

Investigação da influência das condições operacionais na produção de rochas aglomeradas

Investigation of the influence of operating conditions on the production of agglomerated stones

Rondinelli Moulin Lima

Bolsista PCI, Eng. Químico, D.Sc.

Mônica Castoldi Borlini Gadioli

Supervisora, Eng. Química, D. Sc.

Resumo

O conhecimento da influência das variáveis operacionais na produção das rochas aglomeradas é fundamental para a otimização de suas propriedades físico-mecânicas. Dessa forma, esse trabalho teve como objetivo investigar a influência das variáveis operacionais nas propriedades físico-mecânicas das rochas aglomeradas. As rochas aglomeradas foram produzidas utilizando resíduo de quartzito e resina poliuretana vegetal. Para avaliar a influência das variáveis operacionais, temperatura, pressão e tempo de compactação foi utilizado um planejamento fatorial 3^k . As propriedades analisadas foram a densidade, absorção de água e à resistência à flexão. A utilização de 35°C de temperatura, 20 tons de pressão e tempo de compactação de 3h resultou na rocha aglomerada com as melhores propriedades e apresentou resultados superiores que os reportados na literatura. Somente a pressão apresentou influência significativa na variável resposta densidade. O planejamento fatorial 3^k auxiliou na investigação da influência das condições operacionais nas propriedades físico-mecânicas das rochas aglomeradas. Por meio dele foi possível obter melhores resultados de densidade, absorção de água e resistência à flexão.

Palavras-chave: Rochas aglomeradas, planejamento fatorial 3^k , variáveis operacionais.

Abstract

Understanding the impact of operational variables on the production of agglomerated stones is crucial for optimizing their physical-mechanical properties. This study aimed to investigate the influence of operational variables on the physical-mechanical properties of agglomerated stones produced from quartzite waste and vegetable polyurethane resin. A 3^k factorial design was employed to assess the effects of temperature, pressure, and compaction time on the properties, including density, water absorption, and flexural strength. Optimal results were achieved using a temperature of 35°C, a pressure of 20 tons, and a compaction time of 3 hours, surpassing those reported in the literature. Notably, only pressure had a significant influence on the density response variable. The application of the 3^k factorial design facilitated a comprehensive investigation into the influence of operational conditions on the physical-mechanical properties of agglomerated stones, resulting in improved outcomes in terms of density, water absorption, and flexural strength. Further research into varying operating conditions is recommended to enhance the properties of agglomerated stones.

Keywords: Agglomerated stones, 3^k factorial design, operational variables.

1. Introdução

As rochas aglomeradas, também conhecidas como rochas artificiais ou rochas engenheiradas, são constituídas por uma pequena porcentagem de material polimérico, normalmente uma resina, e uma alta porcentagem de agregados naturais, que podem ser quartzo, granito, mármore, cristais de vidro, entre outros. Elas foram desenvolvidas inicialmente pela empresa Breton, no início da década de 70, por meio da tecnologia denominada como Bretonstone. O objetivo dessa tecnologia consiste em submeter a mistura de agregado natural e resina polimérica a um sistema de vibro-compressão sob vácuo, para a produção de uma superfície sólida cujas as propriedades sejam similares e até superiores que a das rochas naturais (REVUELTA, 2021). Dessa forma, uma das grandes vantagens, é a produção de rochas em diferentes tamanhos, formas e cores, podendo ser aplicadas em cozinhas, banheiros, pisos e revestimentos, em diferentes tamanhos, formas e cores (REVUELTA, 2021).

Diversos estudos têm se empenhado em avaliar a produção de rochas aglomeradas utilizando diferentes tipos de agregados naturais e resinas. Uma alternativa que vem se destacando é a utilização de resíduos de rochas ornamentais e de uma resina poliuretana vegetal para a fabricação de rochas aglomeradas (GADIOLI et al., 2023; GOMES et al., 2022; GOMES et al., 2019). Dessa forma, mantém a economia circular ativa, diminuindo a geração de resíduos além de desenvolver um produto totalmente eco-eficiente.

