

INVESTIGAÇÃO DA MICROESTRUTURA DAS ARGAMASSAS COM SUBSTITUIÇÕES PARCIAIS DO CIMENTO POR LODO DE CARBONÁTICO DE CÁLCIO

Palavras-Chave: ARGAMASSA, LODO DE CARBONÁTICO DE CÁLCIO, MICROESTRUTURA,
MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Autoras:

MARCELA EMANUELI CRUZ VASSÃO, FT – UNICAMP

PROF^a. DR^a. LUÍSA ANDRÉIA GACHET (orientadora), FT – UNICAMP

ME. ARIANE ROBERTO BECKER (coorientadora), FT – UNICAMP

INTRODUÇÃO

As argamassas evoluíram historicamente de misturas simples à base de argila e cal até o uso do cimento Portland, consolidando-se como elemento essencial na construção civil brasileira, com funções de revestimento, assentamento e regularização. Com os avanços tecnológicos, passaram a incorporar aditivos e fibras para melhorar suas propriedades, conforme normas como a ABNT NBR 13529 (ABNT, 2021).

Diante dos impactos ambientais associados à produção de cimento, responsável por cerca de 7% das emissões globais de CO₂ (JOHN et al., 2018; WBCSD, 2018), cresce o interesse por alternativas sustentáveis. Uma dessas estratégias é a substituição parcial do cimento por resíduos industriais, como o lodo carbonático de cálcio (CaCO₃), subproduto da indústria de papel e celulose. Normalmente descartado em aterros, esse material apresenta compatibilidade com a matriz cimentícia e potencial para melhorar o desempenho da argamassa quando corretamente dosado (Martins & Rocha, 2022).

Além de avaliar propriedades físicas e mecânicas, a análise microestrutural é essencial para entender os efeitos dessa substituição. Técnicas como a microscopia eletrônica de varredura (MEV) permitem observar a formação de compostos como o gel C-S-H e a etringita, especialmente na zona de transição entre pasta e agregado, onde ocorrem importantes interações com o lodo (Costa et al., 2009; Winter, 2012).

METODOLOGIA

A empresa Suzano S.A. – Unidade Limeira forneceu o lodo carbonatado de cálcio (CaCO_3) utilizado neste estudo. Devido ao seu alto teor de umidade, o material foi submetido a secagem em estufa a $105\text{ }^\circ\text{C}$ por 12 horas, assegurando a remoção adequada da umidade. Em seguida, o lodo seco foi moído em moedor de grãos até atingir granulometria compatível com aplicações em argamassas.

Para a investigação experimental, foram moldados 12 corpos de prova prismáticos ($4 \times 4 \times 16$ cm) para cada traço de argamassa, totalizando 72 amostras. A composição das argamassas foi definida conforme o traço 1:3 (cimento:areia), com base nos estudos de Becker (2021) e Gomes (2020). O cimento Portland tipo CP V-ARI foi parcialmente substituído pelo lodo em percentuais de 10%, 20%, 40% e 60% além de um traço de referência sem substituição. A proporção dos materiais foi determinada considerando a massa específica seca aparente do lodo carbonático.

Ensaio mecânicos foram realizados tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, com o objetivo de avaliar o desempenho inicial e a evolução das propriedades ao longo do tempo de cura. Os testes incluíram:

- Índice de consistência no estado fresco, conforme a norma ABNT NBR 13276:2016;
- Resistência à tração na flexão e à compressão axial no estado endurecido, segundo a norma ABNT NBR 13279:2005;
- Determinação Absorção de água, Índice de vazios, massa específica ABNT NBR 9778 (ABNT, 2005) e do módulo de elasticidade dinâmico por ultrassom conforme a ABNT NBR 15630 (ABNT, 2009).

Após os testes de mecânicos, pequenas porções das amostras de argamassa (0,5 a 1 cm) são coletadas e secas. Para evitar o acúmulo de carga elétrica durante a análise no MEV e aprimorar a qualidade das imagens, as amostras são revestidas com uma fina camada de platina por meio do sputtering.

As imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram empregadas para analisar as alterações microestruturais resultantes da adição de lodo carbonático de cálcio à argamassa, visando compreender a evolução da microestrutura, com ênfase na interação entre o lodo e a matriz cimentícia. A análise microestrutural considera a distribuição dos produtos de hidratação e a configuração da rede porosa, visando relacioná-las com o desempenho mecânico e a resistência da argamassa.

Os traços referem-se às diferentes proporções entre os materiais componentes da argamassa, especialmente quanto ao percentual de substituição do cimento Portland por lodo carbonático de cálcio, com o objetivo de avaliar seus efeitos no desempenho do material.

Figura 01: Equipamento de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) TESCAN VEGA 3



Figura 02: Fragmentos de argamassa contendo lodo carbonatado de cálcio preparados para análise



Tabela 01: Composição dos traços para produção das argamassas com substituição parcial de Cimento Portland CPV por lodo carbonático em gramas.

Traço	Cimento (g)	Areia (g)	Lodo Carbonático (g)	Relação a/c
R00	1000	3000	0	0,64
R10	900	3000	7,581	0,64
R20	800	3000	15,162	0,64
R40	600	3000	30,324	0,64
R60	400	3000	45,485	0,64

Fonte: a autora.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As imagens obtidas no microscópio eletrônico de varredura TESCAN VEGA 3 na ampliação de 500x, revelou alterações significativas na microestrutura das argamassas em função da substituição

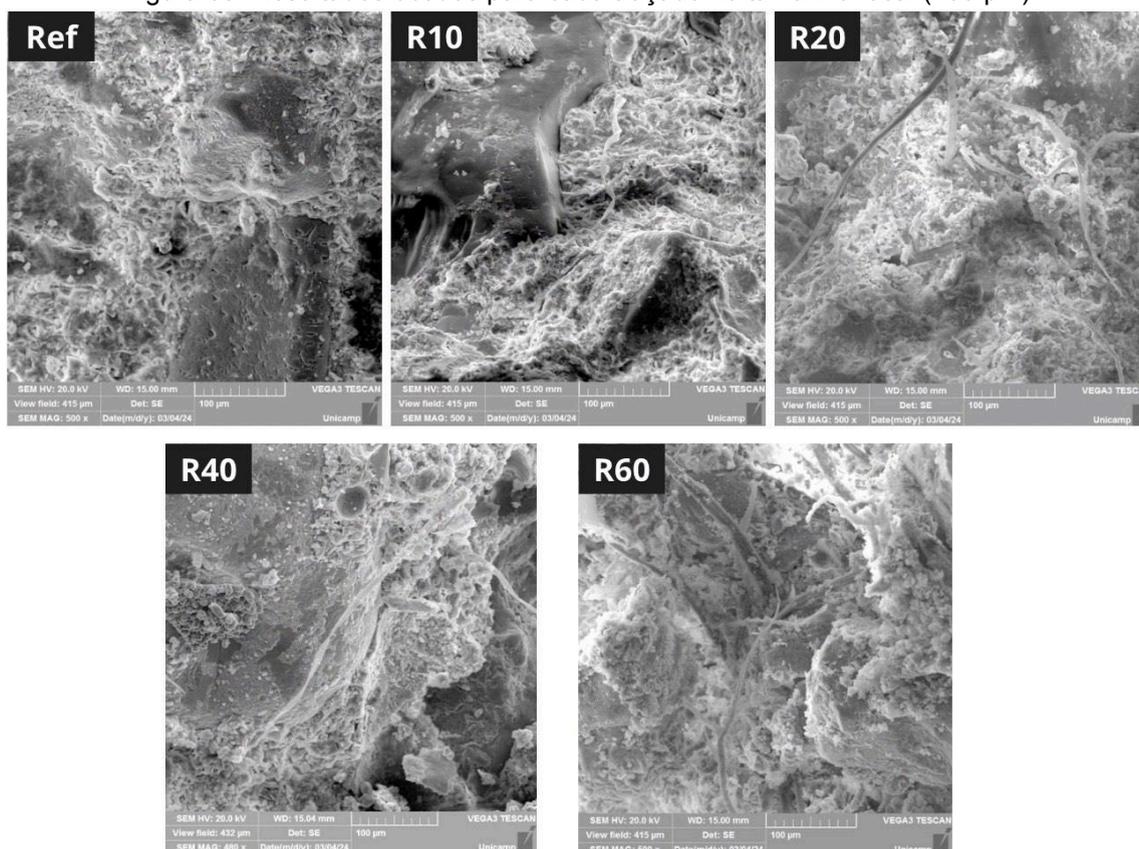
parcial do cimento por lodo carbonático de cálcio, mostrando que, nos traços com até 20% de substituição (R10 e R20), a matriz apresentou boa coesão, com partículas do lodo bem incorporadas entre os produtos de hidratação, sem descontinuidades visíveis ou falhas na zona de transição.

