

Análise de argilas calcinadas na produção do cimento LC³

Thainá Farias Cardoso¹,

Bruna Juvêncio Frasson²,

Elaine Guglielmi Pavei Antunes³

Resumo: A sustentabilidade tornou-se um princípio essencial diante dos desafios ambientais atuais, como as mudanças climáticas e a degradação ambiental. Neste contexto, a substituição parcial do cimento convencional por materiais cimentícios suplementares destaca-se como alternativa promissora para a redução das emissões de CO₂. Esta pesquisa avalia a resistência à compressão do cimento LC³ (*Limestone Calcined Clay Cement*), utilizando argilas calcinadas da região do extremo sul catarinense. As argilas Argilito, Taguá Maracajá e Maciço foram caracterizadas quanto à granulometria, massa específica e atividade pozolânica. A argila Maciço, por apresentar melhor desempenho, foi empregada na formulação de argamassas com substituições de 25%, 35% e 45% de cimento CPV-ARI por argila calcinada e filer de calcário. Os ensaios de compressão mostraram variações significativas na resistência mecânica, associadas à finura e reatividade das argilas, bem como os teores de substituição. A análise estatística confirmou a influência desses fatores no desempenho do cimento LC³. Os resultados demonstram o potencial do uso de argilas calcinadas regionais na formulação de cimentos mais sustentáveis, sem comprometer significativamente a resistência mecânica, contribuindo para a inovação e a sustentabilidade na construção civil.

Palavras-chave: clínquer, materiais cimentícios suplementares, sustentabilidade.

Analysis of Calcined Clays in the Production of LC³ Cement

Abstract: Sustainability has become a fundamental principle in light of current environmental challenges such as climate change and environmental degradation. In this context, the partial replacement of conventional cement with supplementary cementitious materials stands out as a promising alternative to reduce CO₂ emissions. This study evaluates the compressive strength of LC³ cement (*Limestone Calcined Clay Cement*), using calcined clays sourced from the southernmost region of Santa Catarina, Brazil. The clays Argilito, Taguá Maracajá, and Maciço were characterized in terms of particle size distribution, specific gravity, and pozzolanic activity. The Maciço clay, which showed the best performance, was used to produce mortar

¹ Engenheira Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense, cardoosothaina@gmail.com.

² Doutora, Universidade do Extremo Sul Catarinense, brunafrasson@unesc.net.

³ Doutora, Universidade do Extremo Sul Catarinense, elainegpa@unesc.net.

mixes with 25%, 35%, and 45% replacement of CPV-ARI cement by calcined clay and limestone filler. The compressive strength tests revealed significant variations in mechanical performance, associated with the fineness and reactivity of the clays, as well as the replacement levels. Statistical analysis confirmed the influence of these factors on the mechanical behavior of LC³ cement. The results demonstrate the potential of using regional calcined clays in the formulation of more sustainable cements without significantly compromising mechanical strength, contributing to innovation and sustainability in the construction sector.

Key-words: clinker; supplementary cementitious materials; sustainability.

Introdução

A indústria da construção civil destaca-se como uma das impactantes em termos ambientais. Segundo dados do Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável (WBCSD, 2023), um ponto crítico nesse setor é a produção de cimento, que representa aproximadamente 8% das emissões globais de dióxido de carbono (CO₂). Além disso, projeta-se que, até 2050, os países em desenvolvimento demandarão 2,5 vezes mais produtos à base de cimento. Portanto, estima-se que a fabricação de cimento será responsável por aproximadamente 12% a 23% das emissões globais (JUNIOR; BARATA, 2022). Em 2023, de acordo com dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2024), a produção de cimento no Brasil atingiu aproximadamente 56 milhões de toneladas, sendo que 8,8 milhões desse total foram consumidas exclusivamente na região sul do país.

Nos últimos cinco anos, a intensidade das emissões diretas de CO₂ na produção de cimento permaneceram praticamente constante, com um aumento estimado em 1% em 2022. No entanto, para que o setor esteja alinhado com as metas de emissões líquidas zero até 2050, é necessário que haja uma redução de 4% na intensidade de CO₂ até 2030 (MORGADO, 2023). Existem diversas estratégias para reduzir a pegada de carbono do cimento, as ações que devem ser tomadas para essa redução estão agrupadas em três principais grupos, sendo um deles, adições ou substitutos de clínquer (OLIVEIRA, 2019).

