

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA A CRISTALIZAÇÃO SALINA E AOS CICLOS DE MOLHAGEM E SECAGEM EM ROCHAS AGLOMERADAS PRODUZIDAS COM RESÍDUOS DE QUARTZITO, GRANITO E DIFERENTES RESINAS LIGANTES

EVALUATION OF RESISTANCE TO SALT CRYSTALLIZATION AND WETTING DRYING CYCLES IN AGGLOMERATED STONES PRODUCED FROM QUARTZITE AND GRANITE WASTE USING DIFFERENT BINDER RESINS

Caio Barboza Louzada

Aluno de Graduação da Engenharia de Minas 10º período
Instituto Federal do Espírito Santo - IFES
Período PIBIC/CETEM: setembro de 2025 a agosto de 2026
caiolouzada@gmail.com

Mariane Costalonga de Aguiar

Orientadora, Química, D.Sc.
maguiar@cetem.gov.br

Evanizis Dias Frizzera Castilho

Coorientadora, Engenharia Civil, D.Sc.
evanizis@ifes.edu.br

RESUMO

A crescente demanda por materiais sustentáveis na construção civil tem impulsionado pesquisas voltadas ao aproveitamento de resíduos da indústria de rochas ornamentais, visando reduzir impactos ambientais e agregar valor a esses materiais. Neste contexto, objetivo com este trabalho foi analisar se diferentes tipos de resinas ligante, utilizadas na fabricação de rochas aglomeradas a partir de resíduos de quartzito e granito, influenciam nas propriedades físico-químico mecânico quando submetidos aos ensaios de alterabilidade salina e molhagem e secagem. Foram utilizados resíduos provenientes da extração e do beneficiamento, além de resinas epóxi e poliuretano vegetal (PUV) para a produção das rochas aglomeradas artificiais. Essas rochas foram produzidas pela técnica de vibrotermocompressão a vácuo. Ao todo, foram produzidas dezesseis rochas, das quais foram confeccionados corpos de prova conforme normas técnicas específicas para os ensaios de resistência à cristalização salina e durabilidade por molhagem e secagem. Os ensaios consistiram na exposição cíclica das amostras a soluções salinas e a condições alternadas de umedecimento e secagem, simulando mecanismos de degradação frequentemente observados em ambientes de serviço. A avaliação foi realizada por meio da determinação da perda de massa após os ciclos experimentais, permitindo analisar a influência do tipo de resina na resistência dos materiais. De forma geral, os resultados indicaram diferenças de desempenho entre os sistemas ligantes avaliados, evidenciando maior estabilidade das rochas produzidas, contribuindo para o desenvolvimento de rochas aglomeradas mais duráveis e sustentáveis. Reforçando o potencial do aproveitamento de resíduos de quartzito e granito como alternativa tecnológica para aplicações na construção civil.

Palavras chave: Rochas aglomeradas, resina, resíduos.

ABSTRACT

The growing demand for sustainable materials in civil construction has driven research focused on utilizing waste from the ornamental stone industry, aiming to reduce environmental impacts and add value to these materials. In this context, the objective of this work was to analyze whether different types of binder resins, used in the manufacture of agglomerated stones from

quartzite and granite waste, influence the physical-chemical-mechanical properties when subjected to saline alterability and wetting and drying tests. Waste from extraction and processing, as well as epoxy and vegetable polyurethane (PUV) resins, were used to produce the artificial agglomerated stones. These stones were produced using the vacuum vibrothermocompression technique. In total, sixteen stones were produced, from which test specimens were made according to specific technical standards for the tests of resistance to saline crystallization and durability by wetting and drying. The tests consisted of the cyclic exposure of the samples to saline solutions and alternating wetting and drying conditions, simulating degradation mechanisms frequently observed in service environments. The evaluation was carried out by determining the mass loss after the experimental cycles, allowing for the analysis of the influence of the resin type on the materials resistance. In general, the results indicated performance differences between the evaluated binder systems, highlighting greater stability of the produced stones, contributing to the development of more durable and sustainable agglomerated stones. This reinforces the potential of utilizing quartzite and granite waste as a technological alternative for applications in civil construction.

