

Uma análise composicional do concreto romano e suas implicações na engenharia e na arquitetura moderna.

DOI: 10.5281/zenodo.11092601

Bárbara Emília Ribeiro Alcântara^{a*}

Throughout the article, techniques used to analyze concrete structures are discussed, as well as a comparison between modern cement and the material that was used in ancient Rome. The text portrays the current challenges of civil construction and how the knowledge of the ancient people could help to overcome them.

Ao longo do artigo, são abordadas técnicas utilizadas para análise de estruturas de concreto, além de uma comparação entre o cimento moderno e o material que era utilizado na Roma antiga. O texto retrata os desafios atuais da construção civil e como o conhecimento dos povos mais antigos poderia ajudar a superá-los.

^aUniversidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

*E-mail: barbaraemiliaalcantara@gmail.com

Palavras-chave: Cimento Portland; estruturas romanas; pegada de carbono; sustentabilidade.

Aceito em 22 de março de 2024,

Aprovado em 25 de abril de 2024,

Publicado em 01 de maio de 2024.

Introdução

A extraordinária resistência e durabilidade do concreto utilizado pelos romanos antigos têm fascinado e inspirado pesquisadores e profissionais da engenharia e arquitetura modernas. Este material milenar, fundamental na construção de maravilhas arquitetônicas como o Panteão e os aquedutos romanos, deve sua resiliência a uma combinação singular de ingredientes, incluindo cal, água, cinzas e rochas de origem vulcânica. Ao contrário do concreto moderno, aquele produzido na Roma antiga demonstra uma pegada de carbono significativamente menor, devido principalmente à sua formulação e processo de produção menos intensivos em energia. A durabilidade de estruturas romanas, algumas das quais permaneceram intactas por mais de 2.000 anos em ambientes marinhos agressivos, ressalta a superioridade desse antigo material de construção em termos de longevidade e sustentabilidade.^{1, 2}

Em comparação, o concreto Portland, descoberto no século XIX, é hoje o cimento mais utilizado em construções ao redor do mundo. No Brasil, esse material é regido pela norma ABNT NBR 16697,³ que especifica os requisitos que o cimento Portland deve atender para garantir sua qualidade e adequação para uso em diversos tipos de obras, desde construções residenciais até infraestruturas de grande porte. De acordo com esta norma, o cimento Portland é um material aglomerante hidráulico produzido pela moagem do clínquer, que consiste principalmente de silicatos de cálcio hidráulicos, junto a uma ou mais formas de sulfato de cálcio, conhecido

como gesso, como adição para controle do tempo de pega. Esse material também contém aluminatos e ferroaluminatos de cálcio que, apesar de estarem presentes em menor quantidade, são igualmente importantes para o processo de formação do concreto.³

O clínquer, componente principal do cimento Portland, é produzido pela calcinação de uma mistura finamente moída de minerais como calcário, argila ou xisto em um forno rotativo. Esse processo de aquecimento contribui para aproximadamente 5% das emissões globais de CO₂ de origem antropogênica. Assim, embora o concreto Portland seja admirado por sua resistênciarticula e versatilidade, a questão da sustentabilidade ambiental levanta preocupações significativas, incentivando a busca por alternativas mais sustentáveis.^{1, 3}

Figura 1. Panteão. Imagem de Mariam (autor registrado no pixabay como “MariamS”) disponibilizada em <https://pixabay.com/pt/photos/pante%C3%A3o-it%C3%A1lia-roma-arquitetura-448439/>.



A comparação entre o concreto romano e o concreto Portland revela diferenças fundamentais, não apenas em composição e propriedades físicas, mas também em impacto ambiental. Enquanto o concreto romano se beneficia de uma reação química natural com a água do mar para fortalecer sua estrutura ao longo do tempo, o concreto Portland exige medidas adicionais para proteger suas estruturas contra a corrosão e a deterioração.

Essa reação química natural com a água do mar ocorria principalmente devido a um dos materiais vulcânicos chamado de “pozolana”, uma cinza vulcânica encontrada em áreas próximas a Roma, especialmente em Pozzuoli, na Baía de Nápoles.¹¹ De maneira geral, os materiais pozolânicos são compostos silicosos ou sílico-aluminosos que, ao serem moídos com água, reagem com o hidróxido de cálcio para formar compostos com propriedades aglomerantes.¹² Essa reação cria uma solução saturada em cálcio, na qual ocorre a formação de cristais de aluminato e silicato de cálcio hidratado dentro da mistura de concreto. Esses cristais ajudam a unir os componentes do concreto, aumentando sua coesão e densidade.¹³

A questão ecológica emerge como um ponto crucial nesta análise comparativa. A capacidade do concreto romano antigo de minimizar a pegada de carbono, enquanto oferece uma solução duradoura para construções em ambientes desafiadores, fornece ideias valiosas para o desenvolvimento de novos materiais de construção que combinem durabilidade, eficácia estrutural e responsabilidade ambiental.

