

Análise comparativa de parâmetros físico-mecânicos de rochas aglomeradas eco eficientes desenvolvidas por métodos industriais e laboratoriais

Comparative analysis of physical-mechanical parameters of eco-efficient agglomerated rocks developed by industrial and laboratory methods

Alan Dutra Pedruzzi
Bolsista PCI, Eng. Minas

Monica Castoldi Borlini Gadioli
Supervisora, Engenheira Química, D. Sc.

Resumo

A grande quantidade de resíduos gerados na extração e beneficiamento de rochas ornamentais que atualmente são descartados, tem apresentado aplicações que podem ser utilizados como matéria prima na fabricação de novos materiais, podendo acrescentar valor e aos mesmos possibilitar benefícios econômicos e ambientais, aos setores envolvidos. As rochas aglomeradas, são uma alternativa tecnológica propícia para a utilização desses resíduos. Pela grande demanda das rochas aglomeradas tanto no mercado interno quanto no exterior, principalmente como material de aplicação na construção civil, determinar suas propriedades se torna algo essencial. No Brasil, não existem normas para ensaios de rochas aglomeradas. Assim, o CETEM/NR-ES vem elaborando um estudo pré normativo com intuito de submeter futuramente projeto de normas de ensaios de caracterização tecnológica à ABNT. O objetivo desse trabalho foi realizar uma comparação de rochas aglomeradas eco eficientes produzidas no laboratório do CETEM e no laboratório de teste industrial através de ensaios, com base na EN 14617, para analisar como diferentes métodos de fabricação podem influenciar as propriedades físico-mecânicas desses materiais. Os resultados do ensaio de índices físicos apresentaram uma amplitude de valores consoante às rochas produzidas na indústria e com base em métodos estatísticos a rocha fabricada pelo método laboratorial comprovou-se mais densa, com melhor compactação das partículas, do que a industrial. No ensaio de resistência à flexão, as rochas produzidas mostraram valores próximos de tensão, contudo mais baixos que as rochas comerciais, mas, utilizando-se de métodos estatísticos verificou-se que independentemente dos métodos de produção, a resistência mecânica dos materiais é equivalente.

Palavras-chave: rochas aglomeradas; resíduos, caracterização tecnológica; métodos de produção.

Abstract

The large amount of waste generated in the extraction and processing of ornamental stones that are currently discarded, has presented applications that can be used as raw material in the manufacture of new materials, which can add value and enable economic and environmental benefits to the sectors involved. Agglomerated stones are a suitable technological alternative for the use of these residues. Due to the great demand for agglomerated stones

both in the domestic and foreign markets, mainly as a material for application in civil construction, determining their properties becomes essential. In Brazil, there are no standards for testing agglomerated stones. Thus, CETEM/NR-ES has been preparing a pre-normative study in order to submit a project of standards for technological characterization tests to ABNT in the future. The objective of this work was to carry out a comparison of eco-efficient agglomerated stones produced in the CETEM laboratory and in the industrial test laboratory through tests, based on EN 14617, to analyze how different manufacturing methods can influence the physical-mechanical properties of these materials. The results of the physical indices test showed a range of values depending on the stones produced in the industry and, based on statistical methods, the stone manufactured by the laboratory method proved to be denser, with better particle compaction, than the industrial stone. In the flexural strength test, the produced stones showed values close to tension, however lower than the commercial stones, but using statistical methods it was found that regardless of the production methods, the mechanical strength of the materials is equivalent.

Key words: agglomerated stone; waste, technological characterization; production methods.

1. Introdução

Na mineração de rochas ornamentais, sua produção apresenta consequências ambientais devido principalmente ao baixo aproveitamento do material na lavra, promovendo a geração de resíduos oriundos dos processos de extração e beneficiamento. Apenas na lavra, 83% da matéria prima é transformada em resíduos (VIDAL, et. al., 2014).

De modo a aproveitar esses resíduos, estudos feitos pelo CETEM vêm sendo desenvolvidos validando sua importância na busca de inovações tecnológicas para aproveitar essas substâncias de maneira sustentável. Uma alternativa é o uso desses resíduos de rochas ornamentais como matéria prima na fabricação de compósitos como as rochas aglomeradas. Além de incorporar valor a um elemento indesejável, também auxilia para benefícios ambientais e econômicos, onde todo esse planejamento tem sua denominação como economia circular (ANTUNES, et. al., 2020).

