SBCC 2025
II Simpósio Brasileiro de Ciência do Cimento

IMPACTO DA TEMPERATURA DE CALCINAÇÃO DO CAULIM NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E AMBIENTAIS DE MATRIZES DE CIMENTOS PORTLAND BRANCOS

Impact of kaolin calcination temperature on the mechanical and environmental properties of white Portland cement matrices

Artur Spat Ruviaro
Universidade Federal de Santa Catarina | Florianópolis, Santa Catarina | arturspatruviaro@gmail.com

Laura Silvestro
Universidade Tecnológica Federal do Paraná | Guarapuava, Paraná | laurasilvestro@utfpr.edu.br

Henrique Almeida Santana
Instituto de Pesquisas Tecnológicas | São Paulo, São Paulo| almeidahen@gmail.com

Fernando Pelisser
Universidade Federal de Santa Catarina | Florianópolis, Santa Catarina | pelisser@hotmail.com

Resumo

Com o objetivo de contribuir para a busca de matérias-primas adequadas à produção de cimento Portland branco (CPB), propôs-se a substituição de 25% do CPB nacional por caulim/metacaulim calcinados a diferentes temperaturas. A reatividade da argila in natura e das argilas calcinadas foi avaliada por meio do teste R^3, enquanto as pastas e cimentos foram analisados quanto à resistência à compressão aos 7 e 28 dias. Também foi determinado o índice de CO_2 das matrizes. Os resultados mostraram que a incorporação de argila calcinada promoveu aumento da resistência à compressão e redução do índice de CO_2, configurando-se como uma alternativa viável e sustentável para a produção de CPB.

Palavras-chave: Cimento Portland branco; Calcinação; Metacaulim; Resistência à compressão; Análise ambiental.

ABSTRACT

Aiming to contribute to the search for suitable raw materials to produce white Portland cement (WPC), the replacement of 25% of national WPC by kaolin/metakaolin calcined at different temperatures was proposed. The reactivity of the raw and calcined clays was evaluated through the R^3 test, while the pastes and cements were analyzed for compressive strength at 7 and 28 days. The CO_2 index of the matrices was also determined. The results showed that the incorporation of calcined clay led to an increase in compressive strength and a reduction in the CO_2 index, making it a viable and sustainable alternative for WPC production.

Keywords: White Portland cement; Calcination; Metakaolin; Compressive strength; Environmental analysis.

1. INTRODUÇÃO

O cimento Portland branco (CPB) é um tipo especial de cimento que se distingue do cimento Portland comum por seus componentes, por sua composição química e mineralógica (Shafeek et al., 2020), devido à necessidade de obtenção de coloração específica. A dificuldade de incorporar materiais alternativos em CPB, é a coloração, sendo esta, a propriedade mais difícil de ser mantida durante todo o processo. São necessárias matérias-primas de alta qualidade para a fabricação de CPB, que estão cada vez mais escassas. Alcançar o índice de brancura necessário é desafiador, no entanto, verifica-se que materiais cimentícios suplementares de coloração clara, como a argila caulinítica e o calcário podem ser uma alternativa, com vantagens econômicas e ambientais. No Brasil, os cimentos Portland brancos estruturais podem conter até 25% de fíler calcário (FC) em substituição do clínquer, conforme a NBR 16697 (ABNT, 2018). Considerando que o Brasil não produz clínquer Portland branco, esse percentual de substituição ainda é baixo, encarecendo o produto

final. Dessa forma, para aumentar os percentuais de substituição, o metacaulim (MK) pode ser incorporado ao CPB nacional, produzindo cimentos ternários, e, seguindo as estratégias das pesquisas de cimentos LC³ (*Limestone Calcined Clay Cement*): redução dos custos e impactos ambientais com elevados percentuais de substituição, garantindo resistência e durabilidade. Porém, poucas são as investigações em cimentos LC³ brancos. Dessa forma, o objetivo dessa pesquisa é a substituição de 25% de CPB nacional por caulim/metacaulim e investigar o impacto da temperatura de calcinação do caulim nas propriedades mecânicas e ambientais das matrizes brancas produzidas.

