

ESTUDO ESTATÍSTICO DA PRODUÇÃO DE ROCHAS AGLOMERADAS: ANÁLISE EXPERIMENTAL DAS VARIÁVEIS OPERACIONAIS

STATISTICAL STUDY OF AGGLOMERATED STONES PRODUCTION: EXPERIMENTAL ANALYSIS OF OPERATIONAL VARIABLES

Lahís Menon de Almeida

Aluna de Graduação da Engenharia de Minas, 10º período
Instituto Federal do Espírito Santo - IFES
Período PIBITI/CETEM: setembro de 2024 a agosto de 2025
lahismenon18@gmail.com

Leonardo Luiz Lírio da Silveira

Orientador, Geólogo, D.Sc.
leolysil@cetem.gov.br

Mariane Costalonga de Aguiar

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

Rondinelli Moulin Lima

Coorientador, Engenheiro Químico, D.Sc.
rondinelli_ml@hotmail.com

RESUMO

O setor de rochas ornamentais no Brasil possui expressiva relevância econômica e destaque no cenário internacional, impulsionado por sua diversidade geológica e qualidade dos materiais. No entanto, o aumento da produção intensifica a geração de resíduos, especialmente durante o corte e beneficiamento dos blocos. Neste contexto, o objetivo com este trabalho foi realizar um estudo estatístico experimental voltado à produção de rochas aglomeradas a partir de resíduos de rochas ornamentais, utilizando o método de vibro-termo-compressão a vácuo e posteriormente analisar o efeito de variáveis operacionais. Foram avaliadas as influências das variáveis operacionais – temperatura, tempo e pressão – nas propriedades físicas e mecânicas do material, como densidade, absorção de água, porosidade e resistência à flexão. Com base em um planejamento composto central (PCC), foi adotado 16 combinações experimentais. Dentre as formulações avaliadas, a rocha correspondente à combinação 12 apresentou o melhor desempenho, com alta densidade aparente 2251,53 kg/m³, baixa porosidade (0,44%) e absorção de água (0,19%), além de expressiva resistência à flexão 29,27 MPa. Esses resultados demonstram forte correlação entre a estrutura física compacta e o comportamento mecânico, evidenciando a importância do controle das variáveis operacionais no processo produtivo. A aplicação do planejamento estatístico foi fundamental para identificar a combinação ideal de parâmetros, possibilitando otimização de desempenho e maior eficiência no uso de resíduos.

Palavras chave: Rochas aglomeradas, vibro-termo-compressão a vácuo, planejamento composto central (PCC).

ABSTRACT

The Brazilian ornamental stone sector enjoys significant economic importance and international prominence, driven by its geological diversity and material quality. However, increased production intensifies waste generation, especially during the cutting and processing of blocks. Therefore, the objective of this study was to conduct an experimental statistical study on the production of agglomerated stones from ornamental stone waste using the vacuum vibro-thermal compression method and subsequently analyze the effect of operational variables. The influence of operational variables – temperature, time, and pressure – on the material's

physical and mechanical properties, such as density, water absorption, porosity, and flexural strength, was evaluated. Based on a central composite design (CCP), 16 experimental combinations were adopted. Among the formulations evaluated, the stone corresponding to combination 12 performed best, with a high apparent density of 2251.53 kg/m³, low porosity (0.44%) and water absorption (0.19%), and significant flexural strength of 29.27 MPa. These results demonstrate a strong correlation between the compact physical structure and mechanical behavior, highlighting the importance of controlling operational variables in the production process. The application of statistical planning was essential to identify the ideal combination of parameters, enabling performance optimization and greater waste utilization efficiency.

Keywords: Agglomerated stones, vacuum vibro-thermal compression, central composite planning (CCP).