Nesse sentido, um dos principais focos dos estudos desse material está na sua interação com a água, uma vez que um dos pontos que afeta a durabilidade do concreto é a penetração de água nesse. Logo, a adsorção da água no concreto romano é um aspecto chave que, atualmente, pode ser considerado como um dos fatores que contribui para sua notável resistência ao longo dos milênios, particularmente em ambientes submersos ou que estejam em contato intermitente com a água.⁵

Figura 2. Arena de pula. Imagem de Alexandru Manoele (autor registrado no pixabay como “alexman89”) disponibilizada em <https://pixabay.com/pt/photos/arena-de-pula-arquitetura-estrutura-6618265/>.



Portanto, este artigo visa explorar a composição química do concreto romano e suas implicações para a engenharia e arquitetura modernas. Com isso, serão abordados não apenas a história e os segredos da sua resistência, mas também a relevância dessas descobertas para enfrentar os desafios contemporâneos de construção, incluindo a necessidade urgente de reduzir as emissões de carbono na indústria da construção.

Metodologia

Devido às características do concreto romano, já citadas anteriormente, muitos pesquisadores modernos têm se interessado pela análise das propriedades microscópicas desse material, com o objetivo de aplicar tais conhecimentos no desenvolvimento de materiais de construção mais sustentáveis e duráveis na atualidade. Desse modo, técnicas como microscopia eletrônica, microdifração de raios X, espectroscopia Raman e microsonda eletrônica estão sendo cada vez mais utilizadas nas pesquisas químicas e arqueológicas dos compostos presentes no concreto.⁴

Para o desenvolvimento do trabalho que culminou no artigo de referência,¹ foram utilizadas amostras perfuradas de um “*Hospitium*”, palavra oriunda do latim que era empregada na era greco-romana para designar o lugar onde as pessoas se hospedavam por determinado período, em Pompéia. Para análise das amostras, foram adotadas as técnicas de microtomografia síncrotron (μ CT) e radiografia de nêutrons, com o objetivo de estudar como a microestrutura do material, inclusive com trincas (rachaduras) induzidas, afeta a adsorção de água. Ademais, para medir a porosidade, foi utilizado um Porosímetro de Mercúrio Thermo-Finnigan

Pascal Série 240 equipado com uma unidade de baixa pressão.

Resultados e discussão

Os autores¹ iniciaram o trabalho analisando a porosidade dos blocos de concreto romano por porosimetria por intrusão de mercúrio. Desse modo, os estudos destacaram a presença de uma distribuição de tamanho de poros única no concreto romano, com poros significativamente maiores do que os encontrados no concreto moderno, particularmente o concreto de cimento Portland. Esta porosidade vista no concreto romano possui uma estrutura capaz de facilitar a distribuição e a movimentação da água de maneira que potencialmente contribui para a sua capacidade de autocura, onde fissuras e danos internos podem ser mitigados ou reparados ao longo do tempo através da formação de novos minerais.

Além disso, a análise das amostras de concreto romano revelou que a água é distribuída uniformemente por todo o material, evidenciando um sistema de poros conectados que desempenha um papel crucial na dinâmica de absorção de água. Tal fato não apenas permite que o concreto "respire" e se ajuste a variações ambientais, mas também restringe a penetração de água a níveis que poderiam levar a danos estruturais mais graves, como a erosão química.⁶

A investigação também mostrou que, no concreto romano, as fissuras tendem a não se propagar de maneira descontrolada como em alguns materiais modernos. Ao invés disso, a formação de novos poros e a redistribuição da porosidade em torno de áreas danificadas indicam uma capacidade notável do material de redistribuir tensões e "curar" áreas problemáticas internamente, um aspecto que contribui muito para a sua durabilidade.

Outro ponto observado no estudo foi que a análise dos materiais revelou que as características específicas da matriz cimentícia romana, incluindo a presença de fibras e a composição química única resultante do uso de materiais vulcânicos, conferem ao concreto uma capacidade de absorver energia mecânica e resistir a falhas catastróficas de maneira mais eficaz do que muitos materiais de construção modernos.

Por fim, o estudo das interações microestruturais e da dinâmica da água no concreto romano antigo sugere que sua capacidade de gerenciar a penetração e distribuição de água, juntamente com um mecanismo inerente de autocura, são fatores-chave para a sua notável durabilidade. Isso

significa que, quando se desenvolvem fissuras, os materiais dentro do concreto podem reagir com a água para formar novos minerais que preenchem essas fissuras ao longo do tempo. Esse processo de autocura é parcialmente atribuído à presença de materiais vulcânicos (como a pozolana) na mistura do concreto, que podem reagir com a cal hidratada e a água para formar novos cristais de hidratos de cálcio e outros minerais alcalinos.

Conclusões

A investigação aprofundada sobre a composição e as propriedades do concreto romano antigo, em comparação com o concreto Portland moderno, revela um legado de engenharia e sustentabilidade que transcende milênios. A análise composicional desse material milenar não somente desvenda os segredos de sua resistência e durabilidade extraordinárias, mas também oferece lições valiosas para enfrentar os desafios contemporâneos na engenharia e arquitetura modernas. Os resultados deste estudo destacam a importância da microestrutura, porosidade e capacidade de autocura do concreto romano na promoção de uma longevidade sem precedentes, mesmo em condições ambientais adversas.

