

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE COMPÓSITO FORMADO POR RESÍDUO DE MÁRMORE E POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS)

Joyce de Almeida Carminati, Lucas Destefani Paquini, Pablo Silveira Rodrigues, Amanda Vargas dos Passos, Manuela Moura Amorim, Demetrius Profeti e Luciene Paula Roberto Profeti

Universidade Federal do Espírito Santo. Alto Universitário s/n – Guararema, 29500-000, Alegre, Espírito Santo, Brasil, joyceacarminati@gmail.com, lucasdestefanip@hotmail.com, pablosilveirarodrigues@hotmail.com, amandavargas516@gmail.com, manuamoram94@gmail.com, demetrius.profeti@ufes.br, luciene.profeti@ufes.br.

Resumo

Devido a contaminação dos recursos naturais provocados pelo acúmulo de resíduos sólidos, como os resíduos de mármore (RM) e poliestireno expandido (EPS), cresce o interesse pela reutilização desses resíduos no desenvolvimento de tecnologias sustentáveis, como compósitos com potencial uso como adsorventes de baixo custo. Este trabalho teve como objetivo produzir compósitos a partir de RM e EPS, sob diferentes proporções, bem como caracterizá-los a partir de técnicas físico-químicas visando avaliar sua viabilidade como adsorvente de espécies recalcitrantes presentes em meio aquoso. As análises incluíram área e porosidade por fisissorção de N_2 , espectroscopia no infravermelho por transformada de fourier (FTIR), difração de raios X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e ponto de carga zero (pH_{PCZ}). Os resultados indicaram materiais mesoporosos, preservação das fases cristalinas de calcita e dolomita oriunda do RM, aumento da porosidade superficial e redução da alcalinidade conforme o eleva a fração de EPS. Esses resultados reforçam a viabilidade do material como alternativa promissora e eficaz para o tratamento de efluentes.

Palavras-chave: Biocarvões. Biopolímeros. Materiais alternativos. Sustentabilidade.

Área do Conhecimento: Engenharias – Engenharia Química

Introdução

A crescente geração de resíduos sólidos, decorrente de atividades industriais e urbanas, representa um desafio para a gestão ambiental. De acordo com o Panorama dos Resíduos Sólidos 2023, publicado pela Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (Abrema) estima-se que, em 2022, cada brasileiro tenha gerado uma média diária de 1,04 kg de resíduos sólidos (Abrema, 2023). Frequentemente, esses resíduos são descartados de forma inadequada, em que tendem a se acumular no meio ambiente, contribuindo para a saturação de aterros, contaminação dos recursos naturais, entre outros problemas ambientais (Samudio; Dourado; Dos Reis, 2017; Oliveira; Calado, 2024). Dentre eles, aqueles provenientes da indústria petroquímica como, por exemplo, o poliestireno expandido (EPS), segundo a Associação Brasileira do Poliestireno Expandido (ABRAPEX) são produzidas anualmente no Brasil em torno de 60 mil toneladas de EPS, porém apenas 5 mil toneladas têm destinação correta. Outro setor industrial que gera uma quantidade expressiva de resíduo é o de rochas ornamentais principalmente durante o processo de produção, seja resultante de quebras de chapas, retalhos de recorte e material particulado ou lama residual, assim, devido ao volume acumulado muitas empresas do setor não realizam o gerenciamento correto desses resíduos (Neto; Melo, 2013).

Neste contexto, o desenvolvimento de novos materiais utilizando esses resíduos como adsorventes na remoção de poluentes em meio aquoso surge como alternativa promissora, permitindo seu reaproveitamento como insumos para aplicações tecnológicas e ambientais (Santos *et al.*, 2025). A escolha de materiais adsorventes está relacionada à presença de características como elevada área superficial, porosidade e grupos funcionais capazes de interagir com contaminantes orgânicos ou inorgânicos (Azevedo; Oliveira; Cavalcanti, 2020; Silva *et al.*, 2024). Assim, o resíduo de mármore (RM), constituído majoritariamente por carbonato de cálcio, pode atuar na adsorção por mecanismos de troca iônica, enquanto o EPS contribui como matriz polimérica, garantindo estabilidade estrutural e maior

variabilidade e disponibilidade de grupos funcionais decisivos para condução de processos de adsorção quimicamente governados (Bhatt *et al.*, 2023).