1. INTRODUÇÃO

O Brasil ocupa posição de destaque no comércio internacional de rochas ornamentais, impulsionado por sua variedade geológica e pelas características estéticas e físicas dos materiais. Esse protagonismo tem se intensificado nos últimos anos, refletindo nos dados recentes de exportação, que no 1º quadrimestre somaram US\$ 459,1 milhões, com incremento de respectivamente 19,5% frente ao mesmo período de 2024, com os Estados Unidos e a China entre os principais mercados consumidores. Tais resultados reforçam a importância econômica do setor e evidenciam a necessidade de avanços tecnológicos que permitam conciliar eficiência produtiva, aproveitamento de resíduos e menor impacto ambiental (ABIROCHAS, 2025).

Em contrapartida, o aumento na demanda por rochas ornamentais acarreta a geração expressiva de resíduos, decorrente do baixo aproveitamento volumétrico do material durante os processos de corte e beneficiamento. Dessa perda, 40% é o volume perdido do bloco de rocha durante o corte com serras multifios, dos quais 14% são de rocha de grande porte e 26% são partículas finas, designadas de finos do beneficiamento de rochas ornamentais (FiBRO) compostas de água e pó de pedra (CASTILHO et al., 2024).

A produção de rochas aglomeradas emerge como uma alternativa sustentável diante da crescente preocupação com questões ambientais, especialmente no que diz respeito ao uso responsável dos recursos naturais e à gestão adequada dos resíduos industriais (ALMEIDA; GADIOLI; AGUIAR, 2024). Além disso, a industrialização envolve um alto controle de qualidade das matérias primas, resultando em um produto final de cores homogêneas, baixa porosidade e excelente resistência mecânica. (LEE et al., 2008).

Com o aumento da utilização dos materiais artificiais no mercado brasileiro, torna-se essencial a realização de estudos que validem tecnicamente sua eficiência e viabilidade produtiva. Nesse contexto, investigações estatísticas aplicadas à produção de rochas aglomeradas tornam-se estratégicas para compreender como variáveis operacionais, como temperatura, tempo e pressão de compactação, influenciam diretamente nas propriedades finais do material. A produção da rocha aglomerada conduzida por meio do método de vibro-termo-compressão a vácuo, por exemplo, permite avaliar o comportamento dos compósitos em diferentes condições, contribuindo para o desenvolvimento de parâmetros que favoreçam a padronização da produção e assegurem a qualidade do produto final.

2. OBJETIVO

O objetivo com este trabalho foi realizar um estudo estatístico experimental voltado à produção de rochas aglomeradas a partir de resíduos de rochas ornamentais, utilizando o método de vibro-termo-compressão a vácuo e posteriormente analisar o efeito de variáveis operacionais.

3. METODOLOGIA

3.1. Material Utilizado

Para a fabricação das rochas aglomeradas, foi utilizado como agregado natural o resíduo de Quartzito, denominado comercialmente como Verde Amazonico, proveniente do beneficiamento primário (esquadrejamento de blocos). O material foi submetido ao processo de britagem (britador de mandíbulas), moagem (moinho de rolos) e peneiramento, sendo classificado em três faixas granulométricas: partículas grossas (2,38 mm a 2,00 mm), médias (2,00 mm a 0,063 mm) e finas (diâmetro inferior a 0,063 mm).

3.2. Produção das Rochas

As rochas foram produzidas, sendo 90% em peso de agregado natural de resíduo de quartzito, onde (55,56% de partículas grossas, 22,78% de partículas médias e 21,66% de partículas finas) e 10% de resina Epóxi. As proporções utilizadas do resíduo foram calculadas por meio de uma programação linear aplicada no método Simplex Lattice. (MARDEGAN; GADIOLI; AGUIAR, 2024).

O resíduo foi colocado em um recipiente e posteriormente, foi despejada a resina para o processo de homogeneização. A massa foi introduzida em um molde de 200 x 200 mm e levada a uma prensa de vibro-termo-compressão a vácuo. Após as placas serem compreendidas e retirada da prensa, foi realizado a pós-cura. A placa foi colocada em uma estufa para a realização da pós-cura da resina durante um período de 5 (cinco) horas à uma temperatura de 60°C. Após a pós-cura as rochas passaram por um processo de acabamento final, onde foram levigadas.

