



Desempenho e Durabilidade de Materiais Inovadores em Estruturas Expostas a Ambientes Agressivos: Uma Revisão Bibliográfica

Performance and Durability of Innovative Materials in Structures Exposed to Aggressive Environments: A Literature Review

Diego Ruan Souza da Rocha

Jonathan Guedes da Silva

Diego Pacheco da Silva

Diego Expedito Martins de Oliveira

Alex Gomes Pereira

Resumo: Estruturas expostas a ambientes agressivos como zonas marinhas, áreas industriais e regiões urbanas demandam materiais com elevada durabilidade e resistência à corrosão. Este estudo apresenta revisão bibliográfica, analisando o desempenho de concretos avançados (autoadensáveis, autorreparáveis, de ultra-alto desempenho), nanomateriais, compósitos poliméricos reforçados e geopolímeros em condições de exposição severa. A pesquisa foi conduzida em bases Scopus, Web of Science, SciELO, Google Scholar e repositórios CAPES, selecionando estudos que descrevem mecanismos de degradação, propriedades de durabilidade, métodos de proteção e casos de aplicação. Os resultados indicam que concreto de ultra-alto desempenho (UHPC) reduz a permeabilidade em até 90% comparado ao concreto convencional, prolongando a vida útil em ambientes marinhos. Concreto autorreparável demonstra capacidade de selar fissuras induzidas por corrosão, mantendo integridade estrutural por períodos estendidos. Compósitos com fibra de carbono (CFRP) apresentam imunidade à corrosão eletroquímica, viabilizando reforço em estruturas deterioradas. Geopolímeros exibem resistência superior a ataques ácidos e sulfáticos, reduzindo emissões de CO₂ em até 60%. Conclui-se que a seleção adequada de materiais, associada a projetos de drenagem e proteção superficial, é essencial para garantir durabilidade em ambientes agressivos.

Palavras-chave: durabilidade; ambientes agressivos; concreto avançado; corrosão; nanomateriais; sustentabilidade.

Abstract: Structures exposed to aggressive environments—such as marine zones, industrial areas, and urban regions—require materials with high durability and corrosion resistance. This article presents a literature review analyzing the performance of advanced concretes (self-consolidating, self-healing, and ultra-high-performance), nanomaterials, reinforced polymer composites, and geopolymers under severe exposure conditions. The research was conducted using Scopus, Web of Science, SciELO, Google Scholar, and CAPES repositories, selecting studies that describe degradation mechanisms, durability properties, protection methods, and application cases. The results indicate that ultra-high-performance concrete (UHPC) reduces permeability by up to 90% compared to conventional concrete, thereby extending service life in marine environments. Self-healing concrete demonstrates the ability to seal corrosion-induced cracks, maintaining structural integrity over extended periods. Carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) composites exhibit immunity to electrochemical

corrosion, enabling the reinforcement of deteriorated structures. Geopolymers show superior resistance to acid and sulfate attacks while reducing CO₂ emissions by up to 60%. It is concluded that the proper selection of materials, combined with drainage designs and surface protection measures, is essential to ensure durability in aggressive environments.

Keywords: durability; aggressive environments; advanced concrete; corrosion; nanomaterials; sustainability.

INTRODUÇÃO

Estruturas de engenharia civil localizadas em ambientes agressivos como zonas costeiras, áreas industriais com emissão de gases corrosivos, regiões com ciclos de congelamento-degelo e solos sulfatados enfrentam processos de deterioração acelerada que comprometem sua vida útil. A corrosão de armaduras, ataque por sulfatos, reação álcali-agregado e carbonatação são mecanismos que reduzem a capacidade resistente de estruturas convencionais em períodos de 30 a 50 anos, gerando custos elevados de manutenção e reparação (Zhang; Liu, 2022).

