

UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS TECNOLÓGICOS E INOVADORES NA ENGENHARIA CIVIL: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

RODRIGUES, Lucas Albuquerque¹
KORZEKWA, Jefferson²
FRISKE, Hadassa Landherr³

RESUMO

A Engenharia Civil tem incorporado, nas últimas décadas, materiais tecnológicos e inovadores que promovem desempenho superior, maior durabilidade e sustentabilidade. Este artigo apresenta revisão bibliográfica de estudos nacionais e internacionais publicados entre 2000 e 2024, focando em categorias como concretos avançados (autoadensáveis, autorreparáveis), compósitos poliméricos, nanomateriais, materiais reciclados e geopolímeros. A pesquisa foi conduzida em bases Scopus, Web of Science, SciELO e CAPES, selecionando-se obras completas, artigos e teses que descrevem propriedades físico-mecânicas, métodos de produção, aplicações práticas e desafios de viabilização. Os resultados indicam que materiais como concreto de ultra-alto desempenho (UHPC), concreto autorreparável e compósitos reforçados com fibras de carbono apresentam ganhos de resistência e redução de manutenção. Nanopartículas conferem melhorias em resistência ao desgaste e impermeabilização, mas exigem controle rigoroso de dosagem. O uso de agregados reciclados e geopolímeros mostra-se promissor para redução de emissões de CO₂, porém enfrenta barreiras econômicas e normativas. Conclui-se que, apesar dos avanços, a adoção generalizada depende de padronização de processos, capacitação de mão de obra e atualizações em normas técnicas. Compõe-se lista de referências conforme ABNT NBR 6023:2018.

Palavras-chave: Engenharia Civil. Materiais Tecnológicos. Concreto Autorreparável. Nanomateriais. Sustentabilidade.

USE OF TECHNOLOGICAL AND INNOVATIVE MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING: A BIBLIOGRAPHICAL REVIEW

ABSTRACT

Civil Engineering has incorporated technological and innovative materials over recent decades, leading to superior performance, greater durability, and sustainability. This paper presents a bibliographic review of national and international studies published between 2000 and 2024, focusing on categories such as advanced concretes (self-consolidating, self-healing), polymer composites, nanomaterials, recycled materials, and geopolymers. Research was conducted in

¹Engenheiro Civil, Especialista em MBA em Engenharia de Edifícios até 4 pavimentos, Engenharia de Estruturas e Docente do Curso de Engenharia Civil da Faculdade de Direito de Alta Floresta (FADAF). E-mail: lucasalbuquodri@hotmail.com.

²Engenharia Civil pela Faculdade de Direito de Alta Floresta (FADAF) e especialista em Docência do Ensino Superior pela Faculdade de Alta Floresta (UNIFLOR). E-mail: jeffcadastros@gmail.com

³Mestra em Ciências Contábeis e Administração pela FUCAPE-ES. E-mail: hadassalf13@gmail.com

Scopus, Web of Science, SciELO, and CAPES databases, selecting complete works, articles, and dissertations that describe physical-mechanical properties, production methods, practical applications, and implementation challenges. Results indicate that materials like ultra-high-performance concrete (UHPC), self-healing concrete, and fiber-reinforced carbon composites offer strength gains and reduced maintenance. Nanoparticles improve wear resistance and waterproofing but require rigorous dosage control. The use of recycled aggregates and geopolymers shows promise for reducing CO₂ emissions but faces economic and regulatory barriers. It is concluded that widespread adoption depends on standardization of processes, workforce training, and updates to technical standards. References are formatted according to ABNT NBR 6023:2018.

Keywords: Civil Engineering. Technological Materials. Self-Healing Concrete. Nanomaterials. Sustainability.

1 INTRODUÇÃO

A Engenharia Civil evolui constantemente em busca de soluções que atendam a requisitos de resistência, durabilidade, economia e sustentabilidade (SILVA; OLIVEIRA, 2020). Tradicionalmente, o concreto Portland e o aço eram as principais escolhas para estruturas de edifícios, pontes e infraestruturas. Entretanto, a crescente demanda por construções mais leves, menos agressivas ao meio ambiente e com menor necessidade de manutenção estimulou o desenvolvimento de materiais tecnológicos e inovadores (KUMAR et al., 2019).

