

PRODUÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE ROCHAS AGLOMERADAS A PARTIR DO PLANEJAMENTO SIMPLEX LATTICES UTILIZANDO DIFERENTES RESINAS

PRODUCTION AND OPTIMIZATION OF AGGLOMERATED STONE FROM SIMPLEX LATTICES PLANNING USING DIFFERENT RESINS

Bruno Mardegan

Aluno de Graduação da Engenharia de Minas 8º período
Instituto Federal do Espírito Santo-IFES
Período PIBITI/CETEM: Setembro de 2023 a agosto de 2024
bruno.mardegann@hotmail.com

Rondinelli Moulin Lima

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

Mariane Costalonga de Aguiar

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

RESUMO

Com sua vasta diversidade geológica, o Brasil conta com uma ampla variedade de rochas ornamentais comerciais. O Espírito Santo se destaca como o principal beneficiador dessas rochas no país, gerando uma grande quantidade de resíduos anualmente. Uma forma eficaz de utilizar esses resíduos é na produção de rochas aglomeradas, contribuindo para minimizar o descarte em aterros. Assim este estudo tem como objetivo a utilização do planejamento de mistura Simplex-Lattice para a produção de rochas aglomeradas com resíduos de quartzito e diferentes tipos de resina, além da otimização do modelo estatístico para encontrar a proporção granulométrica que produza rochas aglomeradas com valores mínimos de absorção de água. O resíduo foi britado e moído para alcançar a granulometria desejada, classificada em grosso, médio e fino. As rochas foram produzidas seguindo o empacotamento do simplex com 14 combinações, por meio do método de termo-vibro-compressão a vácuo. Para verificar a influência do simplex na produção das rochas, foi analisado como resultado a absorção de água por meio da norma europeia EN 14617-1. Com os resultados de absorção de água foi realizada uma análise estatística para encontrar uma combinação granulométrica que obtivesse uma menor absorção de água. Os resultados das rochas otimizadas foram comparados com os obtidos pelo método simplex, e observou-se que a otimização apresentou um desempenho superior, comprovando que, utilizando um planejamento estatístico para a produção de rochas aglomeradas, é possível encontrar uma combinação ótima.

Palavras-chave: otimização, planejamento de experimentos, rochas aglomeradas.

ABSTRACT

With its vast geological diversity, Brazil has a wide variety of commercial ornamental stones. Espírito Santo stands out as the main beneficiary of these stones in the country, generating a large amount of waste annually. An effective way to use this waste is in the production of agglomerated stones, helping to minimize disposal in landfills. Therefore, this study aims to use the Simplex-Lattice mixture planning for the production of agglomerated stones with quartzite waste and different types of resin, in addition to optimizing the statistical model to find the granulometric proportion that produces agglomerated stones with minimum values of water absorption. The waste was crushed and ground to achieve the desired particle size, classified as coarse, medium and fine. The stones were produced following simplex packaging with 14 combinations, using the vacuum thermo-vibro-compression method. To verify the influence of simplex on stone production, water absorption was analyzed as a result using the European

standard EN 14617-1. With the water absorption results, a statistical analysis was carried out to find a particle size combination that achieved lower water absorption. The results of the optimized stones were compared with those obtained by the simplex method, and it was observed that the optimization presented superior performance, proving that, using statistical planning for the production of agglomerated stones, it is possible to find an optimal combination.

Keywords: optimization, experiment planning, agglomerated stone.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil apresenta grande diversidade geológica, com 900 variedades comerciais de diversos tipos petrográficos de rochas ornamentais, extraídas principalmente nas regiões Sudeste e Nordeste, totalizando 89,5% da produção brasileira. O Espírito Santo se destaca como o principal estado onde a maior parte das rochas é beneficiada no país, além de ser o maior exportador do Brasil, responsável por cerca de 82,2% das exportações, distribuindo para diversos países como EUA, China, Itália, México, entre outros. O total das exportações brasileiras em 2023 foi de US\$ 1.112,2 milhões e 1,82 Mt (ABIROCHAS, 2024).