Nas últimas duas décadas, pesquisas intensificaram-se no desenvolvimento de materiais que ofereçam resistência superior a esses processos degradativos. Concretos de ultra-alto desempenho (UHPC), concretos autorreparáveis com encapsulamentos bacterianos ou poliméricos, nanomateriais incorporados à matriz cimentícia e compósitos poliméricos reforçados (CFRP, GFRP) emergiram como alternativas viáveis para prolongar a durabilidade (Davidovits, 2008; Liu *et al.*, 2020; Poon; Shi; Lau, 2017). Paralelamente, geopolímeros à base de cinzas volantes e escórias de alto-forno apresentam resistência química superior ao cimento Portland, reduzindo simultaneamente emissões de CO₂ (Davidovits, 2008; Silva; Oliveira, 2020).

Contudo, a aplicação prática desses materiais em estruturas expostas a ambientes agressivos ainda enfrenta desafios relacionados a custos iniciais elevados, necessidade de projetos de proteção complementares como drenagem e revestimentos, e ausência de normas técnicas específicas que orientem dimensionamento e manutenção preditiva (Martins; Almeida, 2023). Além disso, o conhecimento sobre desempenho de longo prazo em condições reais permanece incompleto, especialmente em climas tropicais e subtropicais.

Esta revisão bibliográfica tem por objetivos: (a) sistematizar categorias de materiais inovadores conforme sua resistência a mecanismos específicos de degradação; (b) analisar propriedades de durabilidade como permeabilidade, resistência a sulfatos e corrosão de armaduras reportadas na literatura entre 2000 e 2024; (c) discutir aplicações em estruturas reais e desafios de viabilização econômica; e (d) apontar lacunas de pesquisa para estudos futuros. A relevância do tema reside na necessidade de conciliar desempenho técnico, sustentabilidade ambiental e viabilidade econômica em projetos de infraestrutura de longa duração.

REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

Mecanismos de Degradação em Ambientes Agressivos

Estruturas expostas a ambientes agressivos enfrentam processos de deterioração multifatoriais e complexos que atuam simultaneamente ou sequencialmente. A compreensão profunda desses mecanismos é fundamental para a seleção adequada de materiais e estratégias de proteção.

A corrosão de armaduras pode ocorrer em decorrência da carbonatação do concreto ou da penetração de íons cloreto. Na carbonatação, a redução do pH da solução intersticial pode provocar a despassivação do aço e iniciar processos eletroquímicos de oxidação (Silva; Oliveira, 2020). A carbonatação é um processo que depende de fatores como permeabilidade, umidade relativa e concentração de CO_2 atmosférico. Em ambientes marinhos, os íons cloreto podem penetrar por difusão através da matriz porosa, contribuindo para a despassivação localizada e para a corrosão das armaduras. Estudos de Davidovits (2008) e Zhang & Liu (2022) demonstram que em zonas costeiras, a penetração de cloretos pode atingir profundidades de 50 a 100 mm em apenas 10 anos quando não há proteção adequada.

Ataques por sulfatos, comuns em solos e águas subterrâneas com concentrações superiores a 1.500 mg/L de SO_4^{2-} , causam expansão da matriz cimentícia através de reações químicas que formam etringita secundária e gesso, provocando desintegração progressiva e perda de resistência mecânica (Zhang; Liu, 2022). O ataque por sulfatos ocorre em duas fases: na primeira, sulfatos penetram a matriz porosa; na segunda, reações expansivas internas geram pressões que fraturam a microestrutura. Pesquisas de Poon, Shi & Lau (2017) indicam que concretos convencionais expostos a ambientes sulfatados podem perder até 40% de sua resistência à compressão em períodos de 5 a 10 anos.

Ciclos de congelamento-degelo em regiões de clima frio induzem pressões internas que fraturam a matriz quando a água congelada se expande em aproximadamente 9% de seu volume. Estruturas em regiões com mais de 50 ciclos anuais de congelamento-degelo apresentam deterioração severa em períodos de 15 a 25 anos se não possuírem proteção adequada (Silva; Oliveira, 2020). Reações álcali-agregado (RAA) provocam expansão deletéria quando agregados reativos encontram hidróxidos alcalinos do cimento, formando gel silicoso que absorve água e expande, causando fissuração interna e perda de integridade estrutural. A combinação desses mecanismos acelera a deterioração de forma sinérgica, reduzindo a vida útil de estruturas convencionais para períodos inferiores ao projetado.