Keywords: Agglomerated stone; resin; waste.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de rochas ornamentais. Dito isso, o aumento da busca por alternativas sustentáveis na construção civil tem impulsionado pesquisas voltadas ao reaproveitamento de resíduos provenientes da indústria de rochas ornamentais (Aguiar et al., 2024). Dentre os materiais mais desejado no mercado atual, encontra-se o quartzito e o granito, cujos resíduos são produzidos em grandes quantidades durante os processos de extração e beneficiamento, constituindo um importante passivo ambiental.

De acordo com a norma EN 14618 (Asociación Española de Normalización y Certificación, 2011), define-se como rocha aglomerada o produto manufaturado em processo industrial a partir de uma mistura de agregados, resina e ligante, que contribuem para o aprimoramento das propriedades do material. Nesta etapa de fabricação utilizam-se ligantes, geralmente resinas termofixas à base de epóxi ou poliéster e também a resina biodegradável de poliuretano vegetal.

A análise dessas propriedades se torna indispensável afim de identificar possíveis alterações que possam comprometer a aparência e o desempenho físico-químico e mecânico do material. Como consequência, diversos estudos têm sido desenvolvidos com rochas aglomeradas para avaliar suas propriedades (Castilho et al., 2023; Gadioli et al., 2023; Agrizzi et al., 2022). Segundo (Borba et al., 2011) essas alterações podem comprometer a estética, a durabilidade e, principalmente, a segurança quando essas pedras são aplicadas na construção civil.

Neste trabalho, busca-se analisar possíveis patologias nas rochas produzidas a partir dos ensaios de alterabilidade salina e resistência a molhagem e secagem em corpos de prova produzidos com resíduos de quartzito, granito e resinas ligantes com propriedades distintas.

2. OBJETIVOS

O objetivo com este trabalho foi analisar se diferentes tipos de resinas ligante, utilizadas na fabricação de rochas aglomeradas a partir de resíduos de quartzito e granito, influenciam nas propriedades físico-químico mecânico quando submetidos aos ensaios de alterabilidade salina e molhagem e secagem.

3. METODOLOGIA

Os materiais empregados neste estudo foram: resíduos de quartzito e granito oriundos da extração e do beneficiamento (serragem utilizando tear multifio) e como agente ligante as resinas de poliuretano vegetal (derivada do óleo de mamona) e epóxi. O quartzito utilizado foi o Perla Venata e o granito Branco Dallas.

Os resíduos foram classificados em três faixas granulométricas: grossa, média e fina. O material proveniente da extração foi processado para obtenção das granulometrias grossa e média, enquanto o resíduo do beneficiamento foi utilizado na granulometria fina. Em seguida, essa mistura, em combinação com a resina, foi introduzida em um molde, que é fechado para a realização do processo de vibrotermocompressão a vácuo.

Foram produzidas 16 rochas, sendo 8 delas com resina epóxi (4 com resíduos de granito e 4 com resíduos de quartzito) e outras 8 com resina poliuretano vegetal (PUV) com os respectivos resíduos de granito e quartzito. Com essas rochas, foram preparados corpos de provas seguindo as normas ABNT NBR 13554/2012, para o ensaio de durabilidade a molhagem e secagem e a norma EM 12370/2020, para o ensaio de resistência a cristalização salina. Os ensaios foram realizados no laboratório de caracterização do Instituto Federal do Espírito Santo, campus Cachoeiro de Itapemirim. A Tabela 1 apresenta as combinações das rochas produzidas.

Tabela 1: Combinações das rochas aglomeradas produzidas.

Resíduo	Resina	Resíduo	Resina
Quartzito	Epóxi	Granito	Epóxi
	Mamona (PUV)		Mamona (PUV)

Segundo a norma para o ensaio de molhagem e secagem, são necessários 5 corpos de prova para cada material, de tamanho 100 x 25 x 10 mm, submetidos a dez ciclos de molhagem e secagem, conforme procedimento descrito na norma. Em cada ciclo os corpos de prova foram submetidos a 8 movimentos repetitivos (4 para frente e 4 para trás), nas duas faces do corpo de prova, com uma escova de tiras de aço. Após a escovação, os corpos de prova são mergulhados na água deionizada e em seguida levados para estufa a 70°C. Cada ciclo tem duração de 48 horas, sendo: 42 horas na estufa, 1 hora para realizar a escovação e descansar, 5 horas submersos na solução.