De acordo com Filho (2022) no primeiro trimestre de 2022 as importações de rochas aglomeradas somaram US\$ 16,1 milhões num volume total de 25,8 mil toneladas, ultrapassando em mais de 51% os materiais naturais. Com isso, se torna evidente uma crescente demanda das rochas aglomeradas, que cada vez mais compete no mercado nacional com as rochas naturais.

Na construção civil, a busca das rochas aglomeradas se dá principalmente como material de revestimento interno e também na confecção de pias e bancadas. De modo a ter um maior controle de qualidade do produto, se torna essencial a realização de ensaios de caracterização tecnológica com propósito de conhecer suas propriedades mecânicas, físicas e seu desempenho em testes de aplicação. Apesar disso, no Brasil ainda não há normas específicas para rochas aglomeradas e o CETEM/NR-ES vem elaborando um projeto de estudo pré normativo

estabelecido conforme o pacote de normas europeu EN 14617, destinado a submeter futuramente à ABNT normas de ensaios para esses materiais.

Algumas empresas de rochas ornamentais, nos últimos anos, vêm investindo no desenvolvendo de materiais artificiais, de modo a produzir suas próprias rochas, com qualidade e estética, que consigam atender às necessidades do mercado. Entretanto, a indústria de rochas aglomeradas emprega metodologias operacionais empíricas. Identificar como que esses métodos de produção podem contribuir para as propriedades físicas e mecânicas através de ensaios se torna fundamental, aprimorando o estudo científico de compósitos como as rochas aglomeradas.

2. Objetivos

Este estudo tem como objetivo realizar uma comparação das propriedades de rochas aglomeradas eco eficientes produzidas no laboratório do CETEM e no laboratório de teste industrial, por meio dos ensaios de índices físicos e resistência à flexão utilizando o pacote de normas EN 14617, de modo a analisar como os diferentes métodos de fabricação podem influenciar as propriedades físico-mecânicas desses materiais.

3. Material e Métodos

Os parâmetros físico-mecânicos foram estudados por meio da realização dos ensaios de índices físicos e resistência à flexão, seguindo o pacote de normas EN 14617. As rochas aglomeradas foram preparadas utilizando resíduos de rochas ornamentais denominadas geologicamente como quartzito e comercialmente como “Crystal Quartz” e “Cristallo”. Como matriz polimérica foi usado uma resina à base de poliuretano vegetal, resultante do óleo de mamona.

Os resíduos empregados para a produção dos materiais foram beneficiados a partir de casqueiros, onde foram trabalhados por processos de cominuição primária em um britador de mandíbulas e secundária em um moinho de rolos. Após essas etapas, o resíduo foi peneirado em malhas de # 8, 25, 100 e 230 Mesh para obtenção de partículas grossas e médias. Também foi utilizado o resíduo do tear multifio, que apresenta uma granulometria passante a peneira de #230 Mesh.

As placas foram produzidas utilizando 91% de carga mineral e 9% resina vegetal. Todo o estudo da faixa granulométrica e distribuição das partículas foram realizados com base no estudo de AGRIZZI et. al. (2021). As placas foram fabricadas no laboratório do CETEM e no laboratório de teste de uma empresa.

O método laboratorial foi executado na usina piloto do CETEM/NR-ES em uma prensa manual hidráulica operando com uma pressão de 15 toneladas, num período de 40 minutos a uma temperatura constante de 65°C e vácuo, sendo essa metodologia conhecida como vibro-termo-compressão à vácuo. As placas confeccionadas apresentaram as dimensões de 200 x 200 e 10 mm de espessura.

O método industrial foi feito no laboratório de teste de uma empresa que produz rochas aglomeradas. A produção foi efetuada em uma prensa hidráulica automatizada, durante um intervalo de 2 minutos e vibração mecânica

constante e vácuo. Após esse período, as placas foram retiradas do molde com dimensões finais de 320 x 320 e 30 mm de espessura e sua cura foi finalizada em uma estufa por 40 minutos.

Em ambos os métodos de produção usados, as placas foram submetidas ao processo de pós cura em uma estufa por 4 dias, sendo três dias a temperatura de 60°C e um dia a 80°C. Após a cura final, as placas foram submetidas ao polimento (Figura 1) e preparadas para os ensaios.