Concretos Avançados e Durabilidade

Concretos de ultra-alto desempenho (UHPC) caracterizam-se por microestrutura extraordinariamente densa, obtida mediante otimização rigorosa

de dosagem, uso de sílica ativa em altas concentrações (40-50% em relação ao cimento) e incorporação de fibras metálicas de alta resistência. A sílica ativa, com partículas entre 100 e 200 nm de diâmetro, preenche vazios entre grãos de cimento, reduzindo porosidade capilar de forma significativa. Essa microestrutura reduz a porosidade capilar de aproximadamente 15-20% em concretos convencionais para menos de 5% em UHPC, diminuindo a permeabilidade em ordens de magnitude e dificultando a penetração de agentes agressivos como cloretos e dióxido de carbono (Ciccarelli; Laslett, 2020).

Estudos de Ciccarelli & Laslett (2020) demonstraram que UHPC com permeabilidade de 10^{-12} m/s (comparada a 10^{-11} m/s do concreto convencional) reduz a penetração de cloretos em 90% após 10 anos de exposição em ambiente marinho. A resistência à compressão de UHPC tipicamente supera 150 MPa, com valores reportados entre 150 e 250 MPa em aplicações especializadas. Além disso, UHPC apresenta resistência à tração entre 7 e 15 MPa, significativamente superior ao concreto convencional que raramente supera 3 MPa. A incorporação de fibras metálicas confere comportamento de endurecimento por deformação (strain-hardening), permitindo que o material continue absorvendo energia mesmo após formação de fissuras, propriedade essencial em estruturas sujeitas a impactos ou carregamentos dinâmicos.

Concretos autorreparáveis incorporam mecanismos biológicos ou poliméricos que selam fissuras induzidas por carregamento ou corrosão sem intervenção externa. Bactérias calcificantes como *Bacillus sphaericus* produzem carbonato de cálcio quando ativadas pela presença de água em fissuras, preenchendo vazios e restaurando impermeabilidade. Microcápsulas poliméricas de sílica ou parafina liberam agentes de cura (resinas epóxi, poliuretanos) quando rompidas pela abertura de fissuras, polimerizando e selando o vazio. Essa capacidade de autorreparação prolonga a vida útil em ambientes onde fissuras são inevitáveis, particularmente em estruturas sujeitas a ciclos de congelamento-degelo ou movimentações térmicas (Van Tilburg *et al.*, 2009; Wang; Souvee, 2017).

Nanomateriais para Proteção e Durabilidade

Nanopartículas de sílica (nanosílica) com diâmetros entre 10 e 100 nm reduzem a porosidade capilar em até 45%, melhorando a resistência à penetração de agentes agressivos. A nanosílica atua como preenchimento ultrafino, ocupando espaços entre partículas de cimento e agregado, criando microestrutura mais densa e menos permeável. Além disso, nanosílica reage com hidróxido de cálcio residual do cimento, formando silicato de cálcio hidratado adicional que fortalece a matriz (Poon; Shi; Lau, 2017). Estudos de Guo *et al.* (2019) demonstraram que concretos com 5% de nanosílica apresentam redução de 35% na profundidade de carbonatação após 10 anos de exposição, em comparação com concretos convencionais.

Nanotubos de carbono (CNT) e grafeno conferem propriedades de condução elétrica e térmica excepcionais, viabilizando monitoramento contínuo de estruturas por variação de resistência elétrica. Quando incorporados em camadas superficiais de concreto, esses nanomateriais permitem detecção precoce de danos através

de mudanças na resistividade elétrica, possibilitando manutenção preditiva e intervenção antes que danos se propaguem (Martínez-Ramos *et al.*, 2018). Nanotubos de carbono também aumentam a resistência à tração em até 30% e o módulo de elasticidade em até 20% quando incorporados em concentrações de 0,5% a 1%.

Nanopartículas de óxido de titânio (TiO_2) incorporadas em revestimentos superficiais conferem propriedades fotocatalíticas, degradando contaminantes orgânicos sob exposição à luz solar e reduzindo a colonização de micro-organismos em até 60%. Essa propriedade é particularmente valiosa em estruturas expostas a ambientes marinhos onde algas e bactérias colonizam superfícies, causando deterioração estética e potencial comprometimento da integridade estrutural (Zhang; Liu, 2022). Entretanto, essas aplicações exigem controle rigoroso de dispersão e dosagem, pois a aglomeração de nanopartículas reduz a efetividade e pode comprometer propriedades mecânicas.

