AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE MOAGEM DE RESÍDUOS DE CERÂMICA VERMELHA PARA O USO COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR

Evaluation of Milling Parameters of Red Ceramic Waste for Use as a Supplementary Cementitious Material

Caio Siebra Alcântara
Universidade Federal do Ceará (UFC) | Fortaleza, Ceará | caiosiebra93@alu.ufc.br

Iuri Veríssimo Mendonça
Universidade Federal do Ceará (UFC) | Fortaleza, Ceará | iurivm13@alu.ufc.br

Heloina Nogueira da Costa
Universidade Federal do Ceará (UFC) | Fortaleza, Ceará | heloina@ufc.br

Antônio Eduardo Bezerra Cabral
Universidade Federal do Ceará (UFC) | Fortaleza, Ceará | eduardo.cabral@ufc.br

RESUMO

A disposição dos resíduos da indústria de cerâmica vermelha, geralmente em aterros, reforça a necessidade de soluções sustentáveis para a construção civil. Uma alternativa promissora é seu aproveitamento como Material Cimentício Suplementar (MCS), desde que atenda aos requisitos granulométricos normativos. Neste contexto, este estudo avalia a influência da razão entre corpos moedores e material, e do tempo de moagem na redução do tamanho das partículas e no aumento da área superficial do Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV). Para isso, utilizou-se um moinho de jarro rotativo, no qual foram realizadas etapas de beneficiamento e caracterização química e física do material. Os resultados demonstram que a eficiência da razão de enchimento no refinamento granulométrico é potencializada pelo aumento do tempo de moagem. Em especial, amostras submetidas a 3h de moagem e razão de enchimento de 10:1 continham partículas mais finas e maior área superficial, fatores determinantes para aprimorar a reatividade do RCV.

Palavras-chave: Resíduo Cerâmico; Granulometria; Razão de enchimento; Tempo de moagem.

ABSTRACT

The disposal of red ceramic industry waste, usually in landfills, underscores the need for sustainable solutions in the construction sector. A promising alternative is its use as a Supplementary Cementitious Material (SCM), provided it meets regulatory particle size requirements. In this context, this study evaluates the influence of the grinding media-to-material ratio and milling time on particle size reduction and the increase in the specific surface area of Red Ceramic Waste (RCW). For this purpose, a rotary jar mill was used, in which beneficiation and chemical and physical characterization of the material were carried out. The results demonstrate that the efficiency of the filling ratio in particle size refinement is enhanced by increasing the milling time. Specifically, samples subjected to 3 hours of milling with a 10:1 filling ratio exhibited finer particles and a larger surface area, key factors in improving RCW reactivity.

Keywords: Ceramic Waste; Granulometry; Filling Ratio; Milling Time.

1 INTRODUÇÃO

A preocupação crescente com a sustentabilidade na indústria da construção civil tem impulsionado pesquisas voltadas para a reutilização de resíduos industriais e a redução do consumo de materiais primários não renováveis. Resíduos da produção da indústria de cerâmica vermelha existe em quantidade de desperdícios entre 8 e 10%, dependendo do controle de qualidade da empresa, que normalmente é destinado a acumular em aterros (Cavalcanti *et al*., 2013; Cherene *et al*., 2023).

O resíduo de cerâmica vermelha (RCV) sofre o tratamento térmico (600–900 °C) da produção dos tijolos que leva à desidroxilação de minerais argilosos e à criação de fases amorfas reativas com potenciais pozolânicos (Navrátilová; Rovnaníková, 2016). Nesse contexto, os materiais pozolânicos residuais são também uma alternativa para redução do consumo de cimento - produto com alta emissão de CO_2 - necessitando apresentar uma fonte original com alto teor de silício (Si) e alumínio (Al) para atuarem como Materiais Cimentícios Suplementares (MCS) (Bideci *et al*., 2024). Entretanto, é necessário o processo de beneficiamento para a utilização do RCV como MCS. Procedimento que envolve a redução granulométrica para substituição do cimento, onde a NBR 12653 (ABNT, 2014) exige ter no máximo 20% da amostra do material retida na peneira 45 µm como requisito físico para materiais pozolânicos.

Dessa forma, este artigo tem como objetivo analisar a influência dos parâmetros de moagem do resíduo de cerâmica vermelha (RCV), com ênfase na relação entre a razão enchimento entre corpos moedores e material, e o tempo de moagem. Busca-se compreender como essas variáveis afetam a distribuição granulométrica do material, promovendo a redução do tamanho das partículas, e o aumento da área superficial específica, fatores essenciais para potencializar sua reatividade como MCS.

