

Otimização da absorção d'água de rochas aglomeradas produzidas a partir do planejamento Simplex-Lattice

Optimization of water absorption of agglomerated stones produced from Simplex-Lattice design

Alan Dutra Pedruzzi

Bolsista PCI, Eng. Minas

Mônica Castoldi Borlini Gadioli

Supervisora, Engenheira Química, D.Sc.

Resumo

Os resíduos gerados na produção de rochas ornamentais podem ser utilizados como matéria-prima na fabricação de novos materiais. A sua utilização como matéria prima para fabricação de rochas aglomeradas vem demonstrando um grande potencial tecnológico e econômico. O objetivo desse estudo foi utilizar o planejamento de mistura Simplex-Lattice e otimizar o seu modelo estatístico para encontrar a proporção granulométrica que produza rochas aglomeradas com a menor absorção d'água. As rochas aglomeradas foram produzidas seguindo o planejamento Simplex-Lattice, variando as proporções de partículas grossas, médias e finas. O modelo estatístico gerado foi otimizado por meio da função desejabilidade para ser obter a rocha aglomerada com menor absorção de água. Analisando somente os resultados do planejamento, a rocha com a proporção de 66,67% de grosso, 16,66% de médio e 16,66% de fino foi a que apresentou a menor absorção d'água (0,11%). Entretanto, por meio da otimização do modelo estatístico cúbico completo possibilitou identificar a melhor proporção entre as variáveis de mistura. De acordo com a otimização a combinação de 55,56% de grosso, 22,78% de médio e 21,66% de fino apresenta uma absorção de água de aproximadamente 0,06%.

Palavras-chave: rochas aglomeradas; resíduos; absorção d'água; rede simplex; processos de otimização.

Abstract

Waste generated in the ornamental stone production can be used as raw material in the manufacture of new materials. Its use as a raw material for the manufacture of agglomerated stone has demonstrated great technological and economic potential. The objective of this study was to use Simplex-Lattice mixture design and optimize its statistical model to find the particle size ratio that produces agglomerated stones with the lowest water absorption. The agglomerated stones were produced following the Simplex-Lattice design, varying the proportions of coarse, medium and fine particles. The statistical model generated was optimized using the desirability function to obtain the agglomerated stone with the lowest water absorption. Analyzing only the design results, the stone with a proportion of 66.67% coarse, 16.66% medium and 16.66% fine was the one with the lowest water absorption (0.11%). However, through the optimization of the full cubic statistical model, it was possible to identify the best proportion between the mixing variables. According to optimization, the combination of 55.56% coarse, 22.78% medium and 21.66% fine presents a water absorption of approximately 0.06%.

Keywords: agglomerated stones; waste; water absorption; simplex design; optimization processes.

1. Introdução

As rochas aglomeradas ou conhecidas comercialmente como rochas artificiais tornaram-se uma opção a substituição das rochas naturais, podendo apresentar aparência semelhante e propriedades tecnológicas superiores. Segundo a EN 14618, esses materiais são definidos como compósitos formados por uma mistura de resina, agregados minerais e aditivos. Podendo ser aplicadas como material de revestimento interno em acabamento obras civis, com diferentes tamanhos, formas e cores (DEMARTINI, 2018).

O mercado brasileiro de rochas aglomeradas tem demonstrado uma crescente expansão que vem se fortalecendo desde o ano de 2018. Apenas em 2021, as importações de rochas aglomeradas foram 71% superiores as rochas naturais (CHIODI FILHO, 2021).

De acordo com Vidal (2014), na lavra e beneficiamento de rochas ornamentais, 80% da matéria prima são transformadas em resíduos. Destacando a mineração de rochas ornamentais como uma agente geradora de impactos ambientais. Diante dos impactos ambientais decorrentes do acúmulo de resíduos de rochas ornamentais, torna-se fundamental buscar alternativas sustentáveis para seu aproveitamento, enfatizando a economia circular.

Carvalho et al (2018), verificaram em seus estudos, que a utilização de resíduos de rochas ornamentais como matéria prima para fabricação de rochas aglomeradas, demonstra um grande potencial tecnológico e econômico. Esses materiais têm mostrado propriedades mecânicas superiores em comparação com as rochas naturais, devido principalmente a baixos valores de absorção d'água, se qualificando como uma opção mais adequada para condições de serviço exigentes (AGRIZZI et al., 2022).