O principal componente do cimento Portland é o clínquer, cuja quantidade está diretamente relacionada as emissões de CO₂ durante a produção do cimento. A maior parte das

emissões ocorre durante a calcinação do clínquer, quando o calcário se transforma em cal e libera o CO₂ (DIAS et al., 2022). Para reduzir o uso de clínquer na fabricação de cimento, sem comprometer sua resistência e durabilidade, é essencial incorporar materiais adicionais conhecidos como adições minerais. As adições minerais geralmente são compostas por materiais inorgânicos com finura semelhante à do cimento (LINS, 2017). Os subprodutos industriais como cinzas volantes, escória de alto forno e sílica ativa, juntamente com a pozolana natural, são empregados na produção de cimentos com menor geração de carbono. Porém, a disponibilidade desses subprodutos pode ser limitada para uma produção em larga escala.

Nesse contexto, as argilas calcinadas e o calcário se tornam fontes importantes de materiais cimentícios complementares, devido a sua ampla disponibilidade, uma vez que não requerem processos de produção adicionais, pois são extraídos de depósitos geológicos naturais conforme necessário (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018). Atualmente, a normatização brasileira permite o uso de até 50% de argilas na produção de cimentos Portland do tipo CP IV, mas seu uso em níveis mais altos é limitado devido a problemas de reologia nas misturas. Estudos indicam que o teor ótimo de substituição pela argila calcinada, é de 30% devido ao alto custo de calcinação. No entanto, pesquisas exploram a combinação da argila calcinada com fíler de calcário, que resulta em uma reação sinérgica capaz de formar um produto hidratado chamado carboaluminato (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018). Vizcaíno Andrés et al. (2015), Scrivener (2014), e Antoni (2013), demonstraram em suas pesquisas que esse produto é capaz de preencher vazios na mistura, melhorando o desempenho e as propriedades mecânicas do material final.

O cimento LC³ (Limestone Calcined Clay Cement), que consiste na substituição do clínquer por gesso, argila calcinada e calcário, tem se destacado como uma alternativa ao cimento Portland na busca por uma redução significativa da pegada de carbono e dos impactos ambientais associados à indústria do cimento. Esses materiais podem substituir até 50% do clínquer, demonstrando um potencial para mitigar as emissões de CO₂, reduzindo-as em até 40% (DIAS, 2022; LC³, 2023).

Lins (2017), analisou misturas contendo 15%, 30%, 45% e 60% de substituição de argila calcinada. As argilas utilizadas apresentavam teores de caulinita superiores a 30%. Os resultados obtidos mostraram que, aos 28 dias, o desempenho mecânico dos cimentos, medido pela resistência a compressão, foi superior ao da mistura de referência. No entanto, devido as variações nas características químicas e físicas das adições minerais devido as diferentes origens, o desempenho mecânico do produto final pode sofrer variações.

Portanto, o objetivo deste trabalho consiste em analisar a resistência a compressão do cimento LC³, composto por argila calcinada oriunda da região do extremo sul catarinense, em diferentes percentuais de substituição em relação ao traço referência adotado.

Materiais e Métodos

Os materiais utilizados nessa pesquisa foram o cimento CP V-ARI (ABNT NBR 16697: 2018), areia normalizada (ABNT NBR 7214: 2015), filer de calcário e argila calcinada. Três fontes de argilas foram avaliadas (i) Argilito (A), (ii) Maciço (M) e (iii) Taguá Macarajá (T), todas provenientes da região sul de Santa Catarina.

Os materiais argilominerais foram recebidos em blocos compactos e, antes do uso, passaram por britagem e moagem em moinho centrífugo por 15 minutos, resultando em partículas com dimensão inferior a 75 μm . Em seguida, as argilas foram calcinadas a 750 °C por 2 horas, com taxa de aquecimento de 10 °C/min, seguindo as recomendações de Freitas e Oliveira (2016) e Garcia et al. (2015). Nessa temperatura, ocorre a desidroxilação da caulinita, formando metacaulim, uma fase amorfa de alta reatividade (HANEIN et al., 2021). A calcinação foi realizada em forno tipo mufla Jung ($T_{\text{máx}} = 1100 \text{ °C}$), com as argilas dispostas em pilhas de aproximadamente 2 cm sobre placas cerâmicas. Esse procedimento foi padronizado para garantir homogeneidade térmica entre os diferentes lotes de material, conforme ilustrado na Figura 1.