Para o ensaio de resistência a cristalização salina, são necessários 6 corpos de prova para cada material, de tamanho 40 x 40 mm, que foram submetidos a 15 ciclos onde inicialmente as rochas foram secas em estufa ventilada a uma temperatura de 105°C e pesadas em balança de precisão, até atingirem massa constante.

Em seguida, as amostras foram imersas em uma solução de sulfato de sódio anidro (Na_2SO_4) a 14%, coberto com uma tampa de acrílico para evitar evaporação. Cada ciclo teve duração de 24 horas, sendo: 18 horas na estufa, 4 horas no dessecador, 2 horas submersos na solução de sulfato de sódio.

Para preparar a solução, foi diluído 1 kg de sulfato de sódio para 6 litros de água deionizada. Sendo utilizado, por ciclo, apenas a quantidade de solução necessário para cobrir por completo os corpos de prova. Para otimizar a diluição, foi utilizado um misturador magnético.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Alterabilidade por Ciclos de Cristalização Salina

A cristalização salina simula a degradação causada pela presença de sais solúveis em ambientes úmidos, onde a formação e crescimento de cristais nos poros do material induzem tensões internas que podem levar à fissuração e perda de massa.

Os resultados apresentados na Tabela 2 demonstram diferenças expressivas entre os sistemas ligantes. As amostras produzidas com resina poliuretana vegetal (PUV) não apresentaram perda de massa mensurável, tanto para o quartzito quanto para o granito após os 15 ciclos. Essa estabilidade indica elevada resistência da matriz de PUV à penetração de solução salina e à pressão de cristalização.

Tabela 2: Ensaio de alterabilidade por cristalização salina nas rochas aglomeradas produzidas.

Perda de Massa por Cristalização Salina				
Resíduo x Resina		Média (%)	Desvio padrão	Coefficiente de Variação
Quartzito	PUV	0	0,010	0
	Epóxi	0,79	0,080	0,007
Granito	PUV	0	0,033	0,001
	Epóxi	0,91	0,220	0,046

Em contraste, a degradação observada está associada, principalmente, à absorção de água, às tensões geradas pela expansão e contração durante os ciclos de crescimento de cristais de sal no interior dos poros. Fatores esses que favorecem a formação de microfissuras e a perda de massa. O maior valor observado para o granito pode estar relacionado à sua microestrutura mineralógica heterogênea, que atua como concentradora de tensões durante os ciclos de cristalização, favorecendo o destacamento de grãos. O maior coeficiente de variação das amostras de epóxi também sugere menor uniformidade do compósito.

Esses resultados estão em acordo com Castilho et al., 2023; 2026, que verificaram maior susceptibilidade de matrizes epóxi ao ataque por sais em rochas aglomeradas.

4.2 Ensaio de Molhagem e Secagem

O ensaio de molhagem e secagem (Tabela 3) avalia a durabilidade do material frente a ciclos de absorção de água e perda de umidade, mecanismo comum em fachadas e revestimentos expostos às intempéries. A variação cíclica de volume pode gerar microfissuras e comprometer a coesão da matriz.

Tabela 3: Ensaio de alterabilidade por molhagem e secagem nas rochas aglomeradas produzidas.

Perda de Massa por Molhagem e Secagem				
Resíduo x Resina		Média	Desvio padrão	Coefficiente de Variação
Quartzito	PUV	0,13	0,013	0
	Epóxi	0,52	0,055	0,003
Granito	PUV	0,15	0,007	0
	Epóxi	0,94	0,217	0,047

Conforme apresentado na Tabela 3, novamente a resina PUV apresentou desempenho superior. A natureza da resina de óleo de mamona, com cadeias mais flexíveis, provavelmente permitiu acomodar as expansões e contrações sem gerar danos significativos na estrutura. Já para a combinação epóxi + granito resultou na maior perda de massa de todo o estudo, com alto coeficiente de variação. Esse comportamento reforça que os materiais com maior degradação apresentaram maior suscetibilidade ao intemperismo acelerado, indicando menor estabilidade da interface matriz-partícula e maior facilidade para a propagação de danos induzidos pelos ciclos de envelhecimento.

