SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE CLÍNQUER PORTLAND UTILIZANDO REJEITO DE MINERAÇÃO

Bruna Liebl, Marilena Folgueras, Bruno Meneghetti, Pyetra Maas, Paulo Matos

INTRODUÇÃO

A produção de cimento Portland é estimada em cerca de 4 bilhões de toneladas por ano, gerando uma expressiva contribuição às emissões globais de carbono (ANDREW, 2019; SCRIVENER et al., 2018). No contexto industrial brasileiro, o setor de mineração gera grandes quantidades de rejeito de minério de ferro, material argiloso e rico em óxido de ferro que apresenta potencial para utilização como matéria-prima na construção civil (YAO et al., 2014). Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo sintetizar e caracterizar um clínquer alternativo de cimento Portland utilizando rejeito de mineração de ferro como fonte de óxido de ferro, comparando suas características e desempenho com um clínquer Portland de referência.

DESENVOLVIMENTO

Para a metodologia, foram dosados dois clínqueres a partir das equações de Bogue, empregadas para estimar a composição mineralógica do clínquer Portland a partir da análise química (ANDRADE NETO et al., 2026). A amostra de referência (REF) foi formulada com metacaulim comercial puro (Metamax, BASF), calcário, quartzo e óxido de ferro sintético P.A., enquanto, para o clínquer alternativo (ALT), o óxido de ferro foi substituído por rejeito de minério de ferro, contendo ferro e titânio em sua composição. A homogeneização do material foi realizada em misturador por 10 minutos, com adição de 2% de água, para proporcionar maior estabilidade na prensagem dos corpos de prova. Em seguida, o material foi sinterizado em forno de laboratório com taxa de aquecimento de 15°C/min até 1450 °C, mantendo-se a temperatura máxima por 30 min, sendo resfriado de forma forçada logo após a queima, com o auxílio de uma ventoinha.

Após a sinterização, os clínqueres foram submetidos a um processo padronizado de moagem em moinho de discos, sendo inicialmente moídos durante 3 minutos com um disco e, posteriormente, durante 1 minuto com dois discos. Esse procedimento foi mantido para as diferentes amostras, visando garantir condições semelhantes de moagem e permitir a posterior comparação das análises granulométricas.

Os clínqueres moídos foram submetidos à análise mineralógica por difração de raios X (DRX), à análise química por fluorescência de raios X (FRX), a composição química das fases foi analisada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de dispersão de energia de raios X (EDS), e a distribuição de tamanho de partículas por difração a laser. Dessa forma, foi possível comparar as fases minerais presentes com a composição química dos materiais. Por fim, o estudo da cinética de hidratação foi realizado por calorimetria isotérmica à 25°C, padronizando os clínqueres misturados a 6% de gipsita sob uma relação água/cimento (a/c) de 0,4 para o início do ensaio.

RESULTADOS

A caracterização química dos clínqueres (Tabela 1) indicou, em geral, composições equivalentes entre as amostras; as diferenças concentraram-se nos óxidos introduzidos pelo rejeito de mineração: o teor de Fe_2O_3 da amostra ALT foi 15% superior ao da REF (3,8% contra 3,3%), enquanto o TiO_2 passou de 0,1% para 0,5%, um aumento de cinco vezes Como a referência apresenta apenas

teor residual de titânio (0,1%), este elemento assume papel central no estudo, afetando diretamente as fases formadas, conforme discussão a seguir.

Quanto à composição mineralógica, o teor total de C_3S permaneceu próximo entre as amostras (74,8 ± 1,6%), assim como o total de C_2S (9,1 ± 0,1%). Observou-se, contudo, redistribuição entre os polimorfos da belita: a fração de C_2S α'_H aumentou de 2,1% para 3,8% (+81%), comportamento coerente com a atuação do titânio. O maior teor de Fe_2O_3 elevou o teor de C_4AF de 7,5% para 10,7% (+43%), causado pela já conhecida incorporação de TiO_2 no C_4AF, com consequente redução do C_3A de 4,2% para 3,0% (−29%), atribuída ao consumo de alumínio para formação do C_4AF (Taylor, 1997). Os difratogramas (Figura 1a) apresentaram padrões semelhantes no intervalo destacado (29° a 35,5° 2θ), sendo a diferença mais evidente a maior intensidade das reflexões atribuídas ao C_4AF na amostra ALT, em concordância com a quantificação das fases.