Após a ativação térmica, as argilas calcinadas foram submetidas aos ensaios de massa específica, granulometria a laser, Chapelle Test e Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com

cal. A massa específica foi determinada conforme a ABNT NBR 16605:2017, utilizando frasco de Le Chatelier e querosene como líquido não reagente. A análise granulométrica foi realizada em analisador a laser modelo 1064 (CILAS). O método de Chapelle modificado avalia a atividade pozolânica por meio da fixação de hidróxido de cálcio. O ensaio consiste em manter sob agitação, por 16 ± 2 horas a 90 ± 5 °C, uma mistura de 1,0 g de adição mineral e 2,0 g de óxido de cálcio (CaO) em 250 mL de água, em Erlenmeyer polimérico. A quantificação do hidróxido de cálcio fixado é feita por titulação, sendo o resultado expresso em miligramas de Ca(OH)_2 por grama de adição mineral.

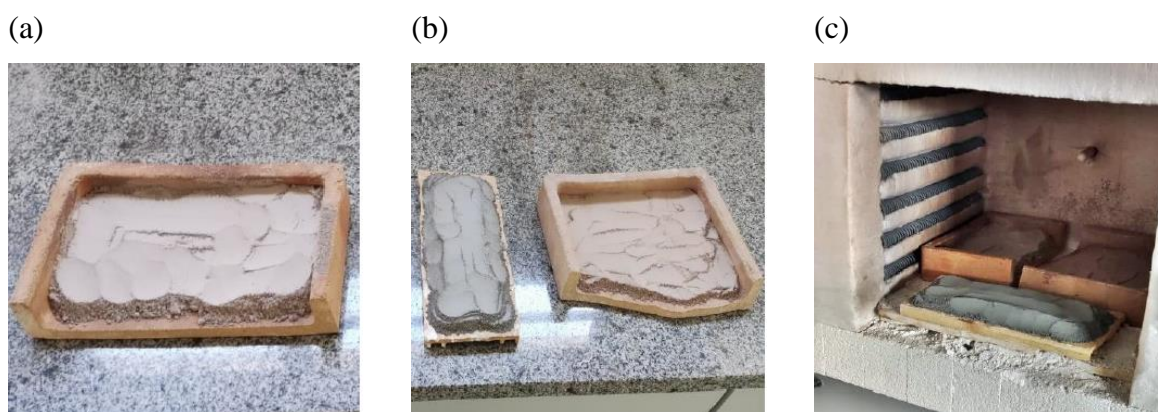


Figura 1. Processo de calcinação das argilas (a) argila M disposta sobre a placa cerâmica, (b) argila T e A disposta sobre a placa cerâmica, (c) argilas na mufla (Fonte: Dos autores, 2024)

Posteriormente, realizou-se o ensaio do Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com cal, conforme a ABNT NBR 5751:2015, que avalia a capacidade do material em reagir com hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) na presença de água, formando compostos cimentícios. Inicialmente, a massa específica das argilas foi determinada segundo a ABNT NBR 16605:2017. Em seguida, conforme a NBR 5751:2015, as argamassas foram ajustadas para atingir um índice de consistência de 225 ± 5 mm, obtido por meio do ensaio da mesa de espalhamento, conforme a ABNT NBR 7215:2019. O método inclui a moldagem de três corpos de prova cilíndricos (50 mm \times 10 mm) e posterior ensaio de compressão. As proporções das misturas, utilizadas no ensaio de IAP, estão apresentadas na Tabela 1. Observa-se variação na

relação água/ligante, ajustada conforme as características físico-químicas das adições minerais, a fim de manter a consistência exigida.

Tabela 1. Proporção de mistura das argamassas com IAP com cal.

Adições minerais	Massa dos materiais (g)				Relação água/ligantes (g/g)	Relação CH/Argila (g/g)
	Hidróxido de cálcio	Areia Normal ¹	Argila	Água		
Argila A			177,8	220,0	0,78	0,58
Argila M	104,0	936,0	185,5	250,0	0,86	0,57
Argila T			189,8	275,0	0,93	0,55

¹ Areia normal brasileira (NBR 7214) – 234 gramas de cada fração granulométrica

A mistura e moldagem seguiram os parâmetros da ABNT NBR 7215:2019. Os corpos de prova foram curados nos moldes por 24 horas a 23 °C e, após desmoldagem, mantidos em estufa a 55 °C por 6 dias. O ensaio de resistência à compressão foi realizado aos 7 dias.

