

Avaliação da durabilidade de compósitos cimentícios reforçados com nanotubos de carbono: uma revisão sistemática da literatura do conhecimento contemporâneo

Evaluating the durability of carbon-nanotube-reinforced cementitious composites: a systematic literature review of contemporary knowledge

Evaluación de la durabilidad de los materiales compuestos cementosos reforzados con nanotubos de carbono: una revisión sistemática de los conocimientos contemporáneos

Bárbara Gomes Martins*

Universidade Federal de Goiás; Escola de Engenharia Civil e Ambiental; Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil.
Goiânia (GO), Brasil.
barbara_gomes16@discente.ufg.br

Andrielli Moraes de Oliveira

Universidade Federal de Goiás; Escola de Engenharia Civil e Ambiental; Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil.
Goiânia (GO), Brasil.

Oswaldo Cascudo

Universidade Federal de Goiás; Escola de Engenharia Civil e Ambiental; Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil.
Goiânia (GO), Brasil.

* Autora correspondente.

CRedit

Contribuição de autoria: Concepção; Curadoria de dados; Análise; Coleta de dados; Metodologia; Redação – rascunho original: MARTINS, B.; Supervisão; Validação; Visualização; Redação – revisão e edição: OLIVEIRA, A.M.; CASCUDO, O.

Conflitos de interesse: Os autores certificam que não há conflito de interesse.

Financiamento: Furnas Centrais Elétricas; Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Aprovação de ética: Os autores certificam que não houve necessidade de aprovação de Comitê de Ética.

Uso de IA: Os autores certificam que não houve uso de inteligência artificial na elaboração do trabalho.

Editores responsáveis: Daniel Sant'Ana (Editor-Chefe); Leandro de Sousa Cruz (Editora Associada); Vanda Alice Garcia Zaroni (Editora Associada); Wanessa Rodrigues de Souza (Assistente editorial).

Resumo

O reforço de matrizes cimentícias com nanotubos de carbono de paredes múltiplas (NTCPM) pode permitir o controle de fissuração em escala nanométrica, contribuindo para a durabilidade e resistência desses compósitos. Um problema relacionado a esses compósitos está associado à dificuldade de dispersão dos NTCPM e baixa interação interfacial fibra-matriz. Assim, este estudo realizou uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) para identificar os principais teores de NTCPM e técnicas de dispersão, correlacionando-os com parâmetros de durabilidade em condições ambientais que degradam matrizes cimentícias, como ambientes com CO₂, cloretos, ácidos e sulfatos. Como método, foi aplicada uma *string* de busca nas bases de dados internacionais entre 2020 e 2024, resultando em 18 artigos. Os resultados mostraram que os NTCPM melhoram as propriedades mecânicas e a microestrutura dos compósitos, além de reduzir o valor dos coeficientes de migração dos íons cloreto e de difusão do CO₂. Isso foi atribuído pelos mecanismos de pontos de nucleação (formação de produtos de hidratação do cimento), pontes de transferência de tensões nas microfissuras e pela densificação da matriz. Embora os NTCPM tenham demonstrado potencial na durabilidade de compósitos cimentícios, a diversidade de metodologias e condições de exposição requer mais estudos para alcançar maior consenso nos resultados.

Palavras-Chave: Compósito; Concreto; Nanotubos de carbono; Durabilidade.

Abstract

Reinforcing cementitious matrices with multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) can enable crack control at the nanoscale, contributing to the durability and strength of these composites. A key challenge associated with these composites is the difficulty in dispersing MWCNTs and the low interfacial interaction between the fiber and the matrix. This study conducted a Systematic Literature Review (SLR) to identify the main MWCNT contents and dispersion techniques, correlating them with durability parameters in environmental conditions that degrade cementitious matrices, such as CO₂, chlorides, acids, and sulfates. A search string was applied to international databases between 2020 and 2024, resulting in 18 articles. The results showed that MWCNTs improve the mechanical properties and microstructure of the composites, in addition to reducing the values of chloride ion migration coefficients and CO₂ diffusion. This was attributed to mechanisms such as nucleation points (formation of cement hydration products), stress transfer bridges in microcracks, and matrix densification. Although MWCNTs have demonstrated potential in enhancing the durability of cementitious composites, the diversity of methodologies and exposure conditions calls for further studies to achieve greater consensus in the results.

Keywords: Composites; Concrete; Carbon nanotubes; Durability.

Resumen

El refuerzo de matrices cementosas con nanotubos de carbono de paredes múltiples (NTCPM) puede permitir el control de fisuración a escala nanométrica, contribuyendo a la durabilidad y resistencia de estos compuestos. Un desafío relacionado con estos compuestos es la dificultad para dispersar los NTCPM y la baja interacción interfacial fibra-matriz. Este estudio realizó una Revisión Sistemática de la Literatura (RSL) para identificar los principales contenidos de NTCPM y técnicas de dispersión, correlacionándolos con parámetros de durabilidad en condiciones ambientales que degradan matrices cementosas, como ambientes con CO₂, cloruros, ácidos y sulfatos. Se aplicó una *string* de búsqueda en bases de datos internacionales entre 2020 y 2024, resultando en 18 artículos. Los resultados mostraron que los NTCPM mejoran las propiedades mecánicas y la microestructura de los compuestos, además de reducir los coeficientes de migración de iones cloruro y la difusión de CO₂. Esto se atribuyó a mecanismos como puntos de nucleación (formación de productos de hidratación del cemento), puentes de transferencia de tensiones en microfisuras y la densificación de la matriz. Aunque los NTCPM han demostrado potencial en la durabilidad de compuestos cementosos, la diversidad de metodologías y condiciones de exposición requiere más estudios para alcanzar mayor consenso en los resultados.

Palabras clave: Compuestos; Concreto; Nanotubos de carbono; Durabilidad.

1 Introdução

As matrizes cimentícias são conhecidas pelas suas características de baixa resistência a tração e pouca capacidade de deformação. De acordo com Metaxa *et al.* (2021), os materiais à base de cimento têm uma nanoestrutura muito complexa que consiste em produtos de hidratação, cristais, partículas de cimento não hidratadas e nanoporosidade, em que o reforço tradicional, inserido em escala macro e micro, não é eficaz. Segundo Carriço *et al.* (2018), os nanotubos de carbono (NTC) mostraram ser candidatos ideais nesse reforço em nanoescala nas matrizes cimentícias.

Iijima (1991) descobriu os NTC e definiu-os como formas metaestáveis de carbono resultantes do enrolamento de um plano de átomos de carbono sob a forma de um cilindro com diâmetro da ordem de 4 a 30 nm e comprimentos da ordem de 3 a 10 μm .

Os NTC possuem impressionantes propriedades mecânicas: apresentam resistência mais de dez vezes maior que aços de alto desempenho, podendo apresentar resistência à tração entre 11 e 63 GPa e módulo de Young entre 450 e 1500 GPa, conforme Gleize e Pelisser (2017).

Eles podem ser encontrados como parede simples (NTCPS), os quais são mais difíceis de serem sintetizados, o que eleva seu custo e praticamente impede sua aplicação em grande escala. Os NTC de paredes múltiplas (NTCPM) podem ser produzidos em larga escala e são mais amplamente utilizados, especialmente quando aplicados em compósitos cimentícios.

Carriço *et al.* (2018) destacam que os NTCPM podem atuar como pontos de nucleação para o crescimento do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), promovendo uma hidratação mais rápida e uniforme dos produtos de hidratação, além de funcionarem como ponte para transferência de tensões em micro/nano fissuras e, por último, também conseguem promover uma matriz mais densa.

As propriedades mecânicas mostraram ser impactadas de diversas maneiras, com relatos apontando desde ganhos sutis ao adicionar NTCPM nas matrizes cimentícias, informado por Bogas, Ahmed e Diniz (2021) e por Gao *et al.* (2020), até significativas melhorias de resistência, constatado por Sarvandani *et al.* (2021), Wang *et al.* (2022), Ming *et al.* (2020) e Karthiyaini *et al.* (2022). Contudo, alguns estudos também apontam para uma diminuição na resistência, como em Mesquita *et al.* (2023), o que foi atribuído à insuficiência do método de dispersão e redução na quantidade de água para hidratação do cimento ao incorporar altos teores de NTCPM.

Além disso, outros estudos têm focado em combinar os NTCPM com material cimentício suplementar, como Liu *et al.* (2022) e Gao *et al.* (2021), até mesmo, compará-los com materiais mais conhecidos na construção civil. Ao substituir parcialmente a massa de cimento por NTCPM ou por sílica ativa, Chukka *et al.* (2022) verificaram que os NTCPM promovem resultados superiores aos da sílica ativa, tanto nas propriedades mecânicas quanto nos parâmetros de durabilidade, atribuindo esse efeito ao menor tamanho de partícula dos NTCPM.

Os resultados encontrados na literatura sempre condicionam os efeitos positivos dos NTCPM à sua boa dispersão dentro do compósito. O processo de ultrassom, conhecido

como sonicação, foi amplamente identificado como método para dispersar as nanopartículas de NTCPM antes de inseri-los na matriz.

Embora a maioria dos estudos relatem benefícios como densificação da matriz, formação de pontos de nucleação e maior transferência de tensões, alguns trabalhos não associam esses efeitos à incorporação de NTCPM. Ao comparar concretos preparados com água deionizada, água deionizada sonicada e água deionizada sonicada com NTCPM, Assi *et al.* (2020) relataram que os efeitos positivos observados na resistência à compressão e na microestrutura não se devem à incorporação de NTCPM, mas sim ao processo de sonicação da água deionizada, pois o processo de sonicação pode produzir CaO_2 e que as duas composições que passaram por sonicação possuem a mesma microestrutura com mais etringita. Além disso, Wang *et al.* (2022) afirmam que os NTCPM não conseguem atuar como ponto de difusão para a nucleação de produtos de hidratação de C_3S (para formação do C-S-H), podendo, somente, promover a formação local de hidróxido de cálcio (CH), o qual possui fraca ligação com o NTCPM, e reduzir a formação de C-S-H.

No entanto, a maior parte dos trabalhos encontrados relatam ganhos na resistência a compressão e flexão. Ainda, ao estudar teores de 0,05% a 0,15% de NTCPM em relação à massa de cimento, Gao *et al.* (2021) já conseguiram ganhos relevantes em baixo teor de NTCPM (0,05%), relatando que o aumento gradativo no teor tornou o concreto mais condutivo e poroso.

Resultados contraditórios englobam o estudo com NTCPM como reforço de material cimentício. Além de existirem diversas empresas que fornecem NTCPM com características distintas e de diferentes formas de sintetização, a resposta dos compósitos cimentícios reforçados com NTCPM diante de situações de exposição também variam. Isso ocorre devido à diversidade de variáveis presentes na literatura. Dentro do grupo de NTCPM foram encontrados diferentes tipos/teores, modificação da superfície (funcionalização com grupos hidroxila ou carboxila), os quais ajudam na dispersão, além de inúmeras metodologias físico-mecânicas e químicas. Quanto às matrizes cimentícias, o tipo/teor de material cimentício e a relação água/aglomerante foram as principais variantes. Esses fatores contribuem para a persistência de resultados contraditórios em muitas pesquisas.