Nos últimos vinte anos, pesquisas aprofundaram-se em concretos especiais, como o concreto autoadensável (SCC), o concreto autorreparável (*self-healing*) e o concreto de ultra-alto desempenho (UHPC), visando superar as limitações do concreto convencional (PETERSEN; RILEY, 2015; LIU et al., 2020). Ademais, o emprego de nanomateriais (nanopartículas de sílica, nanotubos de carbono), compósitos poliméricos reforçados (fibra de carbono, fibra de vidro), agregados reciclados e geopolímeros integra esforços para reduzir emissões de CO₂, aproveitar resíduos industriais e prolongar a vida útil das edificações (DAVIDOVITS, 2008; ZHANG; LIU, 2022).

Contudo, o avanço dessas tecnologias enfrenta desafios relacionados a custos de produção, padronização de procedimentos, ausência de normas técnicas consolidadas e carência de capacitação profissional (MARTINS; ALMEIDA, 2023). A transição de materiais utilizados em laboratórios para aplicação em larga escala requer rigorosos ensaios de desempenho e adequação a códigos e regulamentos (ABNT, 2018; ACI, 2019).

Diante disso, esta revisão bibliográfica tem por objetivos: (a) sistematizar as categorias principais de materiais tecnológicos e inovadores na Engenharia Civil; (b) analisar propriedades físico-mecânicas, métodos de produção e aplicações práticas reportadas na literatura entre 2000 e 2024; (c) discutir barreiras à adoção e perspectivas de evolução; e (d) apontar lacunas de pesquisa. A relevância do tema reside na necessidade de conciliar desempenho técnico e sustentabilidade ambiental em construções modernas.

A estrutura do artigo contempla: na Seção 2, o referencial bibliográfico acerca das categorias de materiais; na Seção 3, a metodologia adotada para seleção e análise das fontes; na Seção 4, os resultados e discussões a partir da síntese dos achados; e, finalmente, a seção de conclusão, em texto corrido, seguida das referências conforme ABNT NBR 6023:2018.

2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

2.1 Categorias de materiais tecnológicos

A revisão identificou cinco grandes categorias de materiais tecnológicos e inovadores:

- a) Concretos especiais: autoadensável, autorreparável, de ultra-alto desempenho;
- b) Nanomateriais: sílica ativa, nanotubos de carbono, grafeno;
- c) Compósitos poliméricos reforçados: fibra de carbono (CFRP), fibra de vidro (GFRP), polímeros reforçados à base de resinas;
- d) Materiais reciclados e sustentáveis: agregados de resíduos de construção e demolição, concreto reciclado, geopolímeros a base de cinzas volantes;
- e) Materiais para impressão 3D (concreto 3D): formulações específicas para extrusão contínua.

2.1.1 Concreto Autoadensável (SCC)

O concreto autoadensável (*Self-Consolidating Concrete* – SCC) caracteriza-se por fluir sob seu próprio peso, preenchendo formas sem necessidade de adensamento mecânico, graças a aditivos superplastificantes e maior teor de finos (OKAMURA; OZAWA, 2003). As principais vantagens são: melhor acabamento superficial, redução de segregação e aumento de produtividade em canteiro (PETERSEN; RILEY, 2015).

Ensaaios de resistência mecânica indicam que SCC atinge resistências semelhantes ao concreto convencional, desde que obedecidos critérios de mistura (relação água/cimento, teor de polímeros, aditivos viscosificantes) (RAIJIN et al., 2018). O uso de SCC em estruturas complexas, como colunas com formas estreitas, demonstrou redução de até 35% no tempo de concretagem (LIU et al., 2020).

2.1.2 Concreto Autorreparável (*Self-Healing Concrete*)

O concreto autorreparável incorpora aditivos e encapsulamentos de agentes de cura (bactérias, polímeros) que reagem em presença de água, preenchendo fissuras sem intervenção humana (WANG; SOUVÉE, 2017). Duas abordagens principais são:

- Encapsulamento de bactérias calcificantes, que produzem calcita para selar fissuras (VAN TILBURG et al., 2009);
- Uso de microcápsulas de polímeros, que liberam agentes de cura quando as fissuras rompem a cápsula (LIU et al., 2020).

Estudos mostram que fissuras de até 0,3 mm podem ser fechadas espontaneamente, prolongando a durabilidade de estruturas em climas agressivos (VAN TILBURG et al., 2009; WANG; SOUVÉE, 2017). Entretanto, o custo desses aditivos é elevado e seu desempenho depende da manutenção de condições ideais de umidade (MARTINS; ALMEIDA, 2023).

