

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS OPERACIONAIS PARA PRODUÇÃO DAS ROCHAS AGLOMERADAS

STUDY OF THE INFLUENCE OF OPERATIONAL VARIABLES FOR THE PRODUCTION OF AGGLOMERATED STONES

Leandro Marçal Fonseca Couto

Aluno de Graduação da Engenharia de Minas, 8º período
Instituto Federal do Espírito Santo
Período PIBIC ou PIBITI/CETEM: outubro de 2022 a outubro de 2023
leandromarcalbd@hotmail.com

Rondinelli Moulin Lima

Orientador, Engenheiro Químico, D.Sc.
rlima@cetem.gov.br

Mônica Castoldi Borlini Gadioli

Coorientadora, Engenharia Química, D.Sc.
mborlini@cetem.gov.br

RESUMO

O Brasil é um dos maiores produtores de rochas ornamentais do mundo, setor que está se desenvolvendo e crescendo cada vez mais no país. A geração de resíduos no processo de produção das rochas ornamentais é um dos principais problemas na área, onde ocorre a perda de aproximadamente um terço do bloco original, na transformação deste para chapas. Dessa forma, as rochas aglomeradas surgem como uma alternativa inovadora na reutilização destes resíduos, pois elas são compostas basicamente de agregados naturais misturados com uma resina polimérica. Entretanto, poucos estudos tem se empenhado em analisar a influência das condições operacionais na produção das rochas aglomeradas. Desse modo, o objetivo deste trabalho foi o estudo e análise das variáveis operacionais utilizadas na produção das rochas aglomeradas. Primeiramente foi realizado a caracterização dos resíduos por meio de Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX). Depois, com intuito de avaliar a influência da pressão, temperatura e tempo de prensagem, as placas foram produzidas seguindo um planejamento fatorial 2^k . A resistência à flexão das rochas produzidas foi utilizada como variável resposta do planejamento. Os ensaios de FRX demonstraram que o resíduo do casqueiro é composto primordialmente de quartzito, enquanto do tear multifio sugere a presença de pequenas concentrações de resíduo de mármore. A condição operacional com 35°C, 10 tons e 2h produziu uma rocha aglomerada com resistência de 23,10 MPa, superior que as rochas aglomeradas da literatura. A análise do planejamento fatorial 2^k indicou que nenhuma das condições operacionais analisadas influenciou significativamente na resistência a flexão.

Palavras-chave: resíduos, rochas ornamentais, rochas aglomeradas.

ABSTRACT

Brazil is one of the largest producers of ornamental stones in the world, a sector that is developing and growing more and more in the country. The generation of waste in the production process of dimension stones is one of the main problems in the area, where approximately one third of the original block is lost when it is transformed into slabs. In this way, agglomerated stones appear as an innovative alternative in the reuse of these residues, as they are basically composed of natural aggregates mixed with a polymeric resin. However, few studies have been engaged in analyzing the influence of operational conditions in the production

of agglomerated stones. Thus, the objective of this work was the study and analysis of the operational variables used in the production of agglomerated stones. First, the characterization of the residues was carried out using X-Ray Fluorescence Spectrometry (FRX). Then, in order to evaluate the influence of pressure, temperature and pressing time, the plates were produced following a 2k factorial design. The bending strength of the produced stones was used as a planning response variable. The FRX tests showed that the waste from the casqueiro is primarily composed of quartzite, while from the multiwire loom it suggests the presence of small concentrations of marble waste. The operational condition with 35°C, 10 tons and 2h produced an agglomerated stone with flexural strength of 23.10 MPa, higher than the agglomerated stones in the literature. Analysis of the 2k factorial design indicated that none of the operational conditions analyzed significantly influenced flexural strength.

Keywords: waste, ornamental stones, agglomerated stones.