A literatura relata que pequenos teores de NTCPM conseguem promover grandes melhorias nos compósitos, com alterações na microestrutura capazes de promover vantagens tanto nas propriedades mecânica quanto nos parâmetros de durabilidade. Embora muitas análises se concentrem na resistência mecânica e na microestrutura, há uma quantidade significativamente menor de estudos que investigam matrizes cimentícias reforçadas com NTCPM em condições ambientais reais. Compreender o comportamento desses compósitos em tais circunstâncias é crucial para aprimorar o entendimento do impacto dessas nanopartículas e criar uma base sólida para futuras pesquisas.

A fim de verificar o atual estado da arte em que as matrizes cimentícias incorporadas com NTCPM se encontram em relação aos parâmetros de durabilidade, este trabalho faz uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) para verificação do comportamento dos compósitos reforçados com NTCPM diante de situações de exposição ambiental em carbonatação, cloretos, meios ácidos e contato com sulfatos. Assim, foram levantados os detalhes das composições, métodos de dispersão, melhores teores de NTCPM e as

condições de exposição que interferem nos resultados, extraindo as principais alterações nas propriedades mecânicas e na microestrutura.

2 Metodologia

Diante da diversidade de variáveis (tipo e teor de NTCPM, métodos de dispersão, composição da matriz e procedimentos experimentais), que dificultam a comparação entre estudos, optou-se por uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL). Essa abordagem permitiu organizar e sintetizar criticamente as evidências disponíveis, avaliar os efeitos sobre durabilidade, propriedades mecânicas e microestrutura, e identificar lacunas para futuras investigações.

Segundo Dresch, Lacerda e Antunes Jr. (2015), a RSL é um estudo secundário que consolida pesquisas primárias sobre um tema, produzindo síntese estruturada do conhecimento existente. Para este trabalho, adotou-se a metodologia proposta pelos autores, que compreende as seguintes etapas: definição da questão e da estrutura conceitual; seleção do time de trabalho; estratégia de busca; pesquisa, elegibilidade e codificação; garantia de qualidade; síntese dos resultados; e apresentação dos estudos.

2.1 Definição da questão e da estrutura conceitual

A questão de pesquisa que guiou esta RSL foi: *Quais são os efeitos da incorporação de NTCPM em compósitos cimentícios sobre os parâmetros de durabilidade, propriedades mecânicas e microestrutura, considerando diferentes métodos de dispersão, dosagem e condições de exposição ambiental, incluindo carbonatação, cloretos, meios ácidos e contato com sulfatos?*

A estrutura conceitual adotada nesta revisão considerou compósitos cimentícios englobando concretos, argamassas e pastas de cimento Portland. No que diz respeito à durabilidade, foram priorizados parâmetros que refletem a performance dos compósitos frente a diferentes condições de exposição ambiental, avaliadas em ensaios laboratoriais controlados, nos quais os pesquisadores definiram variáveis como tipo de ataque, concentração, tempo e demais condições experimentais. Assim, tanto coeficientes de transporte (ex.: difusão de cloretos e carbonatação) quanto indicadores indiretos de degradação (ex.: perda de massa, variação dimensional e velocidade de pulso ultrassônico) foram considerados válidos nesta revisão. As propriedades mecânicas analisadas incluíram resistência à compressão e à tração/flexão, enquanto as análises microestruturais, realizadas por meio de técnicas de microscopia e ensaios complementares (ex.: porosimetria por intrusão de mercúrio e tomografia de raio X), foram interpretadas em função dos diferentes ambientes de exposição e dos métodos de dispersão utilizados para incorporar os NTCPM.

2.2 Seleção do time de trabalho e estratégia de busca

A RSL foi conduzida por um único pesquisador — a autora principal deste estudo — com supervisão e suporte técnico dos demais coautores. A colaboração envolveu discussões sobre a definição da questão de pesquisa, estrutura conceitual e abordagem metodológica, assegurando consistência e rigor científico na revisão.

Para a estratégia de busca, foram selecionadas quatro bases de dados de abrangência internacional e reconhecida relevância para a área: *Scopus*, *Science Direct*, *Web of Science* e *Engineering Village*.

As palavras-chave foram organizadas em três grupos: nanomaterial de interesse; tipo de matriz cimentícia; e propriedade avaliada. Sendo assim, as palavras-chave selecionadas foram: nanotubos de carbono de paredes múltiplas e sua abreviação NTCPM (nanomaterial); concreto, argamassa, pasta de cimento, compósito cimentício ou cimento Portland (matriz cimentícia); durabilidade ou desempenho (propriedade avaliada), além de utilizar os operadores booleanos para combinar os três grupos. Por se tratar de bases internacionais, as palavras-chave foram inseridas em inglês, o que resultou na *string* de busca: “(“carbon nanotube” OR “CNT”) AND (“concrete” OR “mortar” OR “cement paste” OR “cementitious composites” OR “Portland cement”) AND (“durability” OR “performance”)”. Não foi incluído o termo específico “nanotubo de carbono de paredes múltiplas” (“multi-walled carbon nanotube” ou “MWCNT”), uma vez que a maior parte dos artigos não apresentava essa especificação nos títulos ou resumos. A inclusão desse termo teria restringido excessivamente os resultados, embora todos os trabalhos selecionados nesta RSL tenham utilizado NTCPM.

A *string* foi aplicada no campo de “title, abstract and keywords” das bases de dados selecionadas. Foram aplicados filtros de período (2020–2024), tipo de documento (artigos) e áreas de conhecimento (ciência dos materiais, engenharia, química, ciência ambiental, física e astronomia, engenharia química, matemática, energia e ciência da computação).

Os resultados das buscas foram exportados em arquivos no formato *bibtex* e organizados no programa *Parsifal*, ferramenta voltada ao apoio de revisões sistemáticas. Essa etapa permitiu consolidar as referências de forma padronizada, identificar artigos duplicados e preparar o conjunto de estudos para as fases de triagem e análise subsequente. A última busca foi realizada em 01/07/2024.

2.3 Pesquisa, elegibilidade e codificação

Para garantir consistência e reprodutibilidade na seleção dos estudos, foram previamente definidos critérios de inclusão e exclusão, apresentados nos Quadros 1 e 2, respectivamente. Esses critérios nortearam a triagem e asseguraram que apenas estudos relevantes para esta RSL fossem mantidos, contemplando resultados experimentais sobre a incorporação de NTCPM em compósitos cimentícios, com foco em parâmetros de durabilidade, propriedades mecânicas e microestrutura.

A partir dos resultados exportados para o *Parsifal*, os documentos duplicados foram identificados e removidos. Em seguida, foi realizada a triagem inicial por leitura de títulos e palavras-chave. Quando a leitura de títulos e palavras-chave não era suficiente para determinar a elegibilidade, realizava-se a leitura do resumo e, em seguida, do texto parcial ou completo, aplicando-se de forma consistente os critérios de inclusão e exclusão previamente definidos.

Quadro 1: Critérios de inclusão adotados.

Categoria	Aplicação
Estudos de durabilidade, propriedades mecânicas e microestrutura	Estudos que apresentam parâmetros de durabilidade, propriedades mecânicas e análises microestruturais, antes e após a exposição, permitindo uma avaliação abrangente do efeito dos NTCPM.
Estudos de durabilidade e a microestrutura	Estudos que apresentam parâmetros de durabilidade e análises microestruturais antes e após a exposição, permitindo interpretar os mecanismos internos associados ao desempenho dos compósitos com NTCPM.
Estudos de durabilidade e propriedades mecânicas	Estudos que apresentam parâmetros de durabilidade e propriedades mecânicas (compressão e/ou tração/flexão) antes e após a exposição, permitindo relacionar os efeitos do NTCPM ao comportamento estrutural dos compósitos.
NOTA: Em todos os casos, foram incluídos apenas estudos que avaliaram compósitos submetidos a condições de exposição ambiental controladas (carbonatação, cloretos, sulfatos ou meios ácidos) e que permitiram verificar o efeito do NTCPM de forma isolada, por meio da comparação com matrizes de referência sem adição do nanomaterial.	

Quadro 2: Critérios de exclusão adotados.

Categoria	Aplicação
Estudos que não envolvem compósitos cimentícios	Uso de NTCPM em sensores embutidos em estruturas de concreto armado; aplicação dos NTCPM em outros sistemas construtivos (materiais poliméricos, madeira, compósitos metálicos); matrizes geopoliméricas.
Estudos que não adicionam nanotubos de carbono na matriz	Uso de materiais derivados do carbono, como óxido de grafeno, negro de fumo, fibra de carbono; uso de outro nanomaterial.
Estudos que não apresentam programa experimental	Estudos de revisão, meta-análises, artigos de opinião, capítulos de livros, artigos de congresso, notas técnicas, comunicações breves, resumos expandidos. Trabalhos teóricos, de simulação numérica ou computacionais.
Estudos que não abordam propriedades de durabilidade	Monitoramento estrutural, concreto autossensível e piezoresistivo. Propriedades reológicas, térmicas, elétricas, entre outros, sem avaliar efeitos em parâmetros de durabilidade.
Estudos que não permitem avaliar isoladamente o efeito do NTCPM	O NTCPM foi adicionado como parte fixa da composição, procedendo a variação de outro aditivo (ex.: sílica ativa, metacaulim, fibras metálicas). Combinação dos NTCPM com outros nanomateriais (como óxido de grafeno), sem apresentar grupo de controle isolado com NTCPM.

Na etapa de codificação, as informações relevantes dos artigos selecionados foram extraídas para uma planilha de dados padronizada, contemplando: dados bibliográficos (título, autores, periódico e país); características dos NTCPM (fornecedor, dimensões, pureza, funcionalização da superfície e teor em relação à massa de cimento); método de dispersão (agitação magnética, agitação mecânica e/ou ultrassonação, com ou sem aditivo); composição da matriz cimentícia (tipo de cimento, adições minerais, aditivos químicos, agregados miúdo e graúdo, relação água/aglomerante); parâmetros de durabilidade (coeficientes de difusão em regime estacionário e não estacionário, coeficiente de carbonatação, taxa de corrosão, resistividade elétrica, perda de massa, permeabilidade, perda de massa do aço, absorção de água por imersão e por capilaridade, profundidade de difusão de cloretos); propriedades mecânicas (resistência à compressão e/ou à tração/flexão); e análises microestruturais (microscopia eletrônica de varredura, porosimetria por intrusão de mercúrio e tomografia computadorizada de raio X).

2.4 Garantia de qualidade

Foram priorizados estudos que apresentassem descrição detalhada dos métodos experimentais, caracterização adequada dos NTCPM e resultados quantitativos consistentes. A extração dos dados foi realizada em planilha padronizada, reduzindo riscos de erro de registro e facilitando a comparabilidade entre os trabalhos. Nos casos de dúvida quanto ao atendimento aos critérios de inclusão, procedeu-se a uma nova leitura integral antes da decisão final. Esse processo contou com a revisão crítica dos coautores, assegurando maior confiabilidade e rigor científico à seleção e análise dos estudos.

2.5 Síntese dos resultados e apresentação dos estudos

Os estudos incluídos foram organizados em duas dimensões principais: análise bibliométrica, voltada a caracterizar o panorama das publicações, e análise técnica, destinada a discutir os efeitos da incorporação de NTCPM em compósitos cimentícios sob diferentes condições de exposição. Os dados extraídos foram consolidados em tabelas e analisados de forma descritiva, com prioridade para parâmetros de durabilidade, seguidos por propriedades mecânicas e microestruturais.