Posteriormente, realizou-se a caracterização do cimento para a preparação das misturas, com base na NBR 7215:2019, adotando a proporção 1:3:0,48 (cimento:areia:água). Foram substituídos 25%, 35% e 45% do cimento por argila calcinada, mantendo a substituição por filer de calcário fixa em 15%, conforme estudos de Avet e Scrivener (2018), Lins (2017) e Antoni (2013). As amostras foram identificadas de acordo com o teor de substituição (ex.: “ARG25” para 25%; “REF” para a mistura referência). As proporções estão detalhadas na Tabela 2, foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos por mistura.

Tabela 2. Proporção de mistura das argamassas seguindo especificações da NBR 7215: 2019.

Traço	Cimento CP V (g)	Argila (g)	Filer calcário (g)	Areia (g)	Água (g)
REF	624,0	-	-	468,0	300,0
ARG25	374,4	156,0	93,6	468,0	300,0
ARG35	312,0	218,4	93,6	468,0	300,0
ARG45	249,6	280,8	93,6	468,0	300,0

Os resultados de resistência à compressão foram analisados por meio de ANOVA e Teste de Tukey para comparação de médias. Os demais resultados foram interpretados de forma qualitativa ou comparativa.

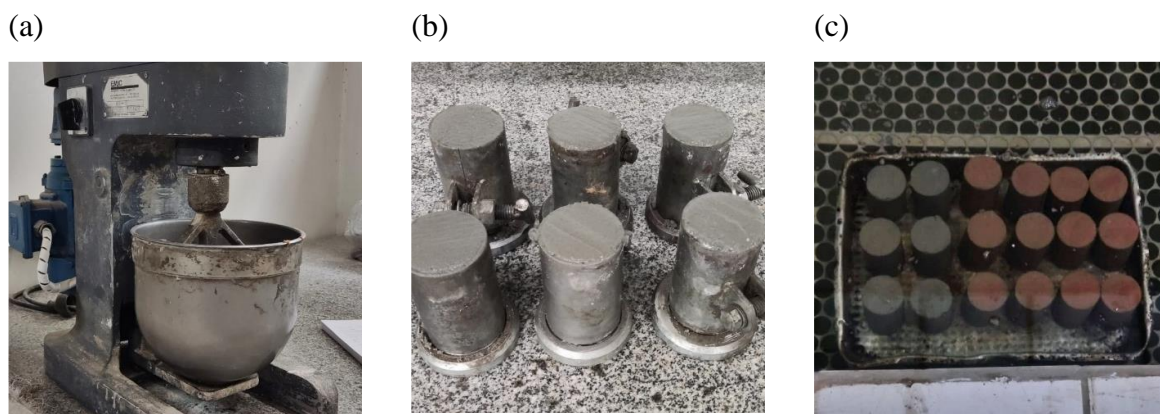


Figura 2. Preparação das argamassas (a) misturador mecânico, (b) moldagem dos corpos de prova, (c) cura dos corpos de prova (Fonte: Dos autores, 2024)

Resultados e discussões

Esta seção apresenta os resultados dos ensaios realizados para avaliar a influência da substituição por diferentes argilas calcinadas no cimento LC³. A caracterização dos materiais iniciou-se pela análise granulométrica, utilizada para determinar o tamanho e a distribuição das partículas. As leituras basearam-se na média das porcentagens passantes acumuladas, originando o gráfico da Figura 3, que exibe as curvas granulométricas das três argilas analisadas.

A análise das curvas granulométricas revelou que as três argilas possuem distribuições de tamanho de partícula semelhantes, com pequenas variações. Até o D₅₀, Argilito (A) e Taguá Maracajá (T) apresentaram valores próximos (22,73 μm e 22,66 μm , respectivamente). No entanto, a Taguá Maracajá destacou-se no D₉₀ (114,83 μm) e no diâmetro médio (42,37 μm), indicando partículas mais grossas. Por outro lado, a argila Maciço (M) apresentou granulometria mais fina e uniforme, com D₉₀ de 20 μm e diâmetro médio de 29 μm .

Quanto à reatividade, os resultados do ensaio de Chapelle Modificado (Figura 4) indicam maior atividade pozolânica para a argila Maciço, com média de 190,45 mg CaO/g. A

Argilito apresentou valor intermediário (145,60 mg CaO/g), enquanto a Taguá Maracajá registrou o menor índice (99,04 mg CaO/g).