2. METODOLOGIA

Para desenvolvimento do programa experimental, foi utilizado um cimento Portland branco (CPB) nacional estrutural (classe CPB-40) fornecido pela Axton (CaO=63,96%, SiO_2=16,05%, Al_2O_3=3,47%, MgO=1,03%, K_2O=0,28%, SO_3=1,92%, Fe_2O_3=0,16%, Na_2O=0,16% e perda ao fogo de 12.97%) e um caulim branco fornecido pela *Esmalglass* do Brasil. Através da termogravimetria, foi determinado o teor de carbonato de cálcio do CPB, resultando em 28,74% em massa, sendo considerado esse percentual para o cálculo das emissões equivalentes de CO_2. O caulim foi calcinado em mufla estática (KK260, Linn Elektro Therm GmbH) nas temperaturas de 600, 700, 800 e 900 °C. A taxa de aquecimento foi de 10 °C/min, conforme Figura 1-a, com patamar de 1 hora. Também foi realizado o teste de reatividade (*R³ test*) conforme protocolos apresentados por Avet et al. (2016), em um calorímetro isotérmico (TAM Air, Thermometric AB) durante 7 dias a 20 °C. O programa experimental foi baseado na NBR 5752 (ABNT, 2014). Assim, foi utilizada relação a/agl. de 0,48, percentual de substituição de CPB por caulim/metacaulim de 25% em massa para produção das pastas. Para os ensaios de resistência à compressão foram moldados 4 corpos de prova cilíndricos (Ø19×25mm) para cada composição e idade, desmoldados após 24 h e mantidos submersos em água até a idade de ensaio (7 e 28 dias). Foram rompidos em uma prensa universal (*Instron*, 5569). As composições investigadas são mostradas no Quadro 1.

Quadro 1: Composições investigas e consumo de materiais para produção de 1 m³ de pasta.

Composições	CPB (g)			Caulim/metacaulim (g)	Água (g)	Consumo de materiais em kg por m³/pasta			
	CPB (g)	Clínquer	Fíler calcário			Clínquer	Fíler calcário	Caulim/ metacaulim	água
REF	100	71,26	28,74	-	48	872,55	348,48	-	586,09
C-0	75	53,45	21,56	25	48	668,01	266,79	268,29	577,49
C-600	75	53,45	21,56	25	48	671,07	268,02	259,97	575,55
C-700	75	53,45	21,56	25	48	671,07	268,02	259,97	575,55
C-800	75	53,45	21,56	25	48	671,07	268,02	259,97	575,55
C-900	75	53,45	21,56	25	48	671,07	268,02	259,97	575,55

Fonte: Elaborado pelos autores.

Para análise ambiental foram consideradas as emissões equivalentes de CO_2 ($ECO_{2\text{-eq}}$) para cada material multiplicado pelo consumo por m³ de pasta. Para o calcário, argila crua e água foram 0,00219, 0,00294 e 0,000658 kg de CO_2/kg de material, respectivamente (Pillai et al., 2019). Para o clínquer branco foi adotado o valor de 1,09 kg de CO_2/kg (Dahanni et al., 2024). Para os metacaulins produzidos nas diferentes temperaturas, foi considerado as $ECO_{2\text{-eq}}$ da argila crua, mais o gasto energético para calcinação. De acordo com a Figura 1-a, rampa de aquecimento na mufla, foi determinado o tempo de cada ciclo para as diferentes temperaturas. A potência da mufla é de 1,4 kW e o rendimento por ciclo foi de 6 kg de material. Assim, foi calculado o gasto energético total para produção de 1 kg de metacaulim para determinada temperatura. Foi considerado, que para cada 1 kWh consumido são liberados 0,135 kg de CO_2/kWh (Ruviaro et al., 2021). Os valores resultantes para cada Kg de metacaulim produzido para as temperaturas de 600, 700, 800 e 900 °C foram de, respectivamente, 0,1289, 0,1394, 0,1499 e 0,1604 kg de CO_2/kg. A partir das emissões equivalentes totais por composição (kg de CO_2/m³ de pasta) e os resultados de resistência à compressão (MPa) foi possível calcular os índice de CO_2 dado em (kg de CO_2/m³ de pasta)/MPa. Quanto menores os valores, mais ecoeficiente é determinada composição.