A padronização adotada, baseada na comparação com a mistura de referência (REF) e na classificação dos resultados em ganhos, perdas ou ausência de variação significativa, permitiu estruturar a análise de forma consistente. Essa sistematização orienta a apresentação dos resultados, contemplando tanto o panorama bibliométrico quanto a caracterização dos estudos e a discussão sob diferentes ambientes de degradação.

3 Resultados e discussões

Os resultados da RSL são apresentados de forma estruturada, considerando a grande heterogeneidade observada entre os estudos incluídos. Essa diversidade — envolvendo tipo de matriz cimentícia, teor e características dos NTCPM, métodos de dispersão, condições de exposição e parâmetros de ensaio — inviabilizou a realização de uma meta-análise estatística formal. Diante disso, adotou-se a estratégia de Síntese Sem Meta-análise (SWiM), prática recomendada em revisões sistemáticas quando os estudos não permitem comparação quantitativa direta.

Nessa abordagem, os resultados foram padronizados em relação à matriz cimentícia de referência (REF), sendo classificados quanto ao comportamento observado em termos de ganhos, perdas ou ausência de variação significativa nas propriedades avaliadas. Sempre que possível, a discussão foi contextualizada por variáveis-chave como tipo de matriz, teor de NTCPM e tempo de exposição, permitindo identificar tendências gerais, divergências e lacunas. A apresentação dos resultados foi organizada em quatro subitens:

- I. *Dados bibliométricos*, que caracterizam o panorama geral das publicações;
- II. *Caracterização dos artigos incluídos*, reunindo informações bibliográficas, experimentais e metodológicas;
- III. *Ensaio técnicos em ambientes de sulfatos e meios ácidos*, sintetizando os ganhos e perdas de propriedades mecânicas, parâmetros de durabilidade e aspectos microestruturais sob condições de ataque químico agressivo;
- IV. *Ensaio técnicos de cloretos, carbonatação e corrosão de armaduras*, discutindo os efeitos da incorporação de NTCPM sobre propriedades mecânicas,

parâmetros de transporte e indicadores de degradação associados à penetração de íons e à carbonatação da matriz cimentícia.

3.1 Dados bibliométricos

A busca sistemática resultou em 1.408 documentos provenientes das quatro bases de dados selecionadas (Quadro 3). Após a identificação e remoção de 685 registros duplicados, permaneceram 723 documentos únicos, submetidos à triagem inicial por títulos e palavras-chave.

Quadro 3: Resultado da aplicação da *string* de busca nas bases de dados.

Categoria	Quantidade de documentos
<i>Scopus</i>	485
<i>Web of Science</i>	418
<i>Science Direct</i>	267
<i>Engineering Village</i>	238
Total de trabalhos	1408
Total de trabalhos duplicados	685
Total de trabalhos avaliados	723

Do total avaliado nessa etapa, 705 artigos foram excluídos conforme os critérios apresentados na seção 2.3, com detalhamento por etapa mostrado no Quadro 4. Restaram 18 artigos, que atenderam integralmente aos critérios de inclusão e compõem o conjunto analisado nesta RSL.

Quadro 4: Resultado da aplicação dos critérios de exclusão.

Categoria	Quantidade de documentos	Exclusão por título/palavras-chave	Exclusão por resumo	Exclusão por leitura parcial/integral
Estudos que não envolvem compósitos cimentícios	284	204	80	0
Estudos que não adicionam nanotubos de carbono na matriz	92	0	81	9
Estudos que não apresentam programa experimental	54	47	7	0
Estudos que não abordam propriedades de durabilidade	112	0	49	63
Estudos que não permitem avaliar isoladamente o efeito do NTCPPM	163	0	68	95
Total de trabalhos excluídos	705			

Cerca de 40% das exclusões ocorreram porque não envolviam compósitos cimentícios, abrangendo geopolímeros, ligantes asfálticos e outros materiais. Esse resultado mostra a amplitude da *string* de busca, mas também reforça a necessidade de uma triagem criteriosa para selecionar apenas estudos relevantes.

Embora haja crescente interesse em NTCPM, poucos estudos avaliam diretamente a durabilidade ou isolam seu efeito. Quase 25% das exclusões envolveram combinações com outros aditivos, refletindo amadurecimento da área, mas dificultando a identificação de mecanismos específicos dos nanotubos.

O Quadro 5 apresenta a distribuição desses artigos incluídos segundo o escopo de avaliação. Observa-se predominância de investigações que associam simultaneamente durabilidade, propriedades mecânicas e microestrutura, refletindo o interesse recorrente da literatura em elucidar os mecanismos internos responsáveis pelo desempenho dos compósitos cimentícios com NTCPM.

Quadro 5: Resultado da aplicação dos critérios de inclusão.

Categoria	Quantidade de documentos
Estudos de durabilidade, propriedades mecânicas e microestrutura	10
Estudos de durabilidade e a microestrutura	5
Estudos de durabilidade e propriedades mecânicas	4
Total de trabalhos incluídos	18

Para fins bibliométricos, cada artigo foi contabilizado uma única vez. Quando um mesmo estudo abordou mais de um ambiente de exposição (por exemplo, cloretos e sulfatos), ele é discutido nos subitens correspondentes (3.3 e 3.4), mas sem duplicação na contagem. Esse conjunto final, embora reduzido em número, reúne as publicações mais relevantes e metodologicamente consistentes, permitindo uma análise crítica mais comparável e fundamentada.

3.2 Caracterização dos artigos incluídos

Os 18 artigos selecionados, identificados na Figura 1, foram caracterizados quanto a informações bibliográficas, metodológicas e experimentais, a fim de subsidiar a análise crítica apresentada nos subitens 3.3 e 3.4.

A Figura 2 evidencia a ampla heterogeneidade dos nanotubos empregados. O diâmetro externo variou de < 8 nm a 100 nm, com maior concentração na faixa de 10 a 30 nm; o comprimento oscilou entre 0,5 µm e 100 µm. A área específica apresentou valores de 60 a >400 m²/g, enquanto a pureza variou de 85% a > 99%. Embora tenha predominado o uso de superfície pura, alguns estudos relataram nanotubos funcionalizados com –COOH ou –OH. Os fornecedores foram igualmente diversos, incluindo empresas internacionais (Glonatech, Eden Innovations) e laboratórios asiáticos (Chengdu, Shandong, Shenzhen), além de nanotubos sintetizados pelos próprios pesquisadores. Essa diversidade de parâmetros impacta diretamente a relação comprimento/diâmetro (fator de forma) e dificulta comparações diretas entre os estudos.

A Figura 3 sintetiza as variáveis associadas às composições de referência. Predominaram argamassas e concretos, com relações a/c entre 0,18 e 0,55. Os teores de NTCPM adicionados variaram, em geral, de 0,01 a 0,4% da massa de cimento, embora dois estudos tenham testado substituições muito mais elevadas (2,0% e 12,5%) da massa de cimento pelos NTCPM. O nanomaterial foi fornecido em pó, disperso em solução ou sintetizado em laboratório. O método de dispersão mais recorrente combinou ultrassonicação (2 a 120 min) com agitação mecânica e aditivos como superplastificantes (SP) ou polivinilpirrolidona (PVP). A heterogeneidade se estendeu aos procedimentos de

mistura: alguns estudos detalharam minuciosamente a ordem de adição dos constituintes, enquanto outros se limitaram a descrições sucintas ou não forneceram informações completas.

A Figura 4 reúne os parâmetros experimentais dos estudos. Em termos de preparo, predominou a cura úmida por 28 dias antes da exposição. Os ambientes agressivos incluíram soluções de cloretos (3–10% NaCl), sulfatos (Na_2SO_4 e MgSO_4), carbonatação acelerada e meios ácidos (pH 4–6). Os tempos de exposição variaram de 28 a 960 dias, refletindo diferentes estratégias de aceleração dos ataques. As propriedades avaliadas contemplaram resistência à compressão e à flexão, coeficientes de transporte (difusão e migração de cloretos, profundidade de carbonatação), absorção e porosidade, perda de massa, taxa de corrosão e análises de porosidade da microestrutura.

Os estudos incluídos apresentam alta variabilidade metodológica quanto às características dos NTCPM, composição das matrizes, estratégias de dispersão e condições de ensaio. Essa diversidade dificulta comparações diretas, mas fornece um panorama abrangente das práticas experimentais recentes e orienta a análise crítica dos efeitos dos NTCPM em diferentes ambientes de exposição, discutidos nos subitens seguintes.

Figura 1: Dados bibliográficos dos artigos.

Referência	Título do artigo	Periódico	Países das instituições dos autores
Alafogianni et al. (2020)	<i>Effect of Environmental Exposure on the Pore Structure and Transport Properties of Carbon Nanotube-Modified Mortars</i>	<i>Materials</i>	Grécia
Bhatrola, Kothiyal e Sameer (2023)	<i>Durability & mechanical properties of functionalized multiwalled carbon nanotube incorporated pozzolana portland cement composite</i>	<i>Materials Today: Proceedings</i>	Índia
Bogas, Ahmed e Diniz (2021)	<i>Influence of Cracking on the Durability of Reinforced Concrete with Carbon Nanotubes</i>	<i>Applied Sciences</i>	Portugal
Chukka et al. (2022)	<i>Experimental Testing on Mechanical, Durability, and Adsorption Dispersion Properties of Concrete with Multiwalled Carbon Nanotubes and Silica Fumes</i>	<i>Adsorption Science & Technology</i>	Índia
Gamal et al. (2021)	<i>Enhancement of the concrete durability with hybrid nano materials</i>	<i>Sustainability</i>	Egito
Gao et al. (2021)	<i>Effect of the dosage of MWCNT's on deterioration resistant of concrete subjected to combined freeze–thaw cycles and sulfate attack</i>	<i>Structural Concrete</i>	China
Han et al. (2023)	<i>Chloride ion penetration resistance of matrix and interfacial transition zone of multi-walled carbon nanotube-reinforced concrete</i>	<i>Journal of Building Engineering</i>	China
Karthiyaini et al. (2022)	<i>Implications of Multi-Walled Carbon Nanotubes in the Performance of Concrete Subjected to Chloride and Acid Environment</i>	<i>Polish Journal of Environmental Studies</i>	Índia
Li et al. (2020)	<i>Chloride-induced corrosion behavior of reinforced cement mortar with MWCNTs</i>	<i>Science and Engineering of Composite Materials</i>	China
Liu et al. (2022)	<i>Effect of multi-walled carbon nanotube on reactive powder concrete (RPC) performance in sulfate dry-wet cycling environment</i>	<i>Construction and Building Materials</i>	China
MacLeod, Gates e Collins (2020)	<i>Durability characterisation of portland cement-carbon nanotube nanocomposites</i>	<i>Materials</i>	Austrália
Ming et al. (2020)	<i>Portland Cement Partially Replaced by Blast Furnace Slag and Multi-Walled Carbon Nanotubes: Effect on Corrosion Resistance of Carbon Steel Reinforcement in 3% NaCl</i>	<i>International Journal of Electrochemical Science</i>	China
Sarvandani et al. (2021)	<i>Effect of functionalized multi-walled carbon nanotubes on mechanical properties and durability of cement mortars</i>	<i>Journal of Building Engineering</i>	Irã
Sumathi et al. (2023)	<i>Mechanical, Durability, and Microstructure Investigations on High-Strength Concrete Incorporating Nanosilica, Multi-Walled Carbon Nanotubes, and Steel Fibres</i>	<i>Advances in Materials Science and Engineering</i>	Índia
Varisha, Zaheer e Hasan (2021)	<i>Mechanical and durability performance of carbon nanotubes (CNTs) and nanosilica (NS) admixed cement mortar</i>	<i>Materials Today: Proceedings</i>	Índia
Wang et al. (2022)	<i>Effect of CNT-COOH Addition on the Compressive Strength, Chloride Resistance, and Microstructure of Cement Mortar</i>	<i>Advances in Materials Science and Engineering</i>	China
Yu et al. (2024)	<i>Chloride penetration resistance of ultra-high performance concrete with various multi-walled carbon nanotubes</i>	<i>Construction and Building Materials</i>	China
Zhang et al. (2023)	<i>Research on Performance Deterioration of Multi-Walled Carbon Nanotube–Lithium Slag Concrete under the Coupling Effect of Sulfate Attack and Dry–Wet Cycles</i>	<i>Materials</i>	China

Figura 2: Características dos NTCPM incorporados nas matrizes cimentícias.

