AVALIAÇÃO DA LAMA DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR EM PASTAS DE CIMENTO DE CALCÁRIO E ARGILA CALCINADA

Assessment of Ornamental Stone Processing Sludge as a Supplementary Cementitious Material in Limestone Calcined Clay Cement Pastes

Rafael Matheus Neckel
UNIOESTE | Toledo, Paraná | rafael.neckel@unioeste.br

Allan Thierry Branco Torres
UNIOESTE | Toledo, Paraná | allan.torres1@unioeste.br

André Inácio da Silva Filho
UFPE | Caruaru, Pernambuco | andre.inacio@ufpe.br

Laura Silvestro
UTFPR | Guarapuava, Paraná | laurasilvestro@utfpr.edu.br

Lidiane Fernanda Jochem
UTFPR | Curitiba, Paraná | lidiane@utfpr.edu.br

Resumo

A produção de cimento Portland (CP) é uma das principais fontes de emissões de dióxido de carbono (CO_2), contribuindo significativamente para as mudanças climáticas. Em busca de alternativas mais sustentáveis, uma estratégia promissora é o uso de materiais cimentícios suplementares (MCS). O limestone calcined clay cement *(LC^3), que utiliza calcário e argila calcinada em substituição ao cimento, reduz a necessidade de clínquer, principal responsável pelas emissões de CO_2 do CP. A lama do beneficiamento de rochas ornamentais (LBRO), frequentemente descartada inadequadamente, pode ser incorporada como MCS no LC^3. Isso ajudaria a reduzir as emissões de CO_2 e mitigar os impactos ambientais do descarte inadequado do resíduo. O presente artigo avaliou pastas de LC^3 com substituição parcial de metacaulim por LBRO calcinada, constatando que, devido à baixa reatividade da LBRO, houve uma diminuição na resistência à compressão das pastas cimentícias.*
Palavras-chave: Cimento de baixo carbono; Resíduo; Potencial pozolânico; Misturas quaternárias.

ABSTRACT

Portland cement (PC) production is one of the main sources of carbon dioxide (CO_2) emissions, significantly contributing to climate change. In search of more sustainable alternatives, a promising strategy is the use of supplementary cementitious materials (SCMs). Limestone calcined clay cement (LC^3), which uses limestone and calcined clay to replace cement, reduces the need for clinker, the main contributor to CO_2 emissions in PC. The sludge from the processing of ornamental stones (LBRO), often improperly discarded, can be incorporated as SCM in LC^3. This would help reduce CO_2 emissions and mitigate the environmental impacts of improper waste disposal. This article evaluated LC^3 pastes with partial replacement of metakaolin by calcined LBRO, finding that, due to the low reactivity of LBRO, there was a decrease in the compressive strength of the cementitious pastes.
Keywords: Low carbon cement; Waste; Pozzolanic potential; Quaternary blends.

1 INTRODUÇÃO

O cimento é um material amplamente utilizado na construção devido à sua versatilidade, mas é responsável por cerca de 10% das emissões globais de CO_2, sendo um dos maiores contribuintes para a poluição atmosférica. A produção de clínquer, principal componente do cimento Portland (CP), requer alta demanda energética, atingindo temperaturas de até 1450 ºC e provocando a decomposição do $CaCO_3$, que responde por cerca de 60% das emissões de CO_2 do CP. Alternativas promissoras incluem o uso de materiais cimentícios suplementares (MCS) como substitutos parciais do clínquer, o que não só reduz as emissões de

CO_2, mas também reaproveita resíduos industriais e da construção civil, promovendo maior sustentabilidade. Exemplos de MCS são cinzas volantes, sílica ativa e escória de alto forno. Porém visto a escassez desses materiais, com qualidade para uso na construção civil, surge a necessidade de estudar novos resíduos que possam ser combinados com o cimento (SNIC, 2019; Zolfagharnasab; Ramezanianpour; Bahman-Zadeh, 2021; Li; Dengler; Hesse, 2023; Mañosa *et al.*, 2024). Diversas pesquisas também avaliam a lama do beneficiamento de rochas ornamentais (LBRO) como material cimentício suplementar (MCS). Proveniente do corte a úmido, pode substituir até 20% da massa do cimento, mantendo propriedades mecânicas semelhantes ao concreto de referência (Bastos *et al.*, 2013; Almada *et al.*, 2020; Nayak; Satapathy; Mantry, 2022; Souza *et al.*, 2023; Torres *et al.*, 2024).