2 METODOLOGIA

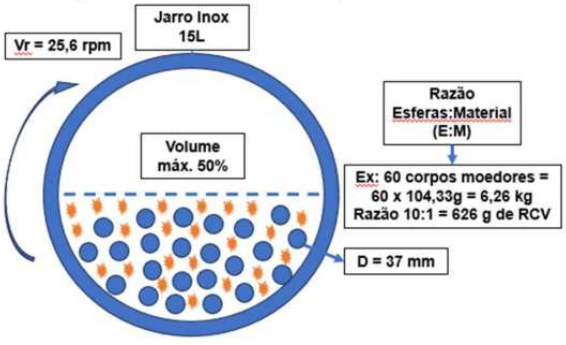
O material utilizado nas análises do presente trabalho foi RCV provenientes do Arranjo Produtivo Local (APL) de cerâmica vermelha do Baixo Jaguaribe, localizado no estado do Ceará. O programa experimental foi dividido em beneficiamento e caracterização química e física do RCV nos diferentes tempos de moagem e razão entre corpos moedores e material.

2.1 BENEFICIAMENTO DO RCV

O RCV foi inicialmente fragmentado com uma marreta e posteriormente submetido à britagem em britador de mandíbula para a redução parcial de sua granulometria. Em seguida, o material foi classificado por peneiramento mecânico utilizando peneiras com aberturas de 4,75mm e 0,075mm, ou seja, somente os resíduos passantes na peneira de 4,75 mm e retidos na peneira de 0,075mm foram encaminhados para moagem.

Para a moagem utilizou-se um moinho de jarro rotativo, modelo SL-34, e foram fixados os seguintes parâmetros: utilização de 50% do volume do jarro de inox, velocidade de rotação (Vr) de 25,6 rpm e diâmetro das esferas de moagem (D) de 37 mm. A variação foi realizada a partir da referência de Tole, Habermehl-Cwirzen, Cwirzen (2019) na razão de enchimento, relação entre a massa total dos corpos moedores (esferas) e a massa do material a ser moído, além do tempo de moagem. Como é ilustrado na Figura 1.

Figura 1: Diâmetro médio de partículas do RCV



Fonte: Autores (2025).

Com isso, o material resultante da moagem foi peneirado na malha de 75 µm para posteriormente ser submetido aos ensaios de caracterização. Para padronizar a identificação das amostras apresentadas na Tabela 1, adotou-se uma nomenclatura baseada no modelo "A_[Razão]_[Tempo]", em que "A" representa a amostra, [Razão] indica a razão enchimento entre corpos moedores e material no moinho e [Tempo] corresponde ao tempo de moagem em horas.

Tabela 1: Parâmetros de moagem analisados

Amostra	Razão de enchimento	Tempo de Moagem (h)
A_10_3	10:1	3
A_10_2	10:1	2
A_7_3	7:1	3
A_7_2	7:1	2
A_7_1	7:1	1
A_6_3	6:1	3
A_6_2	6:1	2
A_6_1	6:1	1

Fonte: Autores (2025).

2.2 CARACTERIZAÇÃO

A caracterização do RCV foi realizada por meio de análise por fluorescência de raios X (FRX), com o objetivo de determinar os percentuais de óxidos em sua composição química, ensaio de Perda ao Fogo (PF), conforme a NBR 17086-6 (ABNT, 2023), e o ensaio da massa específica (γ) conforme a NBR 16605 (ABNT, 2017). Os resultados desses ensaios foram compilados na Tabela 2.

Tabela 2: Resultados da análise química do FRX e massa específica

Composição Química (%)	RCV
SiO_2	58,65
Al_2O_3	17,26
Fe_2O_3	6,58
CaO	0,98
MgO	1,18
K_2O	3,01
SO_3	-
Na_2O	1,58
PF	0,72
Parâmetro Físico	
γ (g/cm³)	2,76

Fonte: Autores (2025).

Na análise química, foi possível observar pela FRX que o RCV atinge pré-requisitos pozolânicos estabelecidos pela NBR 12653 (ABNT, 2018) em sua composição química para aplicação como MCS, onde o percentual de SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 é maior que 70%, mais especificamente 82,49%. Em relação ao requisito da perda ao fogo, o RCV atende ao limite estabelecido para a classe N (≤ 10%), além de apresentar álcalis disponíveis em Na_2O menor que 1,5% e nenhum teor de trióxido de enxofre (SO_3 ≤ 4%).

