O impacto da moagem na reatividade da cinza volante para uso como material cimentício suplementar.

The impact of grinding on the reactivity of fly ash for use as a supplementary cementitious material

José Maria de Moura Júnior
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) | Porto Alegre, RS | jmmj@poli.br

Daniel Thomaz Farina
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) | Porto Alegre, RS | danielfarina31@gmail.com

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

Ana Paula Kirchheim
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) | Porto Alegre, RS | anapaulak@gmail.com

Resumo

O uso de materiais cimentícios suplementares (MCS) é uma das alternativas para diminuição do fator clínquer na produção de cimento, resultando na redução de emissão de CO_2. A cinza volante (CV) é um MCS gerado durante a queima do carvão mineral em termelétricas. Sua granulometria é variável, o que pode influenciar na sua reatividade. Diante disso, este estudo investiga o impacto da moagem na reatividade da CV, que foi moída em um moinho de bolas planetário por períodos entre 10 e 60 minutos. A reatividade foi avaliada pelo método R³ com calorimetria isotérmica e método Chapelle modificado. Os resultados demonstram que o aumento do tempo de moagem resultou na redução do diâmetro das partículas da CV, o que contribuiu para a elevação de sua atividade pozolânica, conforme verificado nos ensaios de reatividade. Essa melhoria indica um maior potencial de aplicação da CV como MCS.
Palavras-chave: Resíduo; Cinza volante; Moagem; Pozolana; Reatividade.

ABSTRACT

The use of supplementary cementitious materials (SCMs) is one of the alternatives for reducing the clinker factor in cement production, leading to lower CO_2 emissions. Fly ash (FA) is an SCM generated during the combustion of mineral coal in thermoelectric power plants. Its particle size distribution is variable, which can influence its reactivity. In this context, this study investigates the impact of grinding on the reactivity of FA, which was ground in a planetary ball mill for periods ranging from 10 to 60 minutes. Reactivity was evaluated using the R³ method with isothermal calorimetry and the modified Chapelle method. The results show that increasing the grinding time led to a reduction in FA particle diameter, which contributed to an increase in its pozzolanic activity, as observed in the reactivity tests. This improvement indicates a greater potential for using FA as an SCM.
Keywords: Waste; Fly ash; Grinding; Pozzolana; Reactivity.

1 INTRODUÇÃO

Diante das mudanças climáticas, agravadas por fenômenos como o aquecimento global e o efeito estufa, a redução das emissões de dióxido de carbono é essencial para mitigar seus impactos adversos. A indústria de cimento, juntamente com a de geração de energia, está entre as maiores responsáveis pelas emissões globais de CO_2 (SUPRIYA *et al.*, 2023). A produção mundial de cimento Portland convencional contribui anualmente com cerca de 3,5 Gt de CO_2 para a atmosfera (STEFANOIU, 2022).

Na fabricação de cimento, a descarbonatação é a maior fonte de emissões, representando cerca de 65% do CO_2 liberado (SCHNEIDER, 2019; SILVA, 2019). Para reduzir esse impacto, propõe-se a substituição parcial do clínquer por materiais cimentícios suplementares (MCS), como a cinza volante, subproduto de usinas termelétricas com partículas esféricas menores que 0,075 mm (HO; HUYNH, 2023). Pela norma ASTM C618-23 (ASTM, 2023), a cinza volante é classificada em classe C, com 50-70% de óxidos e alto teor de CaO, e classe F, com mais de 70% de $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$. Essas características a tornam adequada para uso em argamassas e concretos (ONAIZI *et al.*, 2022).

Este artigo analisa a influência dos tempos de moagem na reatividade da cinza volante. O material foi caracterizado pelo tamanho de suas partículas após cada etapa de moagem, e sua reatividade foi avaliada pelos métodos R³, por calorimetria isotérmica, e pelo método de Chapelle modificado.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 BENEFICIAMENTO DA CINZA VOLANTE

Para o presente artigo, utilizou-se uma CV proveniente da região Sul do Brasil. Inicialmente, realizou-se a homogeneização e o quarteamento das cinzas para a realização da caracterização e utilização nos ensaios. Foi utilizado um moinho de bolas planetário de laboratório, modelo CT-241 da SERVITECH. Padronizou-se uma rotação de 350 rpm, com a razão de esferas em 20:1, e esferas variando entre 13 e 20 mm. A cinza volante foi moída com intervalos de 10 min, variando entre 10 a 60 min, resultando em 6 amostras de diferentes granulometrias.