Referência	Fornecedor	Diâmetro externo (nm)	Comprimento (µm)	Densidade aparente (g/cm ³)	Área específica (m ² /g)	Pureza (%)	Tipo de superfície
Alafogianni <i>et al.</i> (2020)	Glonatech AS	20 - 45	> 10	NI	> 150	> 94	Superfície pura
Bhatrola, Kothiyal e Sameer (2023)	NI	NI	NI	NI	NI	NI	Funcionalizada (não informou qual tipo)
Bogas, Ahmed e Diniz (2021)	TimesNano	20 – 80	10 – 20	2,1	> 60	> 98	Superfície pura
Chukka <i>et al.</i> (2022)	NI	NI	NI	NI	NI	NI	NI
Gamal <i>et al.</i> (2021)	NI	50	10 – 100	NI	NI	NI	Superfície pura
Gao <i>et al.</i> (2021)	NI	10 – 20	5 – 15	NI	100 - 160	> 97	Superfície pura
Han <i>et al.</i> (2023)	Chengdu Organic Chemistry Co.	30 – 80	5 – 10	0,18	> 60	> 95	Superfície pura
Karthiyaini <i>et al.</i> (2022)	NI	25	10	NI	220	> 98	Superfície pura
Li <i>et al.</i> (2020)	Chengdu Institute of Organic Chemistry Research Institute	10 – 20	10 – 30	NI	> 150	> 95	Superfície pura
Liu <i>et al.</i> (2022)	Shandong Dazhan Nano materials Co.	10 – 20	5 – 50	0,06 – 0,1	160 – 210	> 85	Superfície pura
MacLeod, Gates e Collins (2020)	Eden Innovations	25	NI	0,107	NI	> 95	Superfície pura
Ming <i>et al.</i> (2020)	NI	NI	NI	NI	NI	NI	NI
Sarvandani <i>et al.</i> (2021)	Research Institute of Iran Petroleum Industry	out/20	10	NI	250	95 - 99	–COOH (a funcionalização foi feita pelos autores a partir de NTCPM puro adquirido)
Sumathi <i>et al.</i> (2023)	Go Green Technologies	10 – 30	> 10	0,14	110 – 350	99	Superfície pura
Varisha, Zaheer e Hasan (2021)	Adano Technology	10 – 20	1 – 5	NI	370	> 99	Superfície pura e superfície funcionalizada –COOH
		30 – 50	10 – 20		400		
Wang <i>et al.</i> (2022)	Shenzhen Nanoport Co.	5 – 15	10 – 30	0,221	200 – 240	> 95	funcionalizada –COOH
		< 8	10 – 30		> 350		Superfície pura
		< 8	0,5 – 2		> 350		Superfície pura
		20 – 30	10 – 30		> 110		Superfície pura
		20 – 30	0,5 – 2		> 120		Superfície pura
		< 8	10 – 30		> 400		Funcionalizada –COOH
Yu <i>et al.</i> (2024)	NI	< 8	0,5 – 2	NI	> 380	NI	Funcionalizada –OH
		< 8	10 – 30		> 400		Superfície pura
		< 8	0,5 – 2		> 270		Superfície pura
		20 – 30	10 – 30		> 90		Superfície pura
		100 – 200	1 – 10		> 30		Superfície pura
		30 – 60	1 – 10		> 200		Superfície pura
Zhang <i>et al.</i> (2023)	Chengdu Jiakai Technology	40 - 60	< 10	NI	60 - 100	> 98	Superfície pura
Legenda:							
NI – Não informado pelos autores							
OH – Inserção de grupos hidroxila para a funcionalização da superfície							
COOH – Inserção de grupos carboxila para a funcionalização da superfície							

Figura 3: Características dos processos de dispersão e das matrizes cimentícias.

Referência	Matriz	Relação a/c	Teores de NTCPM em relação à massa de cimento	Forma de fornecimento do NTCPM	Método de dispersão	Classe de cimento e sua norma	Procedimento de mistura para obtenção dos compósitos cimentícios
Alafoggianni <i>et al.</i> (2020)	A	0,5	0,2 ; 0,4 ; 0,6 ; 0,8%	NI	(Água + SP-P + NTCPM) foram US (T: NI) → a solução foi colocada em vácuo para remover bolhas durante 45 min.	OPC I 42.5R (ASTM C150 – EUA)	O cimento e a areia foram misturados a seco; a solução de NTCPM foi adicionada.
Bhatrola, Kothiyal e Sameer (2023)	A	0,42	0,0015 ; 0,003 ; 0,006 ; 0,012%	Sintetizados por deposição química a vapor	US (T: 20 min.)	PPC (IS 1489 – Índia)	NI
Bogas, Ahmed e Diniz (2021)	C	0,55	0,10%	NI	(40% da água + NTCPM) passaram por AM (T: 60 min.) e US (T: 45 min.)	OPC 42.5R (EN 197-1 – Europa)	Mistura de todos os agregados em ordem decrescente de tamanho por 3 min com 60% da água; adicionou a solução de NTCPM com o cimento e misturou por 4 min.
Chukka <i>et al.</i> (2022)	C	0,31	1,0 ; 1,5 ; 2,0 ; 3,0% *	NI	NI	OPC 53-grade (IS 12269 – Índia)	NI
Gamal <i>et al.</i> (2021)	C	NI	0,01 ; 0,02 ; 0,04%	NI	(33% da água + nanoargila) misturados e US (T: 10 min.) → (33% da água + NTCPM) misturados e US (T: 10 min.) → (33% da água + SP-P) misturados por 2 min.	OPC 42.5N (EN 197-1 – Europa)	O cimento, areia e brita foram misturados por 2 min. (mistura seca) na betoneira → a dispersão de nanoargila foi colocada e misturada por mais 2 min.; a solução de NTCPM foi colocada e misturada por mais 2 min.; a dispersão de SP-P foi colocada e misturada por mais 2 min.
Gao <i>et al.</i> (2021)	C	0,45	0,05 ; 0,1 ; 0,15%	NI	(40% da água + NTCPM + PVP) passaram por AM (T: 10 min.) e US (T: 60 min.)	OPC 42.5 (GB 175 – China)	Os agregados foram misturados com 60% da água durante 3 min.; o cimento e a solução de NTCPM foram inseridos e misturados.
Han <i>et al.</i> (2023)	C	0,53	0,05 ; 0,1 ; 0,15%	Amostras já dispersas em solução	(40% da água + NTCPM) passaram por AM (T: 60 min.) e US (T: 45 min.)	PC P.II 42.5 (GB 175 – China)	O cimento, areia e brita foram misturados por 2 min. (mistura seca) na betoneira; a solução de NTCPM foi colocada e misturada por mais 2 min.
Karthiyaini <i>et al.</i> (2022)	C	0,35	0,05 ; 0,1 ; 0,15 ; 0,2 ; 0,25%	Amostras em pó	(50 ml de água + SP-R + NTCPM) foram US (T: 30 min.)	OPC 53-grade (IS 1489 – Índia)	A solução de NTC é colocada imediatamente no concreto.
Li <i>et al.</i> (2020)	A	0,4 e 0,5	0,02 ; 0,1 ; 0,2%	NI	(Água + NTCPM + PVP) passaram por AM (T: 15 min.) e US (T: 20 min.)	OPC I 42.5 (GB 175 – China)	A solução de NTCPM é misturada com água e colocada em um misturador de argamassa; adicionou cimento e areia misturou por 1 min.
Liu <i>et al.</i> (2022)	C	0,18	0,10%	Amostras em pó	(Água + NTCPM + PVP) passaram por AM (T: 15 min.) e US (T: 40 min.)	PC P.O.52.5 (GB 175 – China)	A areia, cimento, cinza volante, sílica ativa e pó de escória foram misturados por 1 min.; adicionou-se a água e misturou; adicionou-se a solução de NTCPM e misturou por 3 min.
MacLeod, Gates e Collins (2020)	P	0,4	0,025 ; 0,05 ; 0,1%	Amostras em pó	(Água + SP-P) passaram por AM (T: 2 min.) → adicionou NTCPM e passou por US (T: 10 min.)	GP PC (AS 3972 – Austrália)	3 tipos de composição: No 1º, o cimento foi misturado com a solução de água, SP-P e NTCPM; no 2º, adicionou o NTCPM e o cimento na solução de água e SP-P; no 3º, adicionou cimento na solução de água e NTCPM.
Ming <i>et al.</i> (2020)	C	0,37	12,5%*	NI	NI	PC (GB 175 – China) [tipo não especificado]	NI
Sarvandani <i>et al.</i> (2021)	A	0,485	0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,3 ; 0,4%	NI	(Água + SP-P + NTCPM) passaram por 2 ciclos de US (T: 5 min.)	OPC II (ASTM C150 – EUA)	A solução de NTCPM foi misturada (misturador elétrico a 140 rpm/min.); o cimento foi adicionado e misturado por mais 1 min.; a areia foi adicionada e misturada durante 30 seg.; o conjunto foi misturado por mais 30 seg. a 285 rpm/min; pausa de 90 seg. para retirar a argamassa grudada do fundo; terminou misturando por mais 1 min. a 285 rpm/min.
Sumathi <i>et al.</i> (2023)	C	0,38	0,025 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,15 ; 0,2%	Amostras em pó	(50% da água + SP-P + NTCPM) passaram por Amec (T: 30 min.) → O restante da água foi adicionado e misturado por 60 s. lentamente	OPC 53-grade (IS 12269 – Índia)	A solução de NTC foi colocada no concreto.
Varisha, Zaheer e Hasan (2021)	A	0,55	0,30%	Amostras em pó	(Água + SP-P + nanossilica + NTCPM) foram US (T: 20 min.)	OPC 43-grade (IS 8112 – Índia)	O cimento e a areia foram misturados a seco; adicionou-se a solução de NTCPM.
Wang <i>et al.</i> (2022)	A	0,45	0,01 ; 0,05 ; 0,1%	NI	(Água destilada + NTCPM) foram US (T: 120 min.)	PC P.O.42.5 (GB 175 – China)	O cimento e a areia foram misturados a seco durante 30 seg.; adicionou-se a solução de NTCPM e misturou por mais 3 min.
Yu <i>et al.</i> (2024)	C	0,38	0,25 ; 0,5%	NI	(30 ml de água + SP-R + NTCPM) foram US (T: 5 min.)	OPC III 42.5R (EN 197-1 – Europa)	A solução de NTCPM foi misturada com sílica ativa por 60 seg. (a 1000 ± 100 r/min); o cimento e cinzas volantes foram adicionados e misturados por 60 seg. (a 1000 ± 100 r/min) e mais 120 seg. (a 2000 ± 10 r/min); a areia foi adicionada à mistura e agitada por 60 seg. (a 1000 ± 100 r/min) e por mais 240 seg. (a 2000 ± 10 r/min).
Zhang <i>et al.</i> (2023)	C	0,35 0,4 0,45	0,05 ; 0,1 ; 0,15%	NI	NI	OPC P.O.42.5 (GB 175 – China)	NI

LEGENDA: P = pasta; A = argamassa; C = concreto; * teor de cimento substituído pelos NTCPM; T = tempo; US = ultrassonicação; AM = agitação magnética; AMec = agitação mecânica; SP-P = superplastificante à base de policarboxilato; SP-R = superplastificante redutor de pega; PVP = aditivo polivinilpirrolidona; PC = *Portland Cement* ; OPC = *Ordinary Portland Cement* ; PPC = *Pozzolana Portland Cement* ; GP PC = *General Purpose Portland Cement* .