Devido à grande produção de rochas ornamentais no Brasil, uma enorme quantidade de resíduos é gerada todos os anos. Segundo Campos (2014), há uma perda de 40% do bloco durante o beneficiamento, sendo que 14% correspondem a resíduos grosseiros, denominado casqueiro, e 26% a resíduos finos, gerados no beneficiamento de rochas ornamentais, conhecidos como FiBRO.

Uma forma de minimizar essa geração de resíduos é a inserção desse material na fabricação de novos materiais, como as rochas aglomeradas, que são compostas por agregados minerais, provenientes do beneficiamento de rochas ornamentais e uma resina ligante, sendo transformadas em produtos de alto valor agregado, podendo ser fabricados de diversas cores e tamanhos. (AGUIAR, et al. 2024; GADIOLI, et al. 2023).

2. OBJETIVO

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

3. METODOLOGIA

3.1 Material Utilizado

Para produção das rochas aglomeradas, inicialmente foi coletado o resíduo de quartzito em uma empresa localizada em Cachoeiro de Itapemirim/ES. Foram utilizados dois tipos de resíduos: o casqueiro, obtido do esquadrejamento dos blocos e o resíduo fino proveniente do corte dos blocos pelo tear multifio denominado FiBRO.

Para a confecção das rochas, o material proveniente do esquadrejamento dos blocos, foi submetido a um processo de cominuição em duas etapas. Na primeira etapa, o material foi britado em um britador de mandíbulas. Na segunda etapa, foi moído em um moinho de rolos, a fim de reduzir sua granulometria, resultando em partículas de granulometria grossa e média. Já o FiBRO foi apenas peneirado, para a obtenção do fino. Utilizou-se 3 faixas granulométricas: grosso (2,38 a 0,707 mm), médio (0,707 a 0,063 mm) e fino (< 0,063 mm).

3.2 Produção das Rochas Aglomeradas

Foram comparadas rochas aglomeradas produzidas por meio de três resinas: Poliuretana Vegetal oriundo do óleo da mamona (PUV), Epóxi e Poliéster. As rochas foram fabricadas contendo 1200g, sendo 90% em peso de agregado natural (1080g de resíduo de quartzito) e 10% de resina (120g).

As rochas foram produzidas seguindo o planejamento estatístico simplex-lattice, sendo composta de 14 variações granulométricas apresentado na Tabela 1, entre grosso, médio e fino.

Tabela 1: Planejamento Estatístico Simplex-Lattice.

	Peso (g)			%		
	Grosso	Médio	Fino	Grosso	Médio	Fino
1	1080	0	0	100	0	0
2	0	1080	0	0	100	0
3	0	0	1080	0	0	100
4	360	720	0	33,33	66,67	0
5	360	0	720	33,33	0	66,67
6	0	360	720	0	33,33	66,67
7	720	360	0	66,67	33,33	0
8	720	0	360	66,67	0	33,33
9	0	720	360	0	66,67	33,33
10	360	360	360	33,33	33,33	33,33
11	720	180	180	66,67	16,67	16,67
12	180	720	180	16,67	66,67	16,67
13	180	180	720	16,67	16,67	66,67
14	360	360	360	33,33	33,33	33,33

Para cada resina foram feitas duas combinações de simplex totalizando 28 rochas. No total foram produzidas 84 rochas. Foi analisado como variável resposta do planejamento estatístico a absorção de água das rochas produzidas.

3.3 Ensaio de Índices Físicos

Para verificar a influência do simplex para os diferentes tipos de resinas, foi realizado o ensaio de índices físicos com forme a norma europeia EN 14617-1 (AENOR, 2013) na qual se obtém como resultados a densidade aparente, porosidade e absorção de água.

As rochas produzidas têm dimensões de 200 x 200 mm. Foram retirados 3 corpos de prova de 50 x 50 mm de cada rocha para o ensaio de índices físicos de cada combinação de simplex, totalizando 6 corpos de provas.

