



Tecnologias Inovadoras como Solução para Avaliar os Danos da Lixiviação em Materiais Utilizados na Engenharia Civil

Innovative Technologies as a Solution for Assessing Leaching Damage in Materials Used in Civil Engineering

Kleverson Kennedy Eleutério Rocha

Mestrando do Programa de Pós-graduação em Processos Ambientais, Universidade Católica de Pernambuco- UNICAP. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1980-8487>

Aureliano Amaro Ribeiro Souza de Macedo

Doutorando do Programa de Pós-graduação em Processos Ambientais, Universidade Católica de Pernambuco- UNICAP. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6152-5657>

Victor Lucas de Macedo Alves

Mestrando do Programa de Pós-graduação em Processos Ambientais, Universidade Católica de Pernambuco- UNICAP. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4477-529X>

Eliana Cristina Barreto Monteiro

Escola de Tecnologia e Comunicação, Universidade Católica de Pernambuco-UNICAP, Universidade de Pernambuco- UPE. 52050-900 Recife, PE. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0842-779X>

Galba Maria de Campos-Takaki

Escola de Tecnologia e Comunicação, Coordenadora do Centro Multiusuário Biomoléculas e Superfície de Materiais- CEMACBIOS, MCTI/, Universidade Católica de Pernambuco -UNICAP. 52050-900 Recife, PE. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0519-0849>

Resumo: A durabilidade das estruturas de concreto representa um dos principais desafios da engenharia civil contemporânea, diante da exposição a ambientes agressivos e as crescentes exigências de sustentabilidade. Nesse contexto, a lixiviação destaca-se como um relevante mecanismo de degradação, caracterizado pela dissolução e transporte de compostos solúveis da matriz cimentícia, com a formação do hidróxido de cálcio. Esse processo provoca alterações microestruturais, com aumento da porosidade e permeabilidade, resultando na redução da resistência mecânica, comprometendo a vida útil das estruturas, além de atuar de forma sinérgica com outros mecanismos, como carbonatação e ataques químicos, intensificando manifestações patológicas. A avaliação desse fenômeno baseia-se em ensaios laboratoriais indiretos, com limitações quanto à representação das condições reais. O uso de tecnologias avançadas como microtomografia computadorizada, espectroscopia, sensores baseados em Internet das Coisas (IoT), modelagem computacional e inteligência artificial (IA), possibilitam análises mais precisas e preditivas. É importante associar abordagens qualitativas e exploratórias, fundamentadas em revisão da literatura, bem como, a análise comparativa de dados experimentais integrando métodos tradicionais e inovadores. Outras estratégias podem ser empregadas como adição de minerais, controle da relação água/cimento e aplicação de geopolímeros contribuem significativamente para a mitigação da lixiviação. Portanto, a integração entre conhecimento dos mecanismos de degradação, tecnologias inovadoras e monitoramento possibilitam práticas sustentáveis essenciais para aumentar a durabilidade, desempenho e segurança das estruturas.

Palavras-chave: percolação; durabilidade do concreto; materiais cimentícios; monitoramento estrutural, sustentabilidade.

Abstract: The durability of concrete structures represents one of the main challenges of contemporary civil engineering, given their exposure to aggressive environments and the increasing demands for sustainability. In this context, leaching stands out as a relevant degradation mechanism, characterized by the dissolution and transport of soluble compounds from the cementitious matrix, with the formation of calcium hydroxide. This process causes microstructural changes, increasing porosity and permeability, resulting in reduced mechanical strength, compromising the lifespan of structures, and acting synergistically with other mechanisms, such as carbonation and chemical attacks, intensifying pathological manifestations. The evaluation of this phenomenon is based on indirect laboratory tests, with limitations regarding the representation of real conditions. The use of advanced technologies such as micro-computed tomography, spectroscopy, Internet of Things (IoT) based sensors, computational modeling, and artificial intelligence (AI) allows for more precise and predictive analyses. It is important to combine qualitative and exploratory approaches, based on literature review, as well as the comparative analysis of experimental data integrating traditional and innovative methods. Other strategies can be employed, such as the addition of minerals, control of the water/cement ratio, and the application of geopolymers, which contribute significantly to mitigating leaching. Therefore, the integration of knowledge of degradation mechanisms, innovative technologies, and monitoring enables sustainable practices essential for increasing the durability, performance, and safety of structures.

Keywords: concrete durability; cementitious materials; structural monitoring; sustainability.

INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil enfrenta o desafio constante de conciliar a durabilidade das infraestruturas e exigências de sustentabilidade ambiental (Lima *et al.*, 2024). A durabilidade das estruturas de concreto tem como um dos principais desafios da engenharia civil contemporânea, uma exposição crescente a ambientes agressivos e a necessidade de garantir desempenho ao longo da vida útil. A lixiviação emerge como um fenômeno crítico, caracterizado pela dissolução e transporte de componentes solúveis da matriz sólida de materiais cimentícios pela ação de agentes lixiviantes, como águas de chuva ou percolação subterrânea. Embora, frequentemente está associada à mineração, a lixiviação na construção civil impacta diretamente a integridade estrutural de argamassas e concretos, ao promover o aumento da porosidade e perda de resistência mecânica através da descalcificação da portlandita e dos silicatos de cálcio hidratados (Silva *et al.*, 2025)

Está processo físico-químico ocorre, predominantemente, pela percolação de água através da rede porosa do concreto, promovendo a remoção de íons, especialmente cálcio (Ca^{2+}), provenientes de fases hidratadas como o hidróxido de cálcio. Essa reação resulta em alterações significativas na microestrutura do material, incluindo aumento da porosidade e da permeabilidade, o que compromete diretamente suas propriedades mecânicas e sua durabilidade (Neumann *et al.*, 2019). Estudos recentes demonstram que a eluição está diretamente relacionada

à redução da resistência à compressão e à intensificação da degradação em ambientes úmidos ou em contato contínuo com água (Wang *et al.*, 2024).

Do ponto de vista estrutural, a progressiva perda de constituintes da matriz cimentícia favorece o surgimento de manifestações patológicas, como fissuração, desagregação superficial e formação de depósitos minerais, evidenciando a evolução do processo de deterioração (Oliveira *et al.*, 2022). Além disso, a lixiviação atua de forma sinérgica com outros mecanismos de degradação, como ataques químicos e processos de carbonatação, reduzindo significativamente a vida útil das estruturas e aumentando os custos de manutenção e reabilitação (Bender *et al.*, 2025).