Dessarte, o presente trabalho tem como objetivo realizar a caracterização físico-química do compósito formado por resíduo de mármore e EPS em diferentes proporções, a fim de avaliar a viabilidade de sua aplicação como material adsorvente.

Metodologia

O RM utilizado na produção do compósito é proveniente da indústria de produção de rochas ornamentais localizada em Cachoeiro de Itapemirim, ES. Já o EPS virgem foi obtido do comércio local de Alegre, ES, a escolha por material virgem teve como objetivo evitar possíveis interferentes físico-químicos nos testes. O RM foi seco em estufa até peso constante, e posteriormente resfriado a temperatura ambiente, enquanto o EPS foi fracionado em peças de aproximadamente 3 x 3 cm. Para síntese do compósito, o RM e o EPS foram colocados em cápsulas de porcelana nas proporções 1:1, 1:3 e 1:5 (RM₁@EPS₁, RM₁@EPS₃ e RM₁@EPS₅) e aquecido em mufla a 290 °C até completa homogeneização. Em seguida, os materiais foram levados a forno tubular para o processo de pirólise, em que foi realizado em 3 etapas com diferentes parâmetros de processo, na primeira etapa foi utilizada uma taxa de 3 °C min⁻¹ até atingir 400 °C permanecendo nesta temperatura por 60 min. Na segunda etapa, foi empregada uma taxa de 5 °C min⁻¹ até alcançar 500 °C mantendo-se nesta temperatura por 60 min. Por fim, na terceira etapa a taxa de aquecimento utilizada foi de 10 °C min⁻¹, até a temperatura de 600 °C e tempo de permanência de 60 min. Após estes procedimentos foram realizadas as suas caracterizações físicas (Área e porosidade por Fissorção de N₂, Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier – FTIR, Difração de Raios-X - DRX, Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV) e química (pH_{PCZ}).

A área e porosidade dos materiais averiguados foram obtidas por meio da técnica de fisissorção de N₂ a baixa temperatura, em um equipamento JWGB modelo Meso 112. As áreas superficiais específicas foram calculadas utilizando a equação de BET na região de baixa pressão (p/p₀=0,200). As análises de FTIR foram realizadas no modo de reflectância total atenuada (ATR), empregando um espectrômetro Bruker (Tensor 27) equipado com detector de sulfato de triglicina dopado com l-alanina deuterada (DLATGS). Os espectros foram obtidos na faixa de 4000 a 600 cm⁻¹, com 32 varreduras acumuladas por amostra e resolução espectral de 4 cm⁻¹. As caracterizações estruturais dos compósitos foram realizadas DRX, empregando o método do pó em um difratômetro Rigaku, modelo MiniFlex 600. As análises foram conduzidas na faixa de varredura de 2θ entre 5° e 90°, com passo de 0,50° 2θ s⁻¹, utilizando radiação monocromática Cu Kα (λ = 1,541 Å). As análises por MEV foram conduzidas utilizando um microscópio eletrônico de varredura (JEOL, modelo JSM-6010LA), com o filamento operando a uma tensão de 20,0 kV e uma potência de 1500 W. Antes da análise, o resíduo de mármore e os compósitos de RM e EPS foram submetidas à metalização por pulverização com ouro (MED020 Sputter Cater—Baltec) para melhorar sua condutividade elétrica. Micrografias foram posteriormente adquiridas em ampliações de 100, 500 e 1000x. A determinação do pH no ponto de carga zero (pH_{PCZ}) foi realizada utilizando 0,1000 g do compósito disperso em 10,00 mL de solução aquosa de NaCl 0,1 mol L⁻¹, sob 11 condições iniciais de pH variando de 2,0 a 12,0, ajustadas com soluções de HCl ou NaOH, ambas a 0,1 mol L⁻¹. A solução de NaCl foi empregada com o objetivo de manter a força iônica constante e minimizar variações nos coeficientes de atividade ao longo da faixa de pH. As suspensões foram mantidas em repouso por 1440 minutos (24 horas). Após esse período, os valores de pH final foram determinados com auxílio de um pHmetro Quimis modelo Q400MT, sendo os dados obtidos utilizados para a construção da curva de determinação do pH_{PCZ}.