2.2 CARACTERIZAÇÃO

A granulometria da cinza volante in natura e da moída por diferentes tempos foi analisada com o equipamento Anton-Paar PSA 1090L, usando água como dispersante.

A reatividade das cinzas moídas foi avaliada por dois métodos: o R³ por calorimetria isotérmica e o Chapelle modificado. No R³, conforme a Norma ASTM C1897-20 (ASTM, 2020), prepararam-se pastas com hidróxido de cálcio, carbonato de cálcio e solução de potássio na proporção 1:3:0,5:5,4. Cada pasta foi colocada em uma ampola e inserida no calorímetro isotérmico TAM Air, com água deionizada como referência. A temperatura foi mantida a 40 °C, monitorando o fluxo de calor por 6 dias.

O método Chapelle modificado seguiu a NBR 15895 (ABNT, 2010). Uma solução com 1,0 g de material pozolânico, 2,0 g de CaO e 250 ml de água sem CO2 foi mantida em banho-maria a (90 ± 5) °C, sob agitação, por 16 ± 2 horas. Após, adicionou-se 240 g/L de solução de sacarose, agitada por 15 minutos. A titulação usou 50 ml de HCl 0,1 M, com fenolftaleína (1 g/L) como indicador, determinando a quantidade de hidróxido de cálcio fixado por grama de material.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

A análise granulométrica da CV mostra que o aumento do tempo de moagem reduz o diâmetro das partículas, conforme apresentado na Tabela 1. O moinho utilizado demonstrou alta eficiência, atingindo granulometrias mais finas em menos tempo, quando em comparação ao moinho de bolas utilizado por Ali, Xuan e Poon (2020) que alcançaram 20 micrômetros após 4 horas. Essa tendência evidencia que o processo de moagem exerce influência significativa na diminuição do tamanho das partículas, promovendo maior homogeneidade e refinamento da granulometria.

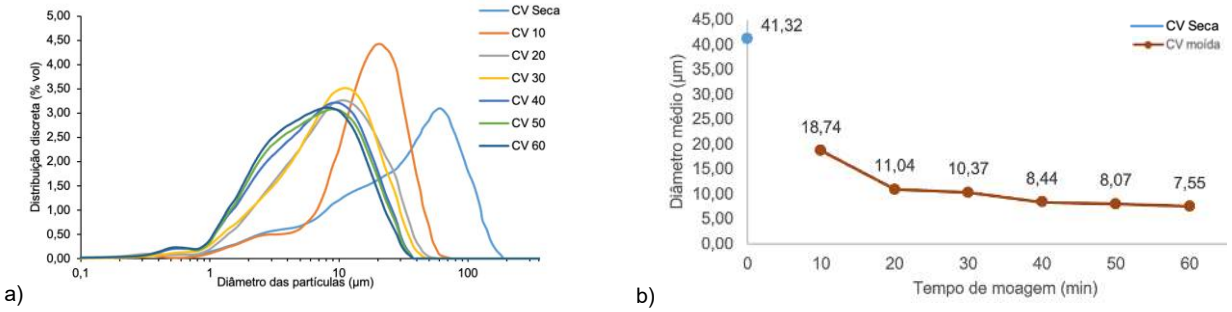
Tabela 1: Caracterização granulométrica da cinza volante.

Cinza volante / tempo de moagem (min)	Dméd (µm)	D10 (µm)	D50 (µm)	D90 (µm)
CV10	18,4	5,02	16,60	33,00
CV20	11,4	2,23	8,48	22,54
CV30	10,7	2,12	8,29	20,41
CV40	8,44	1,68	6,42	17,37
CV50	8,07	1,64	5,96	16,80
CV60	7,55	1,58	5,55	15,63
CV (seca)	41,2	3,84	32,23	87,71

Fonte: Autores (2025).

A análise das curvas de distribuição granulométrica apresentadas na Figura 1a, evidencia uma transição de uma característica descontínua, observada no tempo de moagem de 10 minutos, para uma distribuição mais contínua em tempos superiores de moagem.