Figura 4: Condições e ensaios realizados.

Referência	Processo de cura	Descrição das condições de exposição ambiental estudada e normas de ensaio	Ensaio mecânicos	Análises microestruturais	Ensaio de durabilidade diretos e indiretos
Alafoganni <i>et al.</i> (2020)	Desmoldado após 24h, cura em água por 27 dias	Imersão em solução de sulfato de sódio (5% Na ₂ SO ₄), de acordo com a ASTM C 1012, durante 112 dias.	-	Porosidade pela porosimetria por intrusão de mercúrio (S/E e DE)	Absorção por capilaridade (S/E e DE); Perda de massa (S/E e DE)
Bhatrola, Kothiyal e Sameer (2023)	Desmoldado após 24h, cura imersa em água	Imerso em solução de ácido sulfúrico (1% H ₂ SO ₄) durante 90 dias.	Resistência à compressão (S/E e DE); Resistência à flexão (S/E)	-	Resistividade elétrica (S/E)
Bogas, Ahmed e Diniz (2021)	Desmoldado após 24 h, cura úmida (20 ± 2 °C e UR de 95%)	Carbonatação: Após 14 dias de cura, as amostras permaneceram em câmara seca até o ensaio (de acordo com a LNEC E391). Os CP foram colocados na câmara de carbonatação (23 ± 3°C, UR de 60 ± 5% e 5 ± 0,1% CO ₂), durante 28, 56 e 90 dias. Cloreto: Os CP foram mantidos em câmara úmida até a data do ensaio de migração rápida de cloretos (de acordo com LNEC E463 e Ntbuild 492)	Resistência à compressão (S/E)	-	Absorção de água por capilaridade (S/E); Coeficiente de carbonatação K _c (DE); Coeficiente de difusão de migração de íons cloreto D _{cl} (DE)
Chukka <i>et al.</i> (2022)	Desmoldado após 24h, cura imersa em água	Cloreto: ensaio de migração rápida de cloretos	Resistência à compressão (S/E); Resistência à flexão (S/E)	-	Absorção de água (S/E); Porosidade (S/E); Perda de massa (DE); Carga elétrica passante (DE)
Gamal <i>et al.</i> (2021)	Desmoldado após 24 h, cura úmida (20 ± 2 °C e UR de 95%)	Cloreto: ensaio de resistência à penetração de cloreto (de acordo com a ASTM C1202)	Resistência à compressão (S/E); Resistência à flexão (S/E)	-	Absorção de água por capilaridade (S/E); Aderência das barras (S/E); Carga elétrica passante (DE); Taxa de corrosão (S/E) pela ASTM C876 (ensaio de corrosão)
Gao <i>et al.</i> (2021)	Desmoldado após 24h, cura úmida por 24 dias	Imersão em solução de sulfato de sódio (5% Na ₂ SO ₄) por 4 dias e 200 ciclos de congelamento e descongelamento	Resistência à compressão (S/E e DE)	-	Perda de massa (S/E e DE)
Han <i>et al.</i> (2023)	Desmoldados após 24 h, cura úmida (20 ± 2 °C e UR de 95%)	Cloreto: mantidos 28 dias em câmara úmida até o ensaio de migração rápida (de acordo com GB/T 50082-2009).	-	-	Porosidade por porosimetria por intrusão de mercúrio (S/E); Profundidade de difusão de íons cloreto (migração rápida e do agregado) (DE); Coeficiente de difusão em estado não estacionário D _{ns} (DE)
		Cloreto: mantidos 28 dias em câmara úmida até o ensaio. Imersão em solução de cloreto de sódio (3%NaCl) durante 120 dias			Íons cloreto livres (DE)
		Após o agregado gráudo ser processado, foi colocado em um molde e preenchido com argamassa. Foi desmoldado com 24h e curados por 28 dias até o ensaio de migração rápida (ensaio empírico).			Profundidade de difusão de íons cloreto na matriz e na zona de transição (DE)
Karthiyaini <i>et al.</i> (2022)	Desmoldado após 24h, cura imersa em água por 28 dias	Imersão em solução de ácido sulfúrico (5% H ₂ SO ₄) durante 56 dias.	Resistência à compressão (S/E e DE)	-	Densidade (S/E e DE) das duas situações
		Cloreto: imersão em solução de cloreto (5 kg de sais de cloreto de sódio NaCl + 100 kg de água) durante 56 dias.			
Li <i>et al.</i> (2020)	NI	Cloreto: após 28 dias de cura, imersão em solução de cloreto de sódio (3%NaCl) para ensaio de migração rápida (NORDTEST)	Resistência à compressão (S/E)	-	Coeficiente de difusão em estado não estacionário D _{ns} (DE); Coeficiente de difusão em estado estacionário D _s (DE); Resistividade elétrica (DE); Taxa de corrosão (DE); Perda de massa de aço (DE);
		Cloreto: após 28 dias de cura, imersão em solução de cloreto de adóio (3%NaCl) durante 65 dias para ensaio migração natural (NT Build 443)			
		Cloreto: Imersão de concreto armado em solução cloreto de sódio (3,5% NaCl), durante 3 dias, para corrosão eletroquímica			
Liu <i>et al.</i> (2022)	Desmoldado após 24h, cura em água por 28 dias	Ciclos de imersão em solução de sulfato de sódio (10% Na ₂ SO ₄), por 12h, e secagem em estufa (60°C), por 11h, finalizando com resfriamento de 1h, durante 150 dias.	Resistência à compressão (DE)	Porosidade pela tomografia computadorizada de Raio-X (DE)	Perda de massa (DE)
		Ciclos de imersão em solução de sulfato de magnésio (10% MgSO ₄), por 12h, e secagem em estufa (60°C), por 11h, finalizando com resfriamento de 1h, durante 150 dias.			
MacLeod, Gates e Collins (2020)	Desmoldados após 24h, imerso em água com cal (23 ± 2°C)	Cloreto: Após 28 dias, imersão em duas soluções: uma com hidróxido de sódio e cloreto de sódio (NaOH 0,6 M+ 0,6 M NaCl) de um lado e outra somente com cloreto de sódio (0,6 M NaCl) do outro lado, durante 270 dias.	-	-	Absorção de água (S/E); Permeabilidade à água (S/E); Coeficiente de difusão em estado estacionário D _s (DE)
Ming <i>et al.</i> (2020)	Desmoldado após 24h, cura úmida (20 ± 2 °C e UR de 95%)	Cloreto: Imersão de concreto armado em solução cloreto de sódio (3,5% NaCl), durante 30 dias, para espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE)	Resistência à compressão (S/E)	-	Taxa de corrosão (DE)
Sarvandani <i>et al.</i> (2021)	Desmoldado após 24h, cura imersa em água com cal (para avaliar amostras sem exposição)	Após ser desmoldagem com 24h, procedeu-se a imersão em solução de sulfato de sódio e magnésio (5% Na ₂ SO ₄ + 5% MgSO ₄) em pH 4 durante 960 dias.	Resistência à compressão (S/E e DE); Resistência à flexão (S/E e DE)	-	Absorção de água por capilaridade (S/E)
Sumathi <i>et al.</i> (2023)	Desmoldado após 24h, cura imersa em água	Imersão em solução de ácido sulfúrico (1% H ₂ SO ₄) durante 60 dias.	Resistência à compressão (S/E)	-	Absorção de água por capilaridade (S/E); Perda de massa (DE)
		Imersão em solução de ácido clorídrico (1% HCl) durante 60 dias			
Varisha, Zaheer e Hasan (2021)	Desmoldado após 24h, cura em água por 28 dias	Imersão em solução de sulfato de magnésio (10% MgSO ₄) em pH 6.5 durante 120 dias.	Resistência à compressão (DE); Resistência à flexão (DE)	-	Expansão do comprimento (DE); Velocidade de pulso ultrassônico (DE)
Wang <i>et al.</i> (2022)	Desmoldados após 24 h, cura úmida (20 ± 2 °C e UR de 90%)	Cloreto: ensaio de migração rápida (de acordo com GB/T 50082-2009)	-	-	Porosidade por porosimetria por intrusão de mercúrio (S/E); Profundidade de difusão de íons cloreto (DE); Coeficiente de difusão em estado não estacionário D _{ns} (DE)
Yu <i>et al.</i> (2024)	Desmoldado após 24 h, cura imersa em água por 180 dias	Cloreto: Secagem por 24 h (50°C) e imersão solução de 10% de NaCl (de acordo com GB/T 50082-2009)	-	-	Coeficiente de difusão em estado não estacionário D _{ns} (DE)
Zhang <i>et al.</i> (2023)	Desmoldado após 24h, cura úmida por 26 dias	As amostras foram secas (80°C) por 2 dias, procedeu-se a ciclos de imersão em solução de sulfato de sódio (5% Na ₂ SO ₄) em pH 6-8, por 15h, secagem natural por 1h e secagem em estufa (80°C), por 6h, finalizando com resfriamento de 2h, durante 120 dias.	Resistência à compressão (DE)	-	Perda de massa (DE)

LEGENDA: CP = corpos de prova; S/E = propriedade avaliada sem exposição agressiva (condição de referência); DE = propriedade avaliada depois da exposição agressiva; NI = não informado.

Outro aspecto relevante é a ausência de padronização quanto ao uso de normas técnicas para os ensaios de exposição. Diversos estudos não mencionam a norma seguida, enquanto outros apenas a utilizam como referência inicial, mas introduzem modificações em parâmetros fundamentais. Por exemplo, Liu *et al.* (2022) avaliaram o ataque por sulfato de magnésio empregando solução a 10%, em vez da concentração de 5% prevista pela norma chinesa (GB/T 50082). Os autores justificam a alteração com base na realidade de determinadas regiões da China, onde estruturas de concreto estão expostas a concentrações significativamente mais elevadas de sulfato de magnésio. Esse tipo de adaptação evidencia tanto a preocupação em reproduzir condições locais de maior severidade quanto a dificuldade em estabelecer comparações diretas entre diferentes estudos.