3. RESULTADOS E ANÁLISES

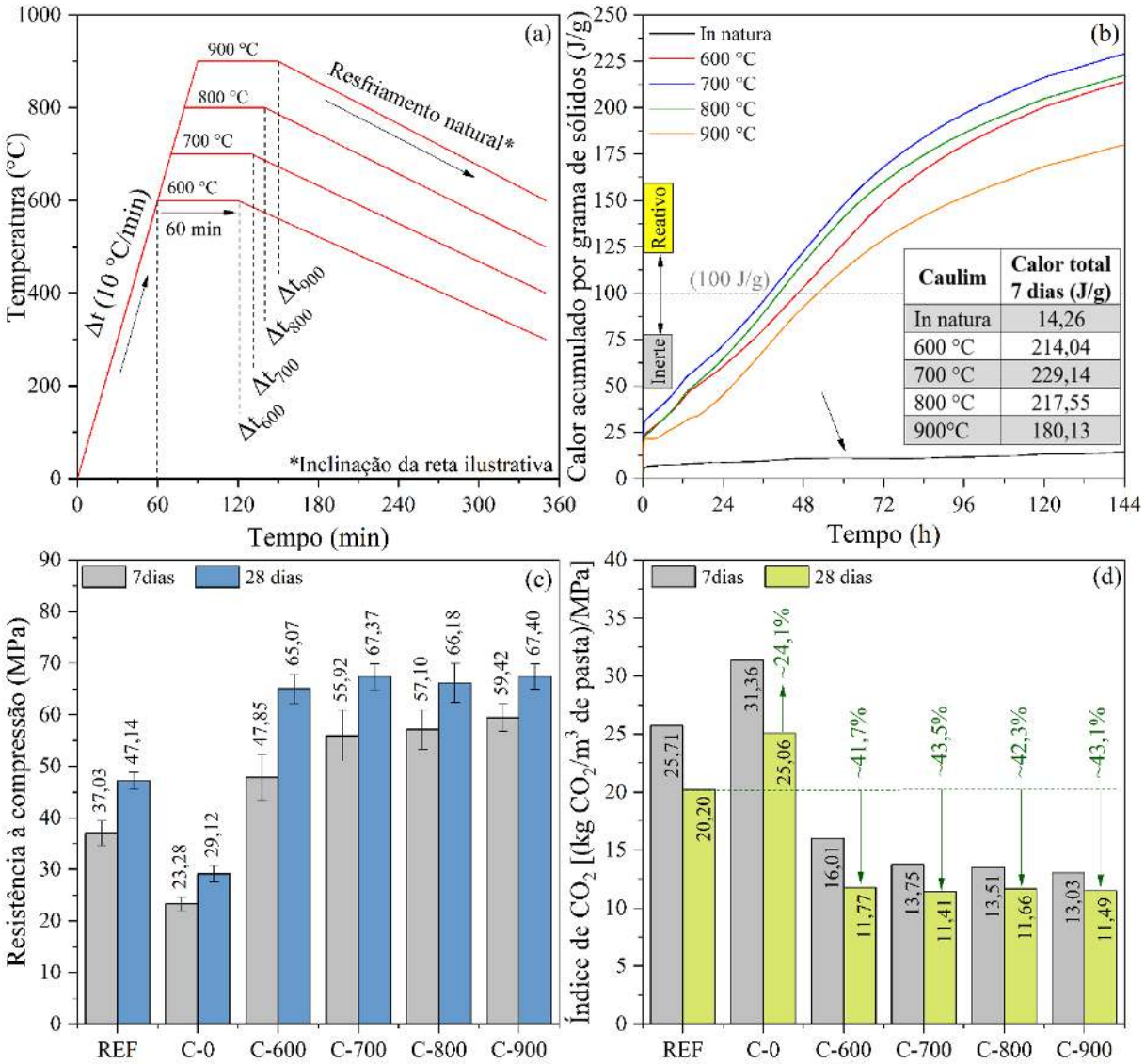
Analisando os resultados do ensaio de reatividade (*R³ test*), apresentados na Figura 1-b, o caulim não apresenta reatividade. À medida que a temperatura de calcinação aumenta para 600 °C e 700 °C, a reatividade do metacaulim aumenta. A partir de 800 °C, a reatividade do MK vai reduzindo, possivelmente