3.3. Condições Operacionais

Para avaliar a influência das condições operacionais, foi utilizado um planejamento composto central (PCC). Os PCCs são planejamentos de primeira ordem com adição de pontos axiais (pontos alfas) para permitir uma estimativa dos parâmetros de uma superfície de segunda ordem. São avaliados 5 níveis: $-\alpha$, -1, 0, +1 e $+\alpha$. No total foram realizadas 16 combinações experimentais sendo 2 repetições no ponto central. A Tabela 1 apresenta os valores experimentais utilizados para cada um desses níveis.

Tabela 1: Valores experimentais.

| | Combinações Experimentais | | | | |
|------------------|---------------------------|------|------|-------|-----------|
| | $-\alpha$ | -1 | 0 | +1 | $+\alpha$ |
| Temperatura (°C) | 46,36 | 60 | 80 | 100 | 113,63 |
| Pressão (MPa) | 1,17 | 3,67 | 7,35 | 11,03 | 13,48 |
| Tempo (min) | 9,77 | 20 | 35 | 50 | 60 |

3.4. Ensaios de Caracterização

Foram realizados os ensaios de Índices Físicos: densidade aparente, absorção de água e porosidade nas rochas aglomeradas produzidas, de acordo com a norma EN 14617-1 (AENOR, 2013), utilizando corpos de prova de 50 mm x 50 mm.

O ensaio de resistência à flexão 3 (três) pontos foi executado de acordo com a norma EN 14617-2 (AENOR, 2016). Foram utilizados corpos de prova com dimensões de 200 mm x 50 mm e espessura conforme os métodos de produção na rocha que obteve melhor desempenho em relação aos ensaios de Índices Físicos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Combinações Experimentais

A Tabela 2 apresenta os resultados das combinações experimentais realizadas por meio do planejamento composto central (PCC) e Índices Físicos das rochas aglomeradas produzidas.

Tabela 2: Combinações experimentais e Índices Físicos das rochas aglomeradas.

| | Planejamento Composto Central | | | Índices Físicos | | |
|--------|-------------------------------|---------------|-------------|--------------------------------|----------------------|----------------|
| | Temperatura (°C) | Pressão (MPa) | Tempo (min) | Densidade (kg/m ³) | Absorção de Água (%) | Porosidade (%) |
| 1 | 60 | 3,67 | 20 | 2022,50 ± 42,34 | 0,52 ± 0,11 | 1,12 ± 0,30 |
| 2 | 60 | 3,67 | 50 | 2072,03 ± 66,12 | 0,38 ± 0,05 | 0,79 ± 0,11 |
| 3 | 60 | 11,03 | 20 | 2124,99 ± 132,68 | 0,76 ± 0,11 | 1,54 ± 0,24 |
| 4 | 60 | 11,03 | 50 | 2190,51 ± 28,43 | 0,22 ± 0,04 | 0,49 ± 0,11 |
| 5 | 100 | 3,67 | 20 | 2086,07 ± 63,11 | 0,34 ± 0,08 | 0,67 ± 0,17 |
| 6 | 100 | 3,67 | 50 | 2081,12 ± 73,83 | 0,32 ± 0,06 | 0,66 ± 0,13 |
| 7 | 100 | 11,03 | 20 | 2241,74 ± 61,73 | 0,31 ± 0,07 | 0,64 ± 0,19 |
| 8 | 100 | 11,03 | 50 | 2236,76 ± 57,62 | 0,61 ± 0,19 | 1,64 ± 0,27 |
| 9 | 46,3 | 7,35 | 35 | 2110,16 ± 35,88 | 0,35 ± 0,05 | 0,74 ± 0,11 |
| 10 | 113,6 | 7,35 | 35 | 2155,21 ± 36,75 | 0,39 ± 0,12 | 0,78 ± 0,21 |
| 11 | 80 | 1,17 | 35 | 1977,27 ± 87,84 | 0,57 ± 0,07 | 1,20 ± 0,21 |
| 12 | 80 | 13,48 | 35 | 2251,53 ± 43,75 | 0,19 ± 0,05 | 0,44 ± 0,13 |
| 13 | 80 | 7,35 | 9,77 | 2131,91 ± 172,63 | 0,27 ± 0,08 | 0,55 ± 0,17 |
| 14 | 80 | 7,35 | 60 | 2143,92 ± 45,34 | 0,34 ± 0,08 | 0,71 ± 0,26 |
| 15 (C) | 80 | 7,35 | 35 | 2137,86 ± 52,50 | 0,26 ± 0,07 | 0,53 ± 0,18 |
| 16 (C) | 80 | 7,35 | 35 | 2155,47 ± 62,74 | 0,27 ± 0,07 | 0,58 ± 0,14 |

