

INFLUÊNCIA DA REDUÇÃO GRANULOMÉTRICA DE MASSA CERÂMICA INCORPORADA COM RESÍDUO FINO DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS NA PRODUÇÃO DE CERÂMICA DE REVESTIMENTO

INFLUENCE OF PARTICLE SIZE REDUCTION OF CERAMIC MASS INCORPORATING ORNAMENTAL STONE PROCESSING FINE WASTE ON THE PRODUCTION OF CERAMIC TILES

Isabella Guidinelli Cardoso Ferri

Aluna de Graduação da Engenharia de Minas, 5º período, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo
Período PIBIC/CETEM: janeiro de 2026 a agosto de 2026
isaengmifes@gmail.com

Kayrone Marvila de Almeida

Orientador, Engenheiro de Minas, M.Sc.
kmalmeida@cetem.gov.br

Mariane Costalonga de Aguiar

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

RESUMO

A indústria de rochas ornamentais representa um dos segmentos mais importantes do setor mineral, sendo o Brasil um dos maiores produtores mundiais, com produção anual de aproximadamente 10,5 milhões de toneladas. Em contrapartida, essa atividade gera grandes volumes de resíduos finos do beneficiamento de rochas ornamentais (FiBRO), tornando necessária a busca por alternativas sustentáveis para seu reaproveitamento. Nesse contexto, a indústria cerâmica apresenta elevado potencial para a incorporação desse resíduo. O presente trabalho teve como objetivo reduzir a granulometria de uma massa cerâmica contendo FiBRO, visando sua aplicação futura na produção de revestimentos cerâmicos, como pisos e porcelanatos. A massa foi submetida à moagem e classificação em peneira de 80 mesh, sendo posteriormente caracterizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), análise granulométrica e ensaios de limites de Atterberg. Foram produzidos corpos de prova contendo 0%, 10%, 20% e 30% de FiBRO, prensados e sinterizados a 1100 °C. As amostras foram avaliadas quanto à retração linear, perda de massa, absorção de água, porosidade aparente, densidade aparente e resistência à flexão. Os resultados demonstraram que a incorporação do FiBRO promoveu redução da absorção de água, de 16,27% para 12,51%, e da porosidade aparente, de 30,18% para 24,05%, além de elevar o módulo de resistência à flexão de 4,65 MPa para 10,48 Mpa. Isso mostra uma melhora significativa das propriedades físico-mecânicas da massa cerâmica, o que indica o potencial de utilização do resíduo na produção de cerâmica de revestimentos.

Palavras chave: Rochas Ornamentais, FiBRO, massa cerâmica, porcelanato.

ABSTRACT

The ornamental stone industry is one of the most important segments of the mining sector, and Brazil is among the world's leading producers, with an annual production of approximately 10.5 million tons. However, this activity generates large amounts of ornamental stone processing fine waste (FiBRO), highlighting the need for sustainable alternatives for its reuse. In this context, the ceramic industry represents a promising destination for incorporating this waste. This study aimed to reduce the particle size of a ceramic mass containing FiBRO to enable its future application in the production of ceramic tiles, including floor and porcelain tiles. The ceramic mass was milled and classified through an 80-mesh sieve and subsequently characterized by scanning electron microscopy (SEM), particle size analysis, and Atterberg limits tests.

Specimens containing 0, 10, 20, and 30 wast % FiBRO were uniaxially pressed and sintered at 1100 °C. The samples were evaluated in terms of linear shrinkage, mass loss, water absorption, apparent porosity, bulk density, and flexural strength. The results showed that the incorporation of FiBRO reduced water absorption from 16.27% to 12.51% and apparent porosity from 30.18% to 24.05%, while increasing flexural strength from 4.65 MPa to 10.48 MPa. These findings demonstrate a significant improvement in the physicommechanical properties of the ceramic mass, indicating that ornamental stone processing fine waste has strong potential as an alternative raw material for the manufacture of ceramic tiles.

Keywords: Ornamental Stone, FiBRO, ceramic mass, porcelain tile.