Uma alternativa proeminente ao cimento Portland é o *limestone calcined clay cement* (LC^3), produzido a partir de uma mistura ternária de clínquer, fíler calcário e argila calcinada, cuja composição mais comum inclui 50% de clínquer, 30% de argila calcinada, 15% de calcário e 5% de gesso (Krishnan; Bishnoi, 2020). Scrivener *et al.* (2018) destacam que o LC^3 emite 30% menos CO_2 comparado ao cimento Portland e 10% menos que cimentos com até 15% de cinza volante. A produção do LC^3 é viável devido à abundância de matérias-primas e ao processo simples que utiliza a infraestrutura existente (Sharma *et al.*, 2021). Embora pesquisas recentes tenham explorado misturas quaternárias, poucas focam no LC^3, indicando a necessidade de mais estudos sobre a incorporação de resíduos no LC^3 para formar essas misturas. Assim sendo, o presente estudo analisa a influência da substituição parcial do metacaulim pela LBRO em pastas de cimento produzidas com LC^3.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Utilizou-se o cimento CP V-ARI para a produção das pastas, devido ao menor percentual de adições em relação aos demais tipos de CP comercializados no país, conforme a NBR 16697 (ABNT, 2018). LBRO foi coletada em uma marmoraria na cidade de Guarapuava-PR, proveniente do processo de beneficiamento de mármore e granito. O resíduo foi seco em estufa a 105 ºC por 24 horas e posteriormente, cerca de 500 g foram peneirados com peneira de malha de 53 µm e submetido ao processo de caracterização.

Tanto a LBRO, quanto o metacaulim (MC), o fíler calcário (FC) e o CP V-ARI foram submetidos ao ensaio de fluorescência de raio-X (FRX), para determinação da composição química dos MCS, massa específica conforme os procedimentos da NBR 16605 (ABNT, 2017), e granulometria por espalhamento a laser.

Adicionalmente, difração de raio X (DRX) foi realizada na LBRO *in natura* a fim de verificar a disposição das fases presentes no resíduo. A LBRO foi submetida a um tratamento térmico nas temperaturas de 650 ºC, 750 ºC e 850 ºC por 6 horas para posterior análise da pozolanicidade do material *in natura* e nas faixas de temperatura de calcinação, seguindo os procedimentos descritos na NBR 5752 (ABNT, 2014).

Por fim, pastas de cimento foram produzidas utilizando as proporções descritas na Tabela 1, com uma relação água/aglomerante de 0,45. As pastas foram acondicionadas em recipientes cilíndricos de 26 mm de diâmetro por 52 mm de altura devidamente selado, permanecendo até os 7 e 28 dias de cura. Passado o período de cura, as pastas foram submetidas ao ensaio de resistência à compressão nas idades de 7 e 28 dias, em uma máquina universal de ensaios da marca EMIC modelo DL30000 com carregamento de 0,45 MPa/s, seguindo os procedimentos da NBR 5739 (ABNT, 2018).

Tabela 1: Proporções dos materiais utilizados na produção das pastas (%)

MCS	REF	LC^3	L650MK15	L650MK25	L750MK15	L750MK25	L850MK15	L850MK25
CP V-ARI	100	55	55	55	55	55	55	55
MC	-	30	15	25	15	25	15	25
FC	-	15	15	15	15	15	15	15
LBRO	-	-	15	5	15	5	15	5

Fonte: Autoria própria (2025).

A análise estatística ocorreu utilizando-se o *software* livre R (R Core Team, 2024) e os pacotes *emmeans* (Lenth, 2025), *multcomp* (Hothorn; Bretz; Westfall, 2008) e *multcompView* (Graves *et al*. 2024). Para tanto, foi realizada ANOVA de fator duplo, considerando os valores de resistência em função do traço e da idade, o teste de Shapiro-Wilk a fim de determinar a normalidade dos resíduos da ANOVA e o teste de Tukey para verificar quais grupos amostrais diferenciam-se entre si.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A composição química, granulometria e massa específica do CP V-ARI e da LBRO são apresentadas na Tabela 2. Na Tabela 3 são apresentadas as resistências à compressão das argamassas moldadas para o ensaio de pozolanicidade, bem como o índice de desempenho da LBRO submetida a diferentes temperaturas de calcinação. Na Figura 1a é ilustrado o resultado do DRX da LBRO, e na Figura 1b são apresentados os valores médios de resistência à compressão das pastas cimentícias aos 7 e 28 dias com os grupos estatísticos obtidos por meio do teste de Tukey. A Tabela 4 apresenta os dados obtidos por meio da ANOVA, bem como os teste de Shapiro-Wilk.