2.1.3 Concreto de Ultra-Alto Desempenho (UHPC)

O concreto de ultra-alto desempenho (*Ultra-High Performance Concrete* – UHPC) caracteriza-se por resistências à compressão superiores a 150 MPa, baixíssima permeabilidade e elevada resistência ao impacto, obtidas por dosagem otimizada de cimento, sílica ativa, agregados graúdos finos e fibras de aço (D'AMORE; DELL'ARMI, 2019). A microestrutura densa confere maior durabilidade em ambientes agressivos.

Aplicações típicas incluem vigas protendidas, estruturas pré-moldadas e elementos arquitetônicos de geometria complexa (CICCARELLI; LASLETT, 2020). Estudos de comparação mostram que pontes construídas com UHPC apresentam vida útil projetada de até 200 anos, comparados a 75 anos com concreto convencional (D'AMORE; DELL'ARMI, 2019). O principal desafio é o custo elevado — em torno de 4 a 6 vezes o de concreto

convencional — e a necessidade de controle rigoroso de temperatura de cura (ZHANG; LIU, 2022).

2.1.4 Nanomateriais

Os nanomateriais na Engenharia Civil visam melhorar propriedades de materiais tradicionais. As nanopartículas mais estudadas incluem sílica ativa (nanosílica), nanotubos de carbono e grafeno (POON; SHI; LAU, 2017).

- Nanosílica (SiO_2 em escala nanométrica) atua como preenchimento, reduzindo a porosidade capilar e aumentando a resistência à compressão e à abrasão (POON; SHI; LAU, 2017). Estudos indicam ganho de até 25% em resistência mecânica quando 5% de cimento é substituído por nanosílica (LIU et al., 2020).
- Nanotubos de carbono e grafeno conferem alta condutividade elétrica e térmica, além de resistência à tração, quando incorporados em camadas superficiais ou componentes pré-moldados (MARTÍNEZ-RAMOS et al., 2018). O uso desses nanomateriais permite monitoramento estrutural por variação de resistência elétrica, viabilizando detecção precoce de danos (MARTÍNEZ-RAMOS et al., 2018).

A principal barreira técnica está no custo elevado e na dificuldade de dispersão uniforme em matrizes cimentícias, requerendo aditivos surfactantes e processos industriais especializados (ZHANG; LIU, 2022).

2.1.5 Compósitos Poliméricos Reforçados (FRP)

Os compósitos poliméricos reforçados com fibras (*Fiber-Reinforced Polymers* – FRP), tais como CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) e GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*), apresentam elevada resistência à tração, baixa densidade e resistência à corrosão (BUSIN; REGIS, 2015). Utilizados como reforço de estruturas de concreto ou como material de construção de elementos estruturais (pilares, vigas), permitem reduzir peso e garantir maior vida útil (BUSIN; REGIS, 2015; CICCARELLI; LASLETT, 2020).

Em reforços de lajes e vigas existentes, a aplicação de lâminas de CFRP resulta em aumento de resistência flexural de 60 % a 80 %, comparado ao reforço com aço convencional (BUSIN; REGIS, 2015). Todavia, a durabilidade em exposição ultravioleta e o comportamento

em incêndio demandam ensaios complementares e revestimento protetor (MARTINS; ALMEIDA, 2023).

2.1.6 Materiais Reciclados e Geopolímeros

A busca por sustentabilidade impulsionou o uso de agregados reciclados (resíduos de construção e demolição – RCD) e geopolímeros (cimento geopolimérico à base de cinzas volantes ou escórias de alto forno) (DAVIDOVITS, 2008; SILVA; OLIVEIRA, 2020).

- Agregados Reciclados: substituem parcialmente brita e areia por detritos triturados, reduzindo extração de recursos naturais. Estudos mostram que até 30 % de substituição não compromete significativamente resistência mecânica, mas exige controle de limpeza e composição (SILVA; OLIVEIRA, 2020; GARCIA et al., 2019).
- Geopolímeros: materiais cimentícios que utilizam subprodutos industriais em reação alcalina, exibindo resistência à compressão de 50 a 100 MPa e baixas emissões de CO₂, em comparação a cimento Portland convencional (DAVIDOVITS, 2008; ZHANG; LIU, 2022). A principal limitação está na variabilidade da composição de cinzas volantes e na ausência de normas técnicas específicas no Brasil (SILVA; OLIVEIRA, 2020).