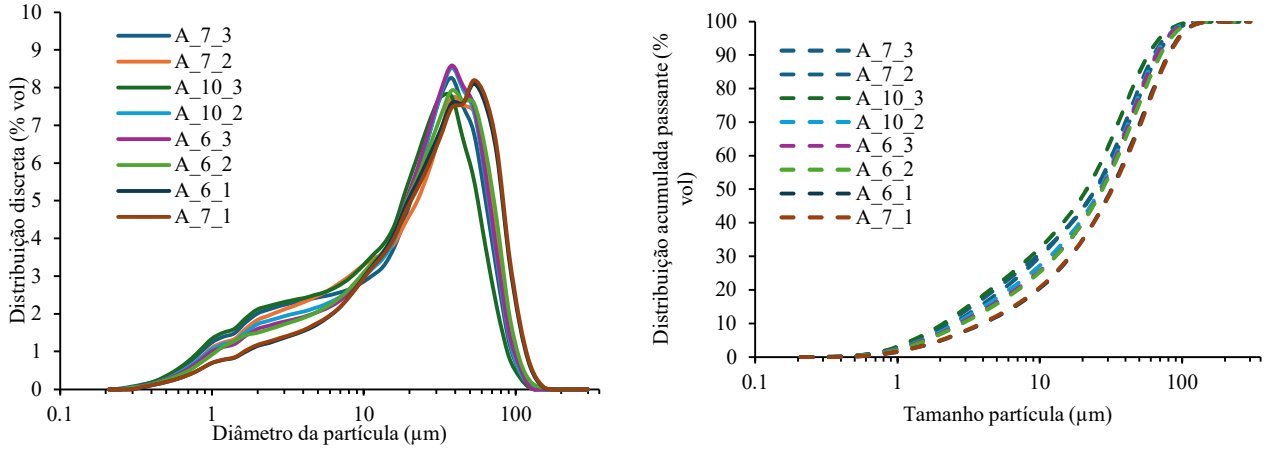
Para avaliação dos parâmetros de tratamento de moagem do resíduo foi realizada a granulometria a laser das amostras. A análise granulométrica foi determinada em um granulômetro a laser Helos KR (Sympatec), com intervalo de análise de 0,1 a 355 µm, executadas 3 leituras de 10 segundos em cada lente, a úmido em H_2O + $Na_4P_2O_7$ e precedidas pela ação de ultrassom, a fim de identificar o tamanho das partículas e a distribuição granulométrica. Além disso, a área específica do RCV foi obtida pelo método Blaine, segundo a NBR 16372 (ABNT, 2015).

3 RESULTADOS E ANÁLISES

A análise das curvas granulométricas do RCV indica o deslocamento do pico de distribuição granulométrica assim como o acúmulo de partículas de menores dimensões com o aumento do tempo de moagem e da razão entre corpos moedores e material, como mostra a Figura 1.

A comparação entre as amostras revela que o aumento do tempo de moagem e da razão entre corpos moedores e material leva a uma redução nos diâmetros das partículas (D10, D50 e D90), indicando um maior grau de cominuição do RCV, conforme apresentado na Tabela 2. Essa tendência reforça a influência do processo de moagem na diminuição do tamanho das partículas, contribuindo para uma distribuição granulométrica com maior processamento.

Figura 1: Curvas de distribuição de tamanho de partículas



Fonte: Autores (2025).

Tabela 2: Diâmetros característicos de partículas e área superficial do RCV

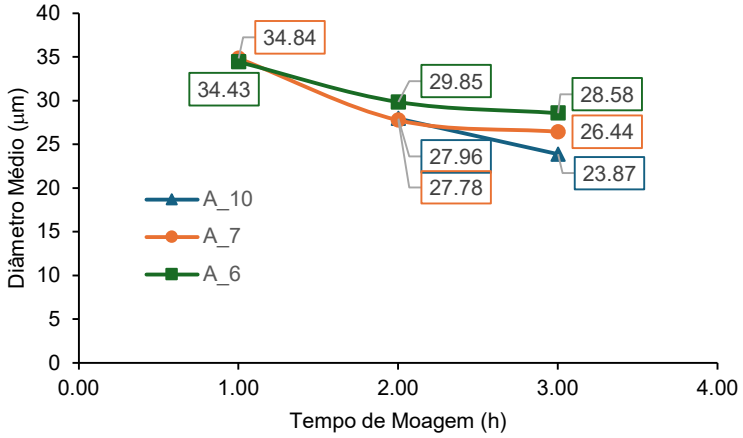
Amostra	D10 (µm)	D50 (µm)	D90 (µm)	Blaine (cm²/g)
A_10_3	2,1	21,3	58,1	5680
A_10_2	2,6	26,4	65,3	4590
A_7_3	2,2	24,6	63	4620
A_7_2	2,5	24,7	67,7	4330
A_7_1	3,9	32,2	81,4	3520
A_6_3	2,7	27,1	66,3	4290
A_6_2	2,8	27,4	70,6	4110
A_6_1	4	31,7	80,3	3420

Fonte: Autores (2025).