Agrizzi et al (2022) utilizou de um planejamento mistura Simplex-Lattice para ajudar a encontrar a melhor proporção granulométrica no desenvolvimento de rochas aglomeradas. Dois tipos de rochas foram produzidos, uma utilizando como material polimérico a resina epóxi e a outra a resina poliuretana vegetal a base de mamona (PUV) e como agregado natural foi utilizado resíduo de quartzito. De acordo com os autores a proporção granulométrica que apresentou os melhores resultados foi utilizando 66,66% de partículas grossas (2,38 a 2,00 mm), 16,67% de partículas médias (2,00 a 0,630 mm) e 16,67% de partículas finas (< 0,630 mm). As rochas aglomeradas produzidas com resina epóxi obtiveram valores de densidade aparente, absorção de água e resistência a flexão de $2,35 \pm 0,03 \text{ g/cm}^3$, $0,16 \pm 0,06\%$ e $27,96 \pm 1,86 \text{ MPa}$, respectivamente, enquanto para a resina PUV os valores foram $2,22 \pm 0,04 \text{ g/cm}^3$, $0,14 \pm 0,06\%$ e $10,77 \pm 0,64 \text{ MPa}$. Os autores ainda destacaram que as rochas aglomeradas produzidas tiveram resultados similares e até superiores quando comparadas com uma rocha natural quartzítica.

Apesar de vários trabalhos estarem investigando a produção de diferentes tipos de rochas aglomeradas, pouco tem se preocupado em avaliar a influências das condições operacionais de produção. Atualmente, as rochas aglomeradas tem sido desenvolvidas de maneira empírica. Lee et al. (2008) estudou a variação da pressão de compactação, do vácuo e da frequência de vibração na produção das rochas aglomeradas e verificou que o aumento da pressão, a diminuição do vácuo e o aumento da vibração resultaram em placas com menores absorção de água e com maiores densidades e resistência a compressão. Já Peng e Qin (2018) investigaram a influência do tempo de compactação e o tempo de cura nas variáveis respostas: absorção de água, densidade, resistência a flexão e resistência a compressão. Segundo os resultados dos autores o aumento do tempo de

compactação diminui a absorção de água e aumenta a densidade. O tempo de três minutos foi o que apresentou maior valor de resistência a flexão e a compressão. Quando se aumentou o tempo de cura, melhorou todas as respostas analisadas.

A compreensão da influência das condições operacionais na produção das rochas aglomeradas é fundamental para a otimização das suas propriedades físico-mecânicas, aumentando o seu valor agregado e gerando um produto de aceitação no mercado.

2. Objetivos

O objetivo desse trabalho foi utilizar o planejamento fatorial 3^k para avaliar a influência das condições operacionais, temperatura, pressão de compactação e tempo de compactação na produção de rochas aglomeradas, utilizando resíduos de quartzito e resina poliuretana vegetal.

3. Material e Métodos

Para produção das rochas aglomeradas, primeiramente foi coletado o resíduo de quartzito na empresa Petrus LTDA, localizada em Cachoeiro de Itapemirim/ES. Foram coletados o casqueiro, obtido do esquadrejamento dos blocos e um resíduo fino proveniente do corte dos blocos pelo tear multifio.

As rochas aglomeradas foram fabricadas contendo 1200g, sendo 90% em peso de agregado natural (1080g de resíduo de quartzito) e 10% de resina PUV (120g). A produção seguiu as proporções indicadas no trabalho de Agrizzi et al. (2022), com 66,66% de partículas grossas (2,38 a 2,00 mm), 16,67% de partículas médias (2,00 a 0,630 mm) e 16,67% de partículas finas (< 0,630 mm). As partículas grossas e médias foram obtidas a partir do casqueiro, que foi britado, moído e peneirado pela alcaçar as granulometrias desejadas. Já para as partículas finas utilizou-se o resíduo fino oriundo do tear multifio. Dessa forma, aproveitou-se resíduos provenientes de diferentes setores da indústria de mineração.

A mistura (resíduo mais resina) foi colocada em um molde e levada à uma prensa hidráulica com aquecedor acoplado, assim foi possível realizar o controle da variação da pressão de compactação (P) e da temperatura (T). Um cronômetro foi utilizado para medição do tempo de compactação (Tp). Após a prensagem, as rochas foram destinadas a uma estufa para realização da pós-cura da resina, ficando três dias com 60°C e um dia a 80°C. Cada rocha produzida possuía as dimensões de 200 x 200 mm e espessura de 15mm.

Foi utilizado um planejamento fatorial 3^k para avaliar a influência das condições operacionais: temperatura, pressão de compactação e tempo de compactação (Tabela 1), nas variáveis respostas: densidade aparente, absorção de água e resistência a flexão. Dessa forma, foram avaliados 3 fatores (3^3) resultando em 27 combinações experimentais.

Tabela 1. Planejamento fatorial 3³ utilizado para avaliar a influência das variáveis operacionais.

