XV SBTA Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas
Porto Alegre/RS - 11 a 13 de junho de 2025

EFEITOS DE DIFERENTES TIPOS DE ARGILA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CIMENTOS LC³

Effects of Different Types of Clay on the Mechanical Properties of LC³ Cements

LARISSA DRESCH [1], SAMARA DA SILVA NAZÁRIO [2], JOSÉ DA SILVA ANDRADE NETO [3]
PAULO RICARDO DE MATOS[4]
[1] Pós-graduanda, Universidade do Estado de Santa Catarina/UDESC, larissa_dresch@hotmail.com
[2] Graduanda, Universidade do Estado de Santa Catarina/UDESC, samaranazario123@gmail.com
[3] Prof. Me., Universidade do Estado de Santa Catarina/UDESC, josedasilvaandradeneto@gmail.com
[4] Prof. Dr., Universidade do Estado de Santa Catarina/UDESC, paulo.matos@udesc.br

RESUMO
O cimento LC³ (cimento de calcário e argila calcinada) é uma alternativa sustentável ao cimento Portland, reduzindo as emissões de CO_2. Sua composição combina calcário e argila calcinada, substituindo parte do clínquer, principal fonte dessas emissões. Este estudo analisou, a resistência à compressão e os produtos de hidratação de argamassas de LC³ com teores de caulinita de 47% e 60%. Os ensaios incluíram testes de compressão (3, 7 e 28 dias), difração de raios X e testes por meio da mesa de consistência. Os resultados mostraram que ambas as argilas levaram a resistências à compressão equivalentes nas respectivas idades, enquanto a argila com menor teor de caulinita levou a maior fluidez. Isso demonstra a importância da seleção adequada das matérias-primas para otimizar as propriedades de argamassas produzidas com LC³.

Palavras-chave: Cimentos LC³, argila calcinada, hidratação, DRX, resistência mecânica.

ABSTRACT
LC³ cement (limestone calcined clay cement) is a sustainable alternative to Portland cement, reducing CO_2 emissions. Its composition combines limestone and calcined clay, replacing part of the clinker, the main source of these emissions. This study analyzed the compressive strength and hydration products of LC³ mortars with kaolinite contents of 47% and 60%. The tests included compression tests (3, 7, and 28 days), X-ray diffraction, and flow table tests. The results showed that both clays led to equivalent compressive strengths at the respective ages, while the clay with a lower kaolinite content resulted in higher fluidity. This highlights the importance of selecting suitable raw materials to optimize the properties of mortars produced with LC³.

Key-words: *LC³ cements, calcined clay, hydration, XRD, mechanical strength.*

Como citar:
DRESCH, L.; NAZÁRIO, S. S.; ANDRADE NETO, J. S.; MATOS, P. R. Efeitos de diferentes tipos de argila nas propriedades mecânicas de cimentos LC³. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 2025, Porto Alegre. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2025.

INTRODUÇÃO

A construção civil é responsável por uma parcela significativa das emissões globais de CO_2, sendo o cimento Portland tradicional um dos principais contribuintes devido ao processo intensivo de clinquerização. O cimento Portland é formado por clínquer e adições, sendo o clínquer seu principal componente, presente em todas as suas variações. O clínquer é produzido a partir da calcinação de uma mistura de calcário e argila em fornos a até 1450°C, formando pelotas incandescentes que são resfriadas e moídas até se tornarem pó [1].

Há milhares de indústrias cimenteiras no mundo, e o Brasil abriga uma parte significativa dessas fábricas. Com a produção contínua de cimento, o processo de calcinação do clínquer em fornos a altas temperaturas resulta em uma expressiva emissão de CO_2 na atmosfera [2].

Por essa razão, a produção de cimento é vista como um processo impactante e nocivo ao meio ambiente. Diante disso, a indústria cimenteira tem se dedicado ao desenvolvimento de produtos que conciliem inovação tecnológica e viabilidade comercial, reduzindo os impactos ambientais sem comprometer a qualidade essencial do material [3].