Resultados

Area e Porosidade por Fissorção de N₂

A análise de área e porosidade por Fisissorção de N₂ indicou que o diâmetro médio de poros é de 23,103 nm; 19,620 nm e 4,157 nm para os compósitos RM₁@EPS₁, RM₁@EPS₃ e RM₁@EPS₅, respectivamente (Tabela 1), sendo classificados como mesoporosos. Ainda, a adsorção e subsequente desorção de N₂ apresentaram comportamento típico de uma isoterma do tipo III, conforme a classificação da IUPAC (Thommes *et al.*, 2015). Esse tipo de isoterma é caracterizado por uma

curvatura convexa ao longo de toda a faixa de pressão relativa (P/P_0) e pela ausência de um ponto B definido, o que indica que as interações entre o adsorvato e a superfície do adsorvente são fracas, enquanto as interações entre moléculas do adsorvato são predominantes.

Tabela 1 - Análise de Área e Porosidade por Fisissorção de N_2 do material compósito $RM_1@EPS_1$, $RM_1@EPS_3$ e $RM_1@EPS_5$.

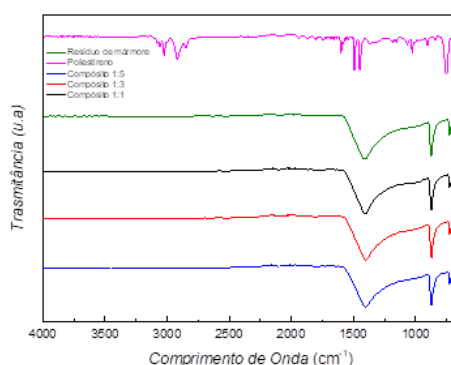
Fisissorção de N_2	$RM_1@EPS_1$	$RM_1@EPS_3$	$RM_1@EPS_5$
Área superficial BET ($m^2 g^{-1}$)	1,398	0,974	37,523
Volume Total de Poros ($cm^3 g^{-1}$)	0,008	0,005	0,039
Diâmetro de Poros Frequente (nm)	2,216	2,519	2,009
Diâmetro Médio de Poros (nm)	23,103	19,620	4,157

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

A análise dos espectros de FTIR (Figura 1) evidenciou a presença das bandas características do grupo carbonato (CO_3^{2-}) nas amostras de RM e em todos os materiais compósitos ($RM@EPS$), com destaque para as bandas preservadas em $1401,4\text{ cm}^{-1}$, $872,19\text{ cm}^{-1}$ e $726,86\text{ cm}^{-1}$, indicando a manutenção da estrutura do carbonato de cálcio após a incorporação do polímero. Porém, as bandas atribuídas ao EPS, como aquelas em $3024,7$; $2918,5$; $2847,6$; $1600,8$; $1490,9$; $1449,9\text{ cm}^{-1}$, não foram identificadas nos compósitos.

Figura 1 – Espectros de FTIR das amostras de resíduo de mármore (RM) e dos compósitos $RM_1@EPS_1$, $RM_1@EPS_3$ e $RM_1@EPS_5$.

