cbecimat26
26° Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais
22 a 26 de novembro de 2026
Costão do Santinho
Florianópolis-SC

Avaliação da Eficiência Energética na Secagem e Queima de Argilas Cerâmicas com a Incorporação de Resíduos Vítreos

Vitor de Souza Nandi[1*]; Tiago Bender Wermuth[1]; Sabrina Arcaro[1]; Oscar Rubem Klegues Montedo[1]
[1]Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM), UNESC, Criciúma, SC, Brasil ·
*vitorsnprof@gmail.com

Introdução

A secagem e a queima concentram o consumo de energia térmica na fabricação de cerâmica vermelha. Ao mesmo tempo, resíduos vítreos ainda chegam a aterros, embora o vidro seja integralmente reciclável (Silva et al., 2017).

Por ser não plástico, o vidro moído tende a reduzir a água de conformação e a facilitar a saída de umidade; por conter óxidos fundentes (Na_2O e CaO), favorece a sinterização em temperaturas mais baixas (Dondi et al., 2009; Delaqua et al., 2022). A secagem rápida (≈60 min) já se mostrou viável para argilas do sul de Santa Catarina (Nandi et al., 2023; Zaccaron et al., 2024), mas o efeito do resíduo vítreo sobre a sensibilidade e a cinética desse ciclo ainda é pouco estudado.

Objetivos

Avaliar o efeito do resíduo vítreo (RV, 0–60% em massa) na plasticidade e na secagem rápida (60 min, até 160 °C) de massas de cerâmica vermelha, por meio da curva de Bigot, do coeficiente de sensibilidade (CSB), da cinética de secagem (Page, Deff) e da energia teórica de evaporação.

Tabela 1. Formulações (% em massa, simplex-centroide) e índice de plasticidade (IP).

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
Plástica*	100	40	40	70	70	40	60	80	50	50
AM	0	60	0	30	0	30	20	10	40	10
RV	0	0	60	0	30	30	20	10	10	40
IP (%)	22,5	10,7	3,6	17,8	10,9	14,5	14,1	16,7	17,4	8,0

*Argila plástica = AP + AV (1:1); AP, AV, AM: argilas preta, vermelha e amarela; RV: resíduo vítreo. F3 recebeu 1,5% de bentonita para viabilizar a extrusão.

Tabela 2. Matérias-primas: FRX (% em massa), fração < 44 µm e IP.

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	Na_2O	K_2O	PF	<44 µm	IP
AP	62,7	19,7	4,5	0,2	0,2	1,6	9,0	83,2	28,8
AV	61,7	19,6	6,8	0,1	0,1	1,7	8,3	71,8	14,0
AM	63,9	17,7	6,3	0,1	0,7	3,4	5,9	64,0	3,8
RV	69,7	2,3	0,2	9,9	13,4	0,4	0,8	5,5	–

Metodologia

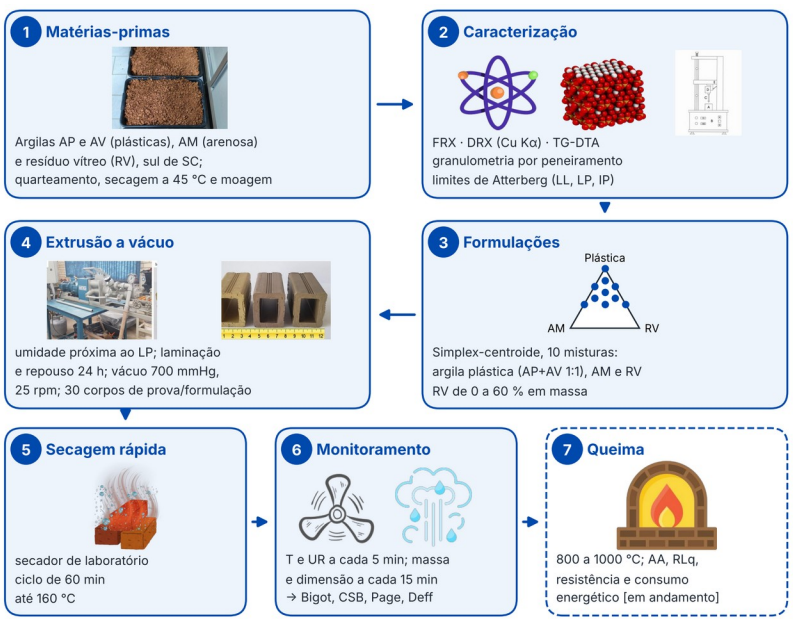


Figura 1. Fluxograma da metodologia. Umidade em base seca (X).