A análise da LBRO anidra revelou que, apesar de sua composição química (SiO_2, Al_2O_3, CaO e Fe_2O_3) estar de acordo com Nayak, Satapathy e Mantry (2022), Almada *et al.* (2023) e Souza *et al.* (2023), ela não atende aos requisitos de pozolanicidade da NBR 12653 (ABNT, 2015), que determina que os materiais pozolânicos da Classe E devem apresentar soma dos óxidos $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 \geq 50\%$ e perda ao fogo ≤ 6,0 %, e conforme a NBR 16697 (ABNT, 2018), existe um limite mínimo de 75% para que materiais pozolânicos sejam utilizados em cimentos comerciais.

Tabela 2: Composição química, granulometria e massa específica dos MCS

MCS	Composição química (%)									D50 (µm)	ρ (g/cm³)
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	SO_3	K_2O	TiO_2	MgO	PF		
CP V-ARI	15,10	3,61	3,08	66,00	3,07	1,05	0,28	3,14	4,05	13,96	2,96
MC	61,60	30,70	2,50	0,54	0,09	0,32	2,16	0,24	1,55	22,75	2,50
FC	2,86	0,08	0,07	45,40	<0,01	0,01	0,01	10,60	40,90	17,05	2,91
LBRO	37,40	8,84	2,59	5,36	0,08	2,29	0,74	-	42,47	17,02	2,99
Legenda: PF = perda ao fogo; ρ = massa específica											

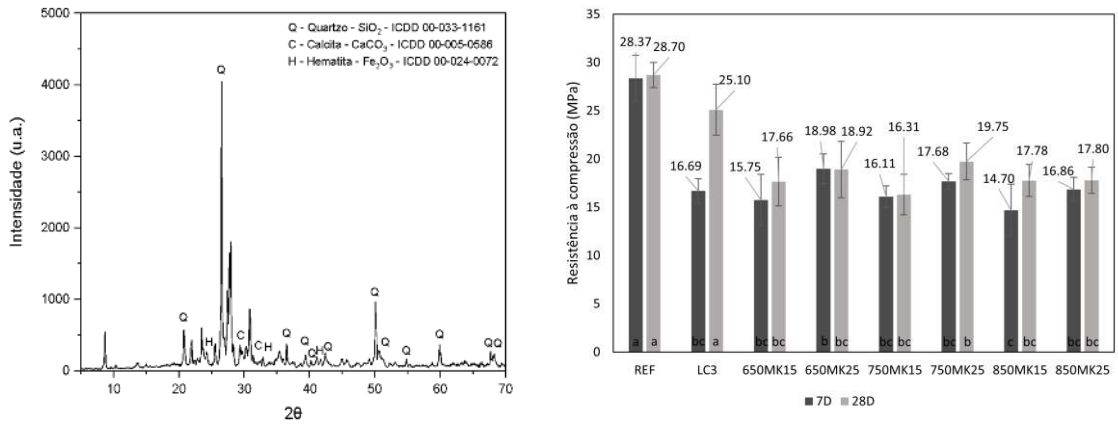
Fonte: Autoria própria (2025).

Tabela 3: Resistência à compressão das argamassas (MPa) e índice de desempenho pozolânico (%)

Corpo de Prova	REF	LBRO *in natura*	LBRO 650	LBRO 750	LBRO 850
1	24,77	14,46	15,36	10,88	12,51
2	21,31	13,92	15,37	16,45	10,67
3	17,28	12,02	14,80	15,72	15,64
Média	21,12	13,47	15,18	14,35	12,94
Desvio padrão	3,75	1,28	0,33	3,03	2,51
Desempenho (%)	-	63,76%	71,86%	67,95%	61,27%

Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 1: a) difratograma da LBRO; b) resistência a compressão média das argamassas com grupos estatísticos



Fonte: Autoria própria (2024)

Tabela 4: Anova de fator duplo para os dados de resistência e teste de normalidade de Shapiro-Wilk

	gl	*SQ*	MQ	F	P-valor	W
Traço	7	1012,1	144,59	37,174	$<2\cdot10^{-16}$	-
Idade	1	87,1	87,14	22,405	$1{,}14\cdot10^{-5}$	-
Traço:Idade	7	123,8	17,69	4,548	$3{,}21\cdot10^{-4}$	-
Resíduos	69	268,4	3,89	-	-	-
Shapiro-Wilk	-	-	-	-	0.1154	0.9761

Fonte: Autoria própria (2025).

