study, composites containing pegmatite residues with two different particle size distributions (below and above 0.212 mm) and polyurethane resin (PU) were prepared by cold molding. The following PU/Pegmatite (wt%) formulations were developed and subsequently characterized: 20/80 to 50/50 (<0.212 mm) and 30/70 to 50/50 (>0.212 mm). The evaluated properties included: density (ASTM D792), Shore D Hardness (ASTM D2240), and Impact Resistance (ASTM D256). The 40/60 (<0.212 mm) formulation proved to be the most technically promising, offering an efficient balance between rigidity, mechanical strength, and dimensional stability. On the other hand, filler contents above 60%, especially with finer particles, tend to compromise the integrity of the material, requiring adjustments in processing to avoid excessive porosity.

**Keywords:** Polyurethane; pegmatite; civil construction; sustainable materials.

## **1. INTRODUÇÃO**

Entre os polímeros pesquisados, destaca-se a resina de poliuretano derivada do óleo de mamona, que pode ser obtida como uma resina bicomponente, resultante da mistura, em temperatura ambiente, de um polímero, o isocianato polifuncional (pré-polímero), e um componente polioli, derivado do óleo de mamona. Essas resinas apresentam desempenho satisfatório na produção de materiais compósitos voltados para aplicações industriais (ABEL-HAMID et al. 2019; CALEGARI et al. 2017). Um dos principais benefícios do uso da PU de origem vegetal é sua biodegradabilidade na presença de microrganismos, considerando o ciclo de vida do material, conforme comprovado por Cangemi et al. (2008), diferentemente de outros polímeros termorrígidos, como as resinas epóxi e poliéster, que não apresentam degradabilidade natural.

Pesquisas atuais estão explorando a viabilidade de materiais de poliuretano (PU) sustentáveis e de alto desempenho. Para superar as limitações dos materiais de injeção à base de PU, a adição de cargas para substituir parcialmente o PU tem se mostrado uma solução viável. As fontes comuns de cargas incluem resíduos sólidos e minerais inorgânicos, que podem melhorar as propriedades mecânicas e a durabilidade do PU. Estudos existentes investigam o uso de materiais como dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ), materiais fibrosos, cascas vegetais, hidróxido de alumínio, titanato de bário, cinzas volantes e carbonato de cálcio (XIONG et al., 2024).

A adição de resíduos minerais oriundos do beneficiamento de rochas ornamentais, como mármore, granito e pegmatito, representa uma estratégia eficiente e ambientalmente responsável, alinhada aos conceitos de valorização de resíduos sólidos e economia circular (BARROS et al., 2018).

Esses resíduos, amplamente disponíveis e frequentemente descartados em grandes volumes, apresentam composição rica em minerais como sílica, feldspato e carbonatos, capazes de conferir rigidez, resistência térmica e propriedades funcionais ao compósito final. O desempenho do material, no entanto, depende diretamente da granulometria, proporção e dispersão das partículas minerais na matriz, fatores que afetam significativamente propriedades do produto (SILVEIRA et al., 2024).

Dessa forma, o uso de PU vegetal associado a resíduos de rocha configura uma solução técnica e ambientalmente viável para aplicações em construção civil, mobiliário, elementos arquitetônicos e outros setores que demandam materiais sustentáveis e de alto desempenho.

## **2. OBJETIVO**

O presente trabalho tem como objetivo preparar e caracterizar compósitos contendo resíduos de pegmatito com duas diferentes granulometrias (abaixo e a cima de 0,212 mm) e resina de poliuretano (PU), para possível aplicação na construção civil.

## **3. METODOLOGIA**

### **3.1. Materiais**

A resina de poliuretano vegetal obtida a partir do óleo de mamona, atóxica e sem cheiro, foi gentilmente doada pela empresa Sinergia (São Paulo). Resíduos oriundos do beneficiamento de pegmatitos ornamentais foram doados pelo CETEM em granulometria abaixo e a cima de 0,212 mm.

### **3.2. Preparação dos Compósitos**

As formulações foram preparadas por moldagem à frio. Inicialmente os componetes da resina formam misturados na proporção 1:1 em massa, em bécher de vidro com auxílio de bastão de vidro. Posteriormente foram pesadas as proporções mássicas para cada uma das formulações PU/Pegmatito, conforme mostra a Tabela 1, misturadas e vertidas em molde de gelatina, onde foram deixados secando por 7 dias, à temperatura ambiente. Após secagem as amostras foram

lixadas, até para ajustar a largura (12 mm) e a espessura (6 mm). Em seguida foram realizados ensaios de Densidade (ASTM D792), Dureza Shore D (ASTM D2240) e Resistência ao Impacto (ASTM D256).

**Tabela 1:** Formulações Pegmatito/PU.

Formulações PU/Pegmatito (% m/m)	PU (g)	Pegmatito (g)	Tamanho resíduo
20/80	20	80	< 0,212 mm
30/70	30	70	
40/60	40	60	
50/50	50	50	
30/70	30	70	>0,212 mm
40/60	40	60	
50/50	50	50	

### 3.3. Ensaio de Densidade

Para a realização do ensaio de densidade foi utilizada a Norma ASTM D792 (2008).