Tradicionalmente, a avaliação da percolação tem sido realizada por meio de ensaios laboratoriais indiretos, como testes de permeabilidade, absorção e métodos acelerados. No entanto, tais abordagens apresentam limitações quanto à representatividade das condições reais de campo e à capacidade de monitoramento contínuo do fenômeno. Diante dessas limitações, estudos recentes têm enfatizado o uso de tecnologias inovadoras para avaliação da durabilidade, incluindo técnicas avançadas de caracterização microestrutural e monitoramento em tempo real (Elenize *et al.*, 2023).

Atualmente, o uso de ferramentas como microtomografia computadorizada, Fluorescência de Raios (XRF) e a Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), sensores embutidos e sistemas baseados em Internet das Coisas (IoT) está cada vez mais se destacando na engenharia, pois permite uma análise mais precisa e contínua da evolução dos danos internos nos materiais. Paralelamente, modelos computacionais e técnicas de (IA) vêm sendo aplicados para simular o comportamento da lixiviação e prever a degradação ao longo do tempo, contribuindo para uma abordagem mais produtiva e eficiente na gestão da durabilidade das estruturas (Wang *et al.*, 2024).

Além dos impactos estruturais, os danos apresentam implicações ambientais relevantes, uma vez que pode promover a liberação de substâncias potencialmente contaminantes para o solo e para os recursos hídricos. Pesquisas recentes indicam que materiais cimentícios podem atuar como pilhas de mineração contendo metais e outros compostos, dependendo de sua composição e das condições de exposição (Andrade *et al.*, 2023). Nesse contexto, o desenvolvimento de materiais inovadores e sustentáveis, como concretos com adições minerais, geopolímeros e compósitos com resíduos reciclados, tem sido amplamente investigado como estratégia para reduzir a suscetibilidade à lixiviação e melhorar o desempenho ambiental das construções.

Sob a perspectiva do projeto e da arquitetura, a escolha adequada de materiais e o emprego de soluções construtivas apropriadas desempenham papel fundamental na mitigação dos efeitos físico-químicos. Estratégias como o controle da permeabilidade, o uso de materiais de alto desempenho e a adoção de diretrizes de sustentabilidade contribuem para aumentar a durabilidade das estruturas e reduzir impactos ambientais ao longo do ciclo de vida das edificações.

Diante desse contexto, este capítulo apresenta o processo de lixiviação em materiais utilizados na engenharia civil sob uma abordagem integrada, contemplando três eixos principais: (I) o comportamento estrutural e o desempenho dos materiais submetidos à lixiviação; (II) as tecnologias inovadoras aplicadas à avaliação e ao monitoramento desse fenômeno; e (III) a seleção de materiais e estratégias de projeto voltadas à mitigação de seus impactos, com ênfase na sustentabilidade. Dessa forma, busca-se contribuir para o avanço do conhecimento técnico e científico na área de durabilidade das estruturas, integrando conceitos tradicionais e abordagens inovadoras.

METODOLOGIA

A pesquisa realizada caracteriza-se como um estudo de natureza qualitativa, exploratória e analítico-computacional, desenvolvido por meio de revisão sistemática da literatura, análise comparativa de dados experimentais preexistentes e suporte de abordagens experimentais e tecnológicas aplicadas à durabilidade de materiais cimentícios. O procedimento metodológico foi estruturado em três etapas principais. Inicialmente, realizou-se o levantamento bibliográfico em bases de dados científicas, como Google Acadêmico, SciELO e Portal de Periódicos CAPES, utilizando descritores como “lixiviação em matrizes cimentícias”, “durabilidade de geopolímeros” e “impacto ambiental de materiais reciclados”, com recorte temporal entre 2023 e 2026. Paralelamente, foram incorporadas normas técnicas relevantes, como a NBR 6118:2023, NBR 9778:2005 e NBR 10787:2011, com o objetivo de fundamentar os critérios de desempenho e caracterização dos materiais. Na segunda etapa, procedeu-se à seleção de estudos de caso de referência (Zhang *et al.*, 2024; Gumieri e Souza, 2025; Rodrigues *et al.*, 2026), os quais apresentam dados quantitativos relacionados à lixiviação em diferentes matrizes, incluindo concreto convencional, concretos com adições minerais e geopolímeros. Adicionalmente, foram considerados resultados de ensaios laboratoriais consagrados, como absorção de água por imersão, permeabilidade à água sob pressão e ensaios de lixiviação acelerada, utilizados para avaliar a porosidade, o transporte de fluidos e a perda de compostos solúveis.

Complementarmente, foram incorporadas técnicas avançadas de avaliação, incluindo ensaios não destrutivos (END), como ultrassom, esclerometria e resistividade elétrica, bem como métodos de caracterização microestrutural, a exemplo da microtomografia computadorizada (micro-CT). Técnicas espectroscópicas, como (XRF) e (FTIR), também foram consideradas para identificação de alterações químicas na matriz cimentícia.

Na terceira etapa, realizou-se a triangulação dos dados, na qual foram comparados parâmetros como perda de massa, variação do pH do lixiviado, evolução da porosidade e potencial de contaminação por metais pesados. Essa análise foi complementada por dados oriundos de sistemas de monitoramento baseados em sensores (IoT), capazes de registrar variáveis como umidade, temperatura e concentração de íons em tempo real. Adicionalmente, foram

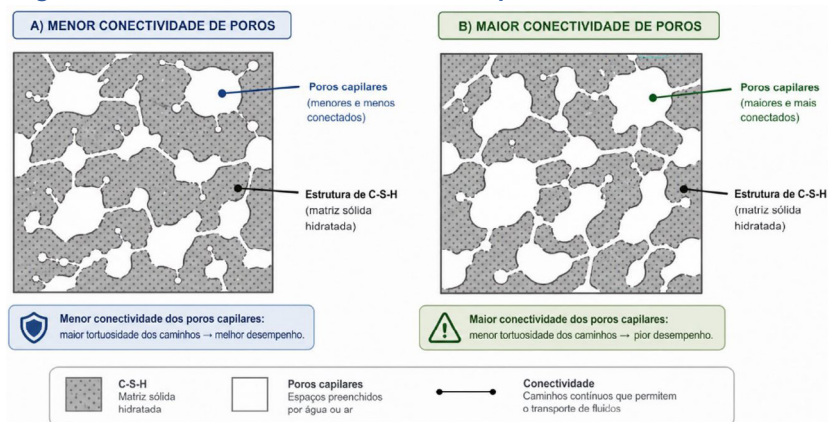
empregadas ferramentas de modelagem computacional, baseadas em equações de transporte de massa e reações químicas, com o intuito de simular o avanço da lixiviação em diferentes condições de exposição. Técnicas de IA e aprendizado de máquina também foram consideradas para identificação de padrões de degradação e previsão de vida útil, a partir da integração de dados experimentais e de monitoramento. Por fim, os resultados foram analisados de forma integrada, buscando correlacionar alterações microestruturais, propriedades mecânicas e indicadores de durabilidade. Essa abordagem permitiu identificar padrões de comportamento físico-químico das matrizes cimentícias sob exposição hidrolítica, fornecendo subsídios para a proposição de estratégias de mitigação, seleção de materiais inovadores e atendimento a requisitos de sustentabilidade, como os estabelecidos por certificações ambientais do tipo LEED.

