

INFLUÊNCIA DO TIPO DE MOINHO NAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂNICAS DE ROCHAS AGLOMERADAS PRODUZIDAS COM RESÍDUOS DE QUARTZITO, MÁRMORE E GRANITO

INFLUENCE OF THE TYPE OF MILL ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF AGGLOMERATED STONES PRODUCED WITH QUARTZITE, MARBLE AND GRANITE WASTE

Caio Barboza Louzada

Aluno de Graduação da Engenharia de Minas 9º período,

Instituto Federal do Espírito Santo - IFES

Período PIBIC/CETEM: setembro de 2024 a agosto de 2025

caiolouzada@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

A utilização de resíduos de rochas ornamentais na produção de materiais sustentáveis tem ganhado destaque como alternativa tecnológica no setor da construção civil. O objetivo com este trabalho foi investigar se diferentes tipos de moinho influenciam no formato das partículas de quartzito, mármore e granito utilizados na produção de rochas aglomeradas, visando avaliar as propriedades físicas e mecânicas por meio de ensaios de caracterização tecnológica. O processo de moagem pode interferir na morfologia das partículas, fator que pode impactar diretamente o desempenho tecnológico do material final. Foram empregados quatro tipos de moinho, a fim de obter variações no formato e na distribuição granulométrica dos resíduos. Em seguida, composições padronizadas de rochas aglomeradas foram formuladas com cada tipo de resíduo moído, utilizando resina como ligante. As rochas aglomeradas produzidas foram submetidas a ensaios tecnológicos, incluindo densidade, absorção de água, porosidade, resistência à flexão e à abrasão. Os resultados indicaram que o tipo de rocha e o tipo de moinho influenciam no desempenho das rochas aglomeradas, sobretudo quanto à compactação das partículas e à aderência entre a matriz e o ligante. Evidenciou-se que o moinho de disco apresenta maior eficiência na produção de partículas com características que favorecem o desempenho físico-mecânico das rochas aglomeradas. Além disso, esse tipo de moagem contribui para a valorização dos resíduos do setor de rochas ornamentais, demonstrando a relevância da escolha adequada do equipamento de cominuição na formulação de materiais construtivos de alto desempenho.

Palavras chave: Rochas aglomeradas, cominuição, moinhos.

ABSTRACT

The use of ornamental stone waste in the production of sustainable materials has gained prominence as a technological alternative in the construction sector. The objective of this study was to investigate whether different types of mills influence the shape of quartzite, marble, and granite particles used in the production of agglomerated stones, aiming to evaluate their physical and mechanical properties through technological characterization tests. The grinding

process can affect particle morphology, a factor that can directly impact the technological performance of the final material. Four types of mills were used to obtain variations in the shape and particle size distribution of the waste. Standardized agglomerated stone compositions were then formulated with each type of ground waste, using resin as a binder. The agglomerated stones produced were subjected to technological tests, including density, water absorption, porosity, flexural strength, and abrasion resistance. The results indicated that the type of stone and the type of mill influence the performance of the agglomerated stones, particularly regarding particle compaction and adhesion between the matrix and the binder. It was demonstrated that the disc mill is more efficient in producing particles with characteristics that favor the physical and mechanical performance of agglomerated stones. Furthermore, this type of grinding contributes to the valorization of waste from the ornamental stone sector, demonstrating the importance of choosing the right comminution equipment in the formulation of high-performance construction materials.

Keywords: Agglomerated stones, comminution, mills.

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por soluções sustentáveis na indústria da construção civil tem estimulado o aproveitamento de resíduos de rochas ornamentais (AGUIAR et al., 2024). Dentre os materiais mais explorados, destacam-se o quartzito, o granito e o mármore, cujos resíduos gerados durante as etapas de extração e beneficiamento representam um passivo ambiental significativo.

Nesse contexto, as rochas aglomeradas artificiais surgem como uma alternativa tecnológica promissora, com ampla aplicabilidade em revestimentos e acabamentos na construção civil, além de contribuir para o aproveitamento sustentável de resíduos do setor de rochas ornamentais. Observa-se, inclusive, uma tendência crescente na importação desses materiais no Brasil desde 2015, indicando um mercado em expansão (ABIROCHAS, 2025). Diante disso, torna-se relevante investigar formas de valorizar os resíduos gerados, promovendo sua inserção em cadeias produtivas mais sustentáveis.

Um dos desafios na produção de rochas aglomeradas está na obtenção de partículas com granulometria e morfologia adequadas, que favoreçam a compactação, a ligação com a matriz aglomerante e, consequentemente, o desempenho físico-mecânico do produto final. A cominuição, etapa essencial nesse processo, pode influenciar diretamente a forma, a distribuição de tamanho e a textura das partículas. Contudo, conforme destaca Peçanha (2014), embora a importância da forma das partículas seja reconhecida, ainda não há um método padronizado para sua caracterização, o que faz com que sua influência muitas vezes seja subestimada.