Combinação	T (°C)	P (ton)	Tp (h)	Combinação	T (°C)	P (ton)	Tp (h)
1	35	10	1	15	50	15	3
2	35	10	2	16	50	20	1
3	35	10	3	17	50	20	2
4	35	15	1	18	50	20	3
5	35	15	2	19	65	10	1
6	35	15	3	20	65	10	2
7	35	20	1	21	65	10	3
8	35	20	2	22	65	15	1
9	35	20	3	23	65	15	2
10	50	10	1	24	65	15	3
11	50	10	2	25	65	20	1
12	50	10	3	26	65	20	2
13	50	15	1	27	65	20	3
14	50	15	2				

A determinação da densidade aparente e da absorção de água seguiu-se a norma europeia EN 14617-1. Para se medir a massa seca (Msec) os corpos de prova foram secos em uma estufa a uma temperatura de 70°C durante 24h e pesados. Depois foram submersos em água durante 48h para obtenção da massa saturada (Msat) e da massa submersa (Msub), conforme apresentado pela Figura 1. A Densidade Aparente (ρ_a) e a Absorção de água (aa) foram calculadas por meio das Equações 1 e 2, respectivamente.



Figura 1. Pesagem das rochas aglomeradas: (a) massa saturada e (b) massa submersa.

$$\rho_a = \frac{M_{sec} \times \rho_{H_2O}}{(M_{sat} - M_{sub})} \quad (1)$$

$$aa = \frac{(M_{sat} - M_{sec})}{M_{sec}} \times 100 \quad (2)$$

Já a resistência à 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 os resultados de densidade, absorção de água e resistência à flexão para cada combinação das condições operacionais avaliadas.

Tabela 2. Resultado do planejamento fatorial 3³.

	T (°C)	P (ton)	Tp (h)	Densidade (g/cm ³)	Abs. de água (%)	Resist. à Flexão (MPa)
1	35	10	1	2,04 ± 0,01	1,30 ± 0,12	17,30 ± 0,22
2	35	10	2	2,13 ± 0,01	0,38 ± 0,03	23,07 ± 0,59
3	35	10	3	2,13 ± 0,01	0,25 ± 0,01	24,85 ± 1,42
4	35	15	1	2,14 ± 0,02	0,25 ± 0,02	24,82 ± 2,01
5	35	15	2	2,21 ± 0,02	0,17 ± 0,02	28,21 ± 1,65
6	35	15	3	2,17 ± 0,01	0,27 ± 0,01	24,22 ± 1,71
7	35	20	1	2,24 ± 0,01	0,15 ± 0,01	21,43 ± 0,52
8	35	20	2	2,19 ± 0,01	0,27 ± 0,02	19,51 ± 0,67
9	35	20	3	2,27 ± 0,06	0,08 ± 0,01	23,73 ± 1,29
10	50	10	1	2,11 ± 0,03	0,44 ± 0,05	19,63 ± 4,06
11	50	10	2	2,22 ± 0,05	0,22 ± 0,03	19,37 ± 1,65
12	50	10	3	2,06 ± 0,02	0,52 ± 0,04	22,80 ± 2,35
13	50	15	1	2,22 ± 0,01	0,21 ± 0,02	25,42 ± 0,77
14	50	15	2	2,18 ± 0,03	0,40 ± 0,04	24,21 ± 1,67
15	50	15	3	2,24 ± 0,02	0,20 ± 0,02	20,71 ± 1,90
16	50	20	1	2,12 ± 0,04	0,48 ± 0,04	21,62 ± 1,23
17	50	20	2	2,19 ± 0,01	0,18 ± 0,02	29,43 ± 4,97
18	50	20	3	2,21 ± 0,02	0,23 ± 0,03	20,19 ± 1,49
19	65	10	1	2,11 ± 0,03	0,31 ± 0,02	19,88 ± 2,22
20	65	10	2	2,17 ± 0,01	0,34 ± 0,04	18,29 ± 0,01
21	65	10	3	2,20 ± 0,03	0,23 ± 0,03	25,60 ± 1,67
22	65	15	1	2,13 ± 0,03	0,34 ± 0,02	21,92 ± 0,90
23	65	15	2	2,19 ± 0,03	0,26 ± 0,02	16,37 ± 2,92
24	65	15	3	2,13 ± 0,01	0,20 ± 0,01	21,93 ± 0,39
25	65	20	1	2,24 ± 0,01	0,15 ± 0,01	15,36 ± 0,79
26	65	20	2	2,10 ± 0,03	0,56 ± 0,01	22,31 ± 0,88
27	65	20	3	2,22 ± 0,01	0,20 ± 0,02	26,64 ± 1,14