COMPORTAMENTO ESTRUTURAL E DESEMPENHO DOS MATERIAIS SUBMETIDOS À LIXIVIAÇÃO

A percolação química em materiais de construção, notadamente no concreto e em solos estabilizados, caracteriza-se como um processo físico-químico de dissolução e transporte de espécies solúveis da em alterações microestruturais que favorecem o aumento da porosidade e da permeabilidade do material, intensificando o fluxo iônico. Nesse contexto, a durabilidade das estruturas de concreto armado encontra-se diretamente condicionada à capacidade da matriz em limitar o transporte de íons, sendo que a ineficiência desse desempenho pode acarretar a redução da vida útil, em consonância com os preceitos estabelecidos pela NBR 6118 (ABNT, 2023).

Estudos recentes indicam que esta patologia causa o aumento da porosidade capilar e da conectividade dos poros, como ilustrado na Figura 1, facilitando a penetração de agentes agressivos e acelerando processos de degradação secundários com descrito por Wang *et al.* (2024) e adaptado com auxílio a IA.

Figura 1 - Influência da conectividade dos poros na estrutura de C-S-H.



Fonte: Autoria própria (2026).

Segundo Batista e Oliveira (2024), o entendimento destas manifestações patológicas torna-se importante para a manutenção e garantia da segurança estrutural. Portanto, além do viés de da manifestação patológica, o fenômeno apresenta uma dimensão ambiental preocupante relacionada à utilização de subprodutos industriais e materiais reciclados na composição de novos materiais, embora, alinhada aos princípios da economia circular, podem resultar na liberação de metais pesados e na alteração do pH dos solos e lençóis freáticos (Rodrigues *et al.*, 2026). Como consequência direta dessas alterações microestruturais, observa-se uma redução significativa das propriedades mecânicas do concreto. A resistência à compressão (f_{ck}) tende a diminuir com o avanço dos danos estruturais, devido à perda de material ligante responsável pela coesão interna. De forma semelhante, o módulo de elasticidade sofre redução, indicando maior deformabilidade e menor rigidez estrutural. Oliveira *et al.* (2022), descrevem que a perda de cálcio pode comprometer até 25% da resistência mecânica em condições severas de exposição.

Além disso, o aumento da permeabilidade potencializa a entrada de água e íons agressivos, como cloretos e sulfatos, criando um ambiente propício à corrosão das armaduras e à deterioração acelerada das estruturas. Esse comportamento compromete diretamente a durabilidade, reduzindo a vida útil do projeto e elevando custos de manutenção e reabilitação. No âmbito das manifestações patológicas, a lixiviação está associada ao surgimento de fissuras, desagregação superficial e eflorescências. A eflorescência, em particular, resulta da precipitação de sais dissolvidos transportados pela água para a superfície do material, formando depósitos visíveis que indicam processos internos de degradação. Sem um controle eficaz em estágios mais avançados, a perda de coesão da matriz pode levar à desintegração progressiva do material.

A interação da lixiviação com outros mecanismos de deterioração agrava ainda mais o desempenho estrutural. A carbonatação, por exemplo, pode ser acelerada pela maior permeabilidade do material afetado, enquanto ataques químicos tornam-se mais intensos devido à facilidade de penetração de agentes agressivos. Essa atuação sinérgica compromete a segurança estrutural e reforça a necessidade de abordagens integradas na avaliação da durabilidade (Bender *et al.*, 2025)

De acordo com Gumieri e Souza (2025), o uso de adições minerais reduz significativamente a exposição ao refinar a porosidade capilar do concreto. Adicionalmente, Mehta e Monteiro (2024) reforçam que o controle da relação água/cimento é o parâmetro mais eficaz para garantir a impermeabilidade da matriz. Entre as alternativas inovadoras, os geopolímeros destacam-se por sua estabilidade química superior e baixa pegada de carbono, uma vez que sua estrutura não depende do ciclo tradicional do cálcio (Davidovits, 2023). Estudos comparativos demonstram que essas matrizes apresentam menor potencial de contaminantes quando comparadas aos sistemas tradicionais de cimento Portland (Zhang *et al.*, 2024).

Portanto, a transição para uma construção mais resiliente exige que a especificação criteriosa desses materiais inovadores seja integrada às estratégias de projeto. A adoção de certificações ambientais, como o sistema LEED, fornece

o arcabouço necessário para que projetistas e construtores selecionem materiais que minimizem o impacto ambiental no ciclo de vida da obra (USGBC, 2024). Para a avaliação diagnóstica, diversos ensaios são tradicionalmente aplicados entre os principais como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Ensaios para diagnosticar as condições de fluxo de fluidos, porosidade e perda de íon.

ENSAIOS	DESCRIÇÃO
Permeabilidade	Avalia a capacidade de fluxo de fluidos no interior do material
Absorção de água	Indica a porosidade acessível
Lixiviação acelerada	Utilizado para simular condições severas e avaliar a perda de massa e de íons ao longo do tempo

Fonte: Autoria própria (2026).

Esses métodos, embora amplamente utilizados, apresentam limitações quanto à representação das condições reais de campo, especialmente em relação à variabilidade ambiental e à escala temporal dos processos. No contexto normativo brasileiro, destacam-se diretrizes estabelecidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, como a NBR 9778 (absorção de água por imersão) e a NBR 10787 (permeabilidade), além de especificações do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes para materiais utilizados em obras de infraestrutura. Essas normas fornecem parâmetros importantes para a caracterização do comportamento dos materiais frente à ação da água, ainda que não abordem de forma específica todos os aspectos da lixiviação.