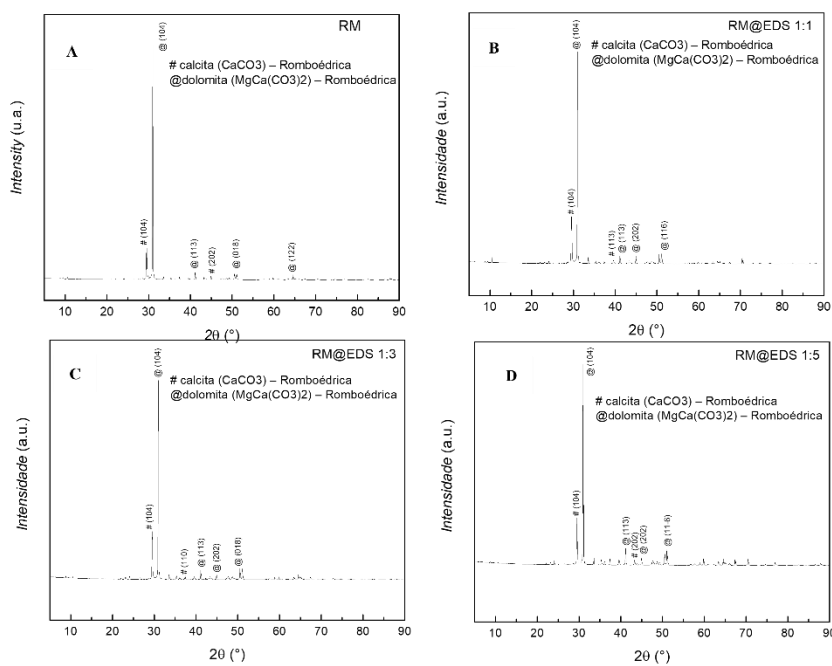


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Difração de raios X (DRX)

A análise dos Difractogramas de raios X apresentados na Figura 2 confirma a presença das fases cristalinas predominantes de carbonato de cálcio ($CaCO_3$) e carbonato de cálcio e magnésio ($CaMg(CO_3)_2$) em todas as amostras, incluindo o RM e os compósitos $RM_1@EPS_1$, $RM_1@EPS_3$ e $RM_1@EPS_5$. No RM, foram identificadas reflexões associadas à dolomita (JCPDS ICDD PDF 2 00-036-0426), com picos em $2\theta = 22,02^\circ$, $24,03^\circ$, 31° , $41,12^\circ$, $44,95^\circ$, $50,52^\circ$, $51,06^\circ$ e $59,82^\circ$, e à calcita (JCPDS ICDD PDF 2 01-086-2335), com picos em $2\theta = 23,16^\circ$, $29,55^\circ$, $36,13^\circ$, $39,60^\circ$, $43,36^\circ$, $47,78^\circ$, $48,76^\circ$ e $57,68^\circ$. Nos compósitos $RM_1@EPS_1$ e $RM_1@EPS_3$, as mesmas fases foram preservadas, com os principais picos da dolomita mantidos (JCPDS 2 00-036-0426) e os da calcita também presentes (JCPDS 2 01-086-2335), indicando que a adição do polímero não alterou significativamente a estrutura cristalina do material. No compósito $RM_1@EPS_5$, os picos foram compatíveis com a dolomita (JCPDS ICDD PDF 2 01-084-2065) e calcita (JCPDS ICDD PDF 2 01-086-0174), demonstrando que, mesmo com o aumento do teor de EPS, as fases minerais permanecem estruturalmente estáveis e bem definidas, sem evidência de modificação nas características cristalográficas.

Figura 2 - Difratomogramas de raios X do resíduo de mármore (RM) (A) e dos compósitos RM₁@EPS₁ (B), RM₁@EPS₃ (C) e RM₁@EPS₅ (D).

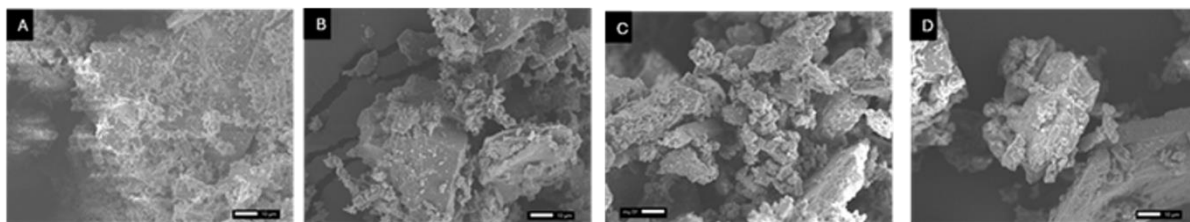


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As micrografias obtidas por MEV indicaram variadas diferenças morfológicas entre o RM e os compósitos RM₁@EPS₁, RM₁@EPS₃ e RM₁@EPS₅. A micrografia do resíduo de mármore apresentou superfície compacta, com partículas de contornos definidos e baixa porosidade. Para o material compósito RM₁@EPS₁, observa-se o início da formação de uma estrutura mais irregular e rugosa, indicando maior heterogeneidade. Ao aumentar a proporção de EPS (RM₁@EPS₃), a morfologia torna-se mais porosa e desagregada. Já para o RM₁@EPS₅, verifica-se uma estrutura com alta porosidade, sugerindo um possível aumento da área superficial, o que corrobora com a análise de BET.

