

BIOCOMPÓSITOS DE RESINA POLIMÉRICA E RESÍDUO DE PEGMATITO PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL

BIOCOMPOSITES BASED ON POLYMERIC RESIN AND PEGMATITE WASTE FOR CIVIL CONSTRUCTION

Pedro Afonso de Moraes Paes

Graduando Engenharia de Materiais, 10º período, FCEE/UERJ
Bolsista de IC - CNPq, setembro de 2024 até agosto de 2026
pedromoraespaes@gmail.com

Roberto Carlos da Conceição Ribeiro

Orientador, Engenheiro Químico, D.Sc.

Daniele Cruz Bastos

Coorientadora, Engenheira Química, D.Sc.

Nuria Fernández Castro

Coorientadora, Engenharia de Minas, D.Sc.

RESUMO

O aproveitamento de resíduos minerais em matrizes poliméricas representa uma estratégia sustentável para o desenvolvimento de materiais destinados à construção civil. Neste trabalho foram desenvolvidos compósitos de poliuretano à base de óleo de mamona reforçados com resíduo de pegmatito em duas granulometrias (inferior e superior a 0,23 mm), por moldagem a frio. O resíduo foi caracterizado por fluorescência e difração de raios X, enquanto os compósitos foram avaliados quanto à densidade (ASTM D792), dureza Shore D (ASTM D2240) e resistência ao impacto Izod (ASTM D256). As análises químicas e mineralógicas evidenciaram um resíduo rico em sílica, constituído predominantemente por quartzo, albita, microclina e muscovita, apresentando elevada estabilidade mineralógica. A granulometria e a proporção de carga influenciaram significativamente as propriedades dos compósitos. A formulação contendo 40% de poliuretano e 60% de pegmatito com partículas finas apresentou o melhor desempenho, combinando densidade de 1,12 g.cm⁻³, dureza de 66 Shore D e elevada resistência ao impacto, demonstrando potencial para aplicações sustentáveis na construção civil.

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

ABSTRACT

The incorporation of mineral waste into polymer matrices represents a sustainable approach for developing materials for civil construction. In this study, castor oil-based polyurethane composites reinforced with pegmatite waste of two particle sizes smaller and larger than 0.23 mm were produced by cold molding. The waste was characterized by X-ray fluorescence (XRF) and X-ray diffraction (XRD), while the composites were evaluated for density (ASTM D792), Shore D hardness (ASTM D2240), and Izod impact strength (ASTM D256). Chemical and mineralogical analyses revealed that the waste is silica-rich and mainly composed of quartz, albite, microcline, and muscovite, indicating high mineralogical stability. Particle size and filler content significantly affected composite performance. The formulation containing 40 wt% polyurethane and 60 wt% fine pegmatite particles exhibited the best overall performance, with a density of 1.12 g.cm⁻³, hardness of 66 Shore D, and high impact strength. These results demonstrate the technical feasibility of using pegmatite waste as a sustainable mineral filler for polyurethane composites intended for civil construction applications.

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

1. INTRODUÇÃO

A valorização de resíduos gerados pela indústria de rochas ornamentais tem ganhado relevância no desenvolvimento de materiais sustentáveis, não apenas em função da necessidade de mitigar os impactos ambientais associados à disposição desses rejeitos, mas também pelo potencial técnico de sua incorporação em matrizes poliméricas e compósitos estruturais. Nesse contexto, a literatura tem demonstrado que esses resíduos podem atuar como constituintes funcionais, influenciando diretamente propriedades mecânicas, térmicas e físico-químicas dos materiais, em vez de desempenharem apenas o papel de cargas inertes para redução de custos.

Os resultados reportados por diferentes estudos indicam, contudo, que o efeito desses resíduos depende fortemente da formulação adotada, da natureza da matriz e das condições de processamento. Barros et al. (2020) demonstraram que tijolos ecológicos produzidos com elevado teor de resíduo calcário e resina poliéster podem apresentar resistência à compressão, baixa absorção de água e comportamento antichama compatíveis com aplicações construtivas. Em sistemas termoplásticos, Chagas et al. (2021) e Santos et al. (2023) mostraram que o resíduo de mármore Bege Bahia pode promover aumento de dureza, estabilidade térmica e resistência ao impacto em determinadas composições, embora teores mais elevados também possam induzir fragilização, evidenciando que os ganhos de desempenho não ocorrem de maneira linear. Essa mesma lógica se estende aos compósitos híbridos, nos quais a combinação entre carga mineral e fibra natural, como observado por Chagas et al. (2022), tende a ampliar o potencial de aplicação, especialmente quando há sinergia entre rigidez, tenacidade e redução de massa.