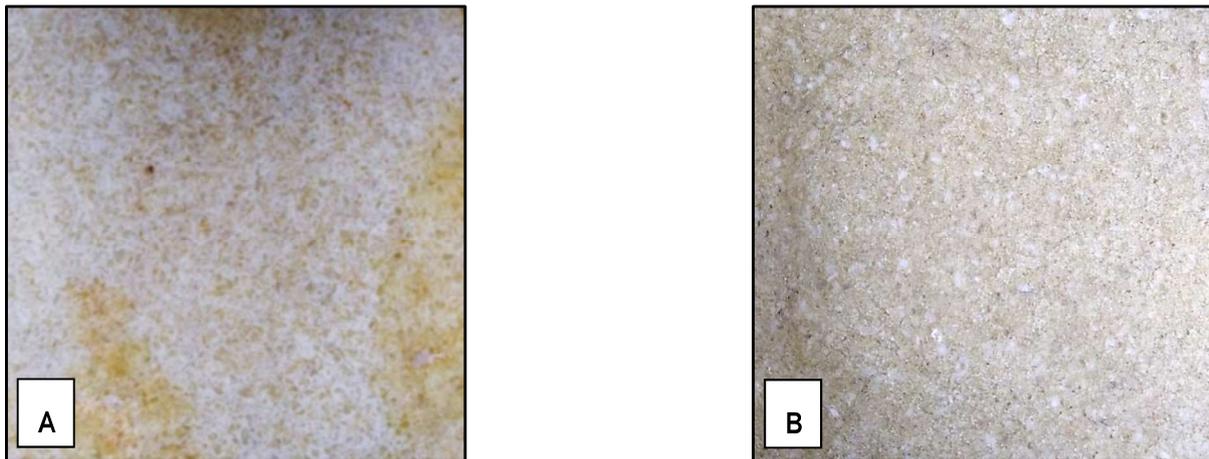


Figura 1. Acabamento final das placas, posteriormente à cura e ao polimento: (A) Método laboratorial e (B) Método industrial.

A análise de índices físicos abrange a determinação de densidade e absorção d'água. Para os ensaios, foram preparados oito (8) corpos de prova com dimensões de 100 x 100 mm, e foi utilizada uma balança Marte Científica modelo AD 2000, seguindo a norma EN 14617-1 (AENOR, 2013). Como o cálculo da porosidade não se encontra inserida na norma usada neste estudo, está sendo proposta a adição da determinação da porosidade aparente no projeto de norma de índices físicos para rochas aglomeradas.

O ensaio de resistência à flexão seguiu os procedimentos da EN 14617-2 (AENOR, 2008). Usaram-se seis (6) corpos de prova com dimensões de 200 x 50 mm e espessura conforme os métodos de produção. O ensaio foi realizado em uma prensa hidráulica Forney modelo F-502F-CPILOT, com capacidade de 50 kN e taxa de carregamento de 0,25MPa/s.

4. Resultados e Discussão

A Tabela 1 mostra os resultados dos ensaios de caracterização tecnológica das rochas aglomeradas fabricadas nos diferentes métodos de produção e também apresenta uma comparação com os resultados de uma rocha artificial comercial, desenvolvida pela Guidoni Quartz. De modo geral, pode-se perceber que os materiais estudados apresentaram bons resultados de densidade, com valores próximos aos da rocha comercializada (2319 kg/m³) e da ficha técnica da Topzstone (2022) cujo os valores são 2100 a 2400 kg/m³.

A absorção d'água mostrou resultados elevados quando comparado com o valor de 0,04% da rocha comercializada e com 0,05-0,07% da ficha técnica da Topzstone (2022). Em relação a porosidade, ela é uma medida diretamente relacionada com a absorção de água, então se a absorção de água é alta, automaticamente a porosidade também apresenta resultados elevados.

Os resultados mecânicos (resistência à flexão) das rochas fabricadas, demonstram valores mais baixos em comparação com o valor de 91,54MPa da rocha comercializada e da ficha técnica da Topzstone (2022) sendo de 30 a 70MPa.

Tabela 1. Resultados dos ensaios das rochas fabricadas em diferentes métodos de produção.

	Método Laboratorial		Método Industrial		Rocha Comercializada	
	\bar{x}	<i>s</i>	\bar{x}	<i>s</i>	\bar{x}	<i>s</i>
Densidade (kg/m ³)	2109	20,97	1965	20,85	2319	4,16
Absorção d'água (%)	0,31	0,09	0,79	0,25	0,04	0,02
Porosidade (%)	0,65	0,18	1,54	0,47	0,09	0,05
Resistência à flexão (MPa)	20,93	2,82	18,59	2,22	91,54	3,54

\bar{x} – Média; *s* – Desvio Padrão.