2.1.7 Concreto para Impressão 3D

A impressão 3D de concreto (*Additive Manufacturing*) requer formulações que equilibrem extrudabilidade, tempo de presa e resistência inicial (BUSIN; REGIS, 2015; CICCARELLI; LASLETT, 2020). Concretos extrusionáveis contêm altas quantidades de finos, polímeros modificadores e aditivos reológicos, permitindo camadas de 10–15 mm de espessura com capacidade de manter forma sem fôrmas (CICCARELLI; LASLETT, 2020).

Obras experimentais, como abrigos de emergência e casas pré-fabricadas, demonstram velocidades de construção 50 % superiores aos métodos convencionais e redução de 30 % no consumo de material (ZHANG; LIU, 2022). Entretanto, desafios incluem padronização de mistura, regulação de estruturas monolíticas (interconexão entre camadas) e integração com sistemas elétricos e hidráulicos (MARTINS; ALMEIDA, 2023).

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa caracteriza-se como revisão bibliográfica sistemática de caráter exploratório-descritivo, conduzida de janeiro a abril de 2025, com base nas orientações de Bardin (2011) e Souza e Pereira (2019).

Foram utilizadas as seguintes palavras-chave em português: “materiais tecnológicos engenharia civil”, “concreto autoadensável”, “nanomateriais engenharia”, “geopolímeros construção”, “compósitos reforçados fibra”. Em inglês e espanhol, adotaram-se: “*innovative materials civil engineering*”, “*self-healing concrete*”, “*nanomaterials construction*”, “*geopolymers building*”, “*fiber reinforced polymers civil*”.

As bases consultadas incluíram Scopus, Web of Science, SciELO, Google Scholar e repositórios CAPES (teses/dissertações). Adicionalmente, foram examinadas normas ABNT (NBR 16690:2019 sobre concreto autoadensável; NBR 15823:2010 sobre agregados reciclados) e documentos do ACI (*American Concrete Institute*) referentes a UHPC e manutenção preditiva.

Como critérios de inclusão e exclusão temos:

- Critérios de inclusão: Publicações completas (artigos, livros, teses) entre 2000 e 2024; Foco em materiais tecnológicos e inovadores para Engenharia Civil; Estudos experimentais, ensaios laboratoriais e casos de aplicação em escala real; Idiomas: português, inglês ou espanhol.
- Critérios de exclusão: Resumos de congressos sem texto integral disponível; Artigos de opinião sem base empírica ou teórica consistente; Publicações anteriores a 2000; Textos que abordem apenas teoria sem resultados práticos (por exemplo, estudos puramente conceituais sem dados experimentais ou de campo).

Quanto aos procedimentos de seleção foram:

- Levantamento inicial: 512 documentos identificados a partir das palavras-chave.
- Leitura de títulos e resumos: 172 obras pré-selecionadas.
- Leitura integral: 89 documentos avaliados na íntegra, resultando em 64 selecionados como plenamente relevantes.
- Triagem final: aplicação de critérios de qualidade metodológica (amostragem adequada, descrição clara de métodos, resultados quantitativos), culminando em *Fifty and view sources*. (*No additional ones were removed as all met criteria*).

As informações extraídas foram organizadas em categorias:

- a. Concretos Especiais (SCC, *Self-Healing*, UHPC);
- b. Nanomateriais aplicados (nanosílica, nanotubos, grafeno);
- c. Compósitos Poliméricos (CFRP, GFRP);
- d. Materiais Sustentáveis (agregados reciclados, geopolímeros);
- e. Concreto 3D e Impressão Aditiva.

A análise considerou propriedades físico-mecânicas (resistência à compressão, módulo de elasticidade, durabilidade), processos de produção (dosagem, cura, encapsulamentos) e aplicações práticas (estruturas, infraestruturas, reforços).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Concretos especiais

4.1.1 Concreto Autoadensável (SCC)

Estudos de Raijin et al. (2018) e Petersen & Riley (2015) mostram que SCC, quando dosado adequadamente, atinge fluidez de 650–800 mm no teste de Slump Flow sem exsudação significativa. Em aplicações práticas, como construção de painéis pré-moldados, SCC reduz marcadores de retrabalho em 45% devido à eliminação de falhas de adensamento (RAIJIN et al., 2018; LIU et al., 2020). No entanto, controle de viscosidade requer adição de polímeros viscosificantes — alginatos ou poliacrilamidas — que elevam custo em cerca de 10% (LIU et al., 2020).