1. INTRODUÇÃO

No ano de 2025, o Brasil registrou o recorde anual da série histórica de suas exportações no segmento, atingindo um faturamento expressivo de US\$ 1.475,8 milhões, representando um aumento de 17,5% em relação a 2024 (ABIROCHAS, 2026a). Tendo o Espírito Santo liderando de forma expressiva as exportações nacionais, correspondendo a 78% do valor total faturado e por 69% do volume exportado em 2025 e mantendo a liderança 2026 faturando US\$ 416,6 milhões e exportando 563,5 mil toneladas (ABIROCHAS, 2026b). O desenvolvimento da indústria de rochas ornamentais resulta, conseqüentemente, no aumento da geração de resíduos provenientes das etapas de extração e beneficiamento, os quais são destinados à disposição em aterros. Esses materiais, quando não destinados adequadamente, podem ocasionar impactos ambientais e elevar os custos de disposição final, reforçando a necessidade de alternativas para seu reaproveitamento (Gadioli et al., 2021). Diante disso, é importante a implementação de medidas que seguem a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010, que estabelece diretrizes voltadas à redução, reutilização, reciclagem e destinação ambientalmente adequada dos resíduos.

Na mesma linha, o Plano Nacional de Economia Circular (PLANEC 2025–2034) torna-se um aliado fundamental na busca por promover a reinserção de resíduos como matérias-primas em novos ciclos produtivos (Brasil, 2025). A indústria cerâmica de revestimento apresenta elevado potencial para absorção de resíduos minerais devido ao grande consumo de matérias-primas naturais (Neves et al., 2024). Tendo isso em vista, o aproveitamento do Fino do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (FiBRO) em massas cerâmicas destinadas à produção de revestimentos representa uma alternativa alinhada aos princípios da economia circular (AMORIM et al., 2023). Entretanto, embora estudos anteriores tenham demonstrado que a incorporação do FiBRO promove melhorias nas propriedades tecnológicas da massa cerâmica, como a redução da absorção de água e o aumento da resistência à flexão, os resultados ainda indicam a necessidade de otimizar o processamento da matéria-prima para atender aos requisitos exigidos para pisos e porcelanatos (Maurício; Almeida, 2025). Nesse sentido, o presente trabalho propõe a redução granulométrica da massa cerâmica, por meio de operações de cominuição, visando melhorar o empacotamento das partículas e, conseqüentemente, reduzir a absorção de água e aumentar a resistência à flexão dos corpos cerâmicos.

2. OBJETIVOS

Reduzir a granulometria da massa cerâmica contendo FiBRO e avaliar sua viabilidade técnica para a produção de cerâmica de revestimento por meio da confecção e caracterização físico-mecânica de corpos de prova.

3. METODOLOGIA

As matérias-primas do estudo, a massa cerâmica e o resíduo Fino do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (FiBRO), foram caracterizadas em trabalhos anteriores (Maurício; Almeida, 2025). A massa cerâmica é composta por argila branca (40%), Areinha (36%) e Batinga (24%).

Para melhorar suas propriedades físicas e mecânicas, a massa cerâmica foi submetida à redução granulométrica. Inicialmente, o material foi processado *in natura*, passando pelas etapas de destorroamento em triturador elétrico e, em seguida, peneiramento em malha de 20 mesh.

A segunda etapa consistiu na redução granulométrica da massa cerâmica para malha de 80 mesh. O material foi submetido à moagem a seco em moinho de bolas de alumina, utilizando corpos moedores ocupando 30% do volume do jarro cerâmico. O equipamento operou em velocidade máxima fixa, com ciclos contínuos de moagem de 15 a 20 minutos. Posteriormente, o material foi peneirado em malha de 80 mesh, sendo o passante considerado o produto final. O material retido foi reprocessado em moinho de barras de aço inoxidável até passar completamente pela peneira de 80 mesh, assegurando a uniformidade granulométrica da massa cerâmica.

Após a obtenção da massa cerâmica com granulometria inferior a 80 mesh, foram preparadas quatro formulações contendo 0%, 10%, 20% e 30% de incorporação de FiBRO. As formulações foram submetidas aos ensaios dos limites de Atterberg (limite de liquidez e limite de plasticidade), conforme as normas ABNT NBR 6459 e ABNT NBR 7180. A massa cerâmica foi caracterizada por análise granulométrica por sedimentação (ABNT NBR 7181), enquanto o FiBRO foi analisado por difração a laser, utilizando o equipamento Malvern Mastersizer 2000. Também foi realizada análise microestrutural por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), com o objetivo de comparar a morfologia e a distribuição granulométrica das partículas da massa cerâmica processada em malha de 20 mesh e da massa reprocessada abaixo de 80 mesh.