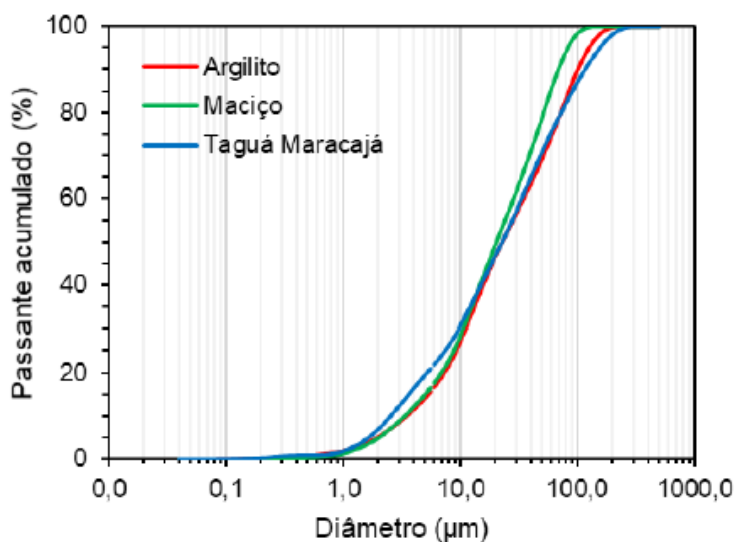


Figura 3. Curva granulométrica das argilas calcinadas (Fonte: Dos autores, 2024)

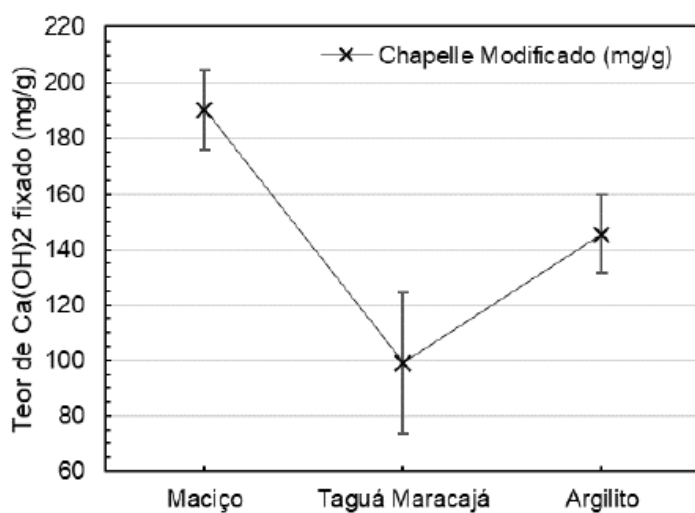


Figura 4. Teores de hidróxido de cálcio fixados conforme o método Chapelle modificado (Fonte: Dos autores, 2024)

Segundo Raverdy et al. (1980), um material é considerado pozolânico quando consome mais de 330 mg CaO/g de adição (equivalente a 436 mg Ca(OH)₂/g). Assim, os resultados do ensaio de Chapelle Modificado indicam que as argilas avaliadas não atingem a atividade pozolânica mínima exigida. Complementarmente, foi realizado o ensaio de Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com cal, visando avaliar a reatividade das argilas calcinadas. Esse método indireto, normatizado, baseia-se na carga de ruptura à compressão para estimar o potencial reativo das adições minerais. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 5.

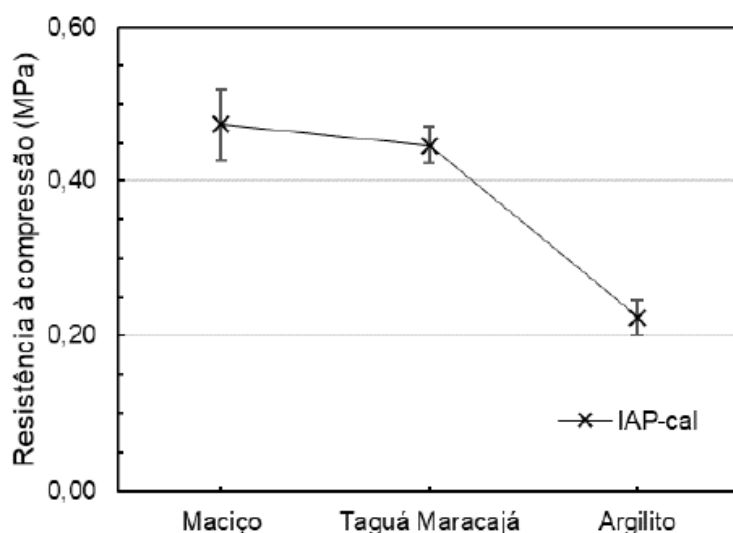


Figura 5. Índice de atividade pozolânica (IAP) com cal (Fonte: Dos autores, 2024)