Nesse contexto, o cimento LC³ (cimento de calcário e argila calcinada) surge como uma alternativa inovadora e sustentável, oferecendo uma redução de até 40% nas emissões de CO_2 em comparação ao cimento convencional[4]. Desenvolvido por meio da substituição parcial do clínquer por argila calcinada e calcário, o LC³ também promove o uso de materiais abundantes e de baixo custo.

Pesquisas indicam que as argilas calcinadas têm uma faixa ideal de teor de caulinita para seu uso, variando entre 40% e 70%. Acima desse intervalo, os ganhos adicionais com o aumento do teor de caulinita tornam-se limitados, o que pode tornar o material inviável do ponto de vista econômico [4].

Diante da crescente demanda por soluções mais sustentáveis na indústria cimenteira, a utilização de argilas calcinadas surge como uma alternativa promissora para a produção de cimentos ecológicos. Este trabalho tem como objetivo analisar as diferenças nas propriedades mecânicas do cimento LC³ em função de duas concentrações distintas de argilas calcinadas, com o intuito de compreender como a concentração de argila influencia o desempenho mecânico do material.

MATERIAIS E MÉTODOS

MATERIAIS

Para a produção de LC³, utilizou-se o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI) comercial. Para atingir a proporção alvo de calcário, utilizou-se fíler calcário calcítico. Nesta pesquisa, foram empregues duas argilas cauliníticas brasileiras, denominadas argila calcinada CC47 originalmente (antes da calcinação) com 47% de caulinita na composição, e argila calcinada CC60, originalmente com 60% de caulinita. As argilas foram recebidas brutas e foram calcinadas em forno elétrico a 750°C por 1

hora. Os teores de caulinita das amostras CC47 e CC60 foram determinados por análises termogravimétricas, utilizando um equipamento SDT650 (TA Instruments), em atmosfera N_2 com taxa de aquecimento de 20°/min. O teor de caulinita foi calculado considerando a perda de massas na faixa de 400 a 600°C e o balanço estequiométrico da desidroxilação. A gipsita (Dynamica®; D_{v50} = 42,87 µm; BET SSA = 1,98 m²/g; densidade = 2,306 g/cm³) foi utilizada como fonte de sulfato de cálcio para ajustar o teor de sulfato nos sistemas. Foi utilizada também, areia proveniente do rio, passante na peneira 1,18 mm, e água. A formulação das argamassas LC³ CC47 e CC60 foi composta na seguinte proporção em massa: 0,557 de cimento Portland, 0,133 de fíler calcário, 0,300 de argila calcinada, 0,010 de gipsita, 1,000 de areia e 0,500 de água. Já a formulação de cimento Portland seguiu a proporção em massa de 0,557 de cimento, 2,000 de areia e 0,500 de água.

MÉTODOS

As propriedades reológicas foram avaliadas utilizando a mesa de espalhamento (*flow table*) de acordo com [5], com diâmetro de 500 mm e altura de queda de 12,5 mm. O molde tronco-cônico possui as dimensões de 125 x 80 x 65 mm. Foram aplicados um total de 15 golpes na primeira camada, 10 golpes na segunda camada e 5 golpes na última camada, além de 30 tombos em 30 segundos na mesa para medir o espalhamento. O espalhamento foi medido em duas direções distintas com o auxílio de uma régua. As propriedades mecânicas foram analisadas por meio de testes de compressão realizados em diferentes idades (3, 7 e 28 dias). Os corpos de prova foram mantidos em cura saturada até as datas de rompimento. Foram rompidos em uma prensa universal de ensaios mecânicos EMIC/Instron eletro-hidráulica, com taxa de carregamento de aproximadamente 0,30 MPa/s. Os corpos de prova utilizados tinham dimensões de 100 x 50 mm, moldados em três camadas, com 12 golpes em cada camada, de acordo com [6]. Para avaliar a hidratação ao longo do tempo, foi utilizada a técnica de difração de raios X, utilizando o sistema D6 PHASER (Bruker) para a identificação das fases. A varredura foi realizada no intervalo de 8,5 a 13° em 2θ, com um passo de 0,022° em 2θ, tempo de aquisição de 0,3 segundos por passo e um tempo total de análise de aproximadamente 15 minutos por amostra. As amostras para o DRX foram coletadas nas idades de 3, 7 e 28 dias, sendo então retiradas fatias de aproximadamente 2 mm. Essas amostras foram utilizadas nas medições sem interrupção da hidratação, possibilitando uma análise detalhada do processo em diferentes estágios. As amostras foram armazenadas em um recipiente fechado e submetidas à cura úmida em água saturada até a realização dos ensaios. Em cada idade especificada, a fatia de aproximadamente 2 mm era cuidadosamente lixada com lixa de granulação 1200 por 2 minutos. Após esse processo, a amostra era inserida no DRX para análise.