Em seguida, foram confeccionados corpos de prova cerâmicos com dimensões de $11 \times 2,5 \times 1$ cm e umidade de 8%, utilizando pressão de 15 toneladas em prensa uniaxial. Cada formulação foi submetida à sinterização em forno mufla, com rampa de aquecimento de $2^\circ\text{C}/\text{min}$ até 1100°C , permanecendo nessa temperatura por 3 horas. Após a queima, os corpos de prova foram avaliados quanto à retração linear, perda de massa, absorção de água, porosidade aparente, densidade aparente, densidade relativa aparente e resistência à flexão, conforme as normas ABNT NBR ISO 10545-3 e ABNT NBR ISO 10545-4, permitindo analisar a influência da redução granulométrica e da incorporação do FiBRO nas propriedades tecnológicas da massa cerâmica.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A massa cerâmica processada abaixo de 80 mesh apresentou aproximadamente 30% de partículas na fração argila ($<0,002$ mm), além de cerca de 90% das partículas com granulometria inferior a 0,1 mm e praticamente 100% abaixo de 0,2 mm, evidenciando a eficiência da moagem na redução das frações mais grosseiras e na obtenção de uma distribuição granulométrica mais contínua e homogênea. O FiBRO, por sua vez, apresentou aproximadamente 10% de partículas na fração argila ($<0,002$ mm) e uma distribuição granulométrica concentrada nas faixas de partículas finas e médias. Essa combinação favorece o empacotamento das partículas na matriz cerâmica, promovendo maior densificação durante a sinterização, com consequente redução da porosidade e da absorção de água, além de contribuir para o aumento da resistência mecânica dos corpos cerâmicos. Esses resultados corroboram os apresentados por Prado et al. (2008), que destacam a importância de distribuições granulométricas mais finas e ajustadas para o fechamento dos poros e a produção de revestimentos cerâmicos de baixa absorção de água.

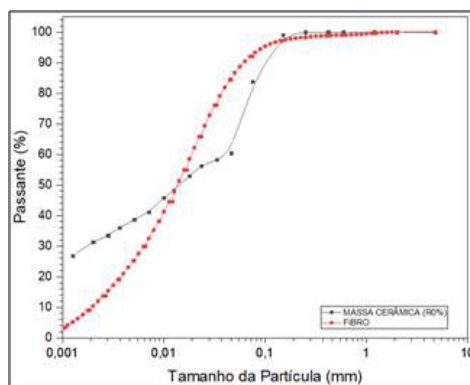


Figura 1: Análise granulométrica da massa cerâmica e do FiBRO.

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), apresentou em ambas as amostras (20 mesh e abaixo de 80 mesh), o comportamento lamelar característico das argilas. Na amostra de 20 mesh, observa-se uma textura heterogênea, caracterizada pela presença de grãos grosseiros com dimensões variadas, Figura 2A. Essas partículas, visualmente isoladas nas imagens, representam quartzo e argilominerais *in natura* que não sofreram redução significativa durante o processo inicial de moagem. Já a amostra abaixo de 80 mesh, Figura 2B, apresentou maior homogeneidade em comparação à de 20 mesh. A morfologia do material influencia sua porosidade e capacidade de absorção de água, portanto, o maior processamento da massa cerâmica, com peneiramento em malha de 80 mesh, pode contribuir para o controle dessas características, conforme evidenciado nas imagens de MEV.

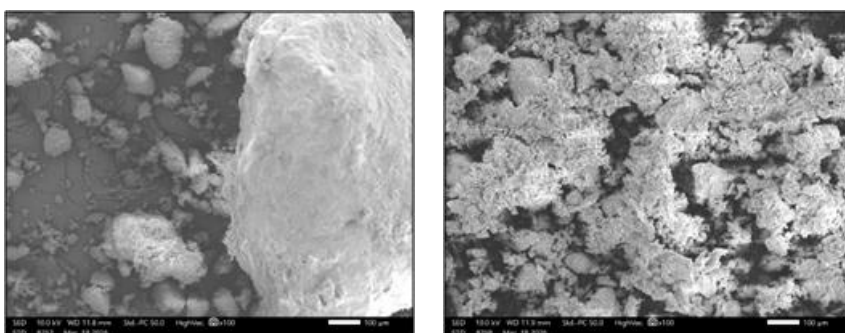


Figura 2: (A) amostra de 20 mesh - zoom de 100x / (B) amostra em 80 mesh - zoom de 100x.