pelo início da cristalização da argila calcinada (Skibsted; Snellings, 2019). Dessa forma, para o ensaio R³, a temperatura ideal de calcinação é 700 °C.

Com o avanço das reações de hidratação (de 7 par 28 dias) a resistência à compressão (Figura1-c) vai aumentando progressivamente. Os menores valores são para REF e C-0 que não possuem metacaulim na composição. Aos 28 dias, a C-0 apresentou reduções de ~38% em relação a REF. De fato, conforme confirmado pelo *R³ test*, o caulim não apresentou reatividade, sendo um material inerte, promovendo apenas o efeito fíler. Adicionalmente, tem-se o efeito de diluição, em que 25% CPB (reativo) foi substituído por material inerte. Por outro lado, todas as composições contento MK calcinado nas diferentes temperaturas, aos 7 dias apresentaram resistência à compressão (RC) superior à REF nas idades de 7 e 28 dias, comprovando a alta reatividade do MK utilizado. O aumento da resistência se deve, ao efeito fíler e às reações pozolânicas do MK acrescidos das reações sinérgicas do MK com o FC.

De forma simplificada, durante as reações de hidratação de sistemas LC³, os aluminossilicatos amorfos ($Al_2Si_2O_7$), formados durante a calcinação de argilas cauliníticas, reagem com hidróxido de cálcio para produzir C-(A)-S-H e aluminato hidratado. Além disso, a alumina pode reagir com calcário para formar carboaluminatos hidratados (Dhandapani; Santhanam, 2017). Analisando estatisticamente (valor de p 0,05), apenas as composições com MK, os resultados aos 7 são significantemente diferentes (F=6,91158, Prob>F =0,00437) e aos 28 dias são significativamente iguais (F=0,42662, Prob>F =0,73828). Dessa forma, com base nos resultados de RC aos 28 dias, não se justifica calcinar o caulim em temperaturas superiores a 600 °C.

Figura 1: Resultados: (a) protocolo de calcinação para as diferentes temperaturas, (b) *R³ test*, (c) resistência à compressão aos 7 e 28 dias e (d) índices de CO_2 para as composições investigadas para as idades de 7 e 28 dias.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Quanto aos índices de CO_2 (Figura 1-d), à medida que as reações avançam, a RC aumenta, reduzindo os índices para todas as composições de 7 para 28 dias. Por outro lado, a composição C-0, apresentou aos 28 dias aumento de ~24% em relação a REF. As demais composições com MK, os índices foram semelhantes, sendo mínimo (↓41,7% em relação à REF aos 28 dias) para C-600, sendo a composição mais ecoeficiente corroborando com os resultados de RC. Embora o gasto energético para a calcinação do MK nas composições C-700, C-800 e C-900 seja maior, resultando em emissões de CO_2 mais elevadas, a RC média dessas misturas foi ligeiramente superior, contribuindo para equilibrar os índices dessas composições.