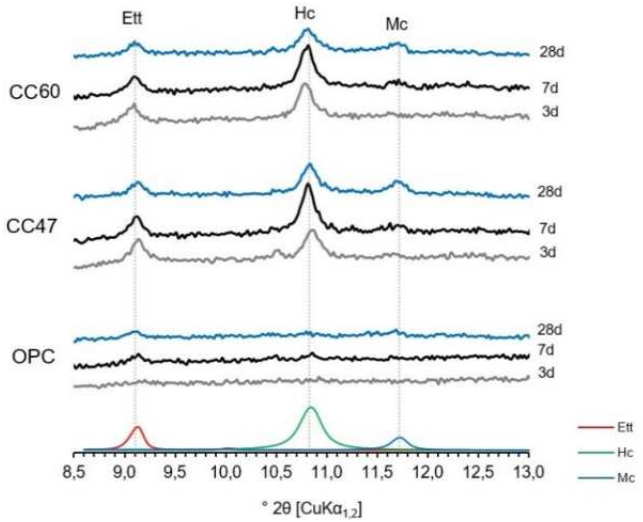
RESULTADOS

Na Figura 1 são apresentados os difratogramas para as duas argamassas de argilas calcinadas CC47 e CC60. Também é apresentada uma argamassa de cimento Portland (OPC) para comparativo das fases. Nas argamassas com argilas calcinadas, a etringita

(fase AFt) pode ser observada após três dias de hidratação. Na argamassa de cimento Portland, a etringita foi evidente a partir do sétimo dia, embora sua presença já seja esperada a partir das primeiras horas de hidratação. A diferença observada nas argamassas com argilas calcinadas em comparação com as argamassa OPC está relacionada ao efeito da argila calcinada na hidratação do cimento. Além disso, entre as argamassas com argilas calcinadas, a variação no teor de caulinita não resultou em diferenças significativas nos produtos de hidratação para uma mesma idade. A presença de argilas calcinas tende a formar maiores quantidades de etringita, por uma soma de efeitos físicos, como a nucleação preferencial, e pela maior disponibilidade de alumínio fornecida pela argila. Já na argamassa OPC, a formação de etringita foi evidente a partir do sétimo dia, podendo estar relacionada à menor precipitação dessa fase nesse sistema. Além disso, por se tratar de uma argamassa, que naturalmente apresenta uma menor quantidade deste produto hidratado, observa-se uma menor intensidade dos picos de difração dessas fases.

As fases AFm, hemicarbonatos (Hc) e monocarbonatos (Mc) são observadas mais claramente nas argamassas com argilas calcinadas devido à interação entre o metacaulim e o calcário. Contudo, conforme observado nas misturas LC³-50, de Scrivener *et al*. (2018) contendo mais de 65% de caulinita calcinada, a formação de carboaluminatos é limitada a partir de 3 dias, indicando uma restrição na precipitação dessas fases AFm. Essa limitação está possivelmente associada à falta de poros grandes o suficiente para o crescimento dessas fases, o que sugere que, uma vez atingido o raio crítico limite de entrada dos poros, a reação do metacaulim não favorece mais a formação de fases AFm. Já na argamassa OPC, as fases carbo-AFm (Hc e Mc) não foram observadas claramente, reforçando que sua formação está relacionada à presença de calcário, os quais influenciam a estabilidade e o comportamento das reações.