Chiodi Filho e Rodrigues (2009) sugerem alguns valores de parâmetros tecnológicos para rochas naturais silicáticas e silicosas utilizadas em revestimento. Segundo os autores, para que as rochas naturais possam ser aplicadas em baixo, médio e alto tráfego elas devem apresentar absorção de água $\leq 0,4\%$ e resistência à flexão maior ou igual a 10,34 MPa. Dentre as 27 combinações das variáveis operacionais investigadas, destaca-se a combinação 9 (35°C, 20 ton e 3h). Essa combinação foi a que apresentou a maior densidade ($2,27 \pm 0,06$ g/cm³) e a menor absorção de água ($0,08 \pm 0,01\%$), além de apresentação uma resistência a flexão ($23,73 \pm 1,29$ MPa), satisfazendo os parâmetros sugeridos por Chiodi Filho e Rodrigues (2009). A maior resistência à flexão foi encontrada na combinação 17, onde a rocha aglomerada apresentou um valor de 29,43 MPa.

Agrizzi et al. (2022) produziram rochas aglomeradas utilizando resíduo de quartzito e resina PUV nas condições operacionais de 60°C de temperatura, 10 ton de pressão e 40 minutos de compactação. Os autores encontraram valores de $2,22 \pm 0,04$ g/cm³, $0,14 \pm 0,06\%$ e $10,77 \pm 0,64$ MPa, para densidade, absorção de água e resistência à flexão, respectivamente. A combinação 9 apresenta valores superiores do que os apresentados por Agrizzi et al. (2022).

A Figura 2 apresenta os gráficos padronizados de Pareto para avaliar a influência das variáveis operacionais e suas interações sobre cada uma das respostas analisadas, para um nível de significância de 5%. Esse gráfico permite identificar os fatores e interações, linear (L) e quadrático (Q), mais importantes no processo em análise.

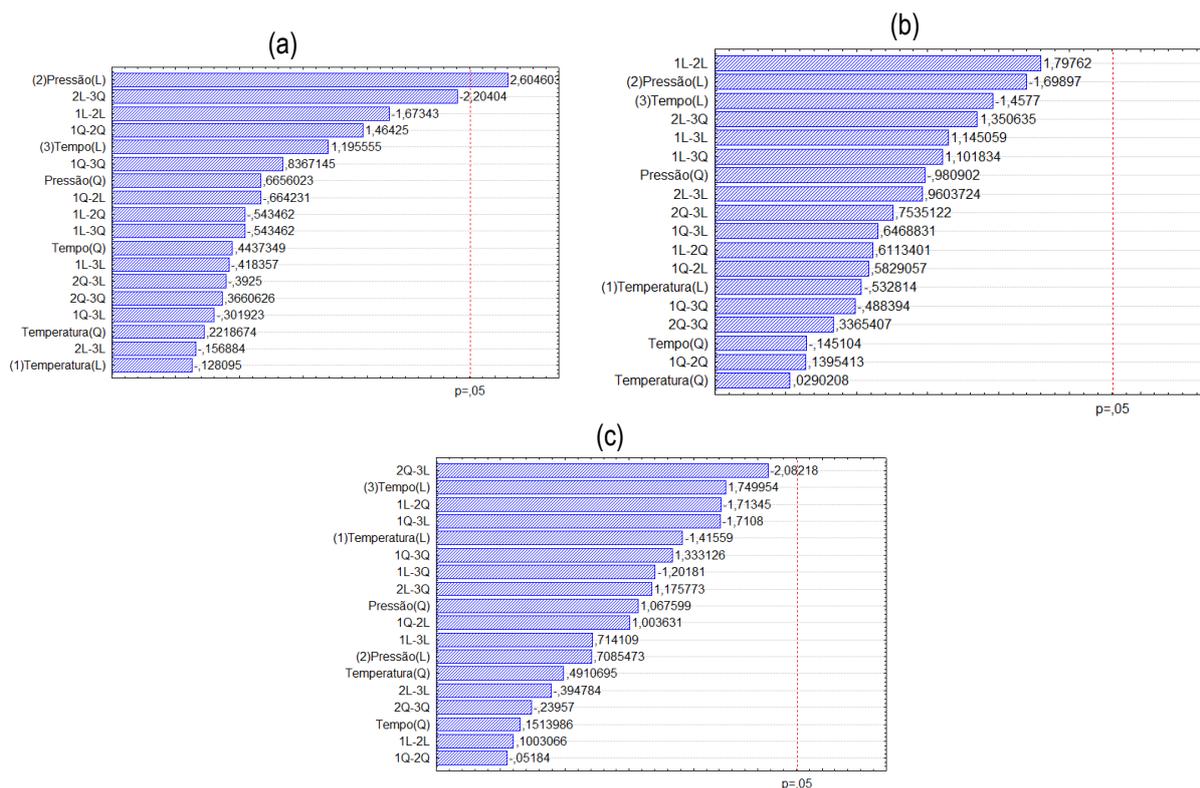


Figura 2. Gráficos de Pareto: (a) densidade, (b) absorção de água e (c) resistência à flexão.