De maneira a verificar se existe diferença significativa entre os métodos de produção das rochas (laboratorial e industrial), foi efetuada uma análise estatística para comparação de duas médias, tanto para medida de densidade quanto para resistência à flexão. As informações utilizadas foram as médias de densidade e resistência à flexão do método laboratorial e método industrial, os seus respectivos desvios padrões e o número de amostras estudadas. Toda a análise foi realizada para um nível de significância de 5% ($\alpha=0,05$).

Por meio da análise estatística, verificou-se que existe diferença significativa entre as densidades, uma vez que o valor-p encontrado foi de aproximadamente zero ($p<10^{-4}$). Como este valor é inferior ao nível de significância estipulado (0,05), então conclui-se que existe diferença significativa entre os dois métodos de produção usados (laboratorial e industrial). Dessa forma, comprova-se estatisticamente que a rocha fabricada no laboratório do CETEM/NR-ES é mais densa que a fabricada pelo método industrial. Uma das hipóteses sobre essa maior densidade, é pelo fato do método laboratorial utilizar um tempo de compressão maior do que o industrial e também haver contato térmico direto, colaborando para uma maior compactação da partículas e tempo de cura da matriz polimérica.

As resistências à flexão das rochas fabricadas apresentaram valores próximos, sendo pelo método laboratorial um pouco superior, dado que, pela análise estatística o valor – p foi de 0,0572. Em razão deste valor ser superior ao nível de significância (5%), pode-se concluir que a resistência à flexão das rochas analisadas é estatisticamente semelhante. Independentemente do método de produção, ambas as rochas apresentam propriedades mecânicas semelhantes.

5. Conclusão

De acordo com os resultados do ensaio de índices físicos, observou-se que a densidade das rochas fabricadas se encontra com abrangência de valores semelhante ao comercializado. O método laboratorial demonstrou ser relativamente melhor neste parâmetro físico do que o método industrial. A partir de métodos estatísticos, foi comprovado que pelo método laboratorial a rocha é mais densa, constatando uma melhor compactação das partículas de quartzito e tempo de cura, sob pressão e temperatura da matriz polimérica. Esta melhor compactação do método laboratorial também explica o fato das rochas apresentarem um valor mais baixo de absorção d'água e porosidade em comparação com o método industrial.

No ensaio de resistência à flexão, verificou-se uma pequena diferença das tensões entre os métodos. Contudo, considerando o desvio padrão, nota-se que os valores são equivalentes. Com base nos métodos estatísticos observou-se que não há diferença significativa entre as rochas, denotando que independentemente dos métodos de fabricação, os materiais apresentam propriedades mecânicas semelhantes.

Em comparação com a rocha comercializada, os parâmetros mecânicos se demonstraram inferiores com base nos resultados do ensaio. Com isso, novos estudos serão necessários de modo a investigar as melhores condições operacionais para uma otimização da resistência à flexão dos materiais, de maneira também a aperfeiçoar o método de produção.

A utilização de resíduos de rochas ornamentais como matéria prima na fabricação de rochas artificiais, com base nos resultados obtidos, se demonstra ser um estudo promissor, contribuindo para redução do impacto ambiental provado pela mineração. Já que, esses resíduos são gerados em grandes escalas, podem ter uma aplicação totalmente sustentável em compósitos com alto valor agregado como as rochas aglomeradas, auxiliando para a economia circular.

6. Agradecimentos

Ao CNPq pela bolsa concedida (processo n. 301371/2022-9), à Fapes (processo nº 84376732) pelo apoio financeiro, aos técnicos do LABRO/NR-ES e as empresas PETTRUS LTDA e a Guidoni Quartz.

7. Referências Bibliográficas

AENOR - ASSOCIACIÓN 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.

ANTUNES, L. B.; GADIOLI, M. C. B.; AGUIAR, M. C. **Desenvolvimento de rochas artificiais eco eficientes com resíduos de rochas ornamentais** = Development of artificial stones eco efficient with ornamental stone waste. In: ANAIS DA JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 2020. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, p.111-115.

CHIODI FILHO, C. **Balço das exportações e importações brasileiras de materiais rochosos naturais e artificiais de revestimento no 1º trimestre de 2022.** Disponível em: https://abirochas.com.br/wpcontent/uploads/2022/05/Informe_02_2022_Exportacoes_1_Trimestre.pdf. Acesso em: 19 de out. 2022.

TOPZSTONE. **Ficha Técnica.** Disponível em: https://www.topzstone.com/_files/ugd/cf6d90_e1bb893973a24ab5b9005204de890fbf.pdf. Acesso em: 27 de out. 2022.

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

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: CETEM/MCTI, 700p. 2014.