Os ensaios de Limites de Atterberg (Tabela 1) evidenciam a influência da incorporação do resíduo FiBRO no comportamento da massa cerâmica na presença de água. Observa-se uma redução gradual e linear do Limite de Liquidez (LL), do Limite de Plasticidade (LP) e do Índice de Plasticidade (IP) à medida que o resíduo é incorporado à massa. Essa redução favorece a moldagem, diminui as deformações durante a secagem e a queima e resulta em menor absorção de água.

Tabela 1: Limites de Atterberg e Índice de Plasticidade.

Limites de Atterberg	R0%	R10%	R20%	R30%
LL	40,08%	39,04%	37,70%	37,06%
LP	24,98%	24,57%	23,42%	22,88%
IP	15,10%	14,47%	14,28%	14,18%

É possível observar na Figura 3, que a incorporação do FiBRO promoveu redução da absorção de água e da porosidade aparente, acompanhada pelo aumento da densidade aparente dos corpos de prova. Esses resultados indicam melhor empacotamento das partículas e maior densificação da massa cerâmica durante a sinterização, favorecidos pela distribuição granulométrica do

resíduo. Em contrapartida, verificou-se uma discreta redução da densidade relativa aparente com o aumento do teor de FiBRO. Como a densidade real do resíduo é semelhante à das argilas empregadas, esse comportamento pode estar associado à formação ou permanência de microvazios fechados na estrutura cerâmica, os quais não são detectados pelo ensaio de absorção de água, mas podem influenciar a densidade relativa aparente.

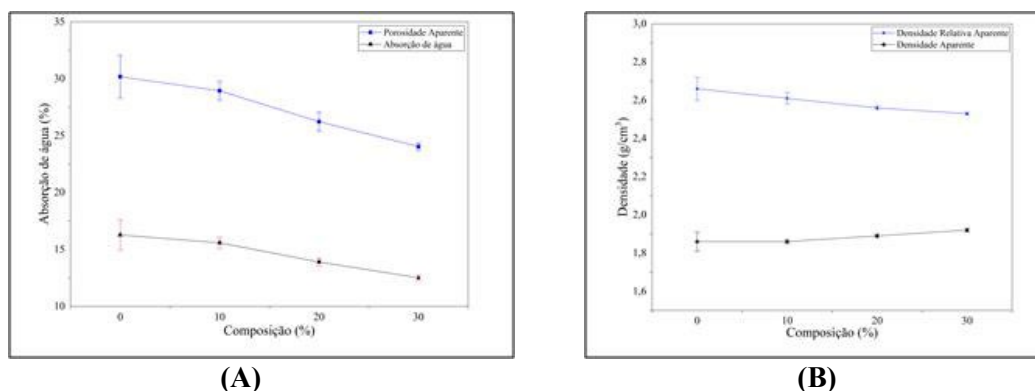


Figura 2: Resultado da absorção de água e porosidade aparente (A), densidade aparente e densidade relativa aparente (B).

A Figura 4 apresenta os resultados dos ensaios de perda de massa, retração linear e módulo de resistência à flexão em três pontos. Observa-se que a incorporação do FiBRO promoveu uma redução gradual da perda de massa durante a queima, passando de aproximadamente 8,1% na formulação R0% para 6,6% na formulação R30%. Em contrapartida, a retração linear aumentou progressivamente, atingindo cerca de 3,1% na formulação com 30% de FiBRO. Esse comportamento é compatível com uma maior densificação da massa cerâmica durante a sinterização, favorecida pelo melhor empacotamento das partículas proporcionado pela distribuição granulométrica do resíduo. Como consequência, verificou-se um aumento expressivo do módulo de resistência à flexão em três pontos, que passou de aproximadamente 4,65 MPa na composição de referência para cerca de 10,48 MPa na formulação contendo 30% de FiBRO. Esse fator está diretamente relacionado à redução da porosidade aparente e da absorção de água, bem como ao aumento da densidade aparente, fatores que contribuem para a formação de uma microestrutura mais compacta e resistente.