Compósitos Poliméricos Reforçados (FRP)

Compósitos de fibra de carbono (CFRP) e fibra de vidro (GFRP) apresentam elevada resistência à corrosão eletroquímica, viabilizando seu uso em ambientes marinhos e industriais onde o aço convencional se deteriora rapidamente. CFRP oferece resistência à tração superior (entre 3.000 e 4.000 MPa), enquanto GFRP proporciona melhor custo-benefício com resistência química adequada (entre 1.000 e 2.000 MPa). A matriz polimérica que envolve as fibras é tipicamente epóxi ou poliéster, conferindo rigidez e transferência de carga entre fibras. Quando aplicadas como reforço de estruturas de concreto existentes, lâminas de CFRP resultam em aumento de resistência flexural de 60% a 80%, comparado ao reforço com aço convencional, com vantagem adicional de não sofrer corrosão (Busin; Regis, 2015).

Estudos de Busin & Regis (2015) documentaram casos de pilares portuários reforçados com envoltório de CFRP que resistiram à exposição marinha por 15 anos sem sinais de corrosão, enquanto estruturas convencionais adjacentes apresentaram deterioração severa com deslocamento de cobrimento e exposição de armaduras. A durabilidade de CFRP em ambientes marinhos é superior à do aço, com degradação mínima mesmo após exposição prolongada a cloretos e umidade.

Geopolímeros e Resistência Química

Geopolímeros obtidos de reação alcalina entre cinzas volantes e ativadores (hidróxido de sódio ou potássio) exibem resistência superior a ataques por sulfatos e ácidos comparada a cimentos Portland. A reação de polimerização que forma geopolímeros é fundamentalmente diferente da hidratação do cimento Portland, resultando em estrutura cristalina mais estável quimicamente. Estudos de Davidovits (2008) e Silva & Oliveira (2020) demonstraram que geopolímeros resistem a ambientes com pH inferior a 3 e concentrações elevadas de sulfatos (superiores a 3.000 mg/L), mantendo integridade estrutural enquanto cimentos Portland sofrem degradação severa.

Geopolímeros alcançam resistência à compressão de 50 a 100 MPa em 28 dias, com potencial para resistências superiores em curas aceleradas. Além disso, geopolímeros reduzem emissões de CO₂ em até 60% comparados a cimentos Portland convencionais, pois utilizam subprodutos industriais (cinzas volantes, escórias) que de outra forma seriam descartados. A principal limitação está na variabilidade da composição de cinzas volantes, que depende do tipo de carvão queimado e das condições de combustão em usinas termelétricas, exigindo controle rigoroso da qualidade dos insumos.

METODOLOGIA

A presente pesquisa caracteriza-se como revisão bibliográfica de caráter exploratório-descritivo, conduzida de janeiro a junho de 2026.

Palavras-chave utilizadas em português: “durabilidade concreto ambientes agressivos”, “corrosão armaduras”, “concreto autorreparável durabilidade”, “nanomateriais proteção”, “geopolímeros resistência química”. Em inglês: “durability aggressive environments”, “self-healing concrete corrosion”, “nanomaterials concrete protection”, “geopolymers chemical resistance”, “CFRP marine structures”.

Bases consultadas: Scopus, Web of Science, SciELO, Google Scholar e repositórios CAPES. Adicionalmente, examinaram-se normas ABNT (NBR 12655, NBR 6118) e documentos ACI referentes à durabilidade em ambientes marinhos.

Critérios de inclusão: publicações completas entre 2000 e 2024; foco em durabilidade de materiais em ambientes agressivos; estudos experimentais com dados quantitativos; idiomas português, inglês ou espanhol. Critérios de exclusão: resumos sem texto integral; artigos de opinião; publicações anteriores a 2000; estudos puramente conceituais sem dados experimentais.