De maneira a ajudar no desenvolvimento de rochas aglomeradas, a rede Simplex-Lattice é um planejamento de mistura que vem auxiliando na combinação das composições granulométricas dos agregados minerais incorporados, de modo a encontrar a melhor proporção granulométrica que potencialize as propriedades do material (GOMES et al., 2018).

No desenvolvimento de novos produtos ou mesmo de rochas aglomeradas, processos de otimização também são importantes para buscar as melhores condições de desenvolvimento e formulação, com alta qualidade e viabilidade econômica (BONA et al., 2000). A utilizando da metodologia de superfície de resposta (MSR) em experimentos, engloba um conjunto de técnicas avançadas de planejamento experimental que auxiliam na otimização da melhor condição de resposta. Pois a MSR apresenta uma facilidade de interpretação e avaliação das relações entre respostas e variáveis de condição (NOVAES et al., 2017).

2. Objetivos

Este estudo tem como objetivo, a utilização do planejamento de mistura Simplex-Lattice para a produção de rochas aglomeradas com resíduos de quartzito e a otimização do modelo estatístico para encontrar a proporção granulométrica que produza rochas aglomeradas com valores mínimos de absorção d'água.

3. Material e Métodos

As rochas aglomeradas foram produzidas por meio da combinação de agregados minerais e resina, de acordo com EN 14618. As rochas foram fabricadas utilizando resíduos de rochas ornamentais denominadas geologicamente como quartzito. Como matriz polimérica, foi usada a resina epóxi.

Para a confecção dos materiais, os resíduos de quartzito foram divididos em três diferentes distribuições granulométricas: grosso (2,38 a 0,707 mm), médio (0,707 a 0,063 mm) e fino (< 0,63 mm). A distribuição granulométrica dos resíduos grosso e médio foi obtida a partir de pedaços de chapas e casqueiros oriundos do esquadramento de blocos de quartzito. Os processos de cominuição primária e secundária foram aplicados utilizando um britador de mandíbulas e moinho de rolos, por fim, os resíduos cominuídos foram peneirados até se obter as granulometrias desejadas. Já os resíduos finos foram coletados do tear multifio.

Foi utilizado um planejamento estatístico Simplex-Lattice (Figura 1) para encontrar a melhor proporção de mistura das diferentes faixas granulométricas dos resíduos. Foram analisadas 14 combinações granulométricas, entre grosso, médio e fino, conforme apresentado na Tabela 1. O planejamento foi realizado em duplicata.

Tabela 1. Planejamento Simplex.

Rochas	Grosso (%)	Médio (%)	Fino (%)
1	100,00	0,00	0,00
2	0,00	100,00	0,00
3	0,00	0,00	100,00
4	33,33	66,67	0,00
5	33,33	0,00	66,67
6	0,00	33,33	66,67
7	66,67	33,33	0,00
8	66,67	0,00	33,33
9	0,00	66,67	33,33
10	33,33	33,33	33,33
11	66,67	16,67	16,67
12	16,67	66,67	16,67
13	16,67	16,67	66,67
14	33,33	33,33	33,33

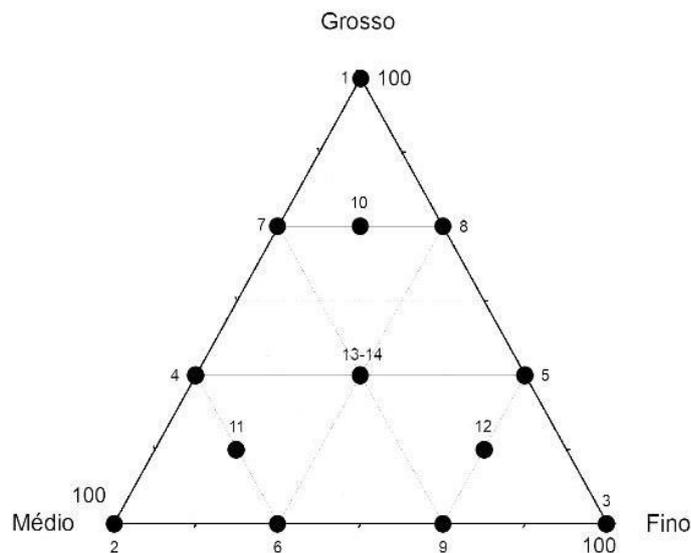


Figura 1. Representação do planejamento Simplex.

