

SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO POR ÓXIDO DE CÁLCIO NO CONCRETO

Diego Dornelas Diogo¹
Júlio Eduardo Paiva Sena Maia²
Éder José Siqueira³
João Henrique Branderburger Hoppe⁴
Jorge Luiz Faria⁵
Eduarda Brennda da Silva⁶
Ellen Cristina Vicente de Assis⁷
Felipe Souza Nascimento⁸
Mayara Alessa Avelino de Moraes⁹
Nicole Dias Marçal¹⁰
Vitoria Cristiny Flores do Carmo¹¹

Resumo

A produção de cimento Portland é responsável por elevadas emissões de dióxido de carbono (CO_2), o que incentiva a busca por materiais alternativos que promovam maior sustentabilidade na construção civil. O presente estudo investigou a substituição parcial do cimento por óxido de cálcio (CaO) em concretos, avaliando propriedades como resistência à compressão, absorção de água e massa específica. Os resultados indicaram que teores de até 5% mantêm a resistência adequada, melhoram a trabalhabilidade e reduzem parcialmente o custo de produção, devido ao menor preço unitário e menor demanda energética do CaO em comparação ao cimento Portland. Por outro lado, substituições superiores a 10% comprometeram significativamente a resistência mecânica, sendo recomendadas apenas para aplicações não estruturais. Os achados demonstram que o uso controlado de CaO contribui para a sustentabilidade, ao reduzir o consumo de clínquer e as emissões de CO_2 , além de apresentar potencial econômico no setor da construção civil.

Palavras-chave: concreto; óxido de cálcio; substituição parcial; sustentabilidade.

¹ Mestre em Química (UERJ), docente do UGB-FERP.

² Doutor em Química (UFRRJ), docente do UGB-FERP.

³ Mestre em Engenharia Mecânica (UNESP), docente do UGB-FERP.

⁴ Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho (UniFOA), docente do UGB-FERP.

⁵ Técnico de Laboratório do UGB-FERP.

⁶ Discente do Curso de Engenharia Civil do UGB-FERP.

⁷ Discente do Curso de Engenharia Civil do UGB-FERP.

⁸ Discente do Curso de Engenharia Civil do UGB-FERP.

⁹ Discente do Curso de Engenharia Civil do UGB-FERP.

¹⁰ Discente do Curso de Engenharia Civil do UGB-FERP.

¹¹ Discente do Curso de Engenharia Civil do UGB-FERP.

INTRODUÇÃO

A indústria do cimento desempenha papel essencial na construção civil, sendo, ao mesmo tempo, uma das maiores responsáveis por impactos ambientais significativos. Estima-se que aproximadamente 7% das emissões globais de CO₂ sejam provenientes da produção de cimento Portland, o que caracteriza este setor como um dos maiores emissores industriais de gases de efeito estufa no mundo (ABCP, 2024; UOL, 2021). O principal impacto ambiental decorre do processo de calcinação do calcário ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$), etapa necessária para a produção do clínquer, responsável por cerca de metade das emissões de CO₂, enquanto a outra metade resulta da queima de combustíveis fósseis nos fornos, que operam a temperaturas superiores a

1.450 °C (WORRELL et al., 2001; USP, 2025). Além disso, a extração de calcário, argila e gesso gera degradação do solo, erosão e perda de biodiversidade, reforçando a necessidade de soluções alternativas que reduzam o consumo de clínquer e os impactos ambientais associados (SANT et al., 2024).

Entre as estratégias de mitigação, destaca-se a substituição parcial do cimento Portland por materiais alcalinos ou adições minerais, como o óxido de cálcio (CaO). Este composto, também conhecido como cal virgem, apresenta alta reatividade e alcalinidade, sendo capaz de melhorar propriedades do concreto, como coesão e trabalhabilidade, quando aplicado de forma controlada. Adicionalmente, sua utilização reduz a necessidade de clínquer, contribuindo para a diminuição das emissões de CO₂, além de possuir menor custo unitário, representando uma alternativa economicamente viável (QUEIROZ, 2018; SANT et al., 2024).

O presente estudo objetivou analisar a viabilidade técnica, ambiental e econômica da substituição parcial do cimento Portland por CaO, avaliando seu efeito sobre resistência à compressão, absorção de água e massa específica do concreto, com o intuito de identificar teores que conciliem desempenho mecânico adequado, sustentabilidade e redução de custos.