Diante desse cenário, evidencia-se que a tais as manifestações patológicas representam um mecanismo crítico de degradação, com impactos diretos no desempenho estrutural e na durabilidade das construções. A compreensão detalhada desse fenômeno é essencial para o desenvolvimento de estratégias mais eficazes de projeto, execução e manutenção, visando aumentar a vida útil das estruturas e garantir maior segurança e sustentabilidade ao ambiente construtivo.

TECNOLOGIAS DE AVALIAÇÃO E MONITORAMENTO DA LIXIVIAÇÃO EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS

A compreensão do comportamento estrutural dos materiais submetidos à dissolução, conforme discutido anteriormente, evidencia a necessidade de ferramentas mais avançadas para identificação, quantificação e monitoramento desse fenômeno ao longo do tempo. Nesse contexto, o avanço tecnológico tem possibilitado o desenvolvimento de métodos mais precisos e contínuos, superando as limitações dos ensaios tradicionais e permitindo uma abordagem mais preditiva da durabilidade das estruturas.

Entre as principais inovações, destacam-se os sensores embutidos baseados em sistemas de Internet das Coisas (IoT) como mostra a Figura 2, capazes de monitorar, em tempo real, parâmetros como umidade, pH, temperatura

e concentração de íons no interior do concreto. Esses dispositivos permitem acompanhar a evolução de patologias diretamente na estrutura, possibilitando intervenções preventivas antes que ocorram perdas significativas de desempenho mecânico. Segundo Elenize *et al.* (2023), o uso de sensores inteligentes contribui significativamente para a gestão da durabilidade, reduzindo incertezas associadas às condições reais de exposição.

Figura 2 - Sensor no concreto: nova tecnologia para melhorar a eficiência e evitar desperdícios.



Fonte: Plataforma de arquitetura, arch daily (2026).

Complementarmente, os ENDs vêm ganhando destaque na avaliação de estruturas em serviço. Técnicas como ultrassom, esclerometria e resistividade elétrica permitem inferir propriedades mecânicas e condições internas do material sem a necessidade de extração de amostras. Essas metodologias são especialmente úteis na detecção de zonas degradadas, onde existe o aumento de porosidade e perda de rigidez.

No campo da caracterização avançada, a microtomografia computadorizada (micro-CT) tem se mostrado uma ferramenta altamente eficaz para análise tridimensional da microestrutura do concreto. Essa técnica possibilita visualizar e quantificar a evolução da rede porosa, permitindo correlacionar diretamente a lixiviação com o aumento da conectividade dos poros e a consequente perda de desempenho estrutural. Estudos recentes demonstram que a micro-CT é capaz de identificar estágios iniciais de degradação antes mesmo de manifestações visíveis (Wang *et al.*, 2024).

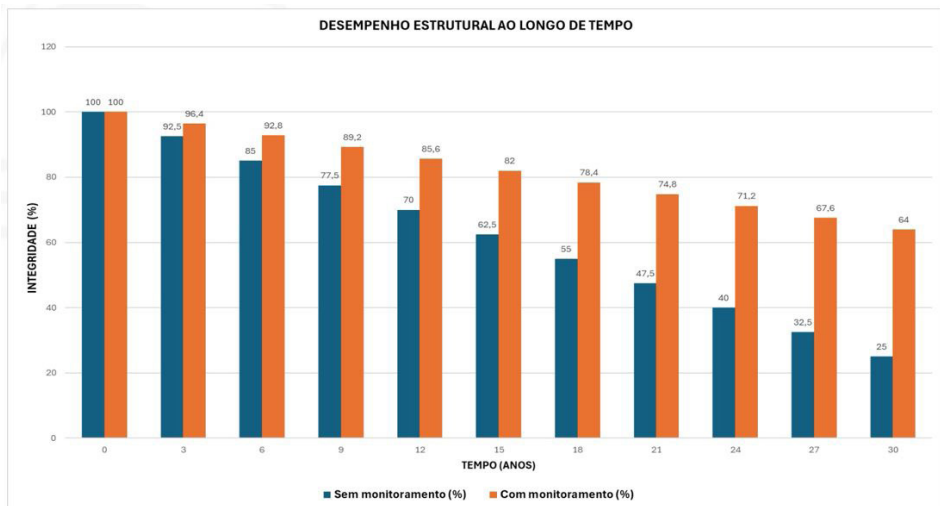
Além disso, técnicas espectroscópicas como XRF e FTIR têm sido amplamente utilizadas para identificar alterações químicas na matriz cimentícia. Essas técnicas permitem detectar a redução de compostos como o hidróxido de cálcio e a formação de novos produtos decorrentes da interação com agentes agressivos, fornecendo uma compreensão detalhada dos mecanismos envolvidos na percolação.

Outro avanço relevante refere-se ao uso de modelagem computacional para simulação da eluição em materiais cimentícios. Modelos baseados em transporte de

massa e reações químicas permitem prever a evolução do fenômeno ao longo do tempo, considerando variáveis como porosidade, coeficiente de difusão e condições ambientais. Esses modelos são fundamentais para estimativas de vida útil e para o desenvolvimento de estratégias de mitigação ainda na fase de projeto.

De acordo com essa abordagem, a degradação dos materiais ocorre de maneira progressiva, sendo intensificada na ausência de acompanhamento técnico adequado, o que favorece o avanço de manifestações patológicas, como a lixiviação. Em contrapartida, a adoção de sistemas de monitoramento possibilita a detecção precoce de anomalias e a implementação de intervenções preventivas, reduzindo significativamente a taxa de deterioração e contribuindo para a extensão da vida útil das estruturas. Nesse contexto, a Figura 3 ilustra de forma conceitual a evolução do desempenho estrutural ao longo do tempo, comparando cenários com e sem monitoramento, evidenciando a diferença na taxa de degradação e os benefícios associados à gestão baseada no ciclo de vida, tomando como base a ISO 15686, 2011. A Figura 3 foi criada com base em uma modelagem conceitual simplificada conforme a ISO 15686, 2011, que considera diferentes taxas de degradação estrutural em função da presença ou ausência de monitoramento ao longo do tempo. No cenário sem monitoramento, adotou-se uma taxa média de deterioração de aproximadamente 2,5% a cada ano, representando condições em que a estrutura está sujeita a processos patológicos, sem acompanhamento técnico sistemático, em 30 anos a estrutura estará com 25% de a integridade e em menos de 40 anos a integridade chega a 0%.

Figura 3 - Evolução do desempenho estrutural ao longo do tempo (30 anos) com e sem monitoramento.