As rochas aglomeradas foram produzidas possuindo 1200g, sendo 90% (1080g) de resíduos de quartzito e 10% (120g) de resina epóxi. A produção das placas foi executada na usina piloto do CETEM/NR-ES em uma prensa hidráulica manual, com uma pressão aplicada de 33,29 MPa, durante um período de 20 minutos, a uma temperatura constante de 90°C com vibração e vácuo, nas dimensões de 200x200 e 10 mm de espessura, sendo essa metodologia conhecida como vibro-termo-compressão à vácuo. Após a fabricação, as placas foram submetidas ao processo de pós cura em uma estufa por 5 horas, a temperatura de 60°C.

Como resposta para o planejamento Simplex-Lattice foi avaliado a absorção de água das rochas produzidas. Para isso, as placas foram cortadas em corpos de prova com dimensões de 50 x 50 mm e foi utilizada uma balança Marte Científica modelo AD 2000, seguindo a norma EN 14617-1 (AENOR, 2013).

Com os resultados obtidos a função de desejabilidade foi utilizada para realizar a otimização do modelo estatístico. Essa função é um dos principais métodos de otimização para experimentos multivariáveis, principalmente para encontrar condições, que fornecem a resposta mais desejada (FERNANDES, 2016). O objetivo da desejabilidade foi encontrar uma condição que minimizasse a absorção de água.

Novaes et al (2017) defende em seus estudos, que a função de desejabilidade na otimização de métodos analíticos oferece consideráveis vantagens, como economia, eficiência e uma abordagem mais objetiva na otimização de procedimentos com múltiplas respostas.

Como método de otimização, a função de desejabilidade se fundamenta na conversão de cada resposta individual em uma grandeza adimensional de desejabilidades individuais (d_j). Com valores limitados ao intervalo [0,1], sendo 0 para um valor inaceitável, e 1 para o valor desejável (NOVAES et al., 2017). Utilizando esta conversão, se torna possível combinar os resultados experimentais encontrados para diferentes ordens de grandeza. Uma vez que, as funções de desejabilidades são especificadas, a desejabilidade global (D) é

normalmente definida como a média geométrica das (m) desejabilidades individuais (di) (Equação 1). Com isso, o processo de otimização se reduz à simples função de se calcular os níveis das variáveis que maximizem a desejabilidade global. A desejabilidade individual (d) pode ser descrita com base em uma função por partes. Nesta função, as faixas de aceitação são representadas por limites, sendo limite inferior (LI) e limite superior (LS), delimitados de acordo com uma resposta (y), que apresente um valor alvo ótimo (V) (Equação 2).

$$D = \sqrt[m]{(d_1 d_2 d_3 \dots d_m)} \quad (1)$$

$$d = \begin{cases} \left(\frac{y - LI^s}{V - LI} \right) & \text{se } LI \leq y \leq V \\ \left(\frac{y - LS^t}{V - LS} \right) & \text{se } V \leq y \leq LS \\ 0 & \text{se } y < LI \text{ ou } y > LS \end{cases} \quad (2)$$

Como o valor de d trabalha em intervalos [0,1], quando uma desejabilidade for igual a 1, demonstrará que a resposta y está coincidindo exatamente com o valor do alvo V, contudo, se o valor da resposta y começar a se afastar do alvo V, alcançando os limites, a desejabilidade irá cair, tornando-a 0.

A relação entre a taxa de variação da desejabilidade e a resposta estimada pelo modelo é determinada pelos valores dos expoentes s e t. Ao ajustar esses valores, podemos acelerar ou desacelerar essa variação, permitindo assim, conceder diferentes níveis de desejabilidade a diferentes respostas. Se estes expoentes assumirem pesos iguais a 1, a função de desejabilidade é linear e quando forem maiores do que 1, uma maior importância é dada aos valores perto do ótimo (NOVAES et al., 2017).

