

**10º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia
O Papel da Engenharia na Cooperação entre as Comunidades Lusófonas
Maputo 29 Julho - 2 Agosto 2025**

APLICAÇÃO DE SUB-PRODUTOS DA INDÚSTRIA EXTRATIVA E TRANSFORMADORA DE ROCHAS ORNAMENTAIS CARBONATADAS EM COMPÓSITOS PÉTREOS

R. Martins^{1*}, A. Azzalini¹, J. Velez¹, L. Lopes^{1,2}, P. Afonso¹, P. Faria^{1,3}, P. Mourão⁴, V. Pires⁵

(1) Departamento de Geociências, Universidade de Évora, Portugal, *rubenvm@uevora.pt

(2) Instituto Ciências da Terra, Polo de Évora, Portugal

(3) GeoBioTec, Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro, Portugal

(4) Departamento de Química e Bioquímica, Universidade de Évora, Portugal and CHANGE & MED

(5) Laboratório HERCULES — Herança Cultural, Estudos e Salvaguarda e IN2PAST — Lab. Associado para a Investigação e Inovação em Património, Artes, Sustentabilidade e Território, Universidade de Évora, Portugal

INTRODUÇÃO

A indústria de extração e transformação de pedra ornamental carbonatada produz elevadas quantidades de resíduos que são depositados a céu aberto em escombreiras e depósitos de lamas carbonatadas (Fig. 1). A aplicação industrial destes resíduos permite acrescentar valor, transformando-os num subproduto, contribuindo assim para o enquadramento dos subsectores de extração e transformação de calcário e mármore, no “Plano de Ação para a Economia Circular”, promovendo o crescimento sustentável. Desta forma, esta investigação demonstrou que as lamas de reciclagem como matéria-prima são passíveis de integrar a produção de ligantes através da sua incorporação no fabrico de materiais compósitos de rochas ornamentais, substituindo parcial ou totalmente as resinas epoxidicas tradicionalmente utilizadas neste tipo de produtos. O trabalho constante neste artigo reflete a investigação realizada no Departamento de Geociências da Universidade de Évora, no âmbito do projeto “Calcinata, (Projeto de I&dt Empresas em Co-promoção, com referência nº 722239 cofinanciado pelo Alentejo 2020, Portugal 2020 e União Europeia através do Programa “Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER)”).

RESULTADOS

Lamas – Caracterização Química

As análises químicas (Tabela 1) efectuadas por espetrometria atómica revelaram um material fundamentalmente carbonatado. Todas as lamas carbonatadas têm percentagens significativas de CaO e apresentam uma percentagem relevante de perda de ignição.

Formulação de ligantes constituídos por lamas carbonatadas e resina

Tabela 2: Resultados dos ensaios de resistência à compressão uniaxial após 28 dias de cura.

Formulações %	R (MPa)
ANM3 = 54,43%NM / 45,57%Res.	102,73
ANM4 = 50%NM / 50%Res.	98,35
ANM5 = 47%NM / 53%Res.	96,23
ANM6 = 52%NM / 48%Res.	106,37
ANC3 = 52,31%NC / 47,69%Res.	103,20
ANC4 = 50%NC / 50%Res.	102,12
ANC5 = 47%NC / 53%Res.	96,04

NM – Lama de Mármore; NC – Lama de Calcário; Res – Resina.

Formulações de compósitos com ligante 52/48 e agregados de mármore

Definidas as formulações com melhor desempenho, em termos de ensaios de resistência à compressão uniaxial (NP EN 1926-2008) (Tabela 3), foram efectuados os restantes ensaios de caracterização (Tabela 4), nomeadamente:

- determinação da resistência à flexão sob carga concentrada (NP EN 12372_2008);
- densidade aparente e porosidade (NP EN 1936-2008);
- absorção de água à pressão atmosférica (NP EN 13755);
- absorção de água por capilaridade (NP EN 1925-2000).