Fonte: Autoria Própria (2026)

Nessa situação, as intervenções tendem a ocorrer de forma corretiva, ou seja, apenas após a manifestação visível dos danos, o que resulta em maior acúmulo de deterioração e comprometimento mais acelerado do desempenho estrutural. No

cenário com monitoramento, considerou-se uma taxa reduzida de degradação, em torno de 1,2% a cada ano, refletindo a influência de estratégias de inspeção contínua e manutenção preventiva que em 30 anos a integridade da estrutura estará em 64% na mesma perspectiva se dobra para 80 anos com relação à sem monitoramento a integridade ainda estará em 4%. O acompanhamento permite a identificação precoce de anomalias, possibilitando intervenções antecipadas que controlam a evolução dos danos e reduzem a propagação, contribuindo para a preservação das propriedades mecânicas e aumento da vida útil da estrutura. A ausência de monitoramento favorece a evolução progressiva e acumulativa dos danos.

Nesse cenário ainda, a aplicação de técnicas de IA e aprendizado de máquina, que vêm sendo utilizadas para analisar grandes volumes de dados experimentais e de monitoramento. Essas ferramentas possibilitam identificar padrões de degradação e prever o comportamento futuro das estruturas com maior precisão. De acordo com Bender (2025), a integração entre IA e dados de monitoramento em tempo real representa um avanço significativo na gestão da durabilidade, permitindo a transição de abordagens reativas para estratégias preditivas.

No contexto normativo e de padronização, instituições como a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e organismos internacionais, como a American Concrete Institute (ACI), têm incentivado a incorporação de metodologias avançadas de monitoramento e avaliação da durabilidade, embora ainda haja lacunas quanto à normatização específica dessas tecnologias emergentes.

Dessa forma, observa-se que as tecnologias de avaliação e monitoramento desempenham papel fundamental na complementação dos estudos sobre o comportamento estrutural da lixiviação. Enquanto os ensaios tradicionais permitem caracterizar o fenômeno em laboratório, as ferramentas modernas possibilitam sua análise em tempo real e em condições reais de serviço. Essa integração entre métodos convencionais e inovadores representa um avanço essencial para a engenharia civil, contribuindo para maior confiabilidade, segurança e sustentabilidade das estruturas ao longo de sua vida útil.

Tecnologias de Avaliação e Monitoramento

Na engenharia civil, avaliar materiais e estruturas é importante para a segurança e o desempenho estrutural. A mudança de métodos tradicionais para modelos integrados reflete na mudança de paradigmas. As tecnologias de sensores e a IA que permitem não apenas a identificação de manifestações patológicas e a previsão de degradação estrutural. Na Tabela 2 pode-se analisar o fluxo de interação entre o meio agressivo e essas ferramentas diagnósticas.

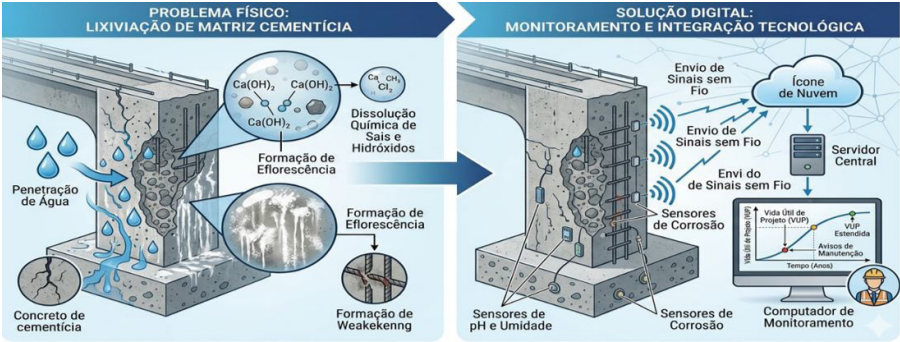
Tabela 2 - Fluxo conceitual da lixiviação e integração com tecnologias de Monitoramento.

PROCESSO DE LIXIVIAÇÃO	CAMADA DE MONITORAMENTO	INTELIGENCIA ARTIFICIAL	DIAGNÓSTICO
Água entra nos poros do concreto dissolvendo a portlandita e causando danos estruturais	Sensores embutidos transmitem dados de umidade, pH e corrosão para a nuvem.	Análise de dados recebidos para prever a vida útil do projeto e gerar alertas de manutenção	Um painel exibe a previsão da vida útil do projeto e alertas de manutenção preditiva
1	2	3	4
ENTRADA DE DADOS FÍSICOS	TRANSMISSÃO SEM FIO	PROCESSAMENTO E DIAGNÓSTICO	SAÍDA DA INFORMAÇÃO

Fonte: Autoria própria (2026).

Diante dessas ferramentas, o uso de sensores embutidos em estruturas que permitem o monitoramento contínuo e obtenção de parâmetros, que constitui um avanço significativo nas práticas de avaliação e gestão da estrutura ao longo do tempo. Diante disso, Esses dispositivos possibilitam a coleta sistemática de dados relacionados a variáveis como umidade interna, temperatura, e até mesmo deformações e que tradicionalmente são medidas por extensômetros do tipo strain gauges. Esses dispositivos de monitoramento fornecem uma visão ilustrada na Figura 4 de forma mais precisa e dinâmica do comportamento estrutural em serviço. A disposição desses sensores e o fluxo de dados para a análise das manifestações patológicas.

Figura 4 - Fluxo Conceitual da Lixiviação e Integração Tecnológica.



Esses sistemas operam por meio de uma arquitetura integrada, esses sensores realizam a aquisição dos dados, que são posteriormente transmitidos por redes de comunicação sem fio até plataformas analíticas centralizadas. Nessas plataformas, os dados são processados, armazenados e interpretados, permitindo sua visualização por meio de painéis que irão alertar para situações de anomalias na estrutura. Essa abordagem viabiliza a implementação de estratégias de monitoramento em tempo real, o que promove ganhos relevantes em termos de eficiência operacional e segurança estrutural. Como principal ponto positivo,

destaca-se a capacidade de detecção precoce de falhas, possibilitando intervenções preventivas e contribuindo para a redução de custos de manutenção e mitigação de riscos. Na figura 5 apresenta o posicionamento dos dispositivos em campo durante a concretagem de um elemento estrutural como forma de monitorar a estrutura.

Figura 5 - Dispositivo de monitoramento para estrutura de concreto.



Fonte: Autoria própria (2026).