4. Resultados e Discussão

A Tabela 2 apresenta os resultados dos ensaios de índices físicos das rochas aglomeradas fabricadas utilizando o planejamento Simplex-Lattice. De acordo com os resultados, verificou-se que a rocha com a combinação 11 obteve a menor absorção d'água (0,11±0,01 %). Demonstrando a mistura 11 ser a melhor proporção granulométrica para a fabricação de rochas aglomeradas com resina epóxi. Esta proporção também foi encontrada por Agrizzi et al. (2020) em um planejamento Simplex-Lattice para produção de rochas aglomeradas com resina poliuretana vegetal. Os autores encontraram valores d e absorção d'água de 0,14 ± 0,06 % respectivamente, resultados semelhantes aos encontrados neste trabalho para rochas aglomeradas produzidas com resina epóxi.

Tabela 2. Resultados do ensaio de índices físico realizado com as rochas aglomeradas do planejamento SIMPLEX.

Rochas	Grosso (%)	Médio (%)	Fino (%)	Absorção D'água (%)
1	100	0	0	1,65 ± 0,17
2	0	100	0	1,60 ± 0,09
3	0	0	100	7,05 ± 0,35
4	33,33	66,67	0	0,92 ± 0,11
5	33,33	0	66,67	2,99 ± 0,20
6	0	33,33	66,67	3,94 ± 0,49
7	66,67	33,33	0	0,89 ± 0,13
8	66,67	0	33,33	0,28 ± 0,03
9	0	66,67	33,33	1,00 ± 0,08
10	33,33	33,33	33,33	0,46 ± 0,08
11	66,67	16,67	16,67	0,11 ± 0,01
12	16,67	66,67	16,67	1,00 ± 0,02
13	16,67	16,67	66,67	2,25 ± 0,14
14	33,33	33,33	33,33	0,62 ± 0,01

Com base nos resultados experimentais, as variáveis independentes: Grosso (G), Médio (M) e Fino (F), foram quantificadas em um modelo cúbico completo (Equação 3). Este modelo apresentou a melhor correlação entre os dados experimentais de mistura apresentando um coeficiente de ajuste de $R^2 = 0,9764$.

$$y = 1,63G + 1,56M + 7,06F - 2,75GM - 12,70GF - 8,51MF - 8,70GMF - 2,06GM(G - M) - 2,76GF(G - F) - 2,45MF(M - F) \quad (3)$$

Com finalidade de encontrar a melhores condições que apresente a mistura granulométrica com a menor porcentagem de absorção d'água, realizou-se um processo de otimização em superfície de resposta usando a função de desejabilidade. A análise realizada é mostrada na Figura 2.

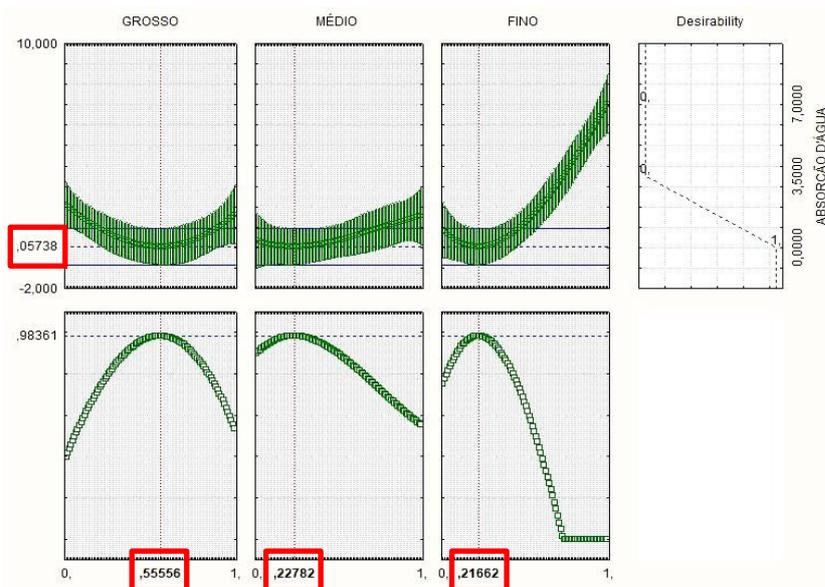


Figura 2. Análise de desejabilidade da otimização das respostas: Grosso, Médio e Fino.

Conforme a Figura 2, a condição ótima da função de desejabilidade para as misturas granulométricas encontradas foram: 55,56 % de Grosso, 22,78 % de Médio e 21,66% de Fino. De acordo com a otimização, essa mistura seria que apresentaria valores de absorção d'água mais próximos de zero, indicando o valor próximo de 0,06 %, numa confiabilidade de 98,36%.