1. INTRODUÇÃO

O mercado brasileiro tem dado cada vez mais valor às rochas aglomeradas, que estão sendo amplamente utilizadas na construção civil. As importações desses materiais superam em dobro as rochas naturais, o que reflete sua importância no mercado nacional. De acordo com a ABIROCHAS (2022), as importações brasileiras de rochas aglomeradas alcançaram US\$ 54,7 milhões e 94 milhões de toneladas, registrando um aumento de 39,7% e 35,8%, respectivamente, em comparação com 2020.

Um dos principais desafios na cadeia produtiva das rochas ornamentais é a alta geração de resíduos, resultando em grandes perdas de matéria-prima, que podem chegar a 83%. No Brasil, estima-se que sejam produzidas cerca de 20 milhões de toneladas de resíduos grossos nas pedreiras e 2,5 milhões de toneladas de resíduos finos nas indústrias, sendo que 2 milhões de toneladas vêm apenas do estado do Espírito Santo (VIDAL et al., 2014). Esse problema é agravado pelo fato de que a maior parte desses resíduos é destinada a aterros, onde se acumulam e podem trazer desafios no futuro para sua remoção.

Uma alternativa para o aproveitamento dos resíduos de rochas ornamentais é a sua utilização na produção de rochas aglomeradas. Essas rochas são compostas por uma pequena porcentagem de material polimérico, geralmente resina, e uma alta porcentagem de agregados naturais, como quartzo, granito, cristais de vidro, entre outros (REVUELTA, 2021). Dessa forma, os resíduos podem ser empregados como agregados naturais.

Lee et al. (2005) estudaram o efeito da pressão de compactação, condição de vácuo e frequência de vibração, nas propriedades físicas de rochas aglomeradas fabricadas com resíduo de vidro. De acordo, quando se utilizou uma pressão de compactação de 14,7 MPa, frequência de vibração de 33,3 Hz e vácuo de 50 mmHg, produziu a melhor rocha aglomerada, com 148,8 MPa de resistência a compressão e 0,02% de absorção de água.

Entretanto, não existem muitos estudos que se empenharam em analisar a influência das variáveis operacionais na produção das rochas aglomeradas e há uma necessidade de aproveitar os resíduos de rochas ornamentais.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é estudar e avaliar a influência de diferentes variáveis operacionais na produção das rochas aglomeradas, fabricadas utilizando resíduo de rochas ornamentais.

3. METODOLOGIA

3.1 Materiais

Para fabricação das rochas aglomeradas foi utilizado como matéria prima o resíduos de rochas ornamentais proveniente da extração (casqueiro) e do beneficiamento (tear multifio). O resíduo coletado do casqueiro, foi moído e peneirado em duas granulometrias, grossa (2,38 a 0,707 mm) e média (0,707 a 0,063 mm). Já para a granulometria fina (<0,063mm) foi utilizado o resíduo proveniente do tear multifio.

3.2 Caracterização dos Resíduos de Rochas Ornamental

Para se obter um melhor conhecimento a respeito dos resíduos, realizou-se a caracterização dos materiais coletados por meio de análise de Fluorescência de Raios-X (FRX).

A composição química das amostras foi determinada utilizando espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) no espectrômetro WDS modelo Axios Max (Panalytical), localizado no CETEM, em Cachoeiro de Itapemirim. As pastilhas foram preparadas utilizando uma prensa automática VANEON, com ácido bórico (H_3BO_3) como aglomerante, na proporção de 1:0,3-2,0g da amostra seca a 105°C por 12 horas e 0,6g de ácido bórico. Os resultados semiquantitativos estão expressos em % (peso), calculados como óxidos normalizados a 100%.

3.3 Produção das Rochas Aglomeradas

Para a fabricação das rochas aglomeradas seguiu-se a proporção de partículas grossas, médias e finas recomendado por Agrizzi et al. (2022), onde utilizou-se de 66,66% de partículas grossas, 16,67% de partículas médias e 16,67% de partículas finas. Essa carga mineral foi misturada com 10% da resina poliuretana vegetal, derivada do óleo de mamona.