Neste trabalho, a partir da análise das propriedades físicas e mecânicas de corpos de prova produzidos com resíduos de quartzito, granito e mármore, busca-se compreender como diferentes tipos de moinho impactam na geração de partículas e no desempenho das rochas aglomeradas. A investigação visa contribuir para o desenvolvimento de materiais de alta performance, alinhados aos princípios da sustentabilidade e da economia circular.

2. OBJETIVO

O objetivo com este trabalho foi investigar se diferentes tipos de moinho influenciam no formato das partículas de mármore, granito e quartzito utilizados na produção de rochas aglomeradas, visando avaliar as propriedades físicas e mecânicas por meio de ensaios de caracterização tecnológica.

3. METODOLOGIA

3.1. Produção das Rochas Aglomeradas

Para a produção das rochas aglomeradas, foram coletados três tipos de resíduos: quartzito, granito e mármore. Esses resíduos, provenientes do beneficiamento de rochas ornamentais, incluíram o casqueiro (esquadrejamento dos blocos) e os finos (serragem em tear multifio).

A fragmentação do casqueiro foi inicialmente realizada em britador de mandíbulas e, posteriormente, o material foi cominuído utilizando diferentes equipamentos: moinho de esferas, moinho de barras, moinho de rolos e moinho de discos. Após a moagem, os resíduos foram peneirados para classificação em três faixas granulométricas: partículas grossas (entre 0,063 mm e 0,053 mm), médias (entre 0,053 mm e 0,044 mm) e finas (menores que 0,044 mm).

Foram elaboradas 12 (doze) combinações entre os métodos de cominuição e os tipos de resíduos coletados (Tabela 1). A partir dessas combinações, produziram-se rochas aglomeradas compostas por 90% de carga mineral (55,6% de partículas grossas, 22,78% de partículas médias e 21,66% de partículas finas) e 10% de resina. A carga mineral foi definida de acordo com Mardegan; Gadioli; Aguiar (2024). As amostras foram moldadas por prensagem uniaxial sob pressão de 60 MPa, em ambiente com vácuo e vibração, durante 20 minutos a uma temperatura de 100 °C. A Tabela 1 apresenta as combinações utilizadas na produção das rochas aglomeradas.

Tabela 1: combinações das rochas aglomeradas produzidas.

Rocha	Moinho	Rocha	Moinho	Rocha	Moinho
Quartzito	Esferas	Mármore	Esferas	Granito	Esferas
	Rolos		Rolos		Rolos
	Disco		Disco		Disco
	Barras		Barras		Barras

3.2. Execução dos ensaios de Índices Físicos, Resistência à Flexão e à Abrasão

Foram realizados ensaios de densidade aparente, absorção de água e porosidade, conforme a norma EN 14617-1, utilizando corpos de prova com dimensões de 50 × 50 mm. O ensaio de resistência à flexão em três pontos seguiu a norma EN 14617-2, utilizando corpos de prova de 200 × 50 mm, com espessura definida conforme as condições de produção. A resistência à abrasão foi avaliada segundo a norma EN 14617-4, utilizando corpos de prova de 70 × 70 mm, também com espessura determinada de acordo com os métodos de fabricação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização tecnológica: Índices físicos, resistência à flexão e resistência à abrasão.

Tabela 2: Ensaios de caracterização tecnológica das rochas aglomeradas produzidas.