Figura 3 - Micrografias de (A) Resíduo de mármore (RM), (B) RM₁@EPS₁, (C) RM₁@EPS₃ e (D) RM₁@EPS₅ ampliadas 1000 x. Escala: 10µm.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Ponto de Carga Zero (pH_{PCZ})

Os resultados de pH_{PCZ} indicam que, à medida que se aumenta a proporção de EPS na composição do compósito, há uma tendência de redução do valor do pH_{PCZ}. O RM₁@EPS₁ apresentou o maior valor (10,09), seguido do RM₁@EPS₃ (10,02), enquanto o RM₁@EPS₅ apresentou o menor valor (8,78).

Discussão

De acordo com a análise de área e porosidade por fisissorção de N_2 , os compósitos se apresentam mesoporosos, com diâmetro médio de poros decrescente conforme se aumenta a fração de EPS, ainda apresentaram isotermas do tipo III conforme classificação IUPAC (Thommes *et al.*, 2015). Essas características são atribuídas as interações superficiais fracas entre adsorvato (N_2) e adsorvente, com predominância das forças de coesão entre as próprias moléculas do adsorvato (OGURA *et al.*, 2018; Calzaferri; Gallagher; Brühwiler, 2023). As análises de FTIR evidenciaram a permanência das bandas características do íon carbonato (CO_3^{2-}), atribuídas às fases de calcita e dolomita em 1401, 872 e 726 cm^{-1} , indicando a preservação estrutural após a incorporação de EPS. A estabilidade mineralógica foi confirmada pelos difratogramas de DRX, que demonstraram a manutenção das fases cristalinas sem alterações significativas na composição ou na organização reticular, mesmo com o aumento da fração polimérica (Li *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2022). A análise realizada por MEV revela que a presença de EPS promove maior porosidade visível, o que contribui para texturas menos densas. De acordo com os valores de pH_{PCZ} obtidos, esse comportamento sugere que o RM, por sua natureza básica (rica em carbonatos, especialmente calcita e dolomita), é o principal responsável pelo caráter alcalino da superfície dos compósitos. Com o aumento da fração de EPS, a camada de carbono produzida suprime os grupos funcionais básicos presentes no RM, resultando na diminuição da alcalinidade superficial e, consequentemente, do valor do pH_{PCZ} . Esses resultados de pH_{PCZ} mostram que ocorre uma redução do valor à medida que se aumenta a fração de EPS, isto é, foram obtidos valores de 10,09; 10,02 e 8,78 para $RM_1@EPS_1$, $RM_1@EPS_3$ e $RM_1@EPS_5$, respectivamente. De acordo com Derkani *et al.* (2019) e Jarrahan *et al.* (2019) em sistemas polímeros-carbonato podem ocorrer a diminuição da alcalinidade superficial devido ao recobrimento da superfície do RM. Assim, quando analisadas as técnicas de caracterização em conjunto, evidencia-se que o EPS atua como estrutura física que modula características texturais e superficiais sem alterar a fase mineral do resíduo de mármore.

Conclusão

Os compósitos de resíduo de mármore (RM) e poliestireno expandido (EPS) apresentaram estrutura mesoporosa, preservação das fases cristalinas de calcita e dolomita provenientes do RM, confirmados pelas análises de FTIR e DRX. Ainda, o aumento da porosidade e área superficial, aliados à redução da alcalinidade com o aumento da fração de EPS, corroborado pelas análises de MEV, BET e pH_{PCZ} , demonstram a viabilidade dos materiais como adsorventes promissores, eficientes e de baixo custo para aplicação no tratamento de efluentes, sendo $RM_1@EPS_5$ o que apresentou as características mais favoráveis à condução de processos de remoção por adsorção.