A argila Maciço apresentou resistência à compressão, com um valor médio de $0,47 \pm 0,05$ MPa, seguida pela argila Taguá Maracajá, com $0,45 \pm 0,02$ MPa. A argila Argilito apresentou a menor resistência à compressão, com um valor médio de $0,22 \pm 0,02$ MPa, no entanto nenhuma das argamassas atingiram a resistência à compressão mínima de 6,0 MPa referenciado por norma. Segundo Filho (2017), as condições indicadas pela norma NBR 5751:2015 interferem no valor da resistência à compressão, ao manter o volume de particulados constante e variar o volume de água de mistura em função das particularidades físico-químicas da adição mineral, há interferência na porosidade do sistema, o que influencia na resistência à

compressão da argamassa no estado endurecido. Em comparação aos dados deste estudo, a maior relação de água/ligante não apresentou a menor resistência como esperado. Um dos fatores que podem contribuir para tal resultado está na finura das argilas, que pode influenciar no desenvolvimento da resistência mecânica e nas propriedades do LC³. A argila M apresentou um D₅₀ de 20,27 µm, similar ao encontrado na literatura (NGUYEN; AFROZ; CASTEL, 2020). Vizcaíno Andrés et al. (2015) demonstraram que argilas calcinadas com maior finura melhoram a resistência à compressão em todas as idades, além de acelerar a taxa de liberação de calor de hidratação e refinar os poros.

A Figura 6 mostra os resultados de resistência à compressão das misturas de cimento LC³ com diferentes percentuais de substituição de argila calcinada Maciço (25%, 35% e 45%) comparadas com a mistura de referência (sem substituição), rompidos aos 28 dias. As médias de resistência à compressão para cada substituição foram, de $35 \pm 0,98$ MPa, $21 \pm 0,59$ MPa, $17 \pm 0,41$ MPa e $19 \pm 0,61$ MPa para as amostras REF, ARG25, ARG35 e ARG45, respectivamente.

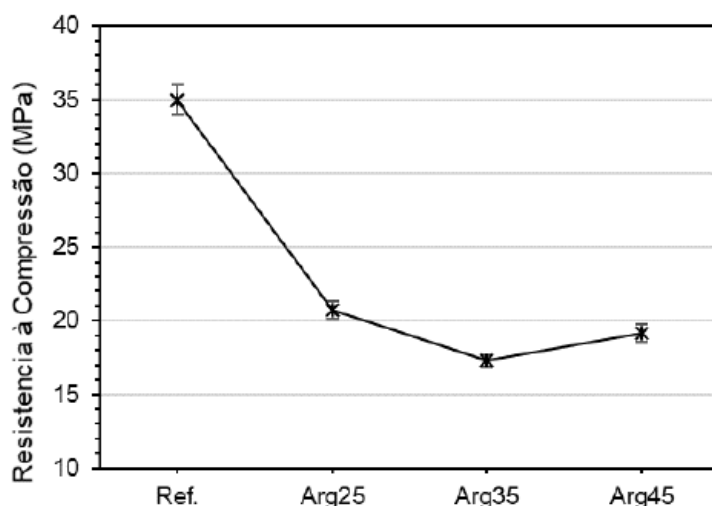


Figura 6. Ensaio de resistência a compressão do cimento LC3 (Fonte: Dos autores, 2024)

A partir da combinação das análises de distribuição granulométrica, resistência à compressão e índice de atividade pozolânica foi possível determinar que a argila Maciço, dentre

as estudadas, apresentou as melhores propriedades para a formulação do cimento LC³. Os resultados individuais de resistência à compressão das amostras, foram analisados primeiramente quanto aos valores discrepantes, seguindo as recomendações da norma ABNT NBR 7215:2019 observando o Desvio Relativo Máximo. Após a retirada dos valores discrepantes foi realizada a análise ANOVA com 5% de confiabilidade, utilizando o software Origin.

A Tabela 3 apresenta os dados da análise estatística ANOVA para o ensaio de resistência a compressão da argamassa conforme NBR 7215:2019. Pode-se afirmar com 99% de confiança de que os resultados são diferentes entre si. A análise do teste de Tukey evidencia que as amostras ARG25, ARG35 e ARG 45 diferem estatisticamente da amostra de referência. E entre as amostras de LC3 estudadas também se observou a variação significativa entre os resultados analisados.