Figura 1: (a) Distribuição granulométrica; (b) Diâmetro médio das partículas segundo granulometria a laser.



Fonte: Autores (2025).

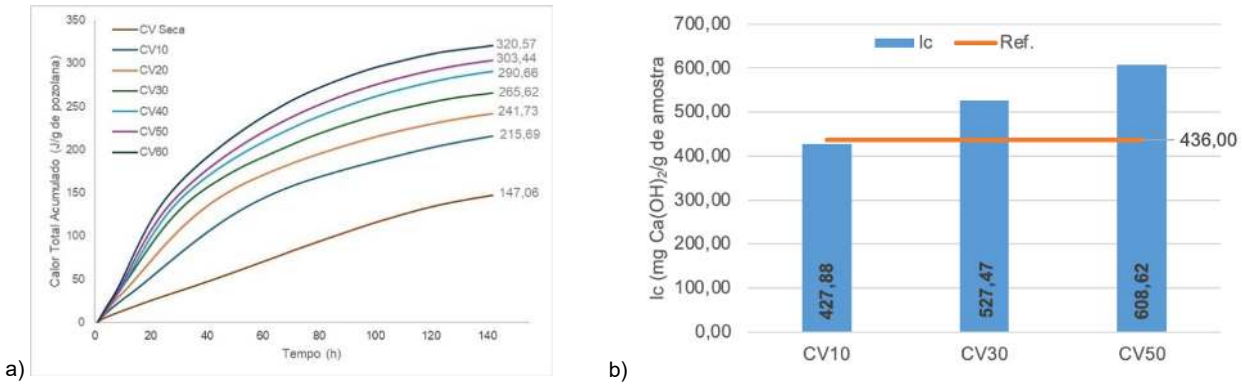
A evolução do diâmetro médio das partículas em função do tempo de moagem é apresentada na Figura 1b. As reduções mais expressivas no diâmetro médio das partículas ocorrem ao comparar a CV seca, sem moagem, com a moída por 10 min, apresentando uma redução de quase 55%, e entre os tempos de moagem de 10 a 20 min, com redução de cerca de 41%. Em tempos subsequentes, observa-se uma redução progressivamente menor: 6% (20 a 30 min); 18% (30 a 40 min); 4% (40 a 50 min); e 6% (50 a 60 min). Esses resultados sugerem, de forma preliminar e sem considerar a viabilidade econômica, que os tempos de 10 ou 20 min podem ser os mais efetivos na redução da granulometria da cinza.

3.2 REATIVIDADE R³ E CHAPELLE

As curvas de calor total acumulado das pastas com cinza volante seca e moída, obtidas por calorimetria isotérmica no ensaio R³, estão na Figura 2a. A CV seca registrou 147 J/g ao final, justificado pelo seu maior diâmetro inicial. Após 10 minutos de moagem, o calor acumulado aumentou 46,67%, indicando maior reatividade. Tempos de moagem mais longos reduziram o tamanho das partículas, elevando a liberação de calor e a reatividade pozolânica. A amostra moída por 60 minutos alcançou 320 J/g ao sétimo dia, um aumento de 218% em relação à CV seca.

Conforme Londono-Zuluaga *et al*. (2022), valores típicos de CV variam entre 80 e 400 J/g, faixa compatível com os resultados obtidos. Para reatividade pozolânica, o material deve atingir pelo menos 98 J/g aos 7 dias (confiança de 66%) ou 160 J/g (confiança de 90%). Todas as CV moídas superaram o limite de 90%, enquanto a CV seca atendeu ao critério de 66%.

Figura 2: Curvas de calor total acumulado das CV (a); Resultados do ensaio de Chapelle modificado em Cinzas Volante (b).



Fonte: Autores (2025).

Os índices de atividade pozolânica de Chapelle (Ic), que representam o teor de hidróxido de cálcio fixado pela fase amorfa das cinzas, são apresentados na Figura 2b. Assim como observado no ensaio R³, as amostras com maior tempo de moagem apresentaram índices mais elevados. Destaca-se que as cinzas CV30 e CV50 ultrapassaram o valor de referência de 436 mg de $Ca(OH)_2$ por grama de amostra, estabelecido por Raverdy *et al*. (1980) como limite mínimo para a caracterização de materiais com atividade pozolânica. Os resultados do ensaio Chapelle indicam que um tempo mínimo de moagem de 30 minutos é necessário para que a CV atinja a atividade pozolânica de referência. De acordo com Ali *et al*. (2020), esse aumento na reatividade está diretamente relacionado à redução do tamanho médio das partículas, o que resulta em uma maior área superficial disponível para a reação com o hidróxido de cálcio.