A composição 12, com temperatura de 80°C, pressão de 13,48 MPa e tempo de 35 min, mostrou-se a mais eficiente na compactação do compósito. Esse conjunto de condições operacionais levou à formação de uma estrutura mais densa e com melhor distribuição interna dos agregados, o que justifica o seu desempenho superior.

Portanto, a escolha da composição 12 como a melhor baseia-se em critérios técnicos, alinhados com normas da área e com o objetivo de produzir um material com alta qualidade física e mecânica.

4.2. Caracterização Tecnológica

A Figura 1 apresenta os resultados de Índices Físicos e Resistência à Flexão da rocha aglomerada produzida com maior desempenho (composição 12).

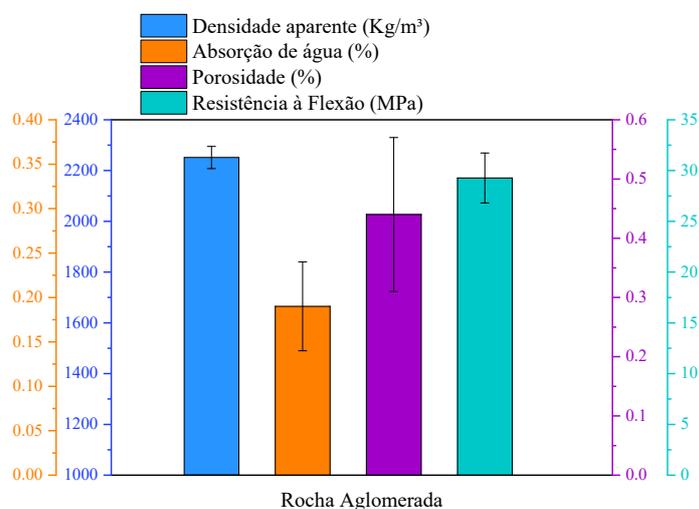


Figura 1: Rocha aglomerada produzida com maior desempenho.

A análise experimental das rochas aglomeradas produzidas a partir do planejamento composto central (PCC) evidenciou variações significativas nas propriedades físicas e mecânicas em função das combinações das variáveis operacionais. Dentre as 16 formulações avaliadas, a Rocha 12 apresentou o melhor desempenho, destacando-se nos resultados de densidade aparente, porosidade, absorção de água e resistência à flexão.

Com uma densidade aparente média de 2251,53 kg/m³, essa formulação indicou uma estrutura interna mais compacta, o que contribui diretamente para a redução da porosidade aparente (0,44%) e da absorção de água (0,19%), ambas entre as menores registradas no estudo. Esses resultados sugerem uma eficiente distribuição e compactação dos agregados na matriz, resultando em menor volume de vazios e maior integridade estrutural.