Apesar das vantagens associadas ao uso dessas tecnologias, existem algumas limitações. Entre elas, destaca-se a dependência de processos rigorosos de calibração, uma vez que a confiabilidade dos dados obtidos está diretamente relacionada à adequada configuração e validação dos sensores e equipamentos utilizados. Além disso, muitos dos resultados gerados são de natureza indireta, exigindo interpretação técnica especializada para a correta correlação com as propriedades reais dos materiais e o estado estrutural. Esse caráter pode introduzir incertezas, especialmente quando não há integração com outros métodos de análise ou validação experimental complementar.

Ensaio não Destrutivo (END)

Os ENDs são ferramentas fundamentais na engenharia moderna, pois permitem a avaliação detalhada de estruturas sem comprometer sua integridade física.

O sistema Ground Penetrating Radar (GPR) opera por meio da emissão de ondas eletromagnéticas de alta frequência, geralmente na faixa de 10 MHz a 1,5 GHz, que se propagam no interior do material investigado. Ao encontrarem interfaces com diferentes propriedades elétricas, como variações de umidade, vazios ou descontinuidades, essas ondas são refletidas e captadas pelo equipamento, permitindo a identificação e análise das heterogeneidades internas (Farina *et al.*, 2025). Essa tecnologia de captura e processamento de sinais é realizada por equipamentos especializados, como a unidade central SIR-3000 demonstrada na Figura 6.

Figura 6 - Radares de penetração no solo (GPR).

Fonte: allied-associates (2023).

Embora, o sistema ofereça alta resolução e eficiência, as fontes ressaltam que os resultados obtidos são em geral, indiretos. Nesse contexto, a aplicação da tecnologia GPR exige uma calibração rigorosa e uma interpretação especializada dos radares grampos gerados, garantindo que as anomalias detectadas correspondam fielmente à realidade estrutural ou geotécnica do objeto em análise.

MATERIAIS, ESTRATÉGIAS DE PROJETO E SUSTENTABILIDADE FRENTE À LIXIVIAÇÃO

A mitigação desse fenômeno não depende apenas da avaliação e diagnóstico, mas também de decisões adequadas na seleção de materiais e nas estratégias de projeto. Nesse contexto, a arquitetura e a engenharia atuam de forma integrada, buscando soluções que aumentem a durabilidade das estruturas e reduzam seus impactos ambientais ao longo do ciclo de vida.

Diversos materiais utilizados na construção civil apresentam diferentes níveis de suscetibilidade à lixiviação como mostra a Tabela 3. Argamassas convencionais, concretos com elevada relação água/cimento e revestimentos porosos tendem a apresentar maior vulnerabilidade, devido à sua microestrutura mais permeável e à maior disponibilidade de compostos solúveis. Em contrapartida, materiais de alto desempenho, como concretos de baixa porosidade e compósitos modificados, apresentam maior resistência à percolação de água e, consequentemente, menor propensão à lixiviação, na Tabela 3 destaca o desenvolvimento de materiais inovadores e sustentáveis. Estudos recentes indicam que a incorporação de materiais pozolânicos reduz significativamente a lixiviação de hidróxido de cálcio, promovendo maior estabilidade química da matriz cimentícia (Andrade *et al.*, 2023). Do ponto de vista ambiental, a tais reações físico-química apresenta implicações relevantes, especialmente no que se refere à contaminação do solo e dos recursos hídricos. A liberação de íons, metais e outros compostos presentes nos materiais

cimentícios pode alterar a qualidade da água subterrânea e superficial, configurando um problema ambiental que extrapola o desempenho estrutural. Segundo pesquisas recentes, a composição do material e as condições de exposição são determinantes para o potencial de contaminação (Elenize *et al.*, 2023). A integração entre escolha de materiais, soluções construtivas e diretrizes de sustentabilidade permite não apenas reduzir a incidência da lixiviação, mas também aumentar a resiliência das estruturas frente a ambientes agressivos. Dessa forma, o papel do projeto arquitetônico e da especificação de materiais torna-se essencial na prevenção de patologias e na promoção de construções mais duráveis e ambientalmente responsáveis.

Tabela 3 - Materiais inovadores e sua trabalhabilidade.

MATERIAL INOVADOR	APLICABILIDADE
Concretos de alto desempenho (CAD)	Concretos autoadensáveis, com microestrutura mais densa e menor permeabilidade;
Geopolímeros	Apresentam menor teor de cálcio livre e maior resistência a processos de lixiviação;
Materiais com adições minerais	Como cinza volante, escória de alto-forno e sílica ativa, que contribuem para o refinamento da estrutura porosa;
Compósitos com resíduos reciclados	Além de reduzir impactos ambientais, podem melhorar propriedades de durabilidade quando adequadamente dosados.

Fonte: Autoria própria (2026).

MODELAGEM COMPUTACIONAL (SIMULAÇÃO DE LIXIVIAÇÃO)

A modelagem computacional aplicada à simulação de lixiviação constitui uma ferramenta relevante para a previsão do comportamento de materiais cimentícios ao longo do tempo, especialmente em ambientes agressivos. Por meio de abordagens numéricas, é possível representar os mecanismos físico-químicos responsáveis pela degradação, permitindo antecipar alterações na microestrutura e no desempenho do material.

Os modelos empregados baseiam-se, principalmente, em equações de transporte de massa, com destaque para os processos de difusão de íons no interior da matriz cimentícia. Associadamente, são consideradas reações químicas, como a dissolução de compostos hidratados, em particular o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), que desempenha papel fundamental na estabilidade química do sistema.

Além disso, a interação entre o fluido agressivo e a estrutura sólida é incorporada aos modelos, possibilitando uma análise mais realista dos fenômenos de lixiviação. A aplicação dessas simulações permite não apenas compreender os mecanismos de degradação, mas também estimar a vida útil dos materiais, avaliar a suscetibilidade ao ataque químico e apoiar o desenvolvimento de composições

mais duráveis. Dessa forma, a modelagem computacional se consolida como uma ferramenta estratégica na análise de durabilidade e no aprimoramento de materiais cimentícios (FERREIRA *et al.*, 2023).

INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL APLICADA À DEGRADAÇÃO

A aplicação de IA na análise de degradação de materiais e estruturas tem se consolidado como uma camada analítica avançada, capaz de explorar grandes volumes de dados e identificar padrões não triviais. Essa abordagem amplia a capacidade preditiva dos modelos tradicionais, permitindo uma avaliação mais robusta do desempenho ao longo do tempo.