Tabela 4: Caracterização das melhores formulações de mármore e calcário

Cura (Dias)	Ligante	Resist. à Flexão (MPa)	Volume de Poros Abertos (ml)		Densidade Aparente (g/m³)	Porosidad e Aberta (%)	Absorção à Pressão Atmosférica (%)	Capilarida de (g/m²s)	Resistência média à compressão uniaxial (MPa)
			i	ii					
28	Mármore	1549 ± 1,38	0,22 ± 0,03	117,0 ± 7,0	2,279 ± 0,19 ± 0,02	52% 48%	0,2 ± 0,03	0,088 ± 0,010	73,30
	Calcário	13,49 ± 0,97	0,22 ± 0,04	104,6 ± 7,4	2,263 ± 0,20 ± 0,03	52% 48%	0,1 ± 0,03	0,062 ± 0,019	88,19

O agregado de mármore, fornecido pela empresa Marvisa, era constituído por três tipos, com os seguintes intervalos granulométricos: BA (4 mm / 6,3 mm), B1 (8 mm / 14 mm) e B2 (14 mm / 25 mm) (Tabela 3).

CONCLUSÕES

A utilização de resina de poliéster em substituição da resina epoxy parece viável. O preço da resina epoxy é, em média, quatro vezes superior ao da resina poliéster, o que torna os produtos compósitos de pedra substancialmente mais caros.

Como um dos objetivos da investigação era a redução da resina e a sua substituição parcial por lamas carbonatadas, a investigação incorporou gradualmente percentagens sucessivamente mais elevadas de carga sólida, sem comprometer a resistência dos provetes. Assim, a percentagem ideal de ligante foi de: 52% de lama carbonatada e 48% de resina poliéster.

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão e à flexão são promissores, tendo em conta o facto das formulações terem sido efectuadas com um misturador mecânico, ligeiro.



AGRADECIMENTOS

Investigação desenvolvida no âmbito do projeto “CALCINATA - Produção de argamassas à base de cal a partir da calcinação de lamas carbonatadas da indústria de rochas ornamentais (mármore e calcário)” com a referência ALT20-03-0247-FEDER-072239. Projeto cofinanciado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) no âmbito do ALANTEJO 2020 (Programa Operacional Regional do Alentejo).

Agradecimentos especiais a: Associação Cluster Portugal Recursos Minerais, co-gestora do projeto e o Gabinete de Apoio ao Projeto da Universidade de Évora; Serviços de Ciência e Cooperação e Serviços Administrativos da Universidade de Évora e em particular ao Sr. Artur Calhau pela cedência dos misturadores, sem os quais não teria sido possível realizar as formulações.

REFÉRENCIAS

Afonso, P.; Azzalini, A.; Faria, P.; Lopes, L.; Martins, R.; Mourão, P.; Pires, V. (2023). Mortar Based on Sludge from Carbonate Dimension Stone Processing Industry - an Experimental and Feasibility Approach. 2023 Geo-Resilience Conference. The British Geological Association

Catálogo da Pedra Ornamental: Aditivos e Receptores. 2023. Consultado em 15 de Junho de 2023. https://www.igep.pt/publicacions/Cat%C3%A1logo%20de%20Pedra%20Portuguesa_2012-compostado.pdf.

DGDI (2023). Catálogo da Indústria da Construção Civil, do Mobiliário e da Decoração. Consultado em 15 de Junho de 2023. <https://dgdi.mctes.pt/pt/consultas/catalego-industria-construcao-civil-mobiliario-decoracao>.

Germão, D.; Lopes, L.; Gomes, C.; Santos, A.; Martins, R. (2014). Impacte das Poluições Invisíveis na Fauna, Flora e Vegetação da Zona dos Mármore: Problema ou Benefício? Colloquium de Cultura, 21, 149-171. Câmara Municipal de Vila Viçosa

INNEG. Portal de Rochas Ornamentais Portuguesas. <https://geoportal.ineg.pt/pt/bdc/roq/>, consulted on April 15, 2023

Juvandes, L.F.P. (2002). Materiais Compósitos Reforçados com Fibras, FRP. Ciência dos Materiais, Licenciatura em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, pp. 76.