3.3 Técnicos: sulfatos e ácidos

A Figura 5 reúne os principais resultados dos trabalhos que investigaram compósitos cimentícios expostos a soluções de sulfatos e/ou a meios ácidos, totalizando 9 pesquisas. Vale ressaltar que o estudo de Karthiyaini *et al.* (2022) analisou mais de um grupo de exposição, constando aqui e na seção 3.4.

Para padronizar a interpretação, adotou-se a convenção de que valores positivos representam ganhos de desempenho e valores negativos indicam perdas, sempre em relação à mistura de referência (REF), o que também foi aplicado em 3.4. Assim, para propriedades em que valores mais altos são desejáveis (ex.: resistência mecânica), a variação foi calculada como: $(NTCPM - REF) / REF$. Já para aquelas em que valores menores são favoráveis (ex.: perda de massa, coeficientes de transporte, porosidade), utilizou-se: $(REF - NTCPM) / REF$. Com essa padronização, ganhos foram destacados em verde e perdas em laranja; variações absolutas $\leq 5\%$ foram consideradas indiferentes e não receberam cor.

Os termos “S/E” (sem exposição) e “DE” (depois da exposição) indicam, respectivamente, medições antes e após o contato com o meio agressivo; os resultados são expressos como variação percentual em relação à REF e a idade do ensaio aparece entre parênteses. Quando um estudo reportou a propriedade aos 28 dias e esse ponto diferiu de forma relevante das idades posteriores, mantivemos também o valor de 28 dias na Figura 5 — como em Bhatrola, Kothiyal e Sameer (2023). Quando não agregou evidência adicional, exibimos apenas as idades mais representativas — como em Sarvandani *et al.* (2021). Quando um mesmo estudo testou múltiplos teores de NTCPM, a Figura 5 apresenta apenas o traço com desempenho mais destacado (maior ganho ou maior perda) para facilitar a leitura.

A maioria dos estudos avaliou sulfatos de sódio e/ou magnésio; um número menor investigou ácido sulfúrico e apenas um abordou ácido clorídrico. Em todos os casos tratou-se de exposição externa, e os ganhos/perdas são sempre comparados à REF sob a mesma condição.

De maneira geral, a adição de NTCPM proporcionou ganhos de resistência mecânica em relação às misturas de referência, mesmo após a exposição a sulfatos e ácidos. Contudo, todos os compósitos apresentaram perda progressiva de desempenho em comparação às suas próprias condições iniciais, evidenciando que os nanotubos atuam apenas como retardadores da deterioração. Esse efeito se mostrou mais claro em ensaios de longa

duração, como o de Sarvandani *et al.* (2021), reforçando que resultados obtidos em idades iniciais podem superestimar o benefício dos NTCPM.

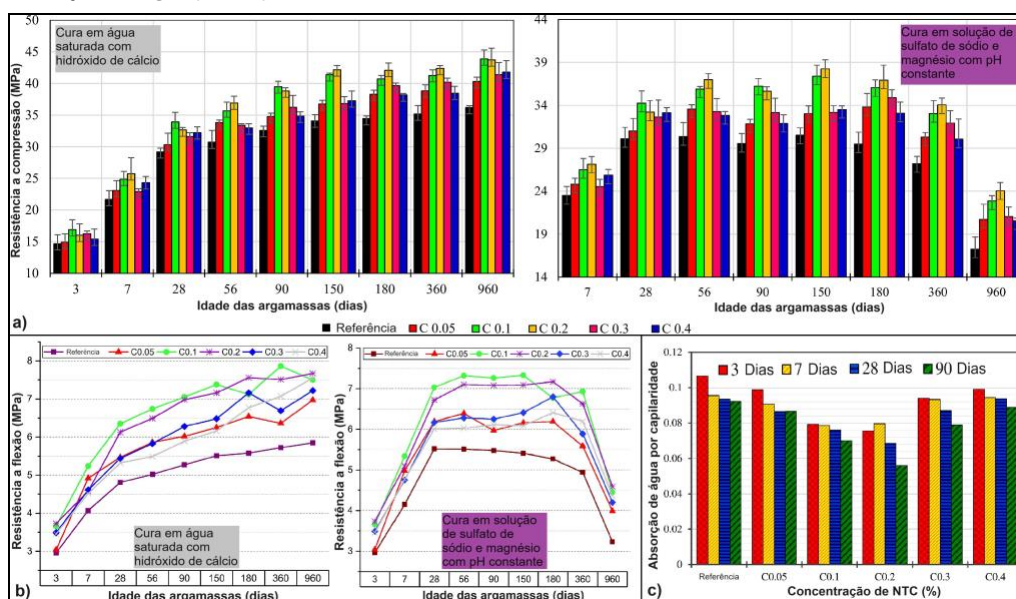
Figura 5: Resultados principais de trabalhos com ataque de sulfatos e ácidos.

Referência	Matriz	Teor de NTCPM	Exposição	Resistência mecânica				Parâmetros de durabilidade e microestrutura		
				Ganho / Perda na Compressão		Ganho / Perda na Flexão		Propriedade avaliada	Ganho / Perda	
				S/E	DE	S/E	DE		S/E	DE
Alafogianni <i>et al.</i> (2020)	A	0,5	Sulfato de sódio (5% Na ₂ SO ₄)	-	-	-	-	Porosidade	+ 21% (112 dias)	+ 16% (112 dias)
								Absorção de água	+ 51% (112 dias)	+ 52% (112 dias)
								Perda de massa	+ 52% (112 dias)	+ 7% (112 dias)
Bhatrola, Kothiyat e Sameer (2023)	A	0,42	Ácido sulfúrico (1% H ₂ SO ₄)	- 2,7% (28 dias) + 1,3% (90 dias)	+ 42,8% (28 dias) + 67% (90 dias)	- 1,9% (28 dias) - 3,5% (90 dias)	-	Resistividade elétrica	+ 34,6% (28 dias) + 9,8% (90 dias)	-
Gao <i>et al.</i> (2021)	C	0,05	Sulfato de sódio (5% Na ₂ SO ₄)	+ 6,5% (28 dias)	+ 13% (200 dias)	-	-	Perda de massa	-	+ 26% (200 dias)
Karthiyaini <i>et al.</i> (2022)	C	0,15	Ácido sulfúrico (5% H ₂ SO ₄)	+ 27% (28 dias)	+ 52% (56 dias)			Densidade	+ 2% (28 dias)	+ 52% (56 dias)
Liu <i>et al.</i> (2022)	C	0,1	Sulfato de sódio (10% Na ₂ SO ₄)	-	+ 36% (150 dias)	-	-	Porosidade	-	- 25% (150 dias)
								Perda de massa	-	- 14% (150 dias)
			Sulfato de magnésio (10% MgSO ₄)		+ 59% (150 dias)			Porosidade	-	+ 13% (150 dias)
								Perda de massa	-	+ 11% (150 dias)
Sarvandani <i>et al.</i> (2021)	A	0,2	Sulfato de sódio e magnésio (5% Na ₂ SO ₄ + 5% MgSO ₄)	+ 19% (960 d)	+ 41% (960 dias)	+ 30% (960 dias)	+ 42% (960 dias)	Absorção de água	+ 39% (90 dias)	-
Sumathi <i>et al.</i> (2023)	C	0,2	Ácido sulfúrico (1% H ₂ SO ₄)	+ 20% (28 dias)	-	-	-	Perda de massa	-	+ 28% (60 dias)
			Ácido clorídrico (1% HCl)					Absorção de água	+ 70% (28 dias)	-
								Perda de massa	-	+ 64% (60 dias)
Varisha, Zaheer e Hasan (2021)	A	0,3	Sulfato de magnésio (10% MgSO ₄)	-	+ 31,4% (120 dias)	-	+ 15,3% (120 dias)	Expansão do comprimento	-	+ 13% (120 dias)
								Velocidade de pulso ultrassônico	-	+ 25% (120 dias)
Zhang <i>et al.</i> (2023)	C	0,15	Sulfato de sódio (5% Na ₂ SO ₄)	-	+ 21% (120 dias)	-	-	Perda de massa	-	+ 20% (120 dias)
LEGENDA: A = argamassa; C = concreto; * teor de cimento substituído pelos NTCPM; S/E = propriedade avaliada sem exposição agressiva (condição de referência); DE = propriedade avaliada depois da exposição agressiva.										
Realce dos compósitos com NTCPM que melhoraram as propriedades.						Realce dos compósitos com NTCPM que pioraram as propriedades.				

A Figura 6 ilustra os resultados de Sarvandani *et al.* (2021), um dos estudos mais extensos, conduzido por até 960 dias. Observa-se que, tanto em resistência à compressão quanto à flexão, os compósitos com NTCPM apresentaram desempenho superior à argamassa de referência, especialmente para teores de 0,1% e 0,2%. Os resultados mostraram que, embora todas as argamassas tenham perdido resistência ao longo do tempo de exposição, todas que continham NTCPM apresentaram desempenho superior à REF, alcançando ganhos de até 41% em compressão e 42% em flexão com 0,2% de NTCPM aos 960 dias. Os autores atribuíram esse efeito à formação de uma rede de nanotubos, à maior densificação da microestrutura e ao efeito ponte entre produtos de hidratação. Ainda assim, verificou-se que a degradação foi inevitável em períodos prolongados, confirmando que os NTCPM apenas retardam os mecanismos de deterioração.

Nas primeiras idades, a difusão de íons sulfato pode preencher poros capilares e formar gipsita e etringita secundária, produzindo um ganho aparente de resistência e menor permeabilidade. Com a continuidade da exposição, o crescimento desses produtos provoca expansão volumétrica, tensões internas e destacamentos, culminando em queda acentuada de resistência. Esse comportamento, evidenciado por Sarvandani *et al.* (2021), mostra que avaliações restritas às primeiras idades superestimam o benefício dos NTCPM; ensaios de longa duração são indispensáveis para capturar o regime de degradação.

Figura 6: a) resistência a compressão das argamassas em cura com água saturada em cal (lado esquerdo) e com sulfato (lado direito) durante 960 dias; b) resistência a flexão das argamassas em cura com água saturada em cal (lado esquerdo) e com sulfato (lado direito) durante 960 dias; c) absorção de água por capilaridade até 90 dias.



Fonte: adaptado de Sarvandani et al. (2021)

Enquanto nas argamassas de Sarvandani et al. (2021), expostas simultaneamente aos sulfatos de sódio e magnésio, o ponto de inflexão da resistência ocorreu por volta de 150 dias, nos concretos de alto desempenho avaliados por Liu et al. (2022), submetidos a exposições isoladas a cada sulfato, a inflexão surgiu já aos 60 dias. Essa discrepância relaciona-se principalmente à diferença de relação a/c (0,485 nas argamassas e 0,18 nos concretos), mas também ao regime de exposição adotado, de imersão contínua em Sarvandani e de ciclos seco-úmido em Liu.

Ao comparar os dois agentes agressivos separadamente, Liu et al. (2022) concluíram que o sulfato de sódio foi mais nocivo que o de magnésio, promovendo maior aumento de porosidade. Contudo, segundo Escadeillas e Hornain (2014), o sulfato de magnésio também é reconhecido como altamente agressivo, pois reage com a portlandita e degrada progressivamente o C–S–H, formando brucita e etringita secundária. Nesse cenário, os NTCPM contribuíram para retardar a difusão dos íons e reforçar a matriz por meio de nucleação e pontes entre fissuras, ainda que não tenham evitado a degradação.