Procedimentos de seleção: levantamento inicial de 487 documentos; pré-seleção de 156 obras; leitura integral dos documentos pré-selecionados e seleção das fontes que atenderam aos critérios de inclusão e exclusão e apresentaram pertinência ao tema.

Informações extraídas foram organizadas em categorias: (a) mecanismos de degradação; (b) UHPC e durabilidade; (c) concretos autorreparáveis; (d) nanomateriais; (e) compósitos FRP; (f) geopolímeros; (g) aplicações em estruturas reais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

UHPC em Ambientes Marinhos

Ciccarelli & Laslett (2020) conduziram estudos comparativos de longo prazo em ambiente marinho, expondo amostras de UHPC e concreto convencional a ciclos de molhagem-secagem com água do mar contendo aproximadamente

35.000 mg/L de sais dissolvidos. Os resultados demonstraram que UHPC com permeabilidade de 10^{-12} m/s reduziu a penetração de cloretos em 90% após 10 anos de exposição, enquanto concreto convencional com permeabilidade de 10^{-11} m/s apresentou penetração significativa de cloretos até profundidades de 60 a 80 mm. A microestrutura extraordinariamente densa de UHPC, com porosidade capilar inferior a 5%, cria uma barreira praticamente impenetrável a íons cloreto, que penetram através de difusão em poros capilares maiores.

Em projeto de ponte costeira no Japão, pilares de UHPC mantiveram integridade estrutural após 20 anos sem sinais visíveis de corrosão de armaduras, enquanto estruturas convencionais adjacentes apresentaram deterioração significativa com deslocamento de cobrimento e exposição de aço oxidado (Zhang; Liu, 2022). Análises eletroquímicas de potencial de corrosão revelaram que armaduras em UHPC permaneceram no intervalo de potencial passivo (superior a -200 mV em relação ao eletrodo de calomelano saturado), indicando ausência de corrosão ativa, enquanto armaduras em concreto convencional apresentaram potenciais inferiores a -500 mV, indicando corrosão severa em andamento.

O custo elevado de UHPC, aproximadamente 5 a 6 vezes o do concreto convencional, permanece como principal barreira, limitando a aplicação a elementos críticos como pilares, vigas protendidas e estruturas onde a vida útil estendida justifica investimento inicial superior. Análise de ciclo de vida indica que a redução da manutenção compensa o investimento inicial em períodos superiores a 50 anos, particularmente em estruturas de difícil acesso ou onde os custos de manutenção são elevados. Estudos econômicos sugerem que em estruturas portuárias, onde custos de interrupção de operações são significativos, UHPC oferece melhor retorno econômico apesar do custo inicial superior.

Concretos Autorreparáveis em Estruturas Deterioradas

Van Tilburg *et al.* (2009) relataram resultados de ensaios de autorreparação de fissuras induzidas por corrosão em pavimentos expostos a ciclos de congelamento-degelo. Protótipos de concreto autorreparável com encapsulamento de bactérias *Bacillus sphaericus* mantiveram integridade superficial após 50 ciclos de congelamento-degelo, comparados a apenas 20 ciclos para concreto convencional antes de apresentar fissuração severa. As bactérias, quando ativadas pela presença de água em fissuras, produziram carbonato de cálcio que preencheu vazios e restaurou impermeabilidade, impedindo a penetração de água e sais que causariam deterioração adicional.

Wang & Souvee (2017) observaram que microcápsulas poliméricas de sílica contendo resina epóxi selam fissuras de até 0,3 mm de abertura em 28 dias, restaurando a impermeabilidade do concreto. Ensaios de permeabilidade revelaram que concretos com microcápsulas apresentaram redução de 70% na taxa de permeabilidade após autorreparação, comparados a concretos convencionais em que fissuras permaneciam abertas. A efetividade da autorreparação dependeu criticamente da manutenção de condições de umidade adequadas, com melhor desempenho em ambientes com umidade relativa entre 60% e 90%.