Verifica-se que o traço de referência em ambas as idades, bem como o traço LC^3 aos 28 dias pertencem ao mesmo grupo estatístico, diferindo-se significativamente dos demais traços. Há também disparidade estatística significativa entre o traço 850MK15 aos 7 dias em relação aos traços 650MK25 aos 7 dias e 750MK25 aos 28 dias. Nos demais traços não há divergência estatística significativa. Além disso, é possível observar, por meio do teste de Shapiro-Wilk, que os resíduos da ANOVA seguem uma distribuição normal.

A calcinação da LBRO (650 ºC e 750 ºC), apesar de ter aumentado a pozolanicidade, não alterou significativamente suas propriedades, como observado na variabilidade das resistências. Pelo DRX é observada a predominância de picos de quartzo, confirmado pelo teor de SiO_2 (37,40%), o que contribui para a baixa reatividade da LBRO, visto que é observado apenas um pequeno halo amorfo, o que indica que a LBRO é predominantemente cristalina. No ensaio com cimento LC^3, a substituição parcial do metacaulim pela LBRO não resultou em ganhos de resistência, confirmando a baixa reatividade do material. Dixit *et al.* (2021) verificaram, ao moldar argamassas quaternárias utilizando cinza volante, uma redução na resistência à compressão quando o MCS foi utilizado em substituição ao clínquer, ao passo que o desempenho mecânico foi mantido quando esta foi utilizada como substituinte parcial do metacaulim, mantendo-se a proporção de 2:1 entre os materiais pozolânicos e o fíler calcário. Rodrigues *et al.* (2022) e Balestra *et al.* (2023) também constataram uma redução na resistência à compressão de argamassas e concretos, respectivamente, ao incorporar 10% de cinza volante em substituição ao clínquer.

Isto posto, os resultados demonstram que a LBRO, mesmo após calcinação, não apresentou características pozolânicas suficientes para atender aos requisitos normativos, refletindo em baixa reatividade e ausência de ganhos significativos nas resistências mecânicas das pastas de LC^3. Esses achados estão em consonância com estudos prévios que indicam a necessidade de materiais suplementares com maior reatividade para garantir desempenho satisfatório em substituições parciais (Dixit *et al*., 2021; Rodrigues *et al*., 2022; Balestra *et al*., 2023).

4 CONCLUSÃO

A LBRO, apesar de apresentar baixo índice de desempenho pozolânico mesmo após calcinação, contribuiu para o entendimento das propriedades de pastas cimentícias. Verificou-se que a calcinação (650 ºC e 750 ºC) aumentou a reatividade da LBRO, mas não proporcionou ganhos significativos de resistência em comparação ao LC^3 ternário. A predominância de quartzo e a baixa reatividade do resíduo limitam sua aplicação direta. Embora o desempenho mecânico não tenha superado as formulações de referência, a reutilização da LBRO como MCS em sistemas LC^3 representa uma alternativa para mitigar o descarte inadequado de resíduos. Sugere-se investigar ajustes na calcinação e a integração de outros MCS para otimizar sua aplicação, além de avaliar a substituição do fíler calcário pela LBRO.

5 AGRADECIMENTOS

À Central de Análises - UTFPR, Campus Pato Branco, pelas análises de DRX; ao Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (CRTI) pelas análises de FRX; À UTFPR, Campus Toledo, por permitir a realização de ensaios no laboratório de Materiais de Construção; à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Fundação Araucária pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

ALMADA, B. S.; MELO, L. S.; DUTRA, J. B.; BUBANI, L. B.; SILVA, G. J. B.; SANTOS, W. J.; AGUILAR, M. T. P. Influence of the heterogeneity of waste from wet processing of ornamental stones on the performance of Portland cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 262, 2020.