Dentre as técnicas mais utilizadas, destacam-se métodos de Machine learning, como Random Forest e Support Vector Machines (SVM), além de abordagens de Deep Learning, baseadas em redes neurais artificiais, que apresentam elevada capacidade de generalização em problemas complexos. Adicionalmente, modelos híbridos, que combinam fundamentos físico-químicos com métodos estatísticos, têm sido empregados para aumentar a confiabilidade das previsões. Os modelos de IA são alimentados por diferentes fontes de dados, incluindo informações provenientes de sensores embutidos, resultados de END e variáveis ambientais, como temperatura, umidade e exposição a agentes agressivos. A integração desses dados permite a construção de modelos mais representativos das condições reais de operação.

Diante dos resultados dessas abordagens, possibilitam a previsão da vida útil de materiais e estruturas, a classificação de níveis de risco e a detecção automática de anomalias, que contribuem para a implementação de estratégias de manutenção preditiva e para a tomada de decisão baseada em dados. Mostrando assim uma ferramenta promissora no avanço do monitoramento de estruturas.

SOFTWARES DE ANÁLISE DE DURABILIDADE

Os softwares de análise de durabilidade constituem ferramentas fundamentais para a avaliação do desempenho de materiais e estruturas ao longo do tempo, permitindo a integração entre modelos físico-químicos e análises estruturais. Essas plataformas possibilitam a simulação de diferentes cenários de exposição, contribuindo para a previsão de mecanismos de degradação e para o suporte à tomada de decisão em projetos e manutenções, alinhando-se aos conceitos de Cidades Inteligentes e medidas de prevenção de manifestação patológica.

Dentre as ferramentas consolidadas, destacam-se: Computer Solutions (COMSOL) Multiphysics, amplamente utilizado para modelagem multifísica, permitindo a simulação acoplada de fenômenos como transporte de massa e reações químicas. O Analysis System (ANSYS) é empregado principalmente em análises estruturais, possibilitando a avaliação de tensões, deformações e

comportamento mecânico sob diferentes condições de carregamento. No entanto, o Life-365 é voltado especificamente para previsão da corrosão de armaduras em estruturas de concreto, com foco na penetração de cloretos e estimativa de vida útil. Por sua vez, o Displacement Analyser Finite Element Analysis (DIANA FEA) é amplamente utilizado em análises não lineares, incluindo a modelagem de fissuração e comportamento avançado de materiais cimentícios.

De forma geral, esses softwares permitem a simulação do transporte de íons no interior dos materiais, a modelagem de processos de fissuração e a análise da vida útil estrutural. Assim, configuram-se como ferramentas estratégicas na engenharia contemporânea, contribuindo para o desenvolvimento de soluções mais duráveis, seguras e economicamente eficientes, conforme as tendências atuais de modelagem computacional aplicada à durabilidade (Bono *et al*, 2024).

ANÁLISE COMPARATIVA DE BOAS PRÁTICAS PARA MINIMIZAR OS PROCESSOS DE LIXIVIAÇÃO

A análise comparativa evidencia que a lixiviação atua de forma multifatorial, afetando simultaneamente aspectos microestruturais, mecânicos e ambientais. Observa-se na Tabela 4 o consenso entre os autores de que o aumento da porosidade e da permeabilidade constitui o principal gatilho para a degradação progressiva. Além disso, estratégias como o uso de adições minerais, controle da relação água/cimento e adoção de geopolímeros mostram-se eficazes na mitigação do fenômeno. Destaca-se ainda a necessidade de abordagens integradas, considerando tanto o desempenho estrutural quanto os impactos ambientais associados:

Tabela 4 - Análise comparativa dos impactos da lixiviação no desempenho de materiais cimentícios com base na literatura recente.

AUTOR(ES)	FOCO DO ESTUDO	PRINCIPAIS RESULTADOS	IMPACTO	CONCLUSÃO RELEVANTE
Wang <i>et al.</i> (2024)	Microestrutura e porosidade	Aumento da conectividade dos poros e da porosidade	Elevação da permeabilidade e do transporte iônico	A lixiviação acelera a degradação ao facilitar a entrada de agentes agressivos
Batista e Oliveira (2024)	Patologias e durabilidade	Identificação da lixiviação como mecanismo crítico	Comprometimento da segurança estrutural	O entendimento do fenômeno é essencial para manutenção preventiva
Rodrigues <i>et al.</i> (2026)	Impacto ambiental	Liberação de metais pesados e alteração do pH	Contaminação de solos e águas subterrâneas	Materiais reciclados exigem controle rigoroso

AUTOR(ES)	FOCO DO ESTUDO	PRINCIPAIS RE-SULTADOS	IMPACTO	CONCLUSÃO RELEVANTE
Oliveira <i>et al.</i> (2022)	Propriedades mecânicas	Redução de até 25% da resistência à compressão	Perda de capacidade estrutural	A perda de Ca(OH)_2 compromete o desempenho mecânico
Bender <i>et al.</i> (2025)	Interação de mecanismos	Sinergia entre lixiviação, carbonatação e ataques químicos	Aceleração da degradação	A durabilidade deve ser analisada de forma integrada
Gumieri e Souza (2025)	Adições minerais	Redução da porosidade e da lixiviação	Melhoria da durabilidade	Estratégia eficaz de mitigação
Mehta e Monteiro (2024)	Dosagem do concreto	Relação a/c como fator crítico	Redução da permeabilidade	Baixa relação a/c aumenta a resistência à lixiviação
Davidovits (2023)	Geopolímeros	Alta estabilidade química e baixo teor de cálcio	Menor suscetibilidade à lixiviação	Alternativa mais durável e sustentável

Fonte: Autoria própria (de acordo com a literatura citada de 2026).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A lixiviação em materiais cimentícios configura-se como um dos principais mecanismos de degradação responsáveis pela redução da durabilidade das estruturas de concreto, atuando na dissolução de compostos essenciais da matriz e promovendo alterações microestruturais relevantes. O aumento da porosidade e da permeabilidade constitui o principal fator associado à intensificação do transporte iônico, favorecendo a entrada de agentes agressivos e acelerando os processos de deterioração. Os dados comparativos indicam reduções significativas nas propriedades mecânicas, com destaque para a resistência à compressão, que pode sofrer perdas de até 25% em condições severas de exposição, além da diminuição do módulo de elasticidade. A lixiviação atua de forma sinérgica com outros mecanismos, como carbonatação e ataques químicos, potencializando a degradação estrutural e reduzindo a vida útil das estruturas. No âmbito tecnológico, o uso de ferramentas avançadas, como sensores baseados em IoT, microtomografia computadorizada, END e técnicas de IA, permite maior precisão na identificação e monitoramento do fenômeno, viabilizando abordagens preditivas mais eficientes. O monitoramento possibilita taxas de degradação significativamente menores, podendo manter níveis de integridade superiores a 60% após 30 anos. O uso de adições minerais, possibilita o controle da relação água/cimento e aplicação de geopolímeros contribuem significativamente para a mitigação da lixiviação, reduzindo os impactos estruturais ambientais.