Rocha x Moinho	Densidade Aparente (Kg/m³)	Índices Físicos			Resistência Mecânica		
		Porosidade (%)	Absorção d'água (%)	Resistência à Flexão (MPa)	Resistência à Abrasão		
					Desgaste 500m (mm)	Desgaste 1000m (mm)	
Quartzito	Esferas	2274 ± 34,93	0,21 ± 0,07	0,10 ± 0,04	10,87 ± 2,34	1,47 ± 0,39	2,79 ± 0,70
	Rolos	2215 ± 64,69	0,51 ± 0,05	0,23 ± 0,03	23,79 ± 4,00	1,00 ± 0,40	1,85 ± 0,66
	Disco	2218 ± 46,93	0,12 ± 0,06	0,06 ± 0,03	26,53 ± 4,60	1,69 ± 0,06	3,03 ± 0,26
	Barras	2353 ± 14,57	0,25 ± 0,08	0,11 ± 0,03	23,48 ± 2,98	0,57 ± 0,25	2,06 ± 0,08
Mármore	Esferas	2270 ± 136,86	1,46 ± 0,23	0,63 ± 0,09	14,01 ± 2,36	0,99 ± 0,27	2,08 ± 0,59
	Rolos	2388 ± 87,75	0,87 ± 0,18	0,36 ± 0,07	15,55 ± 1,93	0,93 ± 0,14	1,69 ± 0,18
	Disco	2306 ± 45,75	0,46 ± 0,11	0,20 ± 0,05	15,11 ± 2,85	1,59 ± 0,12	2,75 ± 0,53
	Barras	2310 ± 131,23	0,71 ± 0,22	0,31 ± 0,09	14,87 ± 3,64	1,69 ± 0,43	2,79 ± 0,25
Granito	Esferas	2024 ± 33,44	0,30 ± 0,08	0,15 ± 0,04	19,84 ± 1,34	1,33 ± 0,10	2,65 ± 0,52
	Rolos	2123 ± 36,51	0,52 ± 0,08	0,25 ± 0,04	19,07 ± 1,31	1,99 ± 0,48	3,39 ± 0,56
	Disco	2075 ± 49,37	0,32 ± 0,07	0,15 ± 0,03	22,00 ± 2,27	1,57 ± 0,35	3,38 ± 0,84
	Barras	2089 ± 63,66	0,29 ± 0,09	0,14 ± 0,04	20,13 ± 0,77	1,51 ± 0,13	3,02 ± 0,04

Com base nos resultados apresentados na Tabela 2, observa-se que o tipo de moinho utilizado na cominuição dos resíduos de rochas ornamentais influencia nas propriedades tecnológicas das rochas aglomeradas produzidas. Essa influência varia de acordo com o tipo de resíduo utilizado (quartzito, mármore ou granito), afetando os índices físicos, como densidade aparente, porosidade e absorção de água, bem como as resistências à flexão e abrasão.

Para as rochas aglomeradas formuladas com resíduos de quartzito, o moinho de disco proporcionou os melhores resultados, com maior resistência à flexão 26,53 MPa, além dos menores valores de porosidade (0,12%) e absorção de água (0,06%), o que indica uma microestrutura mais compacta e eficiente na ligação entre os grãos e a matriz polimérica. Embora o desgaste por abrasão a 1000 m tenha sido relativamente elevado 3,03 mm, o bom desempenho geral sugere que as partículas obtidas com esse tipo de moagem favoreceram a formação de uma estrutura mais resistente e menos porosa.

No caso das amostras produzidas com resíduos de mármore, os melhores resultados foram observados nas amostras cominuídas nos moinhos de rolos e disco, cada um se destacando em diferentes propriedades tecnológicas. O moinho de rolos apresentou maior densidade aparente 2388 kg/m³ e maior resistência à flexão 15,55 MPa, associadas a porosidade (0,87%) e absorção de água (0,36%) em níveis considerados intermediários, o que indica uma boa compactação e adesão entre as partículas e a matriz polimérica. Além disso, o desgaste por abrasão a 1000 m das amostras com moinho de disco foi mais elevado 2,75 mm, o que pode indicar menor resistência superficial ao desgaste.

Por outro lado, o moinho de disco resultou em amostras com menores valores de porosidade (0,46%) e absorção de água (0,20%), evidenciando uma estrutura interna mais fechada e com menor presença de vazios. No entanto, a resistência à flexão 15,11 MPa foi ligeiramente inferior à obtida com o moinho de rolos, e a densidade aparente também foi menor 2306 kg/m³.

Para as rochas aglomeradas com resíduos de granito, mais uma vez o moinho de disco foi o que apresentou melhor desempenho. Essa condição gerou uma resistência à flexão de 22,00 MPa, superior às demais, mantendo baixa porosidade (0,32%) e absorção de água (0,15%), características que refletem uma estrutura interna mais coesa. Ainda que o desgaste por abrasão a 1000 m tenha sido elevado, com um valor de 3,38 mm, o desempenho mecânico geral foi superior.

De modo geral, os moinhos de esferas e de barras apresentaram resultados mais modestos em comparação aos de disco e rolos, com menores resistências à flexão e, em alguns casos, maiores índices de porosidade e absorção de água. O moinho de barras apresentou desempenho intermediário, sem se destacar em nenhuma das rochas avaliadas.

Portanto, de forma consolidada, o moinho de disco se mostrou o mais eficiente para os resíduos de quartzito e granito, enquanto o moinho de rolos foi mais adequado para o mármore. Considerando um critério de desempenho físico-mecânico mais uniforme entre os diferentes tipos de resíduos, o moinho de disco pode ser considerado o mais vantajoso para a produção de rochas aglomeradas, por proporcionar melhor resistência à flexão e microestrutura mais compacta, com baixa porosidade e absorção de água.