Submetidos ao mesmo procedimento padronizado de moagem, os clínqueres apresentaram distribuições granulométricas distintas: a amostra ALT registrou D_{50} de 12,5 µm, valor 2,8 µm superior ao da REF (9,7 µm). Isso pode ser associado a maior presença de C_4AF em ALT, dificultando a moagem. Como consequência, na calorimetria, a amostra REF apresentou início de hidratação mais precoce que a amostra ALT, uma vez que partículas menores facilitam a dissolução e o início da reação. Ao se comparar, porém, os valores de calor acumulado em 24h, 48h e 60h, verifica-se semelhança entre as duas curvas, o que indica cinética de hidratação e potencial de desenvolvimento de resistência inicial equivalentes entre os clínqueres (Scrivener et al. 2015).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista os resultados obtidos neste trabalho, conclui-se que o clínquer produzido a partir do rejeito de minério de ferro demonstra-se como uma alternativa viável ao clínquer Portland convencional. As principais variações observadas decorreram da maior quantidade de ferro e titânio presentes no rejeito, que afetaram diretamente a proporção das fases minerais do cimento. Dessa forma, o papel do titânio e o aproveitamento do rejeito de mineração apresentam-se como alvos promissores de estudo para a compreensão e otimização de cimentos alternativos e sustentáveis.

Palavras-chave: Cimento; Clínquer; Portland; Rejeito de mineração

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE NETO, J.; CARVALHO, I. C.; MATOS, P.; KIRCHHEIM, A. P. Equações de Bogue versus modelo empírico de regressão linear: avaliação estatística da estimativa da composição mineralógica de 40 clínqueres Portland industriais. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 21., 2026, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2026. v. 21.

ANDREW, R. M. Global CO2 emissions from cement production, 1928–2018. **Earth System Science Data**, v. 11, n. 4, p. 1675-1710, 2019.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based industry. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 2-26, 2018.

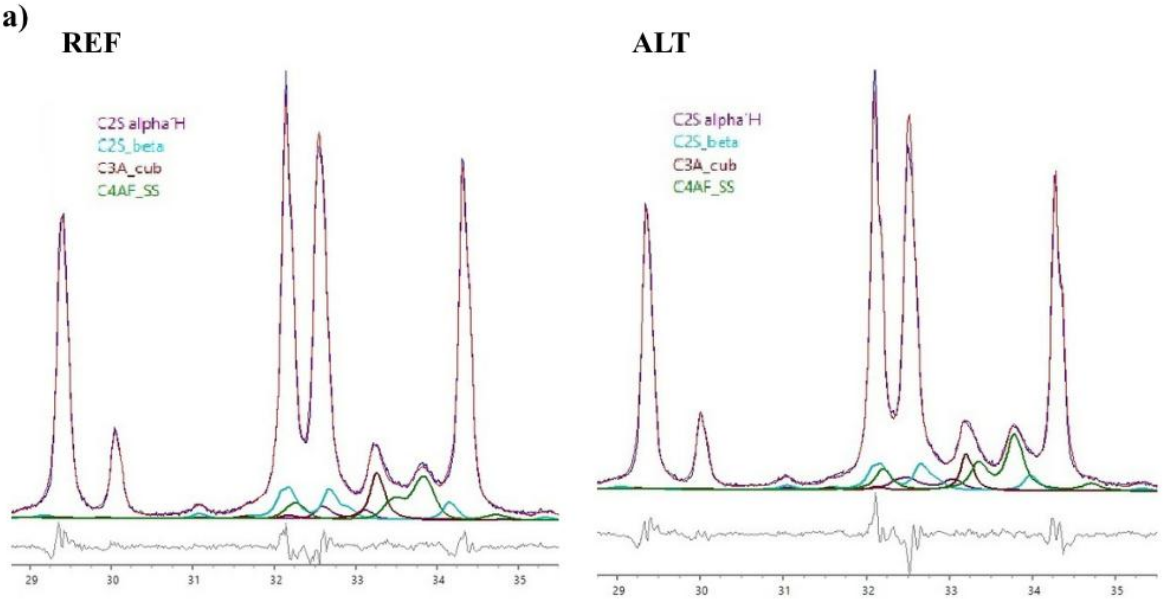
SCRIVENER, K. L.; JUILLAND, P.; MONTEIRO, P. J. M. Advances in understanding cement hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 38-56, 2015.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. 2. ed. London: Thomas Telford, 1997.