Com os resultados dos ensaios, foi realizado uma otimização do modelo estatístico, afim de encontrar a condição que minimizasse a absorção de água. Para as melhores condições analisadas também foram determinadas a densidade aparente, porosidade e a resistência à flexão das rochas conforme as normas europeias EN 14617-1 (AENOR, 2013), EN 14617-2 (AENOR, 2016), respectivamente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta os resultados do ensaio de absorção de água das rochas aglomeradas produzidas com resina epóxi, PUV e poliéster.

Tabela 2: Resultados de absorção de água (%).

	Absorção de água (%)		
	Epóxi	PUV	Poliéster
1	1,65 ± 0,17	0,51 ± 0,10	2,08 ± 0,46
2	1,60 ± 0,09	0,97 ± 0,24	5,12 ± 0,81
3	7,05 ± 0,35	6,60 ± 2,95	--
4	0,92 ± 0,11	0,53 ± 0,09	2,08 ± 0,79
5	2,99 ± 0,20	1,58 ± 0,71	--
6	3,94 ± 0,49	1,46 ± 0,39	--
7	0,89 ± 0,13	0,40 ± 0,07	1,19 ± 0,25
8	0,28 ± 0,03	0,29 ± 0,09	6,32 ± 0,75
9	1,00 ± 0,08	0,52 ± 0,16	--
10	0,46 ± 0,08	0,33 ± 0,05	6,62 ± 1,21
11	0,11 ± 0,01	0,21 ± 0,04	2,85 ± 0,40
12	1,00 ± 0,02	0,27 ± 0,03	7,63 ± 1,29
13	2,25 ± 0,14	1,61 ± 0,69	--
14	0,62 ± 0,01	0,37 ± 0,14	7,10 ± 0,86

Observar-se que a rocha número 11, com a composição de 66,66% de partículas grossas, 16,66% de médias e 16,66% de finas, obteve o melhor resultado de absorção de água para as resinas de epóxi e PUV, apresentando valores de 0,11% e 0,21% respectivamente.

Percebe-se que nas rochas produzidas com resina poliéster não foi possível obter todos os resultados devido à propriedade da resina em contato com o resíduo. Em comparação as outras resinas, notou-se que a resina não aderiu de forma satisfatória aos resíduos, formando uma rocha seca e quebradiça. Tanto ao retirar a rocha do molde quanto durante o levigamento, a resina não conseguiu fazer a sua função de ligante e, com isso, a rocha fragmentava, não permitindo a realização dos ensaios. Observou-se que tais situações eram mais agravantes em altas concentrações de finos, pois quanto menor o tamanho da partícula maior é a sua área superficial. Portanto, para a resina poliéster, acredita-se que a utilização de 10% de resina foi insuficiente, sendo necessária uma maior concentração.

A partir dos resultados de absorção de água, foi realizado, para a resina epóxi e para a resina PUV, um processo de otimização com a finalidade de encontrar a mistura granulométrica que apresentasse a menor porcentagem de absorção de água.

De acordo com a otimização, para a resina epóxi a configuração granulométrica com 55,56% de partículas grossas, 22,78% de médias e 21,66% de finas fornece absorção de água mínima de 0,06%, com confiabilidade de 98%. Já para resina PUV, a absorção de água mínima encontrada pela otimização foi de aproximadamente 0,1% para a combinação de 0% de partículas grossas, 76,77% de médias e 22,89% de finas, com confiabilidade de 100%.

Então, foram produzidas as rochas aglomeradas com as combinações granulométricas recomendadas pela otimização. Além da absorção de água, também foram analisadas a densidade aparente, porosidade e a resistência à flexão das rochas produzidas.

A Tabela 3 apresenta os resultados encontrados para otimização da rocha com resina epóxi (OTEP) e com a resina PUV (OTPUV). Os resultados das rochas otimizadas foram comparados com os da rocha 11, que apresentou o melhor resultado do planejamento simplex.

Tabela 3: Resultados otimizados.