CSB = $(X_0 - Xc)/Xc$, base seca, peça a peça (trecho 1 encerrado quando a retração restante é < 2 p.p.) · Page (ajuste não linear): $MR = X/X_0 = \exp(-k \cdot t^n)$ · Fick (placa, t ≥ 30 min): $\ln MR = \ln(8/\pi^2) - \pi^2 \cdot Deff \cdot t/(4L^2)$, L = 3,5 mm (parede de 7 mm) · Energia teórica: $E = X_0 \cdot \Delta Hvap$ (2257 kJ/kg).

Resultados e Discussão

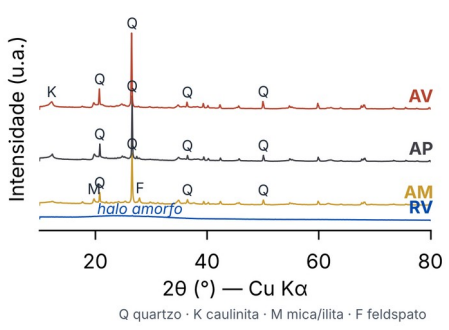


Figura 2. DRX: argilas com Q, M, K e F; RV amorfo.

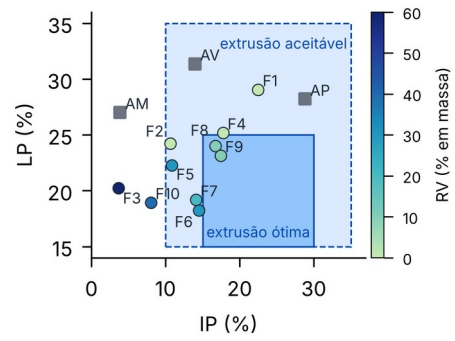


Figura 3. Prognóstico de extrusão (Casagrande): o RV reduz LP e IP.

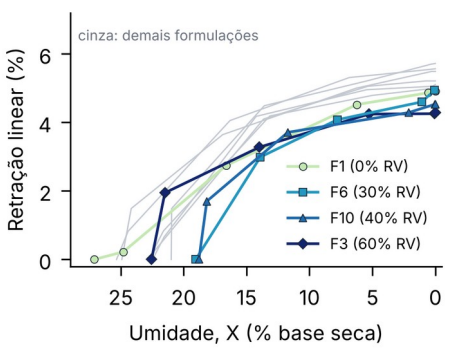


Figura 4. Curvas de Bigot (média de 3 peças); retração final de 4,3–5,7%.

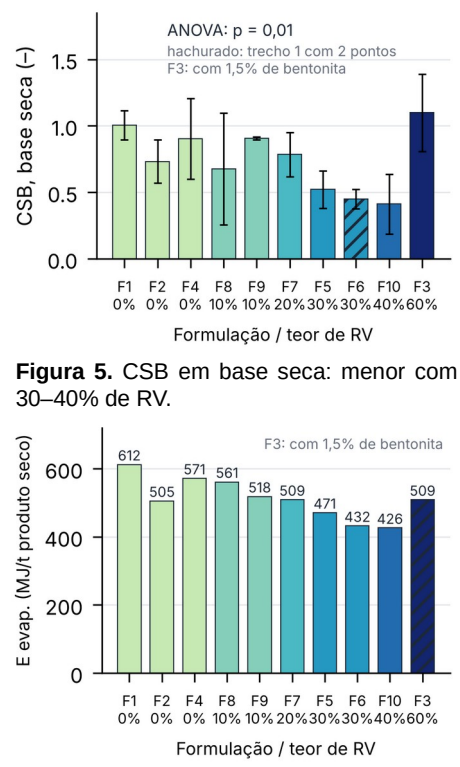


Figura 5. CSB em base seca: menor com 30–40% de RV.