Assim, é particularmente notável o processo de autocura mediado pela água, que se revela fundamental para a durabilidade do concreto romano. Essa capacidade de reparar fissuras internas através da formação de novos minerais não só sublinha a superioridade do concreto romano em termos de manutenção estrutural, mas também aponta para uma direção promissora na busca por materiais de construção mais resilientes e auto-sustentáveis.

Além disso, a questão ecológica emergente deste estudo não pode ser subestimada, tendo em vista que a pegada de carbono significativamente menor do concreto romano, em comparação com o concreto Portland, ressalta a necessidade urgente de desenvolver alternativas de construção mais benéficas ao meio ambiente. Ademais, a capacidade do concreto romano de resistir ao teste do tempo oferece uma perspectiva valiosa para a inovação no design e na composição de materiais de construção modernos.

Em suma, ao integrar as lições aprendidas com o concreto romano antigo, a engenharia e a arquitetura modernas estão diante de uma oportunidade única de avançar em direção a práticas mais duráveis e ecologicamente responsáveis. Este estudo não só homenageia o legado dos engenheiros e arquitetos romanos, mas também serve como um chamado à ação para repensar e inovar no uso de materiais de construção. Dessa forma, ao abraçar as

estratégias do passado, torna-se viável abrir caminho para soluções inovadoras que respondam às exigências do presente e do futuro, alinhando durabilidade e sustentabilidade em um equilíbrio harmonioso.

Contribuições por Autor

O artigo e a inclusão de algumas observações são de Bárbara Emília Ribeiro Alcântara.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

Agradecimentos

Agradeço ao PET-Química/IQ/UnB, à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação (SeSU/MEC) e ao Decanato de Ensino de Graduação (DEG/UnB) por todo o apoio concedido através do Programa de Educação Tutorial. Agradeço também ao Instituto de Química (IQ/UnB) e à Universidade de Brasília pelo suporte e espaço fornecidos.

Notas e referências

- 1 K. Xu, A. S. Tremsin, J. Li, D. M. Ushizima, C. A. Davy, A. Bouterf, Y. T. Su, M. Marroccoli, A. M. Mauro, M. Osanna, A. Telesca and P. J. M. Monteiro, Microstructure and water absorption of ancient concrete from Pompeii: An integrated synchrotron microtomography and neutron radiography characterization, *Cement and Concrete Research*, 2021, **139**, 106282.
- 2 A. P. F. Soares, L. T. Vasconcelos, F. B. C. Nascimento, Corrosão em armaduras de concreto, *Cadernos de Graduação*, 2015.
- 3 Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 16697, Cimento Portland - Requisitos, Rio de Janeiro, RJ, 2018, https://saturno.crea-br.org.br/pop/profissional/ABNT_NBR_16697_2018.pdf.
- 4 F. Marra, M. Anzidei, A. Benini, E. D'Ambrosio, M. Gaeta, G. Ventura e A. Cavallo, Características petroquímicas e áreas de origem de agregados vulcânicos usados em concretos marítimos romanos antigos, *Journal of Volcanology e Pesquisa Geotérmica*, 2016, **328**, 59–69.
- 5 Redação, Concreto do futuro vem de Roma Antiga, <https://habitability.com.br/concreto-do-futuro-vem-da-roma-antiga/> (acessado em 22 de março de 2024).
- 6 J. MacFarlane, T. Vanorio e PJM Monteiro, Imagens em múltiplas escalas, medições de resistência e permeabilidade: Compreendendo a durabilidade do concreto marinho romano, *Construção e Materiais de Construção*, 2021, **272**, 121812.
- 7 Cientistas descobrem o segredo por trás da resistência do concreto romano, <https://www.archdaily.com.br/br/875474/cientistas-descobrem-o-segredo-por-tras-da-resistencia-do-concreto-romano>, (acessado em 22 de março de 2024).
- 8 F. Marra, A. Danti e M. Gaeta, O agregado vulcânico de argamassas romanas antigas do Monte Capitolino: Critérios petrográficos para identificação das “pozolanas” de Roma e implicações históricas, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2015, **308**, 113–126.
- 9 L. F. Kaefer, A evolução do concreto armado, São Paulo, 1998.
- 10 H. S. Kramer, R. C. A. Lima, F. V. Romano, S. S. Silva, Reações expansivas internas no concreto: uma revisão sistemática, *IBRACON*, 2020.
- 11 Riddle solved, <https://news.mit.edu/2023/roman-concrete-durability-lime-casts-0106>, (accessed 2 April 2024).
- 12 G. C. Cordeiro and J. M. Désir, Potencial de argila caulínica de Campos dos Goytacazes, RJ, na produção de pozolana para concreto de alta resistência, *Cerâmica*, 2010, **56**, 71–76.
- 13 paulpreuss, Roman Seawater Concrete Holds the Secret to Cutting Carbon Emissions - Berkeley Lab, <https://newscenter.lbl.gov/2013/06/04/roman-concrete/>, (accessed 2 April 2024).