ALMADA, B. S.; MELO, L. S.; DUTRA, J. B.; BUBANI, L. B.; SILVA, G. J. B.; SANTOS, W. J.; AGUILAR, M. T. P. Effect of the waste ornamental rocks on the hydration and life cycle of Portland cement composites, **Construction and Building Materials**, v. 395, p. 132353, 2023. doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132353.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752:** Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:** Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, p. 9. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653:** Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, p. 6. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605:** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, p. 4. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697:** Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

BALESTRA, C. E. et al. Contribution to low-carbon cement studies: Effects of silica fume, fly ash, sugarcane bagasse ash and acai stone ash incorporation in quaternary blended limestone-calcined clay cement concretes. **Environmental Development**, v. 45, p. 100792, mar. 2023.

BASTOS, R.S., ULIANA, J.G., CALMON, J.L., *et al.* Revisão bibliográfica dos estudos sobre a aplicação de lama do beneficiamento de rochas ornamentais na produção de materiais de construção, *In:* 55° Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais...** Gramado, 2013.

DIXIT, A. *et al.* Quaternary blended limestone-calcined clay cement concrete incorporating fly ash. **Cement and Concrete Composites**, v. 123, p. 104174, out. 2021. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104174.

GRAVES, S. *et al*. **multcompView:** Visualizations of Paired Comparisons. Pacote R versão 0.1-10, 2024. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=multcompView>. Acesso em: 26 mar. 2025.

HOTHORN, T.; BRETZ, F.; WESTFALL, P. Simultaneous Inference in General Parametric Models. **Biometrical Journal**, v. 50, n. 3, p. 346–363, 6 jun. 2008. doi: 10.1002/bimj.200810425.

KRISHNAN, S.; BISHNOI, S. A numerical approach for designing composite cements with calcined clay and limestone. **Cement and Concrete Research**, v. 138, p. 106232, dez. 2020. doi: 10.1016/j.cemconres.2020.106232.

LENTH R.V. emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means. Pacote R versão 1.11.0, 2025. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>. Acesso em: 26 mar. 2025.

LI, X.; DENGLER, J.; HESSE, C. Reducing clinker factor in limestone calcined clay-slag cement using C-S-H seeding – A way towards sustainable binder. **Cement and Concrete Research**, v. 168, p. 107151, 2023. doi: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107151.

MAÑOSA, J.; CALDERÓN, A.; SALGADO-PIZARRO, R.; MALDONADO-ALAMEDA, A.; CHIMENOS, J. M. Research evolution of limestone calcined clay cement (LC3), a promising low-carbon binder – A comprehensive overview. **Heliyon**, v. 10, p. e25117, 2024. doi: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25117.

NAYAK, S.K., SATAPATHY, A., MANTRY, S. Use of waste marble and granite dust in structural applications: a review. **Journal of Building Engineering**, v. 46, p. 103742, 2022. doi: http://doi. org/10.1016/j.jobe.2021.103742.

R CORE TEAM. **R:** A Language and Environment for Statistical Computing. Viena, Austria. R Foundation for Statistical Computing, 2024. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 14 out. 2024.

RODRIGUES, A. L. M. V. et al. Environmental and Mechanical Evaluation of Blended Cements With High Mineral Admixture Content. **Frontiers in Materials**, v. 9, p. 1–11, 1 jul. 2022.

SCRIVENER, K. *et al.* Calcined clay limestone cements (LC3). **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 49–56, dez. 2018.

SHARMA, M. *et al.* Limestone calcined clay cement and concrete: A state-of-the-art review. **Cement and Concrete Research**, v. 149, p. 106564, nov. 2021. doi: 10.1016/j.cemconres.2021.106564

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. Rio de Janeiro: SNIC, 2019.

SOUZA, A.M.; CARVALHO, J.M.F.; SALGADO, I.P.; SANTOS, C.F.R.; FERREIRA, F.A.; PEDROTI, L.G.; LARA, R.C.; PEIXOTO, R.A.F. Influence of filler/cement and powder/total solids on the mixture design of self-compacting micro-concretes containing waste from the ornamental stone industry. **Construction and Building Materials**, v. 407 p, 133445, 2023.

TORRES, A.T.B.; Silva, L.G.; Bosse, R.; *et al.* Investigating ornamental stone waste as a green supplementary cementitious material in Portland cement mortars. **Revista Matéria**, v. 29, 2024. https://doi.org/10.1590/1517-7076-rmat-2024-0259.

ZOLFAGHARNASAB, A.; RAMEZANIANPOUR, A. A.; BAHMAN-ZADEH, F. Investigating the potential of low-grade calcined clays to produce durable LC3 binders against chloride ions attack. **Construction and Building Materials**, v. 303, p. 124541, 2021. doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124541.