De acordo com o Guia de Aplicação de Rochas em Revestimentos (Rodrigues; Chiodi Filho, 2020), para que uma rocha seja considerada adequada ao uso em revestimentos internos e externos, recomenda-se que a absorção de água seja inferior a 0,4% e a porosidade abaixo de 1%, parâmetros que indicam baixa permeabilidade e maior durabilidade do material frente à umidade. Considerando esses critérios, observa-se que a maioria das rochas aglomeradas produzidas neste estudo, especialmente aquelas cominuídas em moinho de disco e moinho de rolos, atenderam a esses requisitos, demonstrando potencial para aplicação em ambientes sujeitos à umidade, como cozinhas e banheiros. De acordo com o Guia as rochas produzidas são consideradas rochas de alta a muito alta qualidade.

Além disso, o mesmo guia destaca que valores de resistência à flexão acima de 10 MPa. Neste trabalho, todos os corpos de prova formulados com resíduos de quartzito e granito superaram esse limite, principalmente os processados no moinho de disco, com valores que chegaram a 26,53 MPa (quartzito) e 22,00 MPa (granito). No caso do mármore, os melhores resultados foram observados com o moinho de rolos (15,55 MPa), também dentro do intervalo adequado para revestimentos de uso geral. De acordo com o Guia as rochas produzidas são consideradas rochas de alta a muito alta qualidade.

Segundo Rodrigues e Chiodi Filho (2020), em termos de desgaste abrasivo para utilização de rochas ornamentais em revestimento de pisos, os materiais podem ser classificados como piso de alto tráfego (< 1,5 mm), piso de tráfego médio (< 3 mm) e piso de tráfego baixo (< 6 mm).

Com base nos parâmetros acima, o resultado encontrado é bastante satisfatório, sendo uma boa opção para ser usada como pisos de baixo e médio tráfego, uma vez que seu desgaste foi superior a 1,5 mm após 1000 m de distância de corrida. Apenas na rocha aglomerada fabricada com resíduo de granito foi em 500 m.

Portanto, com base nos parâmetros estabelecidos pelo Guia, as rochas produzidas neste estudo apresentam características físicas e mecânicas compatíveis com aplicações em revestimentos verticais e pisos de tráfego leve a moderado, reforçando a viabilidade do aproveitamento de resíduos de rochas ornamentais na produção de materiais sustentáveis e tecnicamente eficazes.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, o moinho de disco foi, de modo geral, o mais eficiente na produção de partículas que resultaram em rochas aglomeradas com desempenho físico-mecânico superior, especialmente em termos de resistência à flexão, baixa porosidade e baixa absorção de água, características que indicam boa compactação e aderência entre os grãos e a matriz polimérica. Esse tipo de moagem se destacou particularmente nas formulações com resíduos de quartzito e granito, proporcionando compósitos mais resistentes e densas.

No caso do mármore, embora o moinho de rolos tenha apresentado a maior resistência à flexão e densidade aparente, o moinho de disco também se mostrou bastante eficiente, com valores próximos de resistência mecânica e com vantagens quanto à porosidade e absorção de água, o que reflete uma microestrutura mais compacta. Assim, o moinho de disco demonstrou um desempenho equilibrado e competitivo também para o mármore.

Dessa forma, considerando o conjunto dos resultados, o moinho de disco pode ser considerado a melhor alternativa para a produção de rochas aglomeradas, uma vez que apresentou desempenho consistente e superior na maioria das propriedades avaliadas para os diferentes tipos de resíduos utilizados.

6. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq (processo nº134478/2024-0) pelo apoio financeiro da bolsa concedida. Em especial, aos meus orientadores Leonardo Luiz Lírio da Silveira, Mariane Costalonga de Aguiar e Rondinelli Moulin Lima pelo apoio e ensinamentos na realização do estudo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIROCHAS – Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. Balanço das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais 2025.

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

Asociación Española de Normalización y Certificación - Aenor. UNE - EN 14617 – Piedra aglomerada. Métodos de ensayo. Parte 1: Determinación de la densidad aparente y la absorción de agua, 2013.

Asociación Española de Normalización y Certificación - Aenor. UNE - EN 14617 - Piedra aglomerada. Métodos de ensayo. Parte 2: Determinación de la resistencia a flexión, 2016.

Asociación Española de Normalización y Certificación - Aenor. UNE - EN 14617 - Piedra aglomerada. Métodos de ensayo. Parte 4: Determinación de la resistencia a abrasión. 2012.

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.

PEÇANHA, R.P. Sistemas particulados: operações unitárias envolvendo partículas e fluidos / 1. ed. Rio de Janeiro: ELSEVIER, 2014.

RODRIGUES E.P, CHIODI FILHO C. Guia de aplicação de rochas em revestimentos. 2^a edição revista, atualizada e ampliada. Brasília. ABIROCHAS, 236 p, 2020.