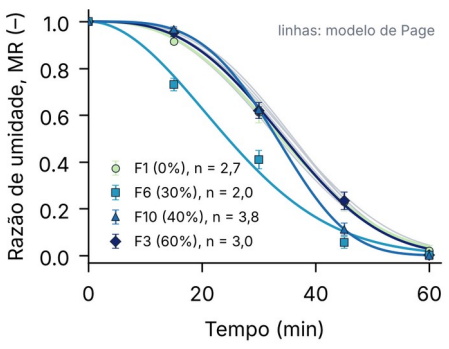


Figura 6. Cinética: MR × t com ajuste não linear de Page ($R^2 \geq 0,991$).

Figura 7. Energia teórica de evaporação: ≈30% menor em F6 e F10 que em F1.

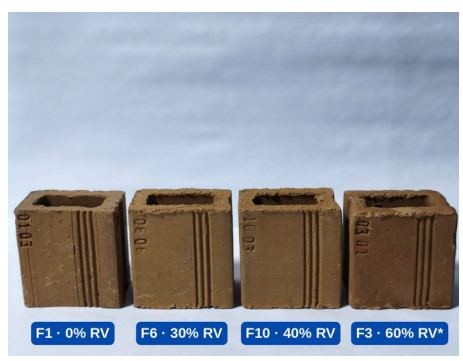


Figura 8. Peças após a secagem rápida, sem trincas. *Com 1,5% de bentonita.

	n (Page)	R^2	Deff (10^{-9} m²/s)
F1	2,73	0,999	9,4
F2	2,99	0,999	5,3
F3	2,96	0,999	5,4
F4	2,90	0,999	8,2
F5	3,12	0,996	5,0
F6	1,96	0,991	11,0
F7	2,73	0,999	8,5
F8	3,26	0,999	5,5
F9	2,73	0,999	7,9
F10	3,78	1,000	9,4

Tabela 3. Page (n, R^2) e Deff aparente (t ≥ 30 min).

Conclusões

- O RV é amorfo e soma 23% de Na_2O + CaO: potencial fundente para reduzir a temperatura de queima.
- O RV reduziu LP e IP; até 30% as massas seguem extrudáveis, e com 60% (F3) foi preciso adicionar 1,5% de bentonita.
- X_0 correlacionou-se com a argila plástica (r = 0,73; p = 0,02) e o IP (r = 0,65; p = 0,04). Com 30–40% de RV, a energia teórica de evaporação caiu ≈30% (612 → 426–432 MJ/t).
- A retração (4,4–5,6%) diminuiu com o teor de RV (r = −0,92; p < 0,001). O CSB variou com a formulação (ANOVA, p = 0,01): menor com 30–40% de RV (F10: 0,41 ± 0,22; F6: 0,45 ± 0,07; F5: 0,52 ± 0,14) que em F1 (1,01 ± 0,11); F3, com bentonita, teve o maior (1,10 ± 0,29).
- A secagem seguiu o modelo de Page (n = 2,0–3,8; $R^2 \geq 0,991$), com Deff aparente ≈ 5–11 × 10^{-9} m²/s, umidade residual ≤ 0,5% (base seca) e sem trincas em 60 min.
- Como próxima etapa, as formulações serão queimadas entre 800 e 1000 °C.

Referências e Agradecimentos

CRANK, J. The mathematics of diffusion. 2. ed. Oxford: Clarendon Press, 1975.
DELAQUA, G. et al. Application of glass waste on red ceramic to improve sintering. Sustainability, v. 14, n. 16, p. 10454, 2022.
DONDI, M. et al. Recycling PC and TV waste glass in clay bricks and roof tiles. Waste Management, v. 29, n. 6, p. 1945-1951, 2009.
NANDI, V. S. et al. Plastic behaviour of clay materials for the manufacture of fast-drying red ceramics. Clay Minerals, v. 58, n. 1, p. 26-37, 2023.
PAGE, G. E. Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers. Dissertação (M.Sc.) – Purdue University, 1949.
SILVA, R. V. et al. The role of glass waste in the production of ceramic-based products and other applications: a review. Journal of Cleaner Production, v. 167, p. 346-364, 2017.
ZACCARON, A. et al. The behavior of different clays subjected to a fast-drying cycle for traditional ceramic manufacturing. Journal of King Saud University – Engineering Sciences, v. 36, n. 5, p. 339-348, 2024.

Agradecimentos: à FAPESC – Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (Processo nº 985/2025, CP 25/2025 – Bolsa de Pós-Doutorado) e à UNESC/PPGCEM.