YAO, Z. T. et al. A review on the utilization of iron ore tailings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 36, p. 439-448, 2014.

ANEXOS

a)



b)

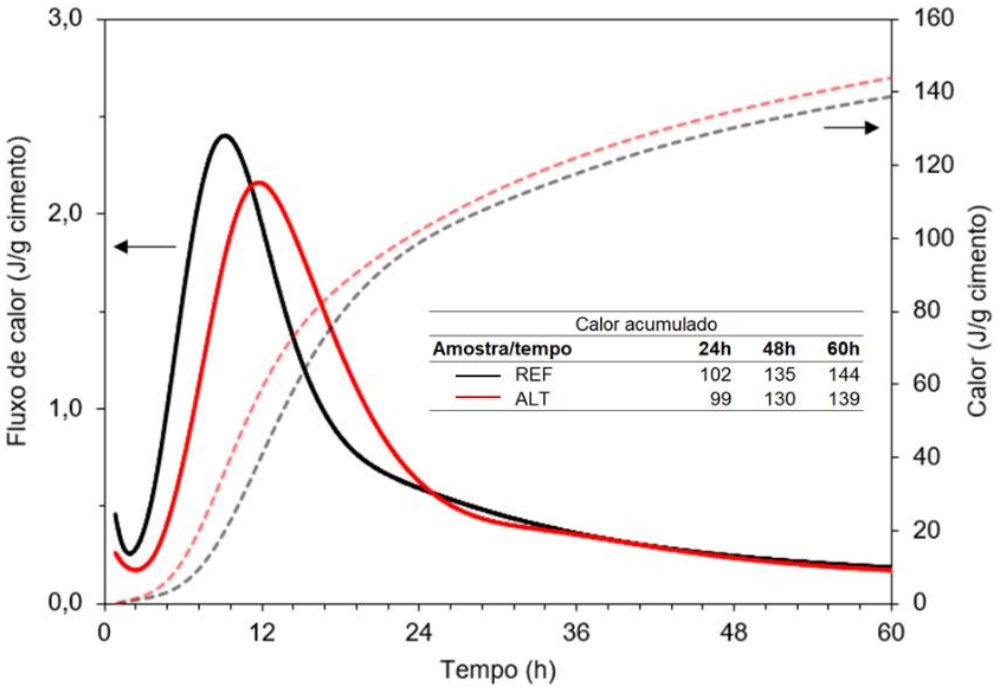


Figura 1. *Caracterização das amostras: (a) difratograma de raios X dos clínqueres REF e ALT; (b) curvas de fluxo de calor e calor acumulado de hidratação das pastas REF e ALT.*

Tabela 1. *Composição química, mineralógica e distribuição granulométrica, dos clinqueres REF e ALT.*

Parâmetro (%)	REF	ALT
Composição química (%)		
CaO	69,6	69,7
SiO2	22,9	22,2
Al2O3	4,0	4,1
Fe2O3	3,3	3,8
TiO2	0,1	0,5
MgO	0,3	0,3
P2O5	0,1	0,2
Na2O	0,1	0,1
K2O	0,0	0,0
SO3	0,0	0,0
Composição mineralógica		
C3S M1	51,6	51,5
C3S M3	24,7	21,7
Total C3S	*76,3*	*73,2*
C2S alpha´H	2,1	3,8
C2S beta	8,4	7,9
C2S gama	0,8	1,1
Total C2S	*9,2*	*9,0*
C3A cúbico	4,2	3,0
C4AF	7,5	10,7
f-CaO	0,6	0,3
Distribuição de tamanho de partículas (µm)		
D10	1,3	1,8
D50	9,7	12,5
D90	29,5	34,6