4 CONCLUSÃO

Neste estudo, foram avaliados diferentes tempos de moagem de uma mesma cinza volante, com o objetivo de analisar seu grau de reatividade. Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

(1) Observa-se que o aumento do tempo de moagem promove uma expressiva redução no diâmetro das partículas de CV, especialmente nos estágios iniciais do processo. Entretanto, à medida que o tempo de moagem avança, a efetividade da moagem diminui, resultando em reduções cada vez menores no tamanho das partículas. Essa redução na eficiência do processo pode limitar os ganhos em aplicações que demandam partículas muito finas, exigindo uma análise criteriosa do tempo ótimo de moagem.
(2) Através da curva de calor total liberado resultante do ensaio R³, verifica-se que quanto maior o tempo de moagem, maior é o aumento de calor liberado, indicando um aumento de reatividade da CV.
(3) As cinzas com maior tempo de moagem desenvolveram teores mais elevados de hidróxido de cálcio fixado pela fase amorfa das amostras.

Dessa forma, a moagem mostrou-se uma estratégia eficaz para a redução do diâmetro das partículas e o aumento da reatividade da CV, contribuindo para seu potencial uso como MCS. No entanto, observou-se que a efetividade da moagem diminui com o tempo, resultando em ganhos cada vez menores na redução do tamanho das partículas. Assim, para viabilizar sua aplicação em escala industrial de forma sustentável, torna-se essencial aprofundar os estudos sobre a relação entre tempo de moagem e desempenho pozolânico, considerando também o custo-benefício energético envolvido no processo.

REFERÊNCIAS

ALI, H. A.; XUAN, D.; POON, C. S. Assessment of long-term reactivity of initially lowly-reactive solid wastes as supplementary cementitious materials (SCMs). **Construction and Building Materials**, v. 232, p. 117192, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C618-23**: Standard Specification for Coal Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. 2023.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1897-20**: Standard Test Methods for Measuring the Reactivity of Supplementary Cementitious Materials by Isothermal Calorimetry and Bound Water Measurements. West Conshohocken, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15895**: Materiais pozolânicos - Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado - Método Chapelle modificado. Rio de Janeiro, 2010.

GUPTA, S.; CHAUDHARY, S. State of the art review on supplementary cementitious materials in India–II: Characteristics of SCMs, effect on concrete and environmental impact. **Journal of Cleaner Production**, v. 357, p. 131945, 2022.

HO, L. S.; HUYNH, T. Long-term mechanical properties and durability of high-strength concrete containing high-volume local fly ash as a partial cement substitution. **Results in Engineering**, v. 18, p. 101-113, 2023.

LONDONO-ZULUAGA, D. *et al*. Report of RILEM TC 267-TRM phase 3: validation of the R3 reactivity test across a wide range of materials. **Materials and Structure**, v. 55, 142, mai 2022.

ONAIZI, Ali M. *et al*. Effect of the addition of nano glass powder on the compressive strength of high volume fly ash modified concrete. **Materials Today: Proceedings**, v. 48, p. 1789-1795, 2022.

RAVERDY, M. *et al*. Appreciation of pozzolanic reactivity of minor components. In: 7th International Congress on the Chemistry of Cement. Paris, France. **Proceedings**, v. 3, p. 36-41, 1980.

SCHNEIDER, M. The cement industry on the way to a low-carbon future. **Cement and Concrete Research**, v. 124, p. 105792, 2019.

SILVA, V. M. da *et al*. **Avaliação do efeito de parâmetros de processos nas características microestruturais do cimento Portland**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. 2019.

STEFANOIU, C. 2020-2021 Performance, and suply and demand to 2025. **Global Cement Magazine**, Epsom, p. 8-15, 2022.

SUPRIYA, R. *et al*. Low-CO2 emission strategies to achieve net zero target in cement sector. **Journal of Cleaner Production**, p. 137466, 2023.