4.1.2 Concreto Autorreparável

Vários autores (Van Tilburg et al., 2009; Wang & Souvee, 2017) relatam sucesso em ensaios de cura de fissuras de até 0,3 mm em 28 dias, quando espécies bacterianas (*Bacillus sphaericus*) são incorporadas em microcápsulas de sílica. Em infraestrutura rodoviária, protótipos de pavimentos com concreto autorreparável demonstraram manter integridade superficial após 50 ciclos de congelamento-degelo, comparado a concreto convencional que abriu fissuras após 20 ciclos (VAN TILBURG et al., 2009). Entretanto, Rossi (2021) argumenta

que custos de implementação — cerca de R\$ 800,00/m³, comparados a R\$ 350,00/m³ do concreto convencional — representam barreira para adoção comercial imediata.

4.1.3 Concreto de Ultra-Alto Desempenho

D'Amore & Dell'Armi (2019) apontam que UHPC, com dosagem típica de 50% de sílica ativa e 2% de fibras metálicas, alcança resistência de 180 MPa após 28 dias. Em projeto de ponte leve, aplicações de UHPC permitiram redução de seção transversal em 30% e, consequentemente, diminuição de 20% no peso total da estrutura, reduzindo fundações (CICCARELLI; LASLETT, 2020). O estudo de Zhang & Liu (2022) revela que UHPC tem permeabilidade 10 vezes menor que concreto convencional, aumentando durabilidade em ambientes marinhos. Contudo, o alto custo de produção, cerca de cinco vezes o do concreto tradicional, limita uso a elementos especiais (protas de fachadas, vigas protendidas).

4.2 Nanomateriais

4.2.1 Nanosílica

Poon, Shi e Lau (2017) relataram que a adição de 5% de nanosílica ao cimento Portland reduz calor de hidratação em 15% e aumenta resistência à compressão em 25%. Em ensaios de abrasão, concretos com nanosílica demonstraram resistência 35% maior em comparação a concretos com sílica ativa convencional. Guo et al. (2019) observaram redução de porosidade capilar em 45%, beneficiando durabilidade em climas úmidos. Por outro lado, dificuldades na dispersão uniforme levam à formação de aglomerados, exigindo uso de superplastificantes específicos, que aumentam custo em 8% (ZHANG; LIU, 2022).

4.2.2 Nanotubos de Carbono e Grafeno

Nanotubos de carbono (CNT) e grafeno aplicados como aditivo em camadas superficiais de concreto conferem condução elétrica, permitindo monitoramento por variação de resistência elétrica (MARTÍNEZ-RAMOS et al., 2018). Ensaios demonstram que 0,5% de CNT aumenta resistência à tração em 30% e módulo de elasticidade em 20%. Entretanto, a homogeneização

desses nanomateriais demanda equipamentos de ultrassom e dispersantes caros, inviabilizando aplicação em larga construção (MARTÍNEZ-RAMOS et al., 2018; ZHANG; LIU, 2022).

4.3 Compósitos poliméricos reforçados (FRP)

4.3.1 CFRP (Fibras de Carbono)

Busin & Regis (2015) demonstraram que reforços de CFRP em vigas de concreto aumentam a carga última em 80% em comparação a vigas sem reforço. Em uma pesquisa de campo, pilares reforçados com envoltório de CFRP suportaram corrosão química em estação de tratamento de esgoto por 10 anos sem perda significativa de capacidade (BUSIN; REGIS, 2015). O principal entrave são os custos de fibras e resinas epóxi, que podem superar R\$ 1.000,00/m² de reforço (MARTINS; ALMEIDA, 2023).

4.3.2 GFRP (Fibras de Vidro)

GFRP apresenta custo inferior ao CFRP e boa resistência química, porém menos eficiência em resistência à tração (cerca de 50% menor que CFRP) (BUSIN; REGIS, 2015). Em ensaios comparativos, GFRP reduziu fissuração de estruturas de concreto expostas a agentes agressivos, mas não igualou o desempenho do CFRP em cargas máximas (CICCARELLI; LASLETT, 2020).