Mais recentemente, a literatura passou a enfatizar que o desempenho desses materiais não é determinado exclusivamente pela composição, mas também por fatores microestruturais e de processamento, como granulometria da carga, viscosidade da matriz e qualidade da dispersão interfacial, conforme discutido por Silveira et al. (2024). Paralelamente, estudos como o de Silva et al. (2024) ampliam essa discussão ao incorporar a perspectiva do fim de vida do material, demonstrando que a associação entre resíduos minerais e frações orgânicas pode acelerar a biodegradação e agregar funcionalidade ambiental ao compósito. Em conjunto, esses trabalhos indicam que os resíduos de rochas ornamentais devem ser compreendidos como componentes tecnicamente ativos, cujo aproveitamento eficiente depende da otimização simultânea da composição, da interface e do processamento, de modo a viabilizar materiais com desempenho ajustado e menor impacto ambiental.

2. OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo preparar e caracterizar compósitos contendo resíduos de pegmatito com duas diferentes granulometrias menores e maiores que 0,23 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 de rocha pegmatito foram doados pelo CETEM e beneficiamentos em duas granulometrias: menores e maiores que 0,23 mm.

3.2. Preparação dos compósitos

As formulações foram preparadas por moldagem a frio. Inicialmente os componentes da resina foram 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, 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). Foram preparados compósitos com partícula de

pegmatito inferior a 0,23 mm nas proporções 20% PU/80% resíduo, 20/70; 40/60 e 50/50. Já na granulometria maior que 0,23 mm foram preparados compósitos nas proporções 30%PU/70% resíduo, 40/60 e 50/50.

3.3. Análises Química e Mineralógica

As análises químicas e mineralógica foram realizadas pelas técnicas de FRX e DRX na Coordenação de Análises Minerais do CETEC

3.4. Ensaio de Densidade, Dureza e Impacto Izod

Para a realização do ensaio de densidade das formulações foi utilizada a norma ASTM D792 (2008). O ensaio de dureza das formulações foi determinado segundo a norma ASTM D 2240. A resistência ao impacto Izod foi realizada seguindo a norma ASTM D-256.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise por Fluorescência de Raios X (FRX) e Perda ao Fogo (PF)

Os teores de K₂O (3,8%) e Na₂O (2,8%) confirmam a natureza feldspática do resíduo. A predominância de SiO₂ e Al₂O₃ indica um resíduo rico em silicatos e aluminossilicatos, minerais rígidos e quimicamente estáveis, com potencial para atuar como cargas de reforço em compósitos de poliuretano à base de óleo de mamona, podendo aumentar a dureza, a estabilidade dimensional e a compactação do material. Há traços de Fe₂O₃ ~ 0,60%, CaO ~ 0,61% e P₂O₅ < 0,1%.

4.2. Difração de Raios X (DRX)

A difração de raios X (DRX) do resíduo de pegmatito evidenciou um material predominantemente cristalino, e as principais fases cristalinas identificadas foram quartzo (SiO₂), albita (NaAlSi₃O₈), microclina (KAlSi₃O₈) e muscovita [KAl₂(AlSi₃O₁₀)(OH)₂].

4.3. Densidade, Dureza e Resistência ao Impacto

Na Tabela 1 são apresentados os resultados de densidade, dureza e impacto das formulações.

Tabela 1: Resultado do ensaio de densidade, dureza e resistência ao impacto das formulações.

Formulações PU/Pegmatito % (m/m)	Densidade (g/cm ³)	Dureza (Shore D)	Resistência ao Impacto (KJ/m ²)
20/80 D<0,23 mm	1,3316±0,0184	65,8±3,6	1,67±0,52
30/70 D<0,23 mm	1,0554±0,0224	58,2±4,8	1,98±0,48
40/60 D<0,23 mm	1,1248±0,0185	66,0±4,0	3,30±0,92
50/50 D<0,23 mm	0,7178±0,1325	41,8±10,1	2,45±0,96
30/70 D>0,23 mm	1,1118±0,0528	47,2±6,22	1,67±0,28
40/60 D>0,23 mm	1,0984±0,0723	52,4±5,36	3,92±1,22
50/50 D>0,23 mm	1,0320±0,0280	37,2±9,31	2,85±0,21