As análises microestruturais indicaram que a influência dos NTCPM está associada à compactação da matriz e à modificação da distribuição dos poros. Em alguns casos, observou-se redução da porosidade total, mas redistribuição para poros de maior interconectividade, o que compromete a durabilidade em longo prazo. Entre as técnicas aplicadas destacaram-se porosimetria por intrusão de mercúrio, adsorção de nitrogênio, absorção capilar, permeabilidade a água e gases, além de ensaios complementares como velocidade de pulso ultrassônico e perda de massa como indicador de deterioração.

Em estudo de menor duração, Alafogianni et al. (2020) relataram que argamassas com até 0,4% de NTCPM apresentaram redução de porosidade de até 16% após 112 dias de exposição a sulfato de sódio. Antes da exposição, a adição de nanotubos aumentou a proporção de poros de gel e capilares médios, reduzindo os grandes poros. Contudo, após a exposição, esse efeito foi parcialmente revertido, com crescimento de poros capilares

médios e redução dos poros de gel, indicando que o ganho inicial não se sustentou a longo prazo.

Os estudos em meios ácidos foram menos numerosos, mas indicaram que a incorporação de NTCPM também contribuiu para atenuar os efeitos da degradação, sobretudo em ácido sulfúrico. O único estudo com ácido clorídrico mostrou tendência semelhante, mas os autores forneceram menos informações sobre condições experimentais, o que limita comparações mais precisas.

Em síntese, os NTCPM promoveram ganhos consistentes em resistência mecânica e parâmetros de durabilidade em relação às misturas de referência, especialmente em períodos iniciais de exposição a sulfatos e ácidos. Contudo, em todos os casos, os compósitos sofreram degradação progressiva ao longo do tempo, reforçando que os nanotubos atuam como retardadores da deterioração, e não como barreira definitiva. O consenso entre os autores é que a melhoria está associada à densificação da matriz, à formação de pontos de nucleação e ao efeito ponte entre microfissuras, mas que a durabilidade em longo prazo permanece dependente da severidade e duração da exposição.

3.4 Técnicos: corrosão induzida por cloretos e por carbonatação

A Figura 7 mostra os resultados de carbonatação, ação dos cloretos e corrosão de armadura, totalizando 10 pesquisas. Somente um artigo abordou a carbonatação da matriz, retornando um resultado positivo e trazendo uma abordagem empírica de análise na fissuração.

Bogas, Ahmed e Diniz (2021) adotaram uma abordagem diferenciada ao comparar fissuras artificiais e naturais (Figura 8). Os autores observaram que o coeficiente de carbonatação foi sempre maior nas regiões fissuradas, mas a presença de NTCPM reduziu a largura dessas fissuras e resultou em melhora de até 18% na resistência à carbonatação. Apesar da variabilidade entre as condições de fissuração, o estudo sugere que os nanotubos podem atenuar a propagação da frente de carbonatação em zonas críticas.

O método apresentou ser interessante, mas com muita variação entre os resultados, principalmente entre as fissuras artificial e natural, pois as profundidades da fissura natural ficaram aleatórias. Segundo Bogas, Ahmed e Diniz (2021), a taxa de carbonatação foi significativamente maior na área fissurada do que na região não fissurada. Além disso, o K_c aumentou em concretos com fissuras mais largas.

Esses resultados estão de acordo com Carriço *et al.* (2018), onde a resistência à carbonatação do concreto armado com NTCPM pode ser melhorada em até 16% quando comparada ao concreto não armado, sendo pouco afetada pelo tipo de NTCPM. Segundo Carriço *et al.* (2018), como suas amostras foram progressivamente secas, desenvolveram-se microfissuras e pequenos microporos tornaram-se disponíveis para difusão de gás. Portanto, os NTCPM poderiam contribuir melhor para esta propriedade.

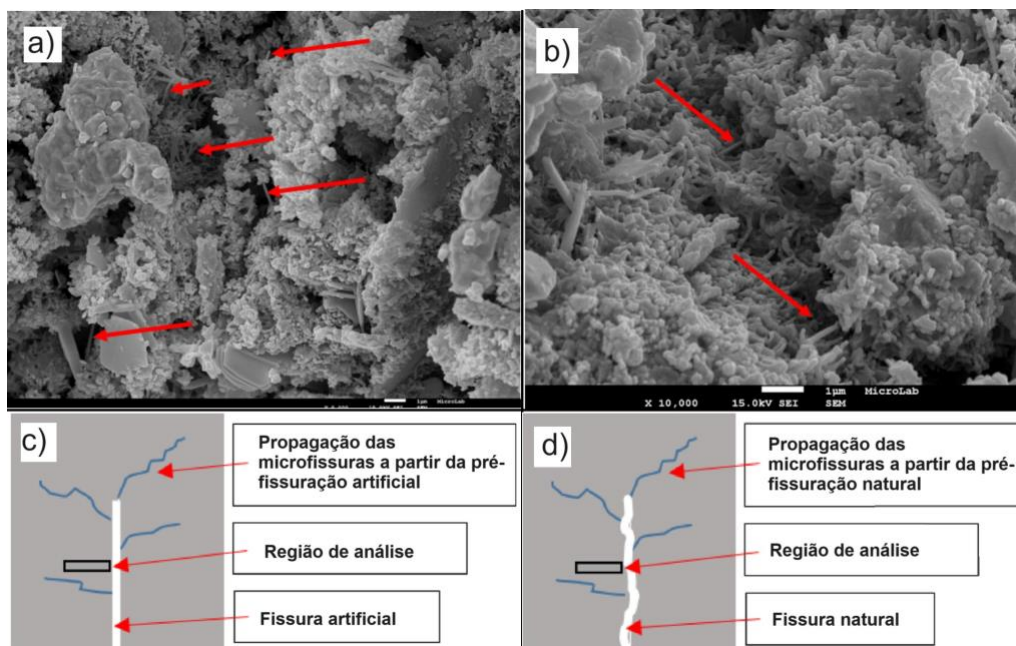
As pontes de NTCPM atravessando fissuras pode contribuir para a redução da conectividade dos poros e conseqüentemente para a difusão de CO_2 no concreto, restando a propagação de fissuras e reduzindo a largura das microfissuras. É possível que o efeito de nucleação melhorou a resistência à carbonatação ao densificar a microestrutura do concreto e ao aumentar a quantidade de substâncias carbonatadas na matriz cimentícia (Bogas; Ahmed; Diniz, 2021).

Figura 7: Resultados principais de trabalhos com cloretos e carbonatação.

Referência	Matriz	Teor de NTCPM	Exposição	Resistência mecânica				Parâmetros de durabilidade e microestrutura		
				Ganho / Perda na Compressão		Ganho / Perda na Flexão		Propriedade avaliada	Ganho / Perda	
				S/E	DE	S/E	DE		S/E	DE
Bogas, Ahmed e Diniz (2021)	C	0,10%	Carbonatação	+ 9,7% (28 dias)	-	-	-	K _c	-	+ 18% (90 dias)
			Cloreto (migração rápida)					Absorção capilar	+ 12% (28 dias)	-
								D _{ns}	-	+ 6,7%
Chukka et al. (2022)	C	2,0% *	Cloreto	+ 17% (90 dias)	-	+ 40% (90 dias)	-	Absorção de água	+ 8% (90 dias)	-
								Porosidade	+ 9% (90 dias)	-
								Perda de massa	-	+ 23% (28 dias)
								Carga elétrica passante	-	+ 68% (28 dias)
Gamal et al. (2021)	C	0,01%	Cloreto	+ 13% (28 dias)	-	+ 15% (28 dias)	-	Absorção de água	- 150% (28 dias)	-
								Carga elétrica passante	-	- 78% (28 dias)
								Taxa de corrosão	-	+ 62% (30 dias)
								Aderência das barras	- 18%	- 31%
Han et al. (2023)	C	0,15%	Cloreto (migração rápida)	-	-	-	-	Profundidade de difusão	-	+ 26% (28 dias)
			Cloreto (migração natural)					D _{ns}	-	+ 19% (28 dias)
			Cloreto: análise da zona de transição					Íons cloreto livres	-	+ 17% (120 dias)
								Profundidade de difusão na matriz	-	+ 17% (28 dias)
								Profundidade de difusão na zona de transição	-	+ 17% (28 dias)
			Cloreto					Porosidade	+ 53% (28 dias)	-
Karthiyaini et al. (2022)	C	0,15%	Cloreto	+ 27% (28 dias)	+ 30% (56 dias)	-	-	Densidade	+ 1,2% (28 dias)	+ 0,9% (56 dias)
Li et al. (2020)	A	0,20%	Cloreto (migração rápida)	+ 12% (28 dias)	-	-	-	D _{ns}	-	- 427%
			Cloreto (migração natural)					D _s	-	- 18% (65 dias)
			Corrosão eletroquímica por cloreto de sódio					Resistividade elétrica	- 16% (28 dias)	-
								Taxa de corrosão	-	- 330% (3 dias)
								Perda de massa de aço	-	- 385 % (3 dias)
MacLeod, Gates e Collins (2020)	P	0,05%	Cloreto	-	-	-	-	Absorção de água	+ 1,2 (28 dias)	-
								Permeabilidade a água	- 280 (28 dias)	-
								D _s	-	+ 63% (270 dias)
Ming et al. (2020)	C	12,5%*	EIE em cloreto de sódio	+ 41% (30 dias)	-	-	-	Taxa de corrosão	-	+ 44% (30 dias)
Wang et al. (2022)	A	0,10%	Cloreto (migração rápida)	+ 25% (28 dias)	-	-	-	Porosidade	+ 34% (28 dias)	-
								D _{ns}	-	+ 26% (28 dias)
								Profundidade de difusão	-	+ 13% (28 dias)
Yu et al. (2024)	C	0,25%	Cloreto (migração rápida)	-	-	-	-	D _s	-	+ 74%
LEGENDA: P = pasta; A = argamassa; C = concreto; * teor de cimento substituído pelos NTCPM; S/E = propriedade avaliada sem exposição agressiva (condição de referência); DE = propriedade avaliada depois da exposição agressiva.										
Realce dos compósitos com NTCPM que melhoraram as propriedades.						Realce dos compósitos com NTCPM que pioraram as propriedades.				

Ainda, os autores também avaliaram migração rápida de cloreto, observando que também obteve uma diferença gigantesca no coeficiente de difusão na zona fissurada naturalmente, comparada com o método padrão. Isolando o efeito do NTCPM, houve uma significativa redução comparando os dois concretos dentro da região, em até 35% no coeficiente de difusão nessa. Isso mostra a importância em se aplicar métodos que se aproximem de uma exposição real e o que acontece após uma fissuração.

Figura 8: a) e b) MEV do concreto com NTCPM fissurado artificialmente (a) e naturalmente (b), onde as setas indicam pontas ou pontes de NTCPM; c) e d) esquema da região do concreto analisada na análise MEV.



Fonte: adaptado de Bogas, Ahmed e Diniz (2021).