A mistura foi colocada em um molde e levado à uma prensa hidráulica com aquecedor acoplado, onde foi possível realizar o controle da variação da pressão (P) e temperatura (T), além de cronômetro para a medição do tempo de compactação (T_p).

Para analisar a influência das condições operacionais, seguiu-se de um planejamento fatorial 2^k , conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Planejamento fatorial 2^k utilizado para analisar a influência das variáveis operacionais.

Nº Placas	T (°C)	P (tons)	T_p (h)
1	35	10	1
2	35	10	2
3	35	20	1
4	35	20	2
5	65	10	1
6	65	10	2
7	65	20	1
8	65	20	2

Cada rocha produzida tem dimensões de 200 x 200 mm e espessura de 15mm e após sua produção, elas foram destinadas a uma estufa para realização da pós-cura da resina, ficando três dias com 60°C e um dia a 80°C.

3.4 Resistência a Flexão

A resistência a flexão das placas foi utilizada como variável resposta do planejamento fatorial 2^k . Primeiramente as placas foram cortadas em corpos de prova de 200x50 mm e depois seco em estufa a 70°C durante 24 h. A resistência a flexão foi determinada em uma prensa EMIC da linha DL, seguindo as condições da norma europeia EN 14617-2.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta as composições químicas dos resíduos analisados, casqueiro e tear multifio. Nota-se para que a alta concentração de óxido de sílica (SiO_2) está associada com a fase cristalina do quartzo. Percebe-se que para o resíduo do tear multifio apresenta uma concentração menor de óxido de sílica e uma concentração maior de óxido de cálcio (CaO) e de perda por calcinação (PPC), quando comparado com o casqueiro. Isso sugere uma possível presença de resíduos de mármore, uma vez que rochas carbonáticas apresentam em sua composição principalmente CaO e MgO, e a PPC se deve provavelmente pela decomposição térmica dos carbonatos.

Tabela 2: Composição química do casqueiro e do tear multifio.

Resíduo	Composição química (%)					
	SiO_2	Al_2O_3	MgO	Fe_2O_3	CaO	*PPC
Casqueiro	97,70	0,771	0,465	0,213	0,186	0,52
Tear Multifio	89,5	1,28	1,83	-	2,28	4,64

Os resultados de resistência a flexão para cada condição operacional do planejamento fatorial 2^k, são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Resultado do planejamento fatorial 2^k.

Nº Placas	T (°C)	P (tons)	Tp (h)	Resistência a Flexão (MPa)
1	35	10	1	16,72 ± 0,92
2	35	10	2	23,10 ± 0,57
3	35	20	1	21,53 ± 0,57
4	35	20	2	19,51 ± 0,67
5	65	10	1	18,78 ± 1,13
6	65	10	2	18,28 ± 0,19
7	65	20	1	15,42 ± 0,70
8	65	20	2	22,32 ± 0,90

Analisando a Tabela 3 nota-se que a placa 2, onde foi produzida com 35°C de temperatura, 20 tons de pressão e 1 hora de tempo foi a que apresentou a maior resistência à flexão (23,10 MPa). Destaca-se também as placas 3 e 8 que apresentaram resultados próximos da placa 2.

Agrizzi et al. (2022) desenvolveram rochas aglomeradas com 85% de resíduo de quartzito e 15% de resina poliuretana vegetal. Para a fabricação das placas os autores utilizaram uma temperatura de 80°C, pressão de 10 tons e encontraram uma resistência à flexão de 10,77±0,64 MPa. Já Gomes et al. (2022), utilizando 85% de resíduo de granito e 15% de resina poliuretana, nas condições operacionais de temperatura 80°C, pressão de compactação de 10 tons e tempo de 20 minutos, produziram uma rocha aglomerada com resistência à flexão de 17,31±0,82 MPa. Dessa forma, nota-se que para algumas condições operacionais apresentado na Tabela 3 foi possível produzir rochas aglomeradas com uma resistência à flexão superior que as apresentadas por Agrizzi et al. (2022) e Gomes et al. (2022).