Figura 1 – Difratograma das argamassas de argilas calcinadas e cimento Portland. Ett: etringita; Hc: hemicarbonato; Mc: monocarbonato.

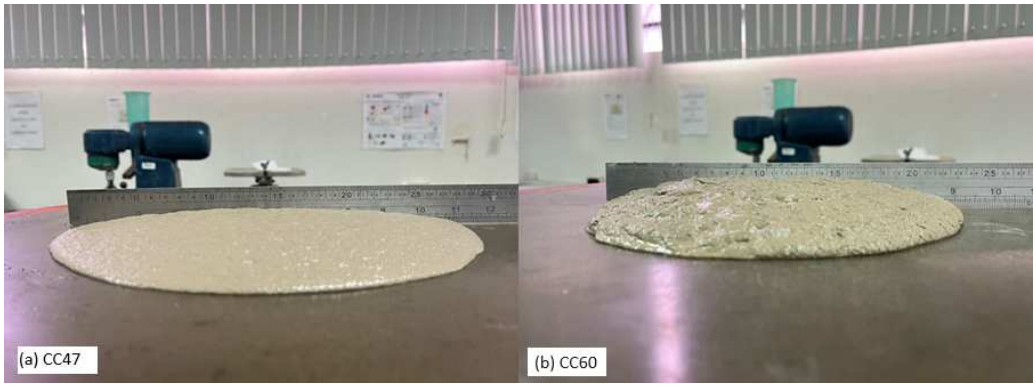


Fonte: Os autores (2025).

A Figura 2 apresenta o espalhamento das argamassas de LC³. A argamassa com a CC47 apresentou um espalhamento de 28,0 cm e a argamassa com CC60 apresentou um

espalhamento inferior, de 22,5 cm. Com base nesses resultados, foi possível concluir que a CC47 apresentou maior fluidez, possivelmente devido a menor concentração de caulinita na argila [7]. Este comportamento sugere que a proporção de caulinita influencia diretamente a fluidez da argamassa, sendo um fator importante a ser considerado no desenvolvimento de materiais com melhor trabalhabilidade. O espalhamento da argamassa de referência também foi medido (19,2 cm), porém não foi utilizado para comparação, pois apresentou uma quantidade de agregado maior que as argamassas de LC³.

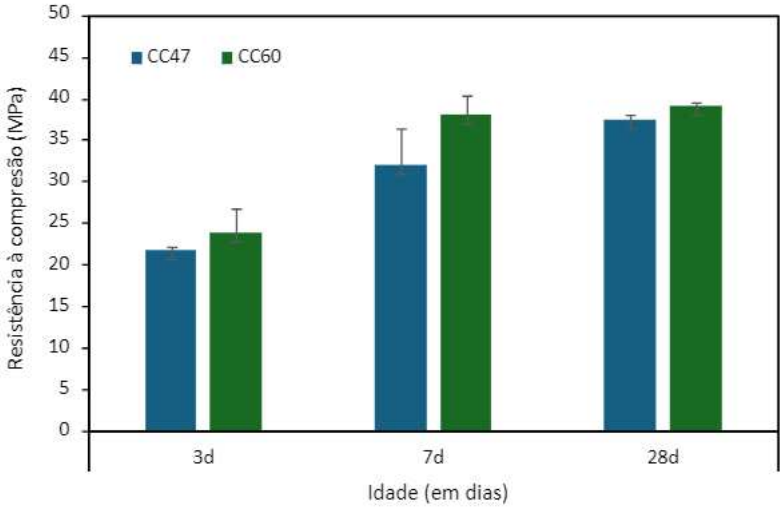
Figura 2 - Espalhamento da argamassa. A amostra CC47 apresentou um espalhamento de 28 cm, enquanto a CC60 obteve 22,5 cm.



Fonte: Os autores (2025).