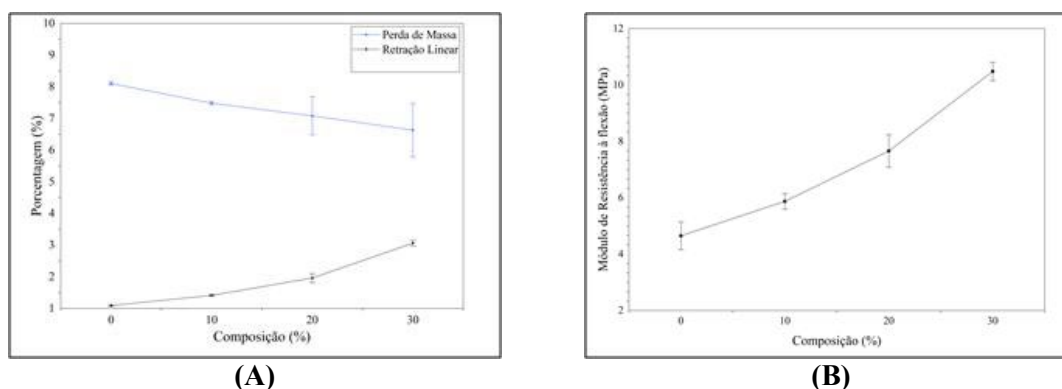


Figura 3: Ensaio de retração linear e perda de massa (A), e resistência à flexão em 3 pontos (B).

5. CONCLUSÕES

A redução granulométrica obtida por mais etapas de cominuição e reprocessamento da massa cerâmica resultou em um material com uma distribuição granulométrica mais homogênea, o que proporcionou um melhor empacotamento. Ela promoveu a redução progressiva da absorção de água, porosidade aparente e perda de massa, ao mesmo tempo em que proporcionou aumento da resistência à flexão em três pontos, passando de 4,65 MPa em R0% para 10,48 MPa na

formulação de 30% de FiBRO. Esse fato mostra que a redução granulométrica do resíduo potencializou a capacidade de preencher os vazios entre as partículas da massa cerâmica, o que favorece a sinterização, reduz defeitos internos e melhora o desempenho mecânico dos corpos de prova.

6. AGRADECIMENTOS

Agradeço ao CNPq pela bolsa de iniciação científica concedida, agradeço também aos meus orientadores Kayrone de Almeida Marvila e Mariane Costalonga de Aguiar, ao IFES campus Cachoeiro, e à minha família.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, M.M.; AGUIAR, M.C.; ALMEIDA, K.M.; SANT'ANA, M.A.K.; GADIOLI, M.C.B. Incorporação de resíduos de rochas ornamentais na produção de cerâmica vermelha: uma abordagem sustentável.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS (ABIROCHAS). Balanço das exportações e importações brasileiras de rochas ornamentais de janeiro a dezembro de 2025. Informe 12/2025. Brasília, DF, jan. 2026a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS (ABIROCHAS). Exportações e importações brasileiras de rochas ornamentais: período janeiro-maio de 2026. Informe 06/2026. Elaborado por Cid Chiodi Filho e Denize Kistemann Chiodi. Brasília, DF, jun. 2026b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 10545-3: Placas cerâmicas – Parte 3: Determinação da absorção de água, porosidade aparente, densidade relativa aparente e densidade aparente. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 10545-4: Placas cerâmicas – Parte 4: Determinação da carga de ruptura e módulo de resistência à flexão. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: ABNT, 2020.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, ano 147, n. 147, p. 3, 3 ago. 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. Plano Nacional de Economia Circular (PLANEC 2025–2034). Brasília, DF, Brasil, 2025.

GADIOLI, M.C.B.; AGUIAR, M.C.; VIDAL, F.W.H.; SANT'ANA, M.A.K.; ALMEIDA, K.M.; GIORI, A.J.N. Incorporation of Ornamental Stone Waste in the Manufacturing of Red Ceramics. *Materials*, v. 15, n. 16, p. 5635, 2022.

MAURÍCIO, T.B.; ALMEIDA, K.M. Estudo da viabilidade de uso do resíduo fino do beneficiamento de rochas ornamentais (FiBRO) em massa cerâmica para produção de piso e porcelanato. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO CETEM, 33., 2025, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro, RJ, Brasil: CETEM/MCTI, 2025.

NEVES, M.S.; MOSCON, L.B.P.; REIS, A.S.; FERREIRA, E.P.; SAGRILLO, V.P.D. Sustentabilidade na cerâmica: o potencial do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais na massa cerâmica argilosa. *Fórum Ambiental da Alta Paulista*, v. 20, n. 3, 2024.

PRADO, A.C.A.; ZANARDO, A.; MENEGAZZO, A.P.M.; MORENO, M.M.T. Influência da distribuição granulométrica na estabilidade dimensional de placas cerâmicas de base vermelha. *Cerâmica*, v. 54, p. 466-471, 2008.