Entende-se também que área superficial específica (Blaine, cm²/g) está diretamente relacionada ao grau de finura das partículas. A amostra A_10_3, que apresentou os menores diâmetros médios, registrou a maior área superficial (5680 cm²/g), evidenciando que a moagem mais intensa aumenta a finura do material. Por outro lado, a amostra A_6_1, com os maiores valores de diâmetro, obteve a menor área superficial (3420 cm²/g), indicando uma ativação de superfície menos eficaz. A área superficial específica é um importante parâmetro para a cinética química, pois quanto maior a área específica superficial do material, maior a taxa de reação química (Rodrigues, 2012).

A Figura 2 apresenta a relação entre o tempo de moagem (h) e o diâmetro médio das partículas (em µm) do resíduo de cerâmica vermelha (RCV) para três diferentes razões de enchimento do moinho.

Figura 2: Diâmetro médio de partículas do RCV



Fonte: Autores (2025).

Observa-se que o efeito da razão entre corpos moedores e material sobre a redução do diâmetro médio das partículas se intensifica à medida que o tempo de moagem aumenta. Inicialmente, com 1h de moagem, as diferenças entre os diâmetros médios das amostras são relativamente pequenas, sugerindo que, em tempos curtos, a razão de enchimento tem uma influência limitada no processo. No entanto, conforme a moagem se prolonga para 2h e 3h, a discrepância entre os valores de diâmetro médio cresce, evidenciando que amostras

com maior razão de enchimento (10:1 e 7:1) sofrem uma fragmentação mais acentuada do que aquelas com razão menor (6:1). Isso pode estar associado a um maior número de colisões entre as partículas e os corpos moedores dentro do jarro.

4 CONCLUSÃO

Os resultados reforçaram que o beneficiamento no moinho de jarro rotativo aumenta o potencial de aplicação do RCV como material cimentício suplementar, alinhando-se aos requisitos físicos normativos para aplicação em matrizes cimentícias. Tanto o aumento do tempo de moagem quanto a elevação da razão de enchimento do moinho exercem um impacto significativo na redução do tamanho das partículas e no aumento da área superficial específica do RCV.

Observou-se que a eficiência da razão enchimento no processamento granulométrico é amplificada com tempos de moagem mais longos, tornando-se um parâmetro essencial para otimizar o processo. Em particular, as amostras submetidas a uma moagem mais intensa (3h e razão de enchimento de 10:1) apresentaram partículas mais finas e maior área superficial, características fundamentais para potencializar a reatividade do material.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Projeto CNPq n° 409236/2022-5 (Melhoramento e valorização de produtos cerâmicos do APL Cerâmica Vermelha do Baixo Jaguaribe/CE) pelo apoio financeiro.

6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16372**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17086-6**: Cimento Portland - Análise química Parte 6: Determinação da perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2023.

BIDECI, Ö. S.; BIDECI, A.; ASHOUR, A. Utilization of Recycled Brick Powder as Supplementary Cementitious Materials - A Comprehensive Review. **Materials**, v. 17, n. 3, p. 637, 2024.

CAVALCANTI, V. M. M.; MOREIRA, M. A.; SILVA, C. A.; PERLATTI, F. **Projeto organização e formalização das atividades de extração de argila no baixo Jaguaribe – Ceará**. Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), 2013.

CHERENE, M. G. P. *et al*. Technological and microstructural perspective of the use of ceramic waste in cement-based mortars. **Construction and Building Materials**, v. 367, 27 fev. 2023.

NAVRÁTILOVÁ, E.; ROVNANÍKOVÁ, P. Pozzolanic properties of brick powders and their effect on the properties of modified lime mortars. **Construction and Building Materials**, v. 120, p. 530-539, 2016.

RODRIGUES, M. S. Avaliação de cinzas de palha de cana-de-açúcar e sua utilização como adição mineral em matrizes cimentícias. Tese (Doutorado) –Universidade Estadual de Campinas –Faculdade de Engenharia Agrícola, Campina, 2012.

TOLE, I.; HABERMEHL-CWIRZEN, K.; CWIRZEN, A. Mechanochemical activation of natural clay minerals: an alternative to produce sustainable cementitious binders–review. **Mineralogy and Petrology**, v. 113, p. 449-462, 2019.