À medida que o teor de lodo aumentou (R40 e R60), observou-se uma mudança na organização da microestrutura, com maior heterogeneidade e presença de porosidade localizada. Ainda assim, a distribuição do lodo se manteve estável, indicando que o material interage com a matriz cimentícia de maneira física e química, podendo atuar como agente de preenchimento e como superfície de nucleação para produtos de hidratação.

Em algumas regiões, principalmente nas amostras R20 e R60, foram identificadas formações aciculares típicas de produtos secundários como a etringita. Embora não sejam o foco central da pesquisa, esses elementos ajudam a indicar que o lodo influencia o ambiente de hidratação e pode favorecer reações associadas ao desenvolvimento microestrutural.

De forma geral, a presença do lodo não comprometeu a integridade da argamassa nos traços analisados. A matriz manteve características desejáveis, como boa aderência entre os componentes e estrutura interna contínua. Isso sugere que, em dosagens controladas, o lodo carbonático de cálcio pode ser incorporado de forma eficiente, contribuindo tanto para a sustentabilidade quanto para a funcionalidade da argamassa.

Figura 03: Resultados obtidos para cada traçado no tamanho focal (100 µm)



CONCLUSÕES

A substituição parcial do cimento por lodo carbonático de cálcio apresentou desempenho satisfatório, com boa integração do resíduo à matriz da argamassa, sua incorporação tem um potencial para atuar como agente de preenchimento e modificação da matriz, sem comprometer a aderência entre os materiais. A presença de formações aciculares foi registrada em alguns traços, indicando a ocorrência de reações secundárias, como a formação de etringita, sem impactos negativos aparentes.

Os resultados indicam que o uso do lodo carbonático é tecnicamente viável em argamassas de revestimento, contribuindo para uma alternativa mais sustentável na construção civil, com redução parcial do consumo de cimento sem prejuízo significativo ao desempenho do material.

BIBLIOGRAFIA

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13529: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- JOHN, V. M.; PUNHAGUI, K.R.G.; QUATTRONE, M.; REIS, D.C. Potencial de mitigação de CO₂ de materiais cimentícios na fase de uso. In: XVII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ENTAC. 2018, Foz do Iguaçu. Anais....São Paulo: ANTAC, 2018.
- Martins, P. R., & Rocha, A. F. (2022). Aplicações industriais de resíduos: o potencial do lodo carbonático de cálcio. In Anais do Congresso Brasileiro de Inovação (Vol. 10, pp. 112-127).
- COSTA, C.; CARVALHO, P. A.; BORDADO, J. C.; NUNES, A. Estudo de argamassas de base cimentícia por microscopia eletrônica de varrimento. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, v. 21, n. 3/4, p. 31-34, 2009. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Departamento de Engenharia Civil.