Yu *et al.* (2024) avaliaram argamassas com diferentes tipos de NTCPM (variando em diâmetro, comprimento, funcionalização e morfologia) e verificaram reduções de até 77% na penetração de cloretos para teores de 0,25% e 0,5%. Esses ganhos foram atribuídos ao refinamento da microestrutura, com formação de géis C–S–H mais densos, cristais de CH menores e redução de poros capilares. De modo semelhante, Han *et al.* (2023) observaram reduções proporcionais ao teor de NTCPM em concretos, destacando o efeito de preenchimento de poros e de ponte de fissura como principais mecanismos.

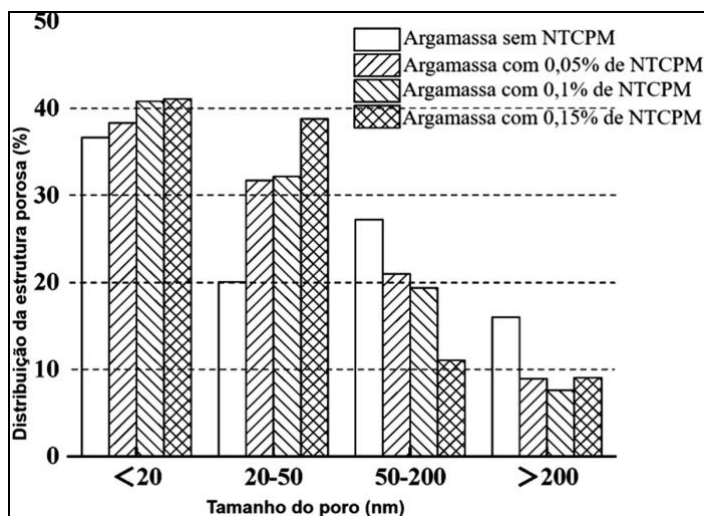
Isso também é validado na Figura 9, mostrando que a distribuição da estrutura porosa melhora gradativamente com o aumento do teor de NTCPM.

Ainda, Han *et al.* (2023) também contribuíram com teste empírico, como o ensaio que avalia a profundidade de difusão dos íons cloreto na zona de transição entre calcário e argamassa. Apesar das reduções tanto na matriz quanto na zona de transição, de -17% (Figura 7), quando se compara essas duas situações, notou-se que a profundidade de difusão dos íons cloreto aumentam na zona de transição, independente da presença de NTCPM. Isso mostra a importância em avaliar métodos mais sofisticados na difusibilidade dos cloretos. Han *et al.* (2023) afirmam que a condição de imersão natural, a incorporação de NTCPM preenche os poros do concreto e melhora a estrutura e conectividade dos poros, a compacidade e a resistência aos íons cloreto do concreto.

Com exceção do estudo de MacLeod, Gates e Collins (2020), que avaliou pastas, a maioria dos trabalhos sobre compósitos cimentícios sob ação de cloretos e carbonatação apontou melhorias nas propriedades mecânicas e nos parâmetros de durabilidade com a adição de NTCPM. Esses ganhos foram atribuídos à compactação da matriz, à atuação dos nanotubos como pontos de nucleação e ao efeito ponte na transferência de tensões em microfissuras. Contudo, alguns estudos ressaltaram que a simples redução da

porosidade total não implica necessariamente menor interconectividade ou tamanho dos poros, o que pode comprometer o desempenho em longo prazo.

Figura 9: Distribuição do tamanho do poro.



Fonte: adaptado de Han *et al.* (2023).

Os resultados referentes à corrosão de armaduras foram menos consistentes. Ming *et al.* (2020) observaram benefícios expressivos ao substituir parcialmente o cimento por escória de alto-forno e adicionar 12,5% de NTCPM: os concretos expostos a solução de 3,5% NaCl apresentaram maior resistência à compressão, menor absorção de água e redução significativa da densidade de corrente de corrosão, atribuídas à menor permeabilidade ao cloreto e à diminuição da condutividade da solução intersticial.

Por outro lado, Li *et al.* (2020) e Gamal *et al.* (2021) relataram resultados negativos. Esses trabalhos, além de menos numerosos, carecem de informações detalhadas sobre metodologia e condições de ensaio, o que dificulta comparações diretas. De forma geral, portanto, ainda não há evidências conclusivas de que os NTCPM contribuam de maneira consistente para reduzir a corrosão de armaduras.

4 Considerações finais

Esta revisão sistemática evidenciou que a incorporação de NTCPM em compósitos cimentícios, mesmo em baixos teores, tende a melhorar a resistência mecânica e a refinar a microestrutura, refletindo em ganhos temporários frente a ataques por sulfatos, cloretos, carbonatação e meios ácidos. Os mecanismos mais recorrentes apontados são a formação de pontos de nucleação, a função de ponte entre microfissuras e a densificação da matriz.

Contudo, verificou-se que tais benefícios não eliminam a degradação em longo prazo, atuando apenas como retardadores da deterioração. Além disso, a grande heterogeneidade dos nanotubos disponíveis (dimensões, pureza, funcionalização), aliada às diferentes metodologias de dispersão, composição das matrizes e condições de ensaio, explica a ausência de consenso em parte dos resultados.

Assim, embora os NTCPM se mostrem promissores para aumentar a durabilidade de compósitos cimentícios, a consolidação desse potencial depende de maior padronização experimental, avaliação em condições de exposição mais próximas da realidade e análise

comparativa entre diferentes rotas de dispersão. Futuras pesquisas devem priorizar a otimização do teor e da dispersão dos nanotubos, buscando maximizar benefícios com menor custo e maior aplicabilidade prática.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Furnas Centrais Elétricas pelo suporte financeiro destinado à realização da pesquisa, bem como à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelas bolsas de doutorado concedidas.

Referências

- ALAFOGIANNI, P.; DASSIOS, K.; TSAKIROGLOU, C. D.; MATIKAS, T. E.; BARKOULA, N. Effect of Environmental Exposure on the Pore Structure and Transport Properties of Carbon Nanotube-Modified Mortars. **Materials**, v. 13, n. 4543, pp. 1-18, 2020. <https://doi.org/10.3390/ma13204543>
- ASSI L. N.; AL-HAMADANI Y. A. J.; DEEVER E.; SOLTANGHARAEI V.; ZIEHL P.; YOON Y. Effect of Sonicated Deionized Water on The Early Age Behavior of Portland Cement-Based Concrete and Paste. **Construction and Building Materials**, v. 247, n. 118571, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118571>
- BHATROLA, K.; KOTHIYAL, N. C.; SAMEER, K. M. Durability & mechanical properties of functionalized multiwalled carbon nanotube incorporated pozzolana portland cement composite. **Materials Today: Proceedings**, v. 93, pp. 249-256, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.178>
- BOGAS, J.A.; AHMED, H.H.; DINIZ, T. Influence of Cracking on the Durability of Reinforced Concrete with Carbon Nanotubes. **Applied Sciences**, v. 11, n. 1672, pp. 1-18, 2021. <https://doi.org/10.3390/app11041672>
- CARRIÇO, A., BOGAS, J. A., AHMED, H., GUEDES, M. Durability of multi-walled carbon nanotube reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 164, pp. 121-133, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.221>
- CHUKKA, N. D. K. R.; REDDY, B. S.; VASUGI, K.; REDDY, Y. B. S.; NATRAYAN, L.; THANAPPAN, S. Experimental Testing on Mechanical, Durability, and Adsorption Dispersion Properties of Concrete with Multiwalled Carbon Nanotubes and Silica Fumes. **Adsorption Science & Technology**, v. 2022, n. 4347753, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/4347753>
- DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; ANTUNES JR, J. A. V. **Design Science Research: Método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia**. Porto Alegre: Bookman, 2015.
- ESCADEILLAS, G., HORNAIN, H. **A durabilidade do concreto frente a ambientes quimicamente agressivos**. In: OLLIVIER, J.P., VICHOT, A. (org), Durabilidade do Concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo como ambiente. 2ª Ed. São Paulo: IBRACON, pp. 433-507, 2014.
- GAMAL, H. A.; EL-FEKY, M.S.; ALHARBI, Y. R.; ABADDEL, A. A.; KOHAIL, M. Enhancement of the concrete durability with hybrid nano materials. **Sustainability**, v. 13, n. 1373, pp. 1-17, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13031373>

- GAO, F.; TIAN, W.; WANG, Y.; WANG, F. Effect of the dosage of MWCNT's on deterioration resistant of concrete subjected to combined freeze–thaw cycles and sulfate attack. **Structural Concrete**, v. 22, pp. E955-E965, 2021. <https://doi.org/10.1002/suco.202000148>
- GLEIZE, P. J. P.; PELISSER, F. **Nanotecnologia e Materiais de Construção**. In: Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. 3ª Ed. São Paulo: IBRACON, 2017. v. 2, pp. 1668-1694.
- HAN, Y., SHAO, S., FANG, B., SHI, T., ZHANG, B., WANG, X., ZHAO, X. Chloride ion penetration resistance of matrix and interfacial transition zone of multi-walled carbon nanotube-reinforced concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 73, n. 106587, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106587>
- IJIMA, S. Helical microtubules of graphitic carbon. **Nature**, v. 354, pp. 56-58, 1991. <https://doi.org/10.1038/354056a0>
- KARTHIYAINI, S.; RAMESH Kannan, M.; SHANMUGASUNDARAM, M.; BHASKAR, A. V.; SUPRAKASH, A. S.; SENTHAMARAIKANNAN, K. Implications of Multi-Walled Carbon Nanotubes in the Performance of Concrete Subjected to Chloride and Acid Environment. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 21, pp. 5071-5081, 2022. <https://doi.org/10.15244/pjoes/150380>
- LI, W., LIU, Y., JIANG, Z., FANG, Y., ZHAN, N., LONG, W., XING, F. Chloride-induced corrosion behavior of reinforced cement mortar with MWCNTs. **Science and Engineering of Composite Materials**, v. 13, n. 4097, 2020. <https://doi.org/10.1515/secm-2020-0029>
- LIU, G., KAN, D., CAO, S.C., CHEN, Z., LYU, Q. Effect of multi-walled carbon nanotube on reactive powder concrete (RPC) performance in sulfate dry-wet cycling environment. **Construction and Building Materials**, v. 343, n. 128075, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128075>
- MACLEOD, A. J. N.; GATES, W. P.; COLLINS, F. Durability characterisation of portland cement-carbon nanotube nanocomposites. **Materials**, v. 13, n. 4097, 2020. <https://doi.org/10.3390/ma13184097>
- MESQUITA, E.; MATOS, A. M.; SOUSA, I.; VIEIRA, M.; SANTOS, L. P. M. Studying the Incorporation of Multi-Walled Carbon Nanotubes in High-Performance Concrete. **Sustainability**, v. 15, n. 12958, 2023. <https://doi.org/10.3390/su151712958>
- METAXA, Z. S.; TOLKOU, A. K.; EFSTATHIOU, S.; RAHDAR, A.; FAVVAS, E. P.; MITROPOULOS, A. C.; KYZAS, G. Z. Nanomaterials in cementitious composites: An update. **Molecules**, v. 26, n. 1430, 2021. <https://doi.org/10.3390/molecules26051430>
- MING, Yang; CHEN, Ping; LI, Ling; HU, Cheng. Portland Cement Partially Replaced by Blast Furnace Slag and Multi-Walled