Referências

- ABREMA – Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2023: P1 – diagnóstico com base em dados de 2022**. São Paulo: ABREMA, 2024. 60 p. Disponível em: https://www.abrema.org.br/wp-content/uploads/dlm_uploads/2024/03/Panorama_2023_P1.pdf. Acesso em: 04 ago. 2025.
- AZEVEDO, P. G. F. de; OLIVEIRA, D. C. da S.; CAVALCANTI, L. A. P. Processos físicos e químicos para o tratamento de efluentes: uma revisão integrativa. **Rev. Bras. Gest. Ambient. Sustent.**, v. 7, n. 17, p. 1667-1678, 2020.
- BHATT, P. *et al.* Developments and application of chitosan-based adsorbents for wastewater treatments. **Environ. Res.**, v. 226, p. 115530, 2023.
- CALZAFERRI, G.; GALLAGHER, S.H.; BRÜHWILER, D. Multiple equilibria describe the complete adsorption isotherms of nonporous, microporous, and mesoporous adsorbents. **Microporous Mesoporous Mater.**, v. 330, p. 111563, 2022.

A Ciência do **NANO** e seu impacto transformador no **MACRO**

DERKANI, M. H. *et al.* Mechanisms of surface charge modification of carbonates in aqueous electrolyte solutions. **Colloids and Interfaces**, v. 3, n. 4, p. 62, 2019.

JARRAHIAN, K. *et al.* O efeito do pH e da mineralogia na retenção de inibidores de incrustação polimérica em rochas carbonáticas para aplicação em tratamentos de compressão. **SPE Prod. Oper.**, v. 34, n. 02, p. 344-360, 2019.

LI, X. *et al.* Research and application of polypropylene carbonate composite materials: A review. **Polymers**, v. 14, n. 11, p. 2159, 2022.

NETO, A. A. B.; MELO, A. M. V. de. Desenvolvimento de projetos de produtos utilizando resíduos pétreos de rochas ornamentais. **Eng. Sanit. Ambient.**, v. 18, n. 4, p. 393-398, 2013.

OGURA, M. *et al.* Identification of the basic sites on nitrogen-substituted microporous and mesoporous silicate frameworks using CO₂ as a probe molecule. **Langmuir**, v. 34, n. 4, p. 1376-1385, 2018.

OLIVEIRA, L. B. de; CALADO, C. R. Reciclagem de resíduos de poliestireno expandido e suas aplicações: uma minirevisão. **Rev. Bras. Gest. Ambient. Sustent.**, v. 11, n. 29, p. 1535-1541, 2024.

RRUFF ID: R040070.1. Calcite – **Amostra de calcita (CaCO₃) proveniente de Pryor Mountain, Big Horn County, Montana, EUA; identificação confirmada por difração de raios X e análise química.** 2025a. Disponível em: < <https://rruff.info/calcite/display=default/R040070> >. Acesso em 01 ago. 2025.

RRUFF ID: R040030.1. Dolomite – **Amostra de dolomita (CaMg(CO₃)₂) proveniente da Áustria; identificação confirmada por difração de raios X e análise química.** 2025b Disponível em: < <https://rruff.info/dolomite/display=default/R040030> >. Acesso em 13 ago. 2025.

SAMUDIO, E. M. M.; DOURADO, F. F. M.; DOS REIS, R. A. Gestão de resíduos no beneficiamento de rochas ornamentais: o caso das marmorarias. **Caleidosc.**, v. 9, n. 1, p. 15-21, 2017.

SANTOS, A. N. S. dos *et al.* Resíduos sólidos e Design sustentável—uma análise da reciclagem na “economia circular” à luz da agenda 2030. **Aracê**, v. 7, n. 2, p. 7365-7391, 2025.

SILVA, K. K. *et al.* Artigo de revisão sobre tratamento de efluentes têxteis por adsorção do azul de metileno por meio do uso do carvão ativado a partir do mesocarpo de coco verde. **Rev. Gest. Secret.**, v. 15, n. 12, p. e4520-e4520, 2024.

THOMMES, M. *et al.* Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). **Pur. Appl. Chem.**, v. 87, n. 9-10, p. 1051-1069, 2015.

WANG, W. *et al.* Study on the efficacy of amorphous calcium carbonate as a consolidant for calcareous matrix. **Herit. Sci.**, v. 10, n. 1, p. 165, 2022.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado do Espírito Santo (FAPES). Bem como ao Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e ao Laboratório de Engenharia Química 1 da Universidade Federal do Espírito Santo, pelas análises de MEV e DRX realizadas.