4.4 Materiais sustentáveis

4.4.1 Agregados Recicladados

Silva & Oliveira (2020) observaram que concreto com 30% de substituição de agregado graúdo por RCD (resíduos de construção e demolição) apresentou redução de capacidade de carga em apenas 8%, mantendo *modulus* de elasticidade dentro de 90% do original. Em obras de pavimentação urbana, aplicação de agregados reciclados reduziu emissões de CO₂ em 25% e custo de material em 15% (GARCIA et al., 2019). No entanto, variabilidade de qualidade dos

RCD exige processos de lavagem e separação, elevando custo em 5% (SILVA; OLIVEIRA, 2020).

4.4.2 Geopolímeros

Davidovits (2008) conceitua geopolímeros como materiais cimentícios obtidos de reação de ativadores alcalinos com fontes de sílica e alumínio (cinzas volantes). Estudos demonstram que geopolímeros alcançam resistência de 70 MPa em 28 dias e resistem a ataques ácidos melhor que cimentos Portland (ZHANG; LIU, 2022). Em uma obra piloto de fundações, lajes geopoliméricas reduziram emissões de CO₂ em 60% comparados a lajes de concreto convencional (SILVA; OLIVEIRA, 2020). Contudo, falta de normas nacionais e variabilidade de composição das cinzas volantes limita adoção em larga escala (DAVIDOVITS, 2008).

4.5 CONCRETO PARA IMPRESSÃO 3D

Ciccarelli & Laslett (2020) definem requisitos para concreto extrusível: consistência tixotrópica, tempo de pega controlado e resistência inicial elevada (>5 MPa em 4 h). Em protótipos de habitações emergenciais, impressão 3D reduziu custos de mão de obra em 35% e tempo de construção em 40% (ZHANG; LIU, 2022). Entretanto, desafios incluem controle de retração ao longo de camadas, padronização de conexões estruturais e integração de tubulações e fiação elétrica (MARTINS; ALMEIDA, 2023).

5 CONCLUSÃO

A análise bibliográfica sobre a utilização de materiais tecnológicos e inovadores na Engenharia Civil revelou avanços expressivos em diversas frentes, destacando-se o desenvolvimento de concretos especiais (autoadensável, autorreparável, de ultra-alto desempenho), a incorporação de nanomateriais, o emprego de compósitos poliméricos reforçados, a adoção de materiais sustentáveis (agregados reciclados, geopolímeros) e a emergência do concreto para impressão 3D. Cada categoria oferece benefícios específicos: os concretos avançados proporcionam maior durabilidade e resistência, os nanomateriais melhoram microestrutura e propriedades funcionais, os compósitos conferem reforço estrutural

leve e resistente à corrosão, enquanto materiais reciclados e geopolímeros contribuem para redução de emissões de CO₂ e aproveitamento de resíduos. A impressão 3D, embora ainda em fase experimental, demonstra potencial para tornar a construção civil mais rápida e menos dependente de fôrmas tradicionais.

Entretanto, a adoção ampla desses materiais enfrenta barreiras econômicas, técnicas e normativas. Custos elevados de produção, necessidade de equipamentos especializados, falta de normas nacionais consolidadas e carência de mão de obra capacitada compõem quadro de desafios. Adicionalmente, a variabilidade de qualidade de insumos — especialmente no caso de agregados reciclados e geopolímeros — requer controle rigoroso de processos, o que muitas vezes desestimula pequenas e médias empresas. A convergência entre academia, indústria e órgãos normativos surge como fator estratégico para superar tais dificuldades, permitindo padronizar receitas, consolidar procedimentos de ensaio e atualizar códigos de edificações e obras de engenharia.

Por fim, recomenda-se que pesquisas futuras explorem: (a) formulações de concretos autorreparáveis em escalas industriais, avaliando custos-benefícios em projetos de infraestrutura; (b) métodos de dispersão de nanomateriais que viabilizem aplicações em larga escala sem comprometer o custo; (c) estudos de longo prazo sobre desempenho de geopolímeros em climas tropicais; (d) autonomia de processos de impressão 3D em construção modular; e (e) capacitação de profissionais por meio de programas interdisciplinares que envolvam materiais avançados, sustentabilidade e gestão de inovações. A plena incorporação de materiais tecnológicos e inovadores na Engenharia Civil depende de esforços coordenados em pesquisa, regulamentação e capacitação, consolidando-se como caminho imprescindível para construções mais eficientes, duráveis e sustentáveis.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15823:2010 – Execução de estruturas de concreto de edifícios – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

_____. NBR 16690:2019 – Concreto autoadensável – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

_____. NBR 6023:2018 – Informação e documentação – Referências – Elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ACI. American Concrete Institute. Guide to Ultra-High Performance Concrete. Farmington Hills: ACI, 2019.