Os resultados da Tabela 3 foram utilizados para calcular a significância estatística dos efeitos das condições operacionais sobre a resistência à flexão das placas aglomeradas. A significância de cada parâmetro foi determinada por meio da técnica de regressão associada à análise de variância, utilizando 5% como nível de significância ($\alpha=0,05$).

A análise estatística do planejamento fatorial 2^k (Tabela 3) forneceu que nenhuma das variáveis operacionais (temperatura, pressão e tempo) influenciaram significativamente na resistência à flexão. Entretanto, o modelo de regressão apresentou um R² de apenas 0,40, ou seja, o modelo não explica de forma adequada toda a variabilidade dos dados. No trabalho de Lee et al. (2008), os autores encontraram que a pressão de compactação foi mais determinante da resistência a

compressão quando comparada com as outras condições operacionais analisada (frequência de vibração e vácuo). Ainda segundo os autores as outras duas condições tiveram mais influência na densidade das rochas aglomeradas produzidas.

5. CONCLUSÕES

Foi realizado a caracterização dos resíduos de quartzito utilizados na produção das rochas aglomeradas. Observou-se que o resíduo do casqueiro apresenta uma alta concentração de óxido de sílica, enquanto o resíduo do tear multifio sugere a presença do processamento de outros tipos de rochas ornamentais, como o mármore.

Foi fabricado rochas aglomeradas utilizando resíduo de quartzito e resina poliuretana vegetal sob diferentes condições operacionais. Verificou-se que quando utilizou uma temperatura de 35°C, pressão de 10 tons e 2 horas de tempo de prensagem produziu a placa com maior resistência a flexão (23,10 MPa).

Por meio da análise estatística verificou-se que nenhuma das condições operacionais analisadas influenciou significativamente na resistência à flexão das rochas produzidas. Entretanto, devido ao baixo coeficiente de regressão acredita-se que talvez outros fatores possam influenciar na qualidade de rocha e que também seja necessário realizar réplicas no planejamento para se ter uma maior confiabilidade no resultado apresentado.

6. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela bolsa concedida (processo nº 160645/2022-0), à Monica Castoldi Borlini Gadioli, Mariane Costalonga de Aguiar, Rondinelli Moulin Lima, Alan Dutra Pedruzzi pelo apoio e ensinamentos na realização dos estudos e aos técnicos do LABRO/NR-ES.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIROCHAS – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. Exportações / Importações Brasileiras. Disponível em: <http://www.abirochas.com.br>. Acesso em: Jul. 2023.

AGRIZZI, C.P. CARVALHO, E.A.S.; GADIOLI, M.C.B.; BARRETO, G.N.S.; DE 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*, vol. 14, 2022.

GOMES, M.F.P.M.; CARVALHO, E.A.S.; BARRETO, G.N.S.; RODRIGUEZ, R.J.S.; MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C.M.F. Development of Sustainable Artificial Stone Using Granite Waste and Biodegradable Polyurethane from Castor Oil. *Sustainability*, vol. 14, 2022.

LEE, M.Y.; CHANG, C.H.; LIN, J.D.; SHAN, M.Y.; LEE, J.C. Artificial stone slab production using waste glass, stone fragments and vacuum vibratory compaction, *Cem. Concr. Compos.*, vol. 30, p. 583-587, 2008.

REVUELTA, M.B. *Construction Materials: Geology, Production and Applications*. 1ª ed. Springer, Switzerland. 602p, 2021.

VIDAL, W.H.; DE AZEVEDO, H.C.A.; CASTRO, N.F. *Tecnologia de Rochas Ornamentais: Pesquisa, Lavra e Beneficiamento*, Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), Rio de Janeiro, 2014.