A Figura 3 apresenta os resultados de resistência à compressão dos corpos de prova das argamassas aos 3, 7 e 28 dias. Aos 3 dias, a argamassa CC47 obteve uma resistência de 21,7 MPa, enquanto a argamassa CC60 atingiu 23,8 MPa. Aos 7 dias, a argamassa CC47 alcançou uma resistência de 32,0 MPa, e a argamassa CC60 obteve 37,9 MPa. Finalmente, aos 28 dias, a argamassa CC47 apresentou uma resistência de 37,3 MPa, e a CC60 alcançou 39,0 MPa. Os ensaios de resistência à compressão apresentaram resultados equivalentes considerando o desvio padrão, apesar da aparente tendência de maiores resistências. De acordo com estudos da área [8], o maior teor de caulinita na argila pode favorecer um aumento na resistência à compressão. Porém, o aumento da quantidade de caulinita não resultou em um ganho significativo de desempenho mecânico. Isso demonstra que o uso de argilas calcinadas com teores de caulinita dentro da faixa entendida como ótima (isso é, 40-65%) resulta em desempenho mecânico similar.

Figura 3 - Resistência à compressão. Aos 3 dias, a CC47 atingiu 21,7 MPa e a CC60, 23,8 MPa. Aos 7 dias, CC47 obteve 32,0 MPa e CC60, 37,9 MPa. Aos 28 dias, CC47 alcançou 37,3 MPa e CC60, 39,0 MPa.



Fonte: Os autores (2025).

CONCLUSÃO FINAL

Este estudo avaliou as propriedades mecânicas de duas argilas calcinadas com diferentes teores de caulinita (47% e 60%). Os resultados indicaram que a utilização da CC47 foi mais eficiente, pois oferece resultados mecânicos semelhantes aos obtidos com a CC60, e ainda levou a uma argamassa com maior fluidez. As medidas de DRX não evidenciaram grandes diferenças em termos de formação de fases quando variado o tipo de argila. Isso demonstra que o aumento do teor de caulinita até 60%, não proporcionou um ganho significativo nas propriedades mecânicas, o que pode resultar em um "desperdício de pureza" de matéria-prima. Isso reforça a importância da otimização das matérias-primas na busca por soluções mais sustentáveis na indústria do cimento.

AGRADECIMENTOS

JAN e PRM agradecem o apoio financeiro do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Brasil) Processo: 405537/2022-0. Os autores também agradecem à Circlua S.A. pelo fornecimento de materiais e à Universidade do Estado de Santa Catarina, campus Joinville, pela infraestrutura laboratorial.

REFERÊNCIAS

[1] PADILHA. R. M. S**. Automação da identificação de C_3S na microscopia do clínquer.** Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação em Engenharia de Software), Universidade Federal do Ceará. Russas. 2023.

[2] OLDONI. B.T. STEFFENS. J. DALLAGO. R. M. MIGNONI. M. L. Aplicação de lodo de estações de tratamento de efluentes em materiais de construção: uma revisão. **Perspectiva**, Erechim. v. 48, n. 182, p. 75-87, 2024/ DOI: https://doi.org/10.31512/persp.v.48.n.182.2024.425.p.75-87

[3] MOREIRA, C; REGO, J. H. S. Efeito do teor de gipsita na resistência à melhoria do cimento LC³. **Revista Matéria**, Brasília, v.25, n.1, 2020. Disponível em: doi.org/10.1590/S1517-707620200001.0900.

[4] SCRIVENER, K.; MARTIRENA, F.; BISHNOI, S.; MAITY, S. Calcined clay limestone cements (LC3). **Cement and Concrete Research**, vol. 114, p. 49–56, 1 Dec. 2018. Disponível em: doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.017.

[5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13276**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2010.

[6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABTN). **NBR 5738:** Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

[7] SILVA, L. G. MOREIRA, M. RIBEIRO, R. S. GIDRÃO, G. M. S. SILVESTRO. L. Caracterização reológica e mecânica de argamassas de cimento LC3. 64º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2023, Florianópolis.

[8] PINHEIRO, D. G. L. **Avaliação do comportamento de misturas ternárias de cimento portland, argila calcinada e nanossílica em compostos cimentícios.** 2023. Tese (Doutorado em estruturas e construção civil) – Faculdade de tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília - DF, 2023.