A superioridade da PUV em relação ao epóxi também foi reportada por Gadioli et al., 2023 em estudo com rochas aglomeradas, corroborando a tendência observada neste trabalho.

5. CONCLUSÕES

Embora o coeficiente de variação apresentados sejam baixos, indicando boa consistência experimental, os resultados demonstraram que o tipo de resina exerce influência na durabilidade das rochas aglomeradas produzidas com resíduos de quartzito e granito, contribuindo para o desenvolvimento de materiais mais duráveis e sustentáveis. As amostras produzidas com resina de poliuretano vegetal apresentaram menores perdas de massa tanto nos ensaios de cristalização salina quanto no de molhagem e secagem, indicando potencial para aplicações em ambientes sujeitos à umidade e à presença de sais.

Em contrapartida, as amostras produzidas com resina epóxi apresentaram maiores perdas de massa e maior variabilidade dos resultados, especialmente quando associadas aos resíduos de granito onde apresenta em geral, sua maior porosidade, microestrutura mineralógica heterogênea e presença de interfaces entre diferentes minerais podem favorecer a concentração de tensões durante os ciclos de degradação, resultando em maior perda de massa.

Desta forma, a resina poliuretana vegetal (PUV) mostrou-se uma alternativa promissora para a produção de rochas aglomeradas com maior durabilidade.

6. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq (processo nº134478/2024-0) pelo apoio financeiro da bolsa concedida. Em especial, aos meus orientadores, Mariane Costalonga de Aguiar e Evanizis Dias Fizera Castilho pelo apoio e ensinamentos na realização do estudo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

ABNTNBR13554; Soil-Cement – Wetting and Drying Durability Test – Test Method. Associação Brasileira de Normas Técnicas: São Paulo, Brazil, 2012.

AGUIAR, M.C.; FERNANDES, M.C.S.; SANT’ANA, M.A.K.; SAGRILLO, V.P.D.; ANASTÁCIO, A.S.; GADIOLI, M.C.B. Eco-Efficient Artificial Stones Produced Using Quartzite Quarry Waste and Vegetable Resin. *Sustainability*, v. 16, p. 247, 2024.

Asociación Española de Normalización y Certificación -AENOR. UNE –EN 14618. Piedra Aglomerada. Terminología y clasificación, 2011.

AGRIZZI, C.P.; CARVALHO, E.A.S.; GADIOLI, M.C.B.; BARRETO, G.N.S.; AZEVEDO, A.R.G.; MONTEIRO, S.N.; VIEIRA, C.M.F. Comparison between Synthetic and Biodegradable Polymer Matrices on the Development of Quartzite Waste-Based Artificial Stone. *Sustainability*, v. 14, p. 6388-18, 2022.

BORBA, A.L.S.; FRANZEM, M.; MENDES, V.A. Importância do controle de qualidade na aplicação de rochas ornamentais como revestimento na construção civil. *Revista Rochas de Qualidade*, ano XLIV, nº 216, pág. 184 -190, 2011.

CASTILHO, E.D.F.; SANT’ANA, M.A. K.; TEIXEIRA, D.N.L.; SILVA, M.E.D.; GADIOLI, M.C.B. Evaluation of the Technological Properties of Artificial Agglomerated Stones in Epoxy Resin and Castor Oil-Based Vegetable Polyurethane Matrix. *RGSA (ANPAD)*, v. 18, p. 04249, 2023.

CASTILHO, E.D.F.; GADIOLI, M.C.B.; AGUIAR, M.C.; Evaluation of the Alterability of Natural and Artificial Agglomerated Stones Produced in Epoxy Matrix. *The polymers*, v. 18, 1164, 2026

GADIOLI, M.C.B.; AGRIZZI, C.P.; AGUIAR, M.C.; LIMA, R.M.; PEDRUZZI, A.D.; RIBEIRO, C.E.G. Evaluation of the contents of ornamentals stones wastes and vegetable polyurethane resin in the production of engineered stones. *Journal Of Building Engineering*, v. 78, p. 107594, 2023.