

CAULIM RESIDUAL ATIVADO COMO ADIÇÃO EM ARGAMASSA DE REVESTIMENTO

FELIPE DO VAHL RIBEIRO¹; THAMIRES ALVES DA SILVEIRA²; RAFAEL DELUCIS⁴.

¹Universidade Federal de Pelotas – felipe.vs.ribeiro@gmail.com

²Universidade Federal de Pelotas - thaamiresasilveira@gmail.com

³ Universidade Federal de Pelotas – rafael.delucis@ufpel.edu.br

1. INTRODUÇÃO

O aproveitamento de resíduos industriais na construção civil representa uma estratégia essencial para promover a sustentabilidade e reduzir os impactos ambientais da cadeia produtiva do cimento. Nesse cenário, o caulim residual, subproduto da mineração e beneficiamento do caulim para as indústrias de papel, cerâmica e tintas (MAIA et al., 2025), surge como uma alternativa interessante para aplicação em materiais cimentícios. Sua reutilização não apenas contribui para a mitigação de passivos ambientais, como também oferece uma solução econômica ao reduzir a demanda por cimento Portland, cuja produção é altamente emissora de dióxido de carbono.

Contudo, o caulim residual em sua forma natural possui baixa reatividade. Para se tornar um material pozolânico eficaz, são necessárias etapas de ativação que modifiquem sua estrutura e revelem seu potencial reativo com o hidróxido de cálcio. Entre os métodos mais eficientes de ativação pozolânica do caulim, destacam-se a ativação térmica, por meio da calcinação a temperaturas controladas, e a ativação mecânica, que promove o aumento da área superficial e a quebra de cristalinidade através de moagem intensiva (DEROUICHE; BAKLOUTI, 2021).

A ativação térmica converte a caulinita presente no caulim em metacaulinita amorfa, responsável pela reatividade pozolânica do material calcinado. Já a moagem mecânica favorece a exposição de sítios ativos e a liberação de estruturas amorfas (DEROUICHE; BAKLOUTI, 2021), mesmo antes da calcinação, contribuindo para o desempenho final do material em sistemas cimentícios. Estudos mostram que caulins residuais devidamente ativados podem melhorar propriedades mecânicas e a durabilidade de argamassas e concretos, sendo uma estratégia eficaz de economia circular (RODRIGUES et al., 2021).

Além disso, a incorporação de materiais pozolânicos como o caulim ativado tem ganhado relevância nas diretrizes normativas e nas políticas públicas voltadas à construção sustentável, incentivando a substituição parcial do cimento por resíduos industriais com potencial reativo. Assim, este trabalho investiga o uso do caulim residual submetido à ativação térmica e mecânica como adição em argamassas de revestimento, com ênfase na avaliação de suas propriedades mecânicas e estruturais.

2. METODOLOGIA

O caulim residual utilizado neste estudo foi fornecido pela empresa Monte Pascoal, localizada no estado da Bahia. Inicialmente, o material foi seco em estufa a 105 °C por 24 horas. Em seguida, o caulim foi submetido à moagem em moinho de jarros por 3,5 horas, sendo posteriormente peneirado, de forma a seccionar

apenas a fração passante em malha de 45 µm. A etapa seguinte consistiu na calcinação do material a 800 °C durante 3 horas.

Para verificação da atividade pozolânica, foi realizado o ensaio de Chapelle modificado, obtendo-se um consumo de hidróxido de cálcio de 970,85 mg de Ca (OH)₂, o que indica significativa reatividade. O desempenho mecânico do caulim ativado foi avaliado por meio da metodologia prescrita na norma ABNT NBR 5752 (2014), que estabelece critérios de pozolanicidade com base em resistência à compressão de argamassas moldadas. Duas formulações de argamassa foram preparadas: a argamassa A (controle), composta por cimento, areia normal e água nas proporções de 624:1872:300 g; e a argamassa B, com substituição de 25% do cimento pelo caulim ativado, nas proporções de 468:156:1872:300 g para cimento, caulim, areia e água, respectivamente. O cimento utilizado foi o CPV-ARI-RS, fornecido pela Votorantim.

A moldagem foi realizada com base em procedimentos rotineiros de nosso laboratório, descritos por da Silveira et al. (2025), com corpos de prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura. Foram moldadas três amostras para cada condição de estudo. Após a cura, os corpos de prova foram submetidos a ensaio de compressão axial em máquina universal de ensaios EMIC DL30000, sob taxa de carregamento de 500 N/s e com pré-carga de 200 N.