5. Conclusão

De acordo com os resultados, a rocha com a mistura 11, que apresenta a proporção granulométrica de 66,67% grosso, 16,67% médio e 16,67% de fino, obteve os melhores resultados, indicando menor absorção de água. Sendo essa mistura, uma alternativa para fabricação de rochas aglomeradas que atendam aos requisitos tecnológicos para materiais de revestimento em ambientes com maior umidade.

A quantificação das variáveis de resposta Grosso, Médio e Fino em um modelo cúbico completo permitiu encontrar a melhor correlação entre os dados experimentais. Com o modelo foi possível realizar a otimização da variável resposta por meio da função de desejabilidade. A condição ótima de mistura granulométrica encontrada foi de 55,56 % de Grosso, 22,78 % de Médio e 21,66% de Fino, obtendo um valor de aproximadamente 0,06% de absorção de água.

A minimização da absorção de água é importante porque dentre as patologias em rochas aglomeradas, a infiltração de líquidos é a que mais pode gerar problemas de manchamento e deterioração estrutural, devido a contatos prolongados e repetitivos. Estudar formas de otimizar composições granulométricas que apresentem porcentagens de absorção d'água mínimas se torna algo fundamental, colaborando para que o material mantenha sua qualidade e resistência ao longo de sua vida útil.

6. Agradecimentos

Ao CNPq pela bolsa concedida (processo n. 306299/2023-9), aos técnicos do LABRO/NR-ES, aos pesquisadores Rondinelli Moulin Lima e Mariane Costalonga de Aguiar pela colaboração no trabalho e a empresa PETTRUS LTDA.

7. Referências Bibliográficas

AENOR – ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. **UNE-EN 14617** – Piedra aglomerada. Métodos de ensayo. Parte 1: Determinación de la densidad aparente y la absorción de agua, 2013. 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, n. 11, p. 1-18, 2022.

BONA, E.; BORSATO, D.; SILVA, F.S.S.R.; HERRERA, P.R. **Aplicativo para otimização empregando o método simplex seqüencial**. Acta Scientiarum, p. 1201-1206, 2000.

CARVALHO, E.A.S.; VILELA, N.F.; MONTEIRO, S.N.; VIEIRA, C.M.F.; SILVA, L.C. **Novel Artificial Ornamental Stone Developed with Quarry Waste in Epoxy Composite**. Materials Research, 2018.

CHIODI FILHO, C. **Balço das exportações e importações brasileiras de materiais rochosos naturais e artificiais de ornamentação e revestimento em 2021**. Disponível em: https://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2022/03/Informe-01_2022-Exportacoes-2021.pdf. Acesso em: 17 de out. 2023.

DERMATINI, T.J.C.; RODRÍGUEZ, R.J.S.; SILVA, F.S. **Physical and mechanical evaluation of artificial marble produced with dolomitic marble residue processed by diamond-plated bladed gang saws**. Journal of materials Research and Technology, 2018.

FERNANDES, J. C. B. **Função de deseabilidade na qualidade de biodiesel a partir das misturas de biodieseis de mamona e amendoim**. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias), Universidade Estadual da Paraíba. Campina Grande -PB. 2016.

GOMES, M.L.P.M.; CARVALHO, E.A.S.; SOBRINHO, L.N.; MONTEIRO, S.N.; RODRIGUEZ, R.J.S.; VIEIRA, C. M.F. **Production and characterization of a novel artificial stone using brick residue and quarry dust in epoxy matrix**. Journal of Materials Research and Technology, v. 7; p. 492-498, 2018.

NOVAES, C.G.; YAMAKI, R.T.; DE PAULA, V.F.; DO NASCIMENTO JÚNIOR, B.B.; BARRETO, J.A.; VALASQUES, G.S.; BEZERRA, M.A. **Otimização de Métodos Analíticos Usando Metodologia de Superfícies De Resposta - Parte I: Variáveis de Processo**. Revista Virtual de Química, p. 1184-1215, 2017.

VIDAL, F.W.H.; AZEVEDO, H.C.A.; CASTRO, N.F. **Tecnologia de rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento**. Centro de Tecnologia Mineral. Rio de Janeiro RJ: CETEM/MCTI, 700p. 2014.