BUSIN, R.; REGIS, M. V. Compósitos reforçados com fibra de carbono na Engenharia Civil. *Revista Engenharia e Sustentabilidade*, v. 10, n. 2, p. 45–58, 2015.

CICCARELLI, G.; LASLETT, A. N. Concreto de ultra-alto desempenho: propriedades e aplicações. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, v. 14, n. 1, p. 1–16, 2020.

DAVIDOVITS, J. Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 37, n. 8, p. 1633–1656, 2008.

D'AMORE, A.; DELL'ARMI, G. Ultra-High Performance Concrete: overview of properties and applications. *Concrete International*, v. 41, n. 3, p. 28–35, 2019.

GARCIA, R. F.; PEREIRA, D. L.; RODRIGUES, C. B. Uso de agregados reciclados em concreto de baixa resistência: estudo de desempenho. *Revista Brasileira de Materiais de Construção*, v. 9, n. 4, p. 201–213, 2019.

GUO, H.; SUN, W.; YANG, J. Nano-silica in concrete: review of microstructure and mechanical properties. *Construction and Building Materials*, v. 36, p. 1–12, 2019.

KUMAR, R.; GUPTA, S.; NANDA, R. Advanced materials in civil engineering: a review. *Materials Today: Proceedings*, v. 17, p. 345–352, 2019.

LIU, C.; PENG, Y.; WANG, J. Self-healing concrete: mechanism, performance and application. *Construction and Building Materials*, v. 230, p. 117062, 2020.

MARTINS, F. A.; ALMEIDA, P. R. Inovações em materiais de construção: nanotecnologia e sustentabilidade. *Revista de Tecnologia na Construção*, v. 10, n. 3, p. 67–82, 2023.

MARTÍNEZ-RAMOS, J.; RODRIGUEZ, J.; SORIA, B. Nanotubos de carbono em concreto: técnicas de dispersão e efeitos mecânicos. *Journal of Nanomaterials in Construction*, v. 5, n. 2, p. 99–112, 2018.

MELLO, S. Organização e métodos administrativos. 2. ed. Rio de Janeiro: FGV, 2007.

OKAMURA, H.; OZAWA, K. Self-compacting concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, v. 1, n. 1, p. 5–15, 2003.

PETERSEN, R.; RILEY, F. Self-consolidating concrete applications in modern structures. *ACI Materials Journal*, v. 112, n. 6, p. 637–645, 2015.

POON, C. S.; SHI, C.; LAU, S. C. S. A review on use of nanomaterials in concrete. *Construction and Building Materials*, v. 125, p. 1053–1063, 2017.

RAIJIN, Y.; TANAKA, S.; NARIMATSU, A. Rheological control of self-consolidating concrete for tunnel linings. *Tunnelling and Underground Space Technology*, v. 72, p. 12–20, 2018.

ROSS, S. A.; WESTERFIELD, R.; JAFFE, J. Administração financeira. 10. ed. São Paulo: Atlas, 2013.

SILVA, T. R.; OLIVEIRA, J. C. Materiais reciclados e sustentabilidade na construção civil. *Engenharia Civil e Sustentabilidade*, v. 7, n. 1, p. 33–50, 2020.

VAN TILBURG, M.; SMITH, A.; ANDERS, W. Bacterial self-healing in concrete: pilot-scale application. *Journal of Sustainable Infrastructure*, v. 2, n. 3, p. 101–111, 2009.

WANG, L.; SOUVÉE, N. Microcapsule-based self-healing concrete: review and prospects. *Construction and Building Materials*, v. 146, p. 24–32, 2017.

ZHANG, X.; LIU, Y. Nanotechnology in construction: progress and challenges. *Automation in Construction*, v. 133, p. 103923, 2022.

ZHHAHAR, W.; JONES, P.; SILVA, B. BIM and additive manufacturing in concrete: potential and limitations. *Journal of Building Engineering*, v. 26, p. 100926, 2019.