Esse comportamento físico refletiu-se diretamente no desempenho mecânico, evidenciado pela resistência à flexão de 29,27 MPa. Esse valor é considerado elevado para compósitos do tipo aglomerado e reforça a correlação entre baixa porosidade e absorção com alta resistência mecânica, conforme descrito. Em materiais compósitos, a presença de vazios atua como pontos de fragilidade que favorecem o surgimento de fissuras e fraturas sob esforço mecânico (CALLISTER; RETHWISCH, 2014). Assim, a estrutura mais densa e menos porosa da Rocha 12 favorece a distribuição uniforme de tensões internas, aumentando sua capacidade de suportar esforços de flexão.

Dessa forma, os dados demonstram que o controle preciso das variáveis operacionais impacta diretamente a qualidade final do produto, e que a integração entre as análises físicas e mecânicas é fundamental para compreender o comportamento das rochas aglomeradas. A formulação 12 destaca-se, portanto, como a mais equilibrada e eficiente dentro do conjunto avaliado, sendo um ponto de referência para formulações futuras que busquem alto desempenho físico-mecânico.

5. CONCLUSÕES

A realização deste estudo estatístico demonstra-se essencial para a avaliação criteriosa das propriedades físicas e mecânica das rochas aglomeradas produzidas por meio do plano composto central (PCC). A análise dos ensaios de caracterização tecnológica permite identificar, com embasamento quantitativo, a combinação mais eficiente entre as variáveis operacionais, representada pela rocha 12, que apresentou o melhor desempenho, evidenciado por alta densidade aparente, baixa porosidade, menor absorção de água e excelente resistência à flexão.

A correlação positiva entre os índices físicos e o desempenho mecânico destaca a importância do controle dos parâmetros de produção, já que formulações mais compactas e menos porosas resultam em maior integridade estrutural e resistência mecânica. Dessa forma, este estudo contribui significativamente para o avanço na formulação de compósitos à base de resíduos minerais, evidenciando caminhos promissores para o desenvolvimento de materiais com alto desempenho técnico e potencial de aplicação.

6. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq (processo 143529/2024-2), pelo apoio financeiro e bolsa concedida. Expresso minha gratidão à Mariane Costalonga de Aguiar e Rondinelli Moulin Lima pelo apoio inestimável e orientação ao longo deste trabalho.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIROCHAS – Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. Exportações e importações brasileiras de rochas ornamentais no 1º quadrimestre de 2025.

AENOR – Asociación Española de Normalización y Certificación. UNEEM 14617 – Piedra aglomerada. Métodos de ensayo. Parte 1: Determinación de la densidad aparente y la absorción de água, 2013.

AENOR – Asociación Española de Normalización y Certificación. UNEEM 14617 - Piedra aglomerada. Métodos de ensayo. Parte 2: Determinación de la resistencia a flexión, 2016.

ALMEIDA, L.M.; GADIOLI, M.C.B.; AGUIAR, M.C. Variabilidade de resíduos e resinas na produção sustentável de rochas aglomeradas: Uma análise dos processos e ensaios de caracterização. In: XXXII Jornada de Iniciação Científica e VIII Jornada de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação, 2024.

MARDEGAN, B.; GADIOLI, M.C.B.; AGUIAR, M.C. Aplicação da rede simplex na produção de rochas aglomeradas com resíduos de quartzito e resina epóxi. In: XXX I Jornada de Iniciação Científica e VII Jornada de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação, 2023.

CALLISTER, W.D.; RETHWISCH, D.G. Fundamentos da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

CASTILHO, E.D.F.; GADIOLI, M.C.B.; AGUIAR, M.C.; AGRIZZI, C.P.; FONTES, V.C.M.; AZEVEDO, A.R.G. Comparative analysis of the technological properties of natural and agglomerated stones in epoxy matrix. *Journal of Materials Research and Technology - JMR&T*, v. 31, p. 3149-3159, 2024.

LEE, M.Y.; KO, C.H.; CHANG, F.C.; LO, S.L.; LIN, J.D.; SHAN, M.Y.; LEE, J.C. Artificial stone slab production using waste glass, stone fragments and vacuum vibratory compaction. *Cement & Concrete Composites*, v. 30, p. 583-587, 2008.