Rochas	11	OTEP	11	OTPUV
Resina	Epóxi	Epóxi	PUV	PUV
Grosso (%)	66,66	55,56	66,66	0
Composição Médio (%)	16,66	22,78	16,66	76,76
Fino (%)	16,66	21,66	16,66	22,88
Densidade (Kg/m3)	2199 ± 60,90	2237 ± 44,34	2102 ± 41,11	2053 ± 88,05
Absorção de água (%)	0,11 ± 0,01	0,08 ± 0,03	0,21 ± 0,04	0,20 ± 0,07
Porosidade	0,25 ± 0,03	0,13 ± 0,05	0,44 ± 0,08	0,48 ± 0,08
Resistência à flexão (MPa)	22,23 ± 1,11	24,11 ± 1,76	15,59 ± 1,70	16,67 ± 1,93

Percebe-se que mesmo realizando a otimização da resina PUV os resultados de índices físicos e da resistência à flexão foram semelhantes ao encontrado na rocha 11, porém notou-se que houve uma melhora na estética da superfície da rocha tornando-a mais uniforme. A retirada da granulometria grossa, resultou em um aspecto mais uniforme, sem porosidade aparente.

Para a resina epóxi, as placas produzidas com a composição granulométrica obtida pela otimização forneceram resultados melhores que a rocha 11. Houve uma diminuição na absorção de água e porosidade e um aumento da resistência à flexão.

De acordo com o Guia de Aplicação de Rochas em Revestimento (CHIODI FILHO, 2009), para as rochas naturais silicosas serem utilizadas em ambientes com baixo, médio e alto tráfego, o valor de absorção de água deve ser $\leq 0,4\%$ e para resistência a flexão ≥ 10 MPa, comprovando que as rochas (OTEP) e (OTPUV) encontradas por meio da otimização atendem os parâmetros para serem aplicadas nesses ambientes.

5. CONCLUSÕES

Os resultados das rochas (OTEP) e (OTPUV) comprovam que, utilizando um estudo estatístico como o simplex, é possível determinar a melhor combinação granulométrica para obter um menor índice de absorção de água.

A utilização da resina poliéster estudada mostra que a utilização de 10% de resina se torna insuficiente, pois não houve uma aderência entre a resina e o resíduo. Contudo, é ideal realizar um estudo para verificar a porcentagem adequada de resina para a produção das rochas. A resina PUV atende às propriedades para a sua aplicação em baixo, médio e alto tráfego, uma vez que é uma resina atóxica de origem vegetal.

6. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq (processo nº 126872/2023-6) pela bolsa concedida, aos meus orientadores Rondinelli Moulin Lima e Mariane Costalonga de Aguiar e aos técnicos do LABRO/NR-ES.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIROCHAS – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS – Balanço do Setor Brasileiro de Rochas Ornamentais e de Revestimento em 2023. Informe - 01/2024. Disponível em: <<https://abirochas.com.br/balancos>> Acesso em jun. 2024.

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 agua, 2013.

AENOR – ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. UNEEM 14617 - Piedra aglomerada. Métodos de ensayo. Parte 2: Determinación de la resistencia a flexión, 2016.

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

CAMPOS, A.R.D.; RIBEIRO, R.C.D.C.; CASTRO, N.F.; AZEVEDO, H.C.A.D.; CATTABRIGA, L. Resíduos: Tratamento e Aplicações Industriais. In: VIDAL, F.W.H. et al. Tecnologia de rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Centro de Tecnologia Mineral, 2014, cap. 9, p. 435.

FILHO, C.C.; RODRIGUES, E. de P. Guia de aplicação de rochas em revestimentos. Projeto Bula. São Paulo: Abirochas, 2009.

GADIOLI, M.C.; AGRIZZI, C.P.; de AGUIAR, M.C.; LIMA, R.M.; PEDRUZZI, A.D.; RIBEIRO, C.E. Evaluation of the contents of ornamentals stones wastes and vegetable polyurethane resin in the production of engineered stones. JOURNAL OF BUILDING ENGINEERING, vol. 78, p. 107594, 2023.