Durante os ensaios, registrou-se a curva carga × deslocamento, sendo posteriormente calculadas as propriedades mecânicas: resistência à compressão, módulo de elasticidade, e índice de fragilidade. O módulo de elasticidade foi determinado a partir do trecho linear da curva, considerando as variações de carga e deslocamento, bem como a altura e a área da seção transversal. A fragilidade foi expressa como a relação entre o deslocamento no pico de carga e o deslocamento na ruptura, conforme equação $F = (\delta_{ruptura} / \delta_{pico}) \times 100$.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta as curvas carga × deslocamento obtidas para as argamassas controle (A) e com caulim ativado (B). Ambas as argamassas apresentam comportamento frágil típico, com trecho elástico seguido de ruptura abrupta. No entanto, a argamassa com caulim ativado atinge carga máxima e deslocamento maiores, indicando resistência e tenacidade superiores. O formato mais alongado da curva sugere que a adição do caulim refinou a microestrutura da matriz, retardando a propagação de trincas. Isso pode ser atribuído à formação de C-S-H secundários, que melhoram a coesão interna (CHENG et al., 2021). Assim, o dano ocorre de forma mais distribuída e menos explosiva, favorecendo um desempenho mais estável do revestimento.

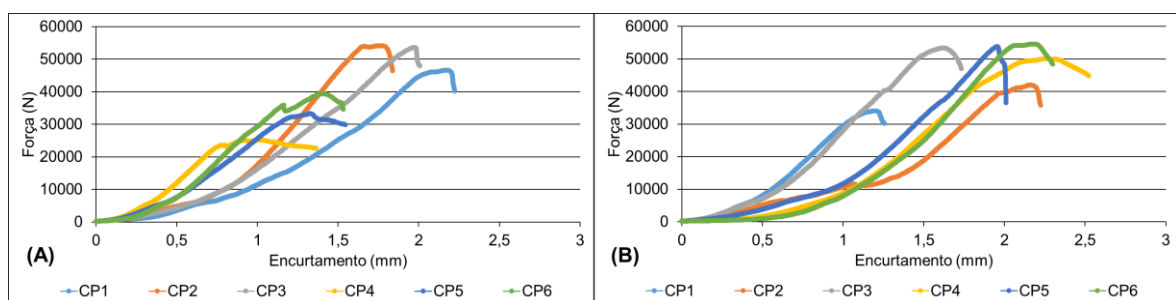


Figura 1 – Curvas força vs. encurtamento das argamassas sem (A) e com (B) caulim ativado.

Na Figura 2A, observa-se que a resistência à compressão da argamassa com caulim ativado foi de 21,54 MPa, enquanto a da argamassa controle foi de 15,05 MPa, representando um incremento de aproximadamente 43,1%. Tal aumento confirma o comportamento pozolânico do caulim ativado, conforme critério da norma ABNT NBR 5752 (2014). A Figura 2B mostra o módulo de elasticidade, que também foi superior para a argamassa com caulim (2063,78 MPa) em relação à controle (1715,76 MPa), indicando uma matriz mais rígida e coesa. Essa diferença pode ser atribuída à interação entre os produtos de hidratação do cimento e as fases reativas do caulim calcinado, que promovem maior densificação da matriz. A melhoria nas propriedades mecânicas pode ser atribuída à formação de fases amorfas reativas no caulim após a calcinação, especialmente o metacaulim, que reage com o hidróxido de cálcio do cimento formando produtos cimentícios adicionais como C-S-H e C-A-H, que densificam a matriz (AHMAD; CHEN; SHAH, 2020). A moagem também contribui, aumentando a área de contato e favorecendo essas reações. Essas prováveis alterações microestruturais explicam a elevação da resistência e rigidez observadas na argamassa com caulim ativado.