Tabela 3. ANOVA para os resultados de resistência à compressão $R^2 = 0,99$.

	Df	SQ	MQ	F-value	p-value
Variáveis	3	646,15	215,38	530,76	0,0000
Erro	14	5,68	0,41		
Total	17	651,84			

A composição ARG35 estudada nessa pesquisa, pode ser enquadrada como LC3-50, ou seja, com 50% do CPV-ARI foi substituído pela composição de argila + calcário (com relação de 2,3: 1 de argila: calcário). A resistência mecânica do ARG35 foi 52% inferior ao material de referência, e pode estar diretamente relacionado com o teor de substituição do CPV-ARI pela argila calcinada. A literatura demonstra que LC3-50 (com substituição de 50% do clínquer por argila + calcário + gesso) produzidos com argilas de baixo teor de caulinita (até 20%) apresentam resistências mecânicas inferiores aos materiais de referência, aproximadamente de 11%, na idade de 28 dias (MARAGHECHI et al., 2018). Portanto, o teor de caulinita desta pesquisa, que varia de 12 a 18% (dados da empresa fornecedora do material), e aos percentuais de substituição, possuem influência direta na menor resistência mecânica em relação a amostra REF, e as referências Maraghechi et al., 2018; Antoni, 2013; Pereira; Rêgo; Hoppe filho, 2023).

Outro fator a ser considerado para o desempenho mecânico do cimento LC³ é a substituição de diferentes adições minerais e sua composição química. Scrivener (2014) afirma que a composição da argila utilizada, especialmente o teor de caulinita, é o principal fator que contribui para o desempenho mecânico dos LC³. A calcinação da caulinita propicia a formação de fases mais reativas, que irão reagir mais facilmente no meio alcalino, liberando os íons de silício e alumínio, para o processo de reação química, o que contribui principalmente para a resistência mecânica em idades mais avançadas. O autor também observa que as proporções de substituição de cada adição mineral são fundamentais para o desempenho mecânico do LC³.

Pereira, Rêgo e Hoppe Filho (2023) demonstraram que, entre duas argilas calcinadas, aquela com maior teor de caulinita (32%) apresentou maior capacidade de reação com a cal, resultando em resistência mecânica superior. Antoni (2013) investigou a influência do teor de caulinita em três argilas com teores variando entre 28% e 100%, constatando que o desempenho mecânico dos cimentos é diretamente proporcional ao teor de caulinita. Aos 28 dias, a argila com 100% de caulinita superou em resistência o cimento sem adições minerais. Esse efeito é atribuído à atividade pozolânica, decorrente do consumo do hidróxido de cálcio presente no sistema cimentício.

Conclusão

Este estudo avaliou a influência da substituição parcial de clínquer por argilas calcinadas e filer de calcário no desempenho mecânico do cimento LC³. Entre as argilas testadas, a argila Maciço destacou-se por sua granulometria fina e maior atividade pozolânica, mostrando-se a mais adequada para a formulação do LC³. A resistência à compressão das misturas com 25%, 35% e 45% de substituição apresentou redução em relação ao cimento de referência, com leve recuperação no percentual mais alto. Esses resultados confirmam a influência do teor de caulinita, finura das argilas e proporções de substituição no desempenho mecânico, corroborando estudos anteriores que indicam menor resistência para teores de caulinita inferiores a 20%. A composição ARG35 (LC³-50) teve redução de 52% na resistência em



comparação ao cimento convencional. Os achados ressaltam a necessidade de otimizar os parâmetros das argilas para melhorar o desempenho do LC³. Futuras pesquisas devem focar em argilas com maior teor de caulinita, diferentes condições de moagem, uso de resíduos industriais como matéria-prima e análise do impacto ambiental em termos de emissões de CO₂. Além disso, recomenda-se avaliar a aplicação do cimento LC³ em argamassas de assentamento e revestimento para ampliar sua viabilidade técnica e sustentável.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751**: Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 7214**: Areia normal para ensaio de cimento - Especificação. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ANTONI, M. **Investigation of cement substitution by blends of calcined clays and limestone**. Tese de Doutorado. École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Lausanne, 223 p, 2013.

AVET, F.; SCRIVENER, K. Investigation of the calcined kaolinite content on the hydration of Limestone Calcined Clay Cement (LC3). **Cement and Concrete Research**, v. 107, 2018.

BERGONZONI, M.; MELLONI, R.; BOTTI, L. Analysis of sustainable concrete obtained from the by-products of an industrial process and recycled aggregates from construction and demolition waste. **Procedia Computer Science**, v. 217, p. 41–51, jan. 2023.