### 3.4. Dureza

A dureza das amostras foi determinado segundo a norma ASTM D 2240.

### 3.5. Ensaio de Impacto Izod

O impacto Izod foi realizado seguindo a norma ASTM D-256.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Densidade

Na Tabela 2 estão apresentados os resultados de densidade das formulações. As amostras apresentaram valores de densidade variando de 0,72 e 1,33 g.cm<sup>-3</sup>. A densidade foi fortemente influenciada pela proporção e pelo tamanho das partículas de resíduo. Teores elevados de resíduo fino (<0,212mm), especialmente na formulação 20/80, resultaram em maior densidade (1,33 g.cm<sup>-3</sup>). Já o aumento da quantidade de resina na amostras 50/50 resultou em uma diminuição do valor de densidade, atribuído à formação de microvazios durante o processamento.

Comparando-se as amostras com tamanho de partícula superior a 0,212mm, os valores de densidade mostraram-se mais próximos, indicando uma melhor homogeneização principalmente para maiores teores de resíduo. Comparando-se com a literatura, no trabalho de da Silveira et al. (2024), valores semelhantes foram encontrados para compósitos de PEAD/resíduos de Bege Bahia e PEAD/Resíduos de calcário, com a densidade variando de 1,068 a 1,175 g.cm<sup>-3</sup>. As variações na densidade podem ser atribuídas a diferenças na compactação e rugosidade das partículas (SANTOS et al., 2023).

**Tabela 2:** Resultado do ensaio de densidade das formulações (g/cm<sup>3</sup>).

PU/Pegmatito	Tamanho (mm)	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	Média	Desvio
20/80	<0,212	1,360	1,311	1,337	1,322	1,328	1,3316	0,0184
30/70		1,053	1,084	1,025	1,046	1,069	1,0554	0,0224
40/60		1,147	1,112	1,140	1,122	1,103	1,1248	0,0185
50/50		0,494	0,842	0,770	0,72	0,763	0,7178	0,1325
30/70	>0,212	1,145	1,104	1,104	1,173	1,033	1,1118	0,0528
40/60		1,139	1,184	1,033	1,122	1,014	1,0984	0,0723
50/50		1,051	1,017	1,035	1,064	0,993	1,0320	0,0280

#### 4.2. Dureza

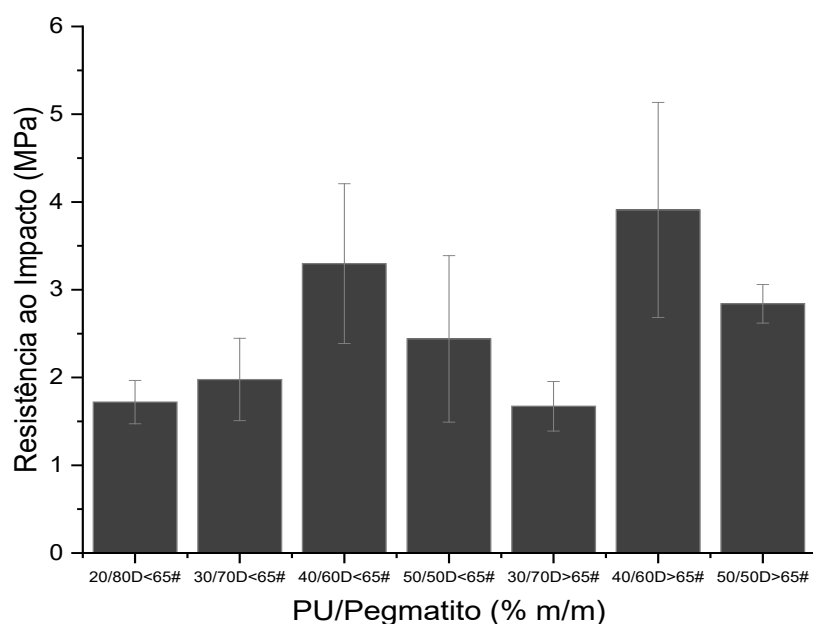
Resultados do ensaio de dureza Shore D estão apresentados na Tabela 3. As amostras 20/80 e 40/60 com partículas finas (<0,212mm) atingiram as maiores durezas, demonstrando que, em compósitos bem densificados, o conteúdo de carga mineral aumenta significativamente a resistência à penetração. Por outro lado, formulações com partículas grossas (>0,212mm) ou teor de resina excessivo apresentaram redução da dureza, o que reflete uma possível fragilidade superficial. Valores semelhantes foram reportados por Silveira et al. (2024), cuja dureza de compósitos PEAD/Bege Bahia e PEAD/Calcário variaram de 57,40 a 59,80 Shore D.