Entretanto, Martins & Almeida (2023) apontam que custos de produção de concretos autorreparáveis, cerca de R\$ 800,00/m³, comparados a R\$ 350,00/m³ do concreto convencional, representam um aumento de aproximadamente 130% no custo de material. Essa diferença de custo, associada à dependência de condições de umidade adequadas para ativação de mecanismos de autorreparação, limita a adoção em larga escala a estruturas específicas onde durabilidade estendida justifica investimento. Pesquisas futuras devem focar na redução de custos através da otimização de formulações de encapsulamento e da identificação de bactérias mais eficientes com menor custo de cultivo.

Nanomateriais em Proteção Superficial

Poon, Shi & Lau (2017) observaram em estudos sistemáticos que nanosílica reduz a porosidade capilar em 45%, melhorando a resistência à penetração de cloretos e dióxido de carbono. A redução de porosidade resulta do preenchimento de vazios ultrafinos entre partículas de cimento por nanopartículas de sílica, criando microestrutura mais densa. Além disso, nanosílica reage com hidróxido de cálcio presente na pasta de cimento, formando silicato de cálcio hidratado adicional que fortalece a matriz cimentícia e reduz a quantidade de hidróxido de cálcio disponível para reações deletérias como carbonatação.

Guo *et al.* (2019) demonstraram que concretos com 5% de nanosílica apresentam redução de 35% na profundidade de carbonatação após 10 anos de exposição a ambiente urbano com concentração de CO₂ de aproximadamente 400 ppm. A redução da carbonatação é particularmente importante em estruturas urbanas onde o dióxido de carbono atmosférico penetra na cobertura de concreto, reduzindo o pH e despассивando as armaduras. Estudos de durabilidade indicam que concretos com nanosílica mantêm proteção de armaduras por períodos 30% a 40% superiores comparados a concretos convencionais.

Aplicações de nanopartículas de TiO₂ em revestimentos superficiais conferem propriedades fotocatalíticas, degradando contaminantes orgânicos sob exposição à luz solar e reduzindo a colonização de micro-organismos em até 60% (Zhang; Liu, 2022). Essa propriedade é particularmente valiosa em estruturas marinhas onde algas e bactérias colonizam superfícies, causando deterioração estética e potencial comprometimento da integridade estrutural. Entretanto, dificuldades na dispersão uniforme de nanopartículas e custo elevado inibem a aplicação generalizada. Nanopartículas tendem a aglomerar em suspensão, reduzindo efetividade e potencialmente comprometendo propriedades mecânicas do concreto.

CFRP em Reforço de Estruturas Marinhas

Busin & Regis (2015) documentaram um caso detalhado de pilares portuários reforçados com envoltório de CFRP que resistiram à exposição marinha por 15 anos sem sinais de corrosão, enquanto estruturas convencionais apresentaram deterioração severa. Os pilares reforçados foram submetidos à inspeção visual periódica, ensaios de ultrassom e análises eletroquímicas que confirmaram a

ausência de corrosão das armaduras e a integridade estrutural mantida. Em contraste, pilares convencionais adjacentes apresentaram deslocamento de cobrimento, exposição de armaduras e corrosão ativa com perda de seção transversal de aço em alguns casos.

O custo de reforço com CFRP, aproximadamente R\$ 1.200,00/m², é compensado pela eliminação de manutenção corretiva frequente e extensão significativa da vida útil. Análises econômicas indicam que em estruturas portuárias onde custos de interrupção de operações são elevados, reforço com CFRP oferece melhor retorno econômico apesar do custo inicial superior. Além disso, CFRP oferece vantagens adicionais como redução de peso (importante em reforços de estruturas existentes onde aumento de carga é indesejável) e possibilidade de aplicação em geometrias complexas onde reforço com aço seria impraticável.

Geopolímeros em Ambientes Sulfatados

Davidovits (2008) e Silva & Oliveira (2020) demonstraram em estudos experimentais que geopolímeros alcançam resistência à compressão de 70 MPa em 28 dias e resistem a ataques por sulfatos melhor do que cimentos Portland convencionais. A resistência superior a sulfatos resulta da estrutura cristalina mais estável de geopolímeros, que não contém fases facilmente atacáveis como aluminato tricálcico presente em cimentos Portland. Quando expostos a soluções de sulfato de sódio com concentração de 5% (aproximadamente 50.000 mg/L de SO₄²⁻), geopolímeros mantiveram resistência praticamente inalterada após 12 meses de exposição, enquanto cimentos Portland convencionais apresentaram redução de 40% a 60% em resistência.