DIAS, R. P.; SELLA, D. C. N.; SANTOS, A. C. P dos; POSSAN, E. Cimento LC³: emissões, inovações e capacidade de produção no Brasil. **Revista Técnico-Científica do CREA-PR**, 2022. Disponível em: <https://revistatecie.crea-pr.org.br/index.php/revista/article/view/807/540>. Acesso em: jan. 2024.

FILHO, J. H.; GOBBI, A.; PEREIRA, E.; QUARCIONI, V.A.; MEDEIROS, M.H.F. Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Pater I): Índice de atividade pozolânica (IAP) com cal, difração de raios X (DRX), termogravimetria (TG/DTG) e chapelle modificado). **Revista Matéria**, v.22, n.3, 2017.



FREITAS, S. S.; OLIVEIRA, J. S. Avaliação dos resíduos da indústria de cerâmica vermelha como insumo para a produção de cimento Portland. **Revista Ambiental**, v. 2, n. 1, p. 80-87, 2016.

GARCIA, E.; JUNIOR., M. C.; QUARCIONI, V.A.; CHOTOLI, F.F. Avaliação da atividade pozzolânica dos resíduos de cerâmica vermelha produzidos nos principais polos ceramistas do Estado de S. Paulo. **Cerâmica**, São Paulo, v. 61, n. 358, p. 251-258, 2015.

HANEIN, T., THIENEL, KC., ZUNINO, F. et al. Clay calcination technology: state-of-the-art review by the RILEM TC 282-CCL. **Revista Materials and Structures**, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01807-6>

JUNIOR, E. S. A; BARATA, S M. Cimento de baixo impacto ambiental a partir de resíduos caulínicos da Amazonia. **Revista Matéria**, v.27 n.01, 2022.

LC³ PROJECT. **Limestone Calcined Clay Cement**. Disponível em: <https://lc3.ch/>. Acesso em: Dez. 2023.

LINS, D. N. (2017). **Análise da Resistência à Compressão do cimento LC³ e a influência das adições minerais em seu desempenho**. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil. Publicação E.DM-29A/17, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 141p, 2017.

MARAGHECHI, H.; AVET, F.; WONG, H.; KAMYAB, H.; SCRIVENER, K. Performance of Limestone Calcined Clay Cement (LC3) with various kaolinite contents with respect to chloride transport. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, 51(5), 1–17. 2018.

MITROVIĆ, A.; ZDUJIĆ, M. Preparation of pozzolanic addition by mechanical treatment of kaolin clay. **International Journal of Mineral Processing**, 2014, 132, 59–66.

MORGADO, A. Cement. 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/industry/cement>. Acesso em: 20 set. 2023

NGUYEN, Q. D.; AFROZ, S.; CASTEL, A. Influence of Calcined Clay Reactivity on the Mechanical Properties and Chloride Diffusion Resistance of Limestone Calcined Clay Cement (LC3) Concrete. **Journal of Marine Science and Engineering**, 8(Figure 1), 1–14, 2020.

OLIVEIRA, G. C. de. **Desenvolvimento de argamassa colante utilizando resíduo de caulim** (Tese de Doutorado). Campina Grande, 2016. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/281>.

PEREIRA, V. L. S.; RÊGO, J. H. da S.; HOPPE FILHO, J. Comparação da reatividade de resíduo de cerâmica vermelha cominuído e matéria-prima de olaria calcinada. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 23, n. 4, p. 255-272, out./dez. 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212023000400702>

RAVERDY M., BRIVOT F., PAILLIERE A.M., DRON, R. Appreciation de l'activite pouzzolanique des constituants secondaires. **In: 7th Int. Congr. Chem. Cem.** Paris, 1980.



SCRIVENER, K. L. Options for the future of cement. **The Indian Concrete Journal**, v. 88, n. 7, p. 11–21, 2014.

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

SNIC - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **Números da indústria**. 2023. Disponível em: <<http://snic.org.br/numeros-industria.php>>. Acesso em: 15 ago. 2024.

VIZCAÍNO ANDRÉS, L. M.; SANCHEZ-BERRIEL, S.; DAMAS-CARRERA, S.; PÉREZ-HERNÁNDEZ, A.; SCRIVENER, K. L.; MARTIRENA-HERNÁNDEZ, J.F. Industrial trial to produce a low clinker, low carbon cement. **Materiales de Construcción**, v. 65, n. 317, p. 045, 2015.