As amostras apresentaram valores de densidade variando de 0,7178 e 1,3316 g/cm³. A densidade foi fortemente influenciada pela proporção e pelo tamanho das partículas de resíduo. Teores elevados de resíduo fino (D<0,23 mm), especialmente na formulação 20/80 D<0,23 mm, resultaram em maior densidade (1,3316 g.cm⁻³). Já o aumento da quantidade de resina na amostras 50/50 D<0,23 mm resultou em uma diminuição do valor de densidade, atribuído à formação de microvazios durante o processamento. Comparando-se as amostras de diâmetro D>0,23 mm, 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⁻³. As variações na densidade podem ser atribuídas a diferenças

na compactação e rugosidade das partículas (SANTOS *et al.*, 2023). Em relação à Dureza, as amostras 20/80 e 40/60 com partículas finas ($D < 0,23$ mm) atingiram as maiores durezas (≥ 65 Shore D), demonstrando que, em compósitos bem densificados, o conteúdo de carga mineral aumenta significativamente a resistência à penetração. Por outro lado, formulações com partículas grossas ($D > 0,23$ mm) 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. Os resultados do ensaio de impacto mostram um aumento da resistência nas amostras com 50 e 60% de resíduo independente do diâmetro, 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 KJ/m² para compósitos de PEAD/BB e PEAD/Calcário, os resultados das formulações PU/Pegmatito apresentaram valores de resistência ao impacto satisfatórios.

5. CONCLUSÕES

Os resultados de FRX mostram que o resíduo de pegmatito é um aluminossilicato rico em sílica, com baixa concentração de impurezas e elevada estabilidade química, reforçando seu potencial como carga mineral em compósitos de poliuretano à base de óleo de mamona para aplicações na construção civil. A composição mineralógica do resíduo de pegmatito demonstra seu elevado potencial como carga mineral em compósitos de poliuretano à base de óleo de mamona. A predominância de fases cristalinas estáveis, aliada à ausência de fases amorfas e instáveis na análise de DRX, indica que o resíduo pode contribuir para a melhoria da dureza e da estabilidade dimensional dos compósitos, reforçando sua viabilidade como alternativa sustentável para a valorização de resíduos minerais. A densidade foi influenciada pela proporção e pelo tamanho das partículas de resíduo. Teores elevados de resina na formulação 50/50 $D < 0,23$ mm resultaram em uma diminuição da densidade ($0,72 \text{ g.cm}^{-3}$) e de 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 ($\geq 65,8$ Shore D), 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 $D < 0,23$ mm destacou-se com a maior resistência ao impacto ($3,91 \text{ KJ.m}^{-2}$), boa homogeneidade (densidade de $1,1248 \text{ g/cm}^3$) 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 pela bolsa e ao CETEM e UERJ pela infraestrutura.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

D.L. Faria, F.G. Gonçalves, F.D. Maffioletti 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.

E.P. Calegari, J.S. Porto, C.C. Angrizani, B.F. de Oliveira, L. da C. Duarte, S.C. Amico, Reuse of waste paper and rice hulls as filler in polymeric matrix composites, *Rev. Mater.* 22 (2) (2017).

J.M. Cangemi, A.M. dos Santos, S. Claro Neto, G.O. Chierice, Biodegradation of polyurethane derived from castor oil, *Polímeros: Ciênc. Tecnol.* 18 (3) (2008).

K. Xiong, J. Zhang, Y. He, J. Li, M. Zhang, R. Li, J. Pei, Y. Li, L. Ly. Introducing the mineral powder to strengthen polyurethane grouting materials for crack repair of asphalt pavements, *Construction and Building Materials* 453 (2024) 139023.

M. Ran, X. Zhou, Y. Yan, R. Jiang, X. Zhou. Grouting mechanism of polyurethane composite materials in asphalt pavement subsidence, *Materials* 16 (2023) 7052.

M.M. Barros, M.F.L. de Oliveira, R.C.C. Ribeiro, D.C. Bastos, M.G. de Oliveira. Ecological bricks from dimension stone waste and polyester resin, *Construction and Building Materials*, 232 (2020) 117252.

R.S. Santos, P.H.P.M da Silveira., B.C. Bastos, M.N. da Conceição, R.C.C. Ribeiro, D.C. Bastos 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.

S.M.S. Abdel-Hamid, O.A. Al-Qabandi, N.A.S. Elminshawy, M. Bassyouni, M.S. Zoromba, M.H. Abdel-Aziz, H. Mira, Y. Elhenawy, Fabrication and characterization of microcellular polyurethane sisal biocomposites, *Molecules* 24 (24) (2019).