Em obra piloto de fundações em solo sulfatado com concentração de sulfatos superior a 3.000 mg/L, lajes geopoliméricas mantiveram integridade estrutural após 12 anos de exposição, enquanto estruturas convencionais apresentaram expansão e fissuração severas (Silva; Oliveira, 2020). Análises químicas de amostras extraídas revelaram que geopolímeros apresentaram profundidade de ataque por sulfatos inferior a 5 mm após 12 anos, enquanto concretos convencionais apresentaram profundidade de ataque superior a 50 mm com formação de etringita secundária e gesso em profundidade.

Além de resistência química superior, geopolímeros reduzem emissões de CO₂ em até 60% comparados a cimentos Portland convencionais, pois utilizam subprodutos industriais (cinzas volantes de usinas termelétricas, escórias de alto-forno) que de outra forma seriam descartados. A produção de cimento Portland convencional apresenta elevada intensidade de emissões de CO₂, enquanto sistemas geopoliméricos podem apresentar menor pegada de carbono, dependendo dos precursores utilizados, dos ativadores alcalinos, das condições de processamento e da energia empregada na produção. Essa redução significativa da pegada de carbono torna geopolímeros particularmente atraentes para projetos com objetivos de sustentabilidade ambiental e conformidade com certificações como LEED ou BREEAM.

A variabilidade da composição de cinzas volantes, que depende do tipo de carvão queimado e das condições de combustão em usinas termelétricas, representa um desafio crítico para a padronização de geopolímeros em escala industrial. Diferentes usinas produzem cinzas com teores distintos de sílica, alumina e óxidos de ferro, exigindo ajustes nas proporções de ativador alcalino para manter consistência de propriedades. Estudos de Silva & Oliveira (2020) demonstram que variações de apenas 5% na composição de cinzas podem resultar em diferenças de até 15% na resistência à compressão final, tornando necessário controle rigoroso de qualidade de insumos.

Além disso, a ausência de normas técnicas brasileiras específicas para geopolímeros limita sua adoção em projetos comerciais, pois projetistas e construtoras preferem trabalhar com materiais consolidados em códigos estabelecidos. A ABNT ainda não publicou norma técnica dedicada a geopolímeros, enquanto normas internacionais como ACI 232.1R-12 oferecem orientações apenas genéricas. Essa lacuna normativa representa uma barreira regulatória significativa para a transição de geopolímeros de aplicações experimentais para uso rotineiro em infraestrutura.

Síntese Comparativa de Desempenho em Ambientes Agressivos

A análise integrada de todas as categorias de materiais revela que cada uma oferece vantagens específicas conforme o tipo de ambiente agressivo e os requisitos estruturais. UHPC é particularmente eficaz em ambientes marinhos onde a penetração de cloretos é o principal mecanismo de degradação, oferecendo redução de permeabilidade que prolonga a vida útil em 50% a 100% comparada ao concreto convencional. Concretos autorreparáveis são mais adequados em estruturas sujeitas a ciclos de congelamento-degelo ou movimentações térmicas, onde fissuras são inevitáveis e o autosselo oferece vantagem significativa de manutenção reduzida.

Nanomateriais como nanosílica oferecem melhorias incrementais em durabilidade a custos moderados, tornando-os viáveis para aplicação generalizada em concretos de desempenho intermediário. Compósitos FRP são ideais para reforço de estruturas existentes em ambientes marinhos ou industriais onde a corrosão do aço é um problema crítico, oferecendo elevada resistência à corrosão eletroquímica em comparação com sistemas convencionais de reforço em aço. Geopolímeros destacam-se em ambientes com ataque químico severo, como solos sulfatados ou exposição a ácidos, onde sua estrutura cristalina oferece resistência superior à dos cimentos Portland.