4. CONCLUSÕES

Foi proposta a substituição de 25% do CPB nacional por caulim/metacaulim com o objetivo de investigar o impacto da temperatura de calcinação do caulim nas propriedades das pastas produzidas. Com base nos resultados obtidos, observou-se que a temperatura de 700°C proporcionou argilas mais reativas. Ao analisar a RC, constatou-se que a argila não calcinada apresentou menor valor de resistência em comparação com a matriz de referência, explicado pelo efeito de diluição do cimento, causado pelo material de menor reatividade. Por outro lado, todos os cimentos produzidos com argila calcinada apresentaram resistências superior à do cimento de referência, devido ao efeito físico das partículas, às reações pozolânicas e às reações sinérgicas entre o MK e FC, o que corrobora os resultados do teste de reatividade (*R^3 test*). Os índices de CO_2 também estão alinhados com os demais resultados, mostrando valores inferiores para os cimentos com as argilas calcinadas, contribuindo para produção de materiais de construção de baixo impacto ambiental.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradeceram às agências brasileiras de pesquisa CNPq (Chamada N° 32/2023), CAPES, FAPESC e Fundação Araucária. Adicionalmente, a Esmalglass do Brasil pelo fornecimento do caulim.

REFERÊNCIAS

ANTONI, M.; ROSSEN, J.; MARTIRENA, F.; SCRIVENER, K. Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. **Cement and Concrete Research**, [S. l.], v. 42, n. 12, p. 1579–1589, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697:Cimento Portland — Requisitos, 2018.

AVET, François; SNELLINGS, Ruben; ALUJAS DIAZ, Adrian; BEN HAHA, Mohsen; SCRIVENER, Karen. Development of a new rapid, relevant and reliable (R3) test method to evaluate the pozzolanic reactivity of calcined kaolinitic clays. **Cement and Concrete Research**, [S. l.], v. 85, p. 1–11, 2016. DOI: 10.1016/J.CEMCONRES.2016.02.015.

DAHANNI, H.; VENTURA, A.; LE GUEN, L.; DAUVERGNE, M.; ORCESI, A.; CREMONA, C. Life cycle assessment of cement: Are existing data and models relevant to assess the cement industry's climate change mitigation strategies? A literature review. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 411, p. 134415, 2024. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.134415.

DHANDAPANI, Yuvaraj; SANTHANAM, Manu. Assessment of pore structure evolution in the limestone calcined clay cementitious system and its implications for performance. **Cement and Concrete Composites**, [S. l.], v. 84, p. 36–47, 2017. DOI: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2017.08.012.

PILLAI, Radhakrishna G.; GETTU, Ravindra; SANTHANAM, Manu; RENGARAJU, Sripriya; DHANDAPANI, Yuvaraj; RATHNARAJAN, Sundar; BASAVARAJ, Anusha S. Service life and life cycle assessment of reinforced concrete systems with limestone calcined clay cement (LC3). **Cement and Concrete Research**, [S. l.], v. 118, p. 111–119, 2019. DOI: 10.1016/J.CEMCONRES.2018.11.019.

RUVIARO, Artur Spat; SILVESTRO, Laura; SCOLARO, Taylana Piccinini; DE MATOS, Paulo Ricardo; PELISSER, Fernando. Use of calcined water treatment plant sludge for sustainable cementitious composites production. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 327, p. 129484, 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129484. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652621036635. Acesso em: 29 out. 2021.

SKIBSTED, Jørgen; SNELLINGS, Ruben. Reactivity of supplementary cementitious materials (SCMs) in cement blends. **Cement and Concrete Research**, [S. l.], v. 124, p. 105799, 2019. DOI: 10.1016/J.CEMCONRES.2019.105799.

SHAFEEK, A. M., KHEDR, M. H., EL-DEK, S. I., & SHEHATA, N. Influence of ZnO nanoparticle ratio and size on mechanical properties and whiteness of White Portland Cement. **Applied Nanoscience**, v. 10, n. 9, p. 3603-3615, 2020. doi.org/10.1007/s13204-020-01444-5