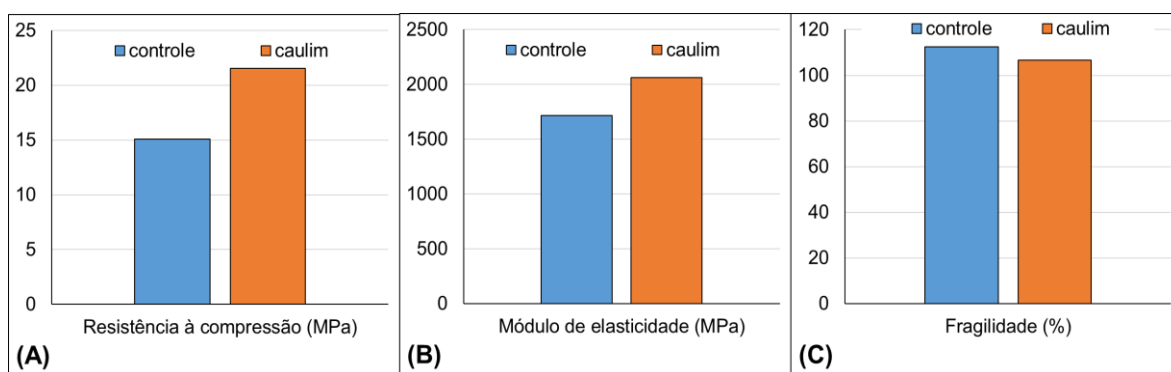


Figura 2 – Níveis médios de resistência à compressão (A), módulo de elasticidade (B) e fragilidade (C).

Quanto ao índice de fragilidade (Figura 2C), ambos os compósitos apresentaram valores superiores a 100%, o que é comum para materiais frágeis, mas houve uma leve redução para a argamassa com caulim (106,58%) em comparação com a argamassa controle (112,50%), sugerindo que a presença do caulim ativado promove leve aumento na ductilidade relativa do material. Esses resultados estão em consonância com estudos anteriores que demonstram a eficácia da ativação térmica do caulim residual como alternativa viável para aplicações cimentícias. Esse resultado pode estar relacionado à presença de fases secundárias formadas a partir da reação pozolânica, como C-A-H e C-S-H, que conferem maior coesão à matriz, redistribuindo melhor os esforços na microestrutura antes da ruptura (KIJJANON et al., 2024). Esses achados estão de acordo com a literatura que aponta o caulim calcinado como um aditivo viável para melhorar o desempenho mecânico e a tenacidade de compósitos cimentícios.

4. CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo investigar o uso do caulim residual ativado termicamente e mecanicamente como adição pozolânica em argamassas de revestimento. Os resultados mostraram que o material apresenta significativa atividade pozolânica, com consumo significativo de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ no ensaio de Chapelle e desempenho superior à argamassa controle quanto à resistência à compressão

e ao módulo de elasticidade. Com base na ABNT NBR 5752, a argamassa com caulim deveria superar o controle em 75% para que fosse atribuída uma atividade pozolânica significativa ao caulim, o que não aconteceu. Além disso, foi observada leve redução no índice de fragilidade, indicando maior capacidade de deformar-se antes da ruptura. Tais achados reforçam o potencial do caulim residual como alternativa sustentável e eficiente para substituição parcial do cimento, promovendo ganhos ambientais e contribuindo para a valorização de resíduos minerais na construção civil. Estudos futuros poderão explorar outros mecanismos de ativação do caulim, diferentes proporções de substituição e a durabilidade das argamassas formuladas com esse material.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMAD, M. R.; CHEN, B.; SHAH, S. F. A. Influence of different admixtures on the mechanical and durability properties of one-part alkali-activated mortars. **Construction and Building Materials**, v. 265, p. 120320, dez. 2020.

CHENG, S. et al. Pozzolanic activity of mechanochemically and thermally activated coal-series kaolin in cement-based materials. **Construction and Building Materials**, v. 299, p. 123972, 2021.

DEROUICHE, R.; BAKLOUTI, S. Phosphoric acid based geopolymerization: Effect of the mechanochemical and the thermal activation of the kaolin. **Ceramics International**, v. 47, n. 10, p. 13446–13456, maio 2021.

KIJJANON, A. et al. Sodium sulfate and magnesium sulfate resistances of mortar with multi-binder systems of calcined kaolinite clay, fly ash, and limestone powder. **Journal of Sustainable Cement-Based Materials**, v. 13, n. 7, p. 1015–1031, 2 jul. 2024.

MAIA, M. B. et al. Kaolin Waste Applied as Support for Photocatalytic Materials. **Sustainability**, v. 17, n. 4, p. 1605, 15 fev. 2025.

RODRIGUES, A. M. et al. Development of Eco-Friendly Mortars Produced with Kaolin Processing Waste: Durability Behavior Viewpoint. **Sustainability**, v. 13, n. 20, p. 11395, 15 out. 2021.