Nota-se pela Figura 2 que para um nível de significância de 5%, a única variável operacional que foi significativa foi a pressão linear para a resposta Densidade. Tanto a absorção de água quanto a resistência a flexão, nenhum das variáveis operacionais apresentaram influência significativa na resposta. Entretanto, a interação entre Pressão Linear x Tempo Quadrático (2L-3Q) na Figura 2a (densidade) e a interação Pressão Quadrático x Tempo Linear (2Q-3L) na Figura 2c (resistência à flexão) apesar de não terem ultrapassado a linha de referência ($p=0,05$), estão próximas do ponto do corte, e podem apresentar influências consideráveis das respostas.

Nos trabalhos de Lee et al. (2008) e Peng e Quin (2018), os autores destacam respectivamente que foi observado influência das variáveis pressão e tempo de compactação nas propriedades físico-mecânicas das rochas aglomeradas produzidas. Acredita-se que, talvez a faixa de valores utilizados para avaliar o efeito da temperatura, pressão e tempo não sejam suficientemente grandes para observar uma variação significativas nas respostas analisadas. Repetições de experimentos e uma análise mais minuciosa sobre cada uma dessas variáveis operacionais devem ser feitas para se obter resultados mais precisos.

5. Conclusão

Foi utilizado um planejamento fatorial 3k para realizar uma análise da influência das variáveis operacionais temperatura, pressão e tempo de compactação das propriedades físico-mecânicas das rochas aglomeradas, produzidas com resíduo de quartzito e resina poliuretana vegetal. Verificou-se que a condição operacional com 35°C de temperatura, 20 tons de pressão durante o tempo de 3h produziu a rochas aglomerada com maior densidade ($2,27 \pm 0,06 \text{ g/cm}^3$), menor absorção de água ($0,08 \pm 0,01\%$) e valor aceitável de resistência a flexão

(23,73±1,29 MPa). Esses valores são superiores quando comparados com rochas aglomeradas semelhantes encontradas na literatura.

Verificou-se pelo gráfico de Pareto que a pressão apresentou foi a única variável operacional que influência significativa, somente na variável resposta densidade. Destaca-se que mais análises devem ser realizadas para se obter respostas mais conclusivas em relação a influência das variáveis operacionais nas propriedades físico e mecânicas das rochas aglomeradas.

6. Agradecimentos

Ao CNPq pela bolsa concedida (processo n. 306600/2023-4), à Fapes (processo nº 84376732) pelo apoio financeiro, a minha supervisora Mônica Castoldi Borlini Gadioli, aos pesquisadores Alan Dutra Pedruzzi e Mariane Costalonga de Aguiar pela colaboração no trabalho e a empresa PETTRUS LTDA.

7. Referências Bibliográficas

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**, v. 14, 2022.

CHIODI FILHO, C.; RODRIGUES, E. P. **Guia de aplicação de rochas em revestimentos**. ABIROCHAS, São Paulo, SP. 2009. 118p.

EN 14617-1. Piedra aglomerada. Métodos de ensayo. **Parte 1: Determinación de la densidad aparente y la absorción de agua**, 2013.

EN 14617-2. Piedra aglomerada. Métodos de ensayo. **Parte 2: Determinación de la resistencia a flexión**, 2008.

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, 2023.

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**, v. 14, 2022.

GOMES, M.F.P.M.; CARVALHO, E.A.S.; SOBRINHO, L.N.; MONTEIRO, S.N.; RODRIGUEZ, R.J.S.; VIEIRA, C.M.F. Physical and mechanical properties of artificial stone produced with granite waste and vegetable polyurethane. **Minerals, Metals and Materials Series**, p. 23-29, 2019.

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. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, p. 583–587, 2008.

PENG, L.; QIN, S. Mechanical behaviour and microstructure of an artificial stone slab prepared using a SiO₂ waste crucible and quartz sand. **Construction and Building Materials**, v. 171, p. 273-280, 2018.

REVUELTA, Manuel Bustillo. **Construction Materials: Geology, Production and Applications**. 1^a ed. Springer, Switzerland. 2021. 602p.