As perspectivas futuras na área indicam que a integração entre IA, sensores inteligentes, modelagem computacional e materiais inovadores tende a transformar significativamente a forma como a durabilidade das estruturas. Nesse contexto, destacam-se ainda o desenvolvimento de modelos preditivos mais robustos, sistemas autônomos de monitoramento em tempo real e a aplicação de conceitos como gêmeos digitais, permitindo maior precisão na tomada de decisão. Paralelamente, a evolução de materiais sustentáveis, como geopolímeros e compósitos avançados, reforçam o compromisso com a redução dos impactos ambientais. Dessa forma, os avanços tecnológicos não apenas ampliam as possibilidades de pesquisa, mas também consolidam uma abordagem mais integrada, preventiva e sustentável na engenharia civil, mantendo o profissional como elemento central na interpretação dos dados e na condução das soluções.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE J. F. C.; CORDOBE R.E.; SCHALCH V. **Comparação dos Lixiviados de resíduos da construção civil com e sem adesão de tinta por meio de simulações em colunas de lixiviação**. Conferência: 20º Congresso Nacional de Meio Ambiente de Poços de Caldas, MG, dezembro de 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10787: Concreto endurecido — Determinação da penetração de água sob pressão**. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.
- BENDER; SAMANTHA FERNANDA. **Estudo da durabilidade do concreto frente à degradação com ataque de sulfatos em estações de tratamentos de esgoto (ETE) / Samantha Fernanda Bender - 2025**. Dissertação (mestrado) universidade do Vale do rio dos sinos, 2025.
- BATISTA, R. J.; OLIVEIRA, M. S. **Durabilidade e patologia das estruturas de concreto: uma visão atualizada**. 3. ed. São Paulo: Pini, 2024.
- DAVIDOVITS, J. **Geopolymer Chemistry and Applications**. 6th ed. Saint-Quentin: Geopolymer Institute, 2023.
- DE BONO V.; *et al.* **Methodology for formulating low-carbon printable mortar through particles packing optimization, Fevereiro de 2024**. Periódico: Cement and Concrete Research, v. 176, p. 107403.
- ELENIZE F. M.; MARILISE G.; REGINA C. E. M.; MARLOVA P. K FELICIANE A. B.; **Avaliação da lixiviação do cromo em concreto pelos métodos de imersão e**

irrigação, REVISTA MATÉRIA - ISSN 1517-7076 - ART. e13233, 2023.

FERREIRA, L. *et al.* Computational modeling of degradation mechanisms in cementitious materials. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 2023.

FARINA, F.; COSTA, D. C.; BRESSAGLIA, P.; TREIBER, H. M.; Aplicação do radar de penetração no solo (GPR) integrado ao GNSS de alta precisão no mapeamento de redes subterrâneas urbanas: estudo de caso na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), **Revista PPC – Políticas Públicas e Cidades – ISSN 2359-1552**, v. 14, n. 2, p. 01–24, 2025.

ISO 15686. ISO 15686-1:2011. Edificações e ativos construídos — Planejamento da vida útil — Parte 1: Princípios gerais e estrutura. **Geneva: International Organization for Standardization**, 2011.

LIMA, P. R. L. *et al.* Sustentabilidade na construção civil: do projeto à gestão de resíduos. **Cadernos de Engenharia Civil**, Porto Alegre, v. 12, n. 3, p. 45-60, 2024.

LI, H. *et al.* **Smart sensors for structural health monitoring: recent advances**. *Sensors*, v. 22, 2022.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 5. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2024.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 5. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2024.

GUMIERI, A. G.; SOUZA, P. S. L. Influência da lixiviação na microestrutura de concretos com adições minerais. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 18, n. 2, p. 1-15, 2025.

NEUMANN JUNIOR, Cláudio. **Avaliação do processo de lixiviação em concreto massa – O caso de Itaipu Binacional**. 2019. 115 f. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil). Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA), Foz do Iguaçu, 2019

Oliveira, M. G. de, Sousa, D. L. de, Teixeira, M. R., Souza, M. R. de, & Sousa, F. dos S. Ocorrência de lixiviação no concreto das galerias da UHE de Tucuruí – Pará/ Occurrence of leaching in the concrete of the galleries of the Tucuruí HPP – Pará. **Brazilian Journal of Development**, 8(4), 26878–26886, (2022). <https://doi.org/10.34117/bjdv8n4-274> Pará, 2002. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA).

RODRIGUES, C. S. Lixiviação de metais pesados em materiais de construção reciclados: impactos ambientais e soluções. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 13, n. 1, p. 112-128, 2026.

SILVA, F. G. S.; HELENE, P. **Corrosão e lixiviação em estruturas de concreto armado**. São Paulo: Oficina de Textos, 2025.

Sensores no concreto: nova tecnologia para melhorar sua eficiência e evitar desperdícios: <https://www.archdaily.com.br/br/973762/sensores-no-concreto-nova-tecnologia-para-melhorar-sua-eficiencia-e-evitar-desperdicios>

UNITED STATES GREEN BUILDING COUNCIL (USGBC). **LEED v5 for Building Design and Construction**. Washington, DC: USGBC, 2024.

WANG J, XING. M.; YANG, X JIAH, H.; YANG, L.; YANG, T.; WANG, C.; LIU, X. **Study on the Long-Term Durability and Leaching Characteristics of Low-Consumption Cement Backfill under Different Environmental Conditions**. Sustainability 2024, 16, 5138.

ZHANG, Y. *et al.* Leaching behavior of geopolymers and cement-based materials: a comparative study on environmental impact. **Journal of Cleaner Production**, v. 410, p. 137-152, 2024.

AGRADECIMENTOS

Os autores Kleverson Kennedy (Processo nº 88887.289863/2026-00) e Victor Lucas (Processo nº 88887.289870/2026-00) agradecem à CAPES pela oportunidade concedida, bem como a Aureliano Amaro bolsa CNPq Doutorado (Processo nº 140815/2026-0) e Galba Maria de Campos Takaki ao CNPq bolsa de produtividade em pesquisa(Processo nº 312241/2022-4), fundamental para a ampliação das fronteiras científicas e o fortalecimento das atividades acadêmicas do PPGDPA-UNICAP.