**Tabela 3:** Resultado do ensaio de dureza Shore D das formulações.

PU/Pegmatito	Tamanho (mm)	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	Média	Desvio
20/80	<0,212	63	65	69	62	70	65,8	3,6
30/70		51	62	57	58	63	58,2	4,8
40/60		67	67	60	65	71	66,0	4,0
50/50		58	45	38	34	34	41,8	10,1
30/70	>0,212	45	40	57	48	46	47,2	6,22
40/60		49	53	52	61	47	52,4	5,36
50/50		29	50	44	30	33	37,2	9,31

#### 4.3. Resistência ao Impacto

Na Figura 1 apresentam-se os resultados do ensaio de Impacto Izod das formulações. Os resultados indicam um aumento da resistência nas amostras com 50 e 60% de resíduo independente do tamanho de partícula do resíduo, entretanto, o aumento subsequente da carga para 70 e 80%, reduz esta propriedade. Considerando que na literatura, Silveira et al. (2024) encontraram resultados variando entre 2,61 e 3,62 MPa para compósitos de PEAD/BB e PEAD/Calcário, os resultados das formulações PU/Pegmatito apresentaram valores de resistência ao impacto satisfatórios.



**Figura 1:** Resultados do ensaio de Impacto Izod (MPa) das formulações.

## 5. CONCLUSÕES

Pôde-se concluir que é possível a aplicação de resíduos de pegmatitos na matriz do PU vegetal para geração de novos compósitos para construção civil. A densidade foi influenciada pela proporção e pelo tamanho das partículas de resíduo. Teores elevados de resina na formulação 50/50 (<0,212mm) resultaram em uma diminuição da densidade ( $0,72 \text{ g.cm}^{-3}$ ) e alta variabilidade, atribuídas à formação de microvazios durante o processamento.

A dureza Shore D, por sua vez, apresentou correlação direta com a densidade nas formulações mais homogêneas. As amostras 20/80 e 40/60 com partículas finas atingiram as maiores durezas, demonstrando que, em compósitos bem densificados, o conteúdo de carga mineral aumenta significativamente a resistência à penetração. Por outro lado, formulações com partículas grossas ou teor de resina excessivo (50%) apresentaram redução da dureza e possível fragilidade superficial.

A amostra 40/60 (< 0,212 mm) destacou-se com a maior resistência ao impacto (3,91 MPa), boa homogeneidade (densidade de  $1,12 \text{ g.cm}^{-3}$ ) e dureza igual 66 Shore D, indicando uma boa combinação entre tenacidade e rigidez superficial.

Dessa forma, a formulação e a seleção granulométrica do resíduo devem ser criteriosamente otimizadas conforme a aplicação-alvo, buscando o melhor compromisso entre resistência ao impacto, dureza superficial e compacidade estrutural.

## 6. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelo apoio financeiro e ao CETEM e a UERJ pela infraestrutura.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDEL-HAMID, S.M.S.; AL-QABANDI, O.A.; ELMINSHAWY, N.A.S.; BASSYOUNI, M.; ZOROMBA, M.S.; ABDEL-AZIZ, M.H.; MIRA, H.; ELHENAWY, Y. Fabrication and characterization of microcellular polyurethane sisal biocomposites, *Molecules* 24 (24) (2019).
- BARROS, M.M.; OLIVEIRA, M.F.L.; RIBEIRO, R.C.C.; BASTOS, D.C.; OLIVEIRA, M.G. Ecological bricks from dimension stone waste and polyester resin, *Construction and Building Materials*, 232 (2020) 117252.
- CALEGARI, E.P.; PORTO, J.S.; ANGRIZANI, C.C.; DE OLIVEIRA, B.F.; DUARTE, L.C.; AMICO, S.C. Reuse of waste paper and rice hulls as filler in polymeric matrix composites, *Rev. Mater.* 22 (2) (2017).
- CANGEMI, J.M.; SANTOS, A.M.; NETO, S.C.; CHIERICE, G.O. Biodegradation of polyurethane derived from castor oil, *Polímeros: Ciênc. Tecnol.* 18 (3) (2008).
- FARIA, D.L.; GONÇALVES, F.G.; MAFFIOLETTI, F.D. et al. Particleboards based on agricultural and agroforestry wastes glued with vegetal polyurethane adhesive: An efficient and eco-friendly alternative, *Industrial Crops & Products* 214 (2024) 118540.
- RAN, M.; ZHOU, X.; YAN, Y.; JIANG, R.; ZHOU, X. Grouting mechanism of polyurethane composite materials in asphalt pavement subsidence, *Materials* 16 (2023) 7052.
- SANTOS, R.S.; SILVEIRA, P.H.P.M.; BASTOS, B.C.; CONCEIÇÃO, M.N.; RIBEIRO, R.C.C.; BASTOS, D.C. Development of Environmentally Ecofriendly Composites Based on Polypropylene/Bahia Beige Waste: Effect of Reinforcement Content on Physical, Mechanical, Chemical, and Microstructural Properties, *Recent Progress in Materials* 5 (3) (2023) 1-17.
- XIONG, K.; ZHANG, J.; HE, Y.; LI, J.; ZHANG, M.; LI, R.; PEI, J.; LI, Y.; LY, L. Introducing the mineral powder to strengthen polyurethane grouting materials for crack repair of asphalt pavements, *Construction and Building Materials* 453 (2024) 139023.