A seleção adequada de material deve considerar não apenas propriedades de durabilidade isoladas, mas também custo-benefício de longo prazo, disponibilidade de insumos, capacidade de mão de obra local e conformidade com normas técnicas vigentes. Em muitos casos, a combinação de estratégias é mais eficaz do que a dependência de um único material: por exemplo, o uso de UHPC com revestimento de proteção superficial oferece proteção dupla contra a penetração de agentes agressivos, enquanto o concreto autorreparável combinado com drenagem

adequada maximiza a durabilidade em ambientes com ciclos de molhagem-secagem.

Limitações desta Revisão

A presente revisão bibliográfica apresenta limitações que devem ser consideradas na interpretação dos resultados. A seleção de publicações restringiu-se aos idiomas português, inglês e espanhol, potencialmente excluindo contribuições relevantes em outros idiomas. Além disso, a maioria dos estudos sobre desempenho de longo prazo em climas tropicais e subtropicais permanece limitada, com predominância de pesquisas conduzidas em regiões de clima temperado, particularmente na Europa e na América do Norte. Essa lacuna geográfica limita a extrapolação de resultados para contextos brasileiros onde temperatura, umidade relativa e ciclos de molhagem-secagem diferem significativamente de climas temperados.

A variabilidade metodológica entre estudos selecionados, incluindo diferentes protocolos de ensaio, períodos de exposição e condições ambientais simuladas, dificulta comparações diretas de desempenho entre materiais. Alguns estudos utilizaram exposição acelerada em câmaras climáticas, enquanto outros conduziram ensaios em campo com períodos de 10 a 20 anos, resultando em dados não diretamente comparáveis. Adicionalmente, a disponibilidade limitada de dados sobre custos de produção em escala industrial para materiais inovadores como concretos autorreparáveis e geopolímeros restringe análises econômicas de viabilidade comercial.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise bibliográfica sistemática de publicações entre 2000 e 2024 revelou que materiais inovadores apresentam potencial de aplicação em estruturas expostas a ambientes agressivos. Concreto de ultra-alto desempenho reduz permeabilidade em ordens de magnitude, concretos autorreparáveis prolongam vida útil mediante autosselo de fissuras, nanomateriais melhoram propriedades de microestrutura e durabilidade, compósitos poliméricos reforçados apresentam elevada resistência à corrosão e geopolímeros conferem resistência química superior em ambientes com ataque por sulfatos e ácidos.

A adoção generalizada desses materiais em projetos comerciais enfrenta múltiplas barreiras que transcendem aspectos técnicos. Custos elevados de produção, necessidade de projetos de proteção complementares como sistemas de drenagem e revestimentos superficiais, ausência de normas técnicas consolidadas em âmbito nacional e carência de mão de obra capacitada compõem quadro complexo de desafios. A variabilidade de qualidade de insumos, particularmente em geopolímeros, requer controle rigoroso de processos que muitas vezes desestimula pequenas e médias empresas de construção.

Recomenda-se que futuras pesquisas explorem formulações de concretos autorreparáveis com custos reduzidos, métodos de dispersão de nanomateriais em larga escala, estudos de longo prazo sobre desempenho de geopolímeros em climas tropicais, integração de monitoramento estrutural com nanomateriais condutores para manutenção preditiva, padronização de procedimentos de projeto e dimensionamento, e capacitação de profissionais através de programas interdisciplinares.

A convergência entre academia, indústria e órgãos normativos surge como fator estratégico imprescindível para superar barreiras atuais. Padronização de receitas de concretos avançados, consolidação de procedimentos de ensaio, atualização de códigos de edificações e desenvolvimento de normas técnicas específicas para geopolímeros são ações essenciais. Políticas de incentivo fiscal para uso de materiais sustentáveis e investimento em pesquisa aplicada podem acelerar a transição de tecnologias de laboratório para a prática corrente.

A plena incorporação de materiais tecnológicos e inovadores na Engenharia Civil representa caminho imprescindível para construções mais eficientes, duráveis e sustentáveis, alinhadas com objetivos de redução de emissões de carbono e aproveitamento racional de recursos naturais.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6023:2018 – Informação e documentação – Referências – Elaboração**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

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.

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.

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.; RODRÍGUEZ, 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.

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.

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.; SOUVEE, 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.