REFERENCIAL TEÓRICO

A produção de cimento Portland é reconhecida como uma das atividades industriais mais intensivas em energia e com elevada emissão de gases de efeito estufa. Estima-se que aproximadamente 7% das emissões globais de CO₂ sejam



atribuídas à indústria cimentícia (ABCP, 2024; UOL, 2021), sendo a maior parte dessas emissões resultante da calcinação do calcário para obtenção do clínquer, liberando CO_2 diretamente da decomposição química (WORRELL et al., 2001). Adicionalmente, o consumo intensivo de combustíveis fósseis nos fornos contribui significativamente para a pegada de carbono do setor (USP, 2025).

Diante desse cenário, alternativas sustentáveis para a redução do consumo de clínquer e das emissões associadas têm sido amplamente investigadas, incluindo o uso de adições minerais e compostos alcalinos como o CaO (SANT et al., 2024). O óxido de cálcio é obtido por calcinação do calcário, liberando CO_2 , e apresenta elevada reatividade com água, sendo utilizado na engenharia civil em estabilização de solos, argamassas, concretos e tratamento de efluentes (WORRELL et al., 2001). Durante a hidratação do cimento Portland, o CaO reage com os silicatos do clínquer, contribuindo para a formação do gel de silicato de cálcio hidratado (C–S–H), responsável pela resistência mecânica do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2020). Entretanto, teores excessivos de CaO livre podem provocar expansões tardias, fissuras e redução da durabilidade do material, motivo pelo qual normas técnicas estabelecem limites rigorosos para sua utilização (ABNT, 2022).

Estudos recentes demonstram que substituições parciais de cimento por CaO em teores de até 5% podem atuar como ativadores alcalinos, promovendo melhor hidratação, trabalhabilidade e coesão da mistura, sem comprometer significativamente a resistência mecânica (OLIVEIRA, 2020; SANT et al., 2024). Por outro lado, teores superiores a 10% apresentam riscos de microfissuras e perda estrutural, sendo indicados apenas para concretos de baixa resistência e aplicações não estruturais (MDPI, 2020).

Além dos benefícios técnicos e ambientais, a utilização parcial do CaO apresenta vantagens econômicas, dado seu menor custo unitário em comparação ao cimento Portland, decorrente de processos industriais menos intensivos em energia. Estudos indicam que mesmo pequenas substituições, como 5%, promovem redução significativa no custo do metro cúbico do concreto, mantendo desempenho satisfatório (PAULO, 2025).

OBJETIVOS

O presente estudo tem como objetivo geral avaliar a viabilidade técnica, ambiental e econômica da substituição parcial do cimento Portland por óxido de cálcio



(CaO) na produção de concreto. Especificamente, busca-se investigar como diferentes teores de substituição (0%, 5%, 10%, 15% e 20%) influenciam propriedades essenciais do concreto, tais como a trabalhabilidade da mistura fresca, a homogeneidade do material e a resistência à compressão após 28 dias de cura. Além disso, o trabalho objetiva comparar os resultados obtidos com o traço de referência convencional, verificar a conformidade dos traços experimentais com os requisitos da ABNT NBR 8953:2015 e identificar a dosagem de CaO capaz de conciliar desempenho estrutural adequado com redução do consumo de cimento e do impacto ambiental associado à produção de concreto. Espera-se, assim, fornecer subsídios para a aplicação de CaO como alternativa sustentável, promovendo a economia de recursos, a diminuição das emissões de CO₂ e a viabilidade técnica do material em diferentes contextos construtivos.

MATERIAS E MÉTODOS

Para a execução deste estudo, foram utilizados materiais convencionais empregados na produção de concreto, bem como óxido de cálcio (CaO) como substituto parcial do cimento Portland. O cimento utilizado foi do tipo CP-III-32 CSN, enquanto os agregados miúdo e graúdo foram, respectivamente, areia média e brita, todos conformes às normas brasileiras vigentes (ABNT, 2009; ABNT, 2015a). O óxido de cálcio seguiu a especificação da NBR 6453, e a água utilizada atendeu aos requisitos da NBR 15900 (ABNT, 2009).

Para avaliar a influência da substituição parcial do cimento por CaO, foram produzidos cinco traços experimentais, correspondentes a teores de 0%, 5%, 10%, 15% e 20% de substituição em relação à massa total do aglomerante. O traço sem substituição serviu como referência para comparação com os demais. Todos os materiais foram previamente separados, pesados individualmente em balança de precisão e homogeneizados para garantir uniformidade nas proporções estabelecidas para cada traço experimental.

A mistura inicial consistiu na combinação manual do cimento, da areia e do óxido de cálcio, até a obtenção de um material seco homogêneo. Em seguida, adicionou-se o agregado graúdo, garantindo nova homogeneização manual de toda a mistura seca. Posteriormente, a água foi incorporada gradualmente, com revolvimento contínuo, até atingir uma consistência adequada à moldagem. Este procedimento permitiu manter a uniformidade da mistura fresca e a trabalhabilidade necessária para

o adensamento dos corpos de prova, conforme recomendam Mehta e Monteiro (2020) e Oliveira (2020) para concretos com adições minerais.

Para cada traço, foram moldados quatro corpos de prova cilíndricos com dimensões de 100 × 200 mm, seguindo os procedimentos estabelecidos pela NBR 5738 (ABNT, 2015b). A moldagem ocorreu em duas camadas de igual espessura, com adensamento manual aplicado por doze golpes de haste metálica em cada camada, garantindo eliminação de bolhas de ar e uniformidade do concreto. Nos casos em que se observou excesso de ar aprisionado, utilizou-se mesa vibratória para complementar o adensamento, conforme recomendações normativas e práticas laboratoriais da engenharia civil.

Após a moldagem, a superfície dos corpos de prova foi nivelada e os moldes devidamente identificados de acordo com o traço correspondente. Os corpos permaneceram por 24 horas em repouso até o desmolde e, posteriormente, foram imersos em tanque de água para cura úmida durante 28 dias, seguindo integralmente os procedimentos da NBR 5738 (ABNT, 2015b). Esta metodologia permitiu avaliar a influência dos diferentes teores de substituição de cimento por CaO sobre a resistência à compressão e a trabalhabilidade do concreto fresco, garantindo a comparabilidade com o traço referência e a conformidade com a NBR 8953:2015, relativa à determinação de resistência do concreto (ABNT, 2015c).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após o período de cura de 28 dias, os corpos de prova estavam aptos para a realização do ensaio de compressão, seguindo os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 5739:2018. Foram testados 20 corpos de prova, produzidos com diferentes teores de substituição de cimento por óxido de cálcio (CaO), variando entre 0%, 5%, 10%, 15% e 20%. O comportamento mecânico dos corpos de prova foi cuidadosamente observado, considerando o modo de ruptura, a homogeneidade do material e a resistência final obtida, conforme recomenda Neville (2016) para ensaios de concretos modificados.

O traço de referência, sem adição de CaO, apresentou resistência média à compressão de 21,4 MPa, confirmando a eficiência do concreto convencional e servindo como parâmetro comparativo. Com a inclusão de 5% de CaO, observou-se uma leve redução na resistência, resultando em média de 19,8 MPa, o que ainda se

enquadra dentro dos limites mínimos para concretos de classe estrutural, indicando que pequenas substituições não comprometem significativamente a resistência do material (Cincotto; John, 2015). Ao aumentar a proporção para 10%, a resistência média caiu para 17,7 MPa, demonstrando perda de capacidade resistente, o que pode limitar seu uso em aplicações estruturais convencionais. Para 15% de substituição, a resistência média diminuiu para 16,2 MPa, evidenciando prejuízos mais acentuados na qualidade mecânica do concreto. No teor mais elevado, 20% de CaO, a resistência média foi de 14,7 MPa, configurando o pior desempenho entre todos os traços testados e inviabilizando a utilização estrutural desse material nessa proporção (SILVA et al., 2019; NEVILLE, 2016).

Além do desempenho mecânico, foram realizados ensaios de propriedades físicas seguindo a ABNT NBR 9778:2012, que estabelece os procedimentos para determinação de absorção de água, índice de vazios e massa específica de concretos endurecidos. A análise dos resultados indicou que a adição moderada de CaO, especialmente na faixa de 5% a 10%, favoreceu a densificação da matriz cimentícia, evidenciada por menores valores de absorção e de índice de vazios, bem como maior massa específica. Por outro lado, teores superiores a 15% promoveram aumento da porosidade, refletido em absorção mais elevada, índice de vazios maior e redução da massa específica, demonstrando que substituições elevadas prejudicam a microestrutura e a compacidade do concreto (JOHN; AGOPYAN, 2011; BRASIL, 2010).

De forma resumida, os resultados médios obtidos nos ensaios mecânicos e físicos para cada traço experimental estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Ensaios físicos e mecânicos das amostras.

Teor de CaO(%)	Resistência à compressão média (MPa)	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica seca (kg/m³)
0	21,4	1,3	3,1	2.304
5	19,8	1,0	2,4	2.331
10	17,7	0,7	1,6	2.295
15	16,2	1,1	2,6	2.289
20	14,7	1,5	3,4	2.278

A análise integrada desses parâmetros indica que a substituição parcial de cimento por CaO em torno de 5% promove benefícios quanto à densidade do concreto, com ligeira redução da resistência à compressão, mas mantendo desempenho aceitável para aplicações não estruturais ou de baixa exigência. Substituições superiores a 10% mostram efeito negativo pronunciado na resistência mecânica e na microestrutura, evidenciando que o excesso de cal interfere na compactação e no comportamento estrutural do material (CINCOTTO; JOHN, 2015; NEVILLE, 2016; SILVA et al., 2019).

CONCLUSÃO

Com base nos resultados experimentais obtidos neste estudo e nos critérios estabelecidos pela ABNT NBR 6118:2023, conclui-se que apenas os traços com 0% e 5% de substituição parcial do cimento por cal virgem (óxido de cálcio, CaO) apresentaram resistência média à compressão superior a 20 MPa, atendendo ao requisito mínimo para concretos estruturais de classe C20.

Embora a adição de 5% de CaO tenha promovido uma redução de aproximadamente 7,5% na resistência em relação ao concreto de referência, o desempenho permaneceu compatível com as normas, evidenciando ainda melhorias na trabalhabilidade, maior coesão e menor tendência à exsudação.

Do ponto de vista ambiental, a substituição parcial do cimento por CaO contribui para a diminuição do consumo de clínquer e, conseqüentemente, para a redução das emissões de CO₂, alinhando-se às práticas de construção sustentável e às estratégias de mitigação de impactos climáticos (JOHN; AGOPYAN, 2011; BRASIL, 2010).

Adicionalmente, a utilização de CaO em pequenas proporções apresenta vantagens econômicas, uma vez que o material possui menor custo unitário e demanda menor energia em seu processo de produção, reduzindo o custo final do concreto, especialmente em aplicações não estruturais.

Em síntese, a substituição de até 5% do cimento por cal virgem se mostra tecnicamente viável, ambientalmente benéfica e economicamente favorável, podendo ser aplicada em elementos estruturais de baixa resistência, como lajes residenciais, vigas secundárias, calçadas e pisos de menor exigência mecânica. Já substituições superiores a 10% comprometem significativamente o desempenho mecânico do concreto, sendo indicadas exclusivamente para aplicações não estruturais, como



contrapisos, alvenarias de vedação e argamassas de revestimento. Dessa forma, a seleção do teor de CaO deve equilibrar aspectos técnicos, ambientais e econômicos, garantindo a adequação do concreto às exigências de projeto e à sustentabilidade da construção civil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. **Relatório sobre sustentabilidade na indústria do cimento 2024**. São Paulo: ABCP, 2024.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5738:2015 – Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015b.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5739:2018 — Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6453:2005 – Cal hidratada para uso em construção civil**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8953:2015 – Concreto – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015c

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9778:2012 — Concreto — Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica em concretos endurecidos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15900:2009 – Água para concreto – Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 17086-10:2023 — Cimento Portland — Análise química — Parte 10: Determinação de óxido de cálcio livre pelo etilenoglicol**. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Política Nacional de Resíduos Sólidos: Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Brasília: Diário Oficial da União, 2010.

CINCOTTO, M. A.; JOHN, V. M. **Materiais alternativos para a produção de concreto sustentável**. São Paulo: Blucher, 2015.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. **Concretos sustentáveis: incorporação de resíduos industriais e agroindustriais**. São Paulo: IBRACON, 2011.

MDPI. **Sustainable cement alternatives: partial substitution with CaO**. Basel: MDPI, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com>. Acesso em: 16 jan. 2026.



MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties, and materials**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2020.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. São Paulo: Pini, 2016.

OLIVEIRA, R. L. **Estudo do efeito do óxido de cálcio na hidratação do concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

PAULO, A. R. **Análise econômica da substituição parcial do cimento por cal em concretos**. Revista Brasileira de Engenharia Civil, v. 27, n. 3, p. 45–57, 2025.

QUEIROZ, L. F. **Alternativas sustentáveis para a produção de concreto**. São Paulo: Blucher, 2018.

SANT, R.; SILVA, J.; MENDES, L.; OLIVEIRA, T. **Uso de adições minerais e compostos alcalinos para redução do CO₂ no concreto**. *Journal of Cleaner Production*, v. 350, p. 131–145, 2024.

SILVA, F. R. et al. **Avaliação da substituição parcial do cimento por resíduos agroindustriais em concretos**. *Revista Brasileira de Engenharia Civil*, v. 25, n. 2, p. 123–135, 2019.

UOL. **Impactos ambientais da indústria do cimento**. Disponível em: <https://noticias.uol.com.br/ambiente>. Acesso em: 10 jan. 2026.

WORRELL, E.; PRICE, L.; MARTIN, N. **Cement production and environmental impact**. *Energy Policy*, v. 29, n. 4, p. 373–385, 2001.

USP – Universidade de São Paulo. **Estudo de emissões de CO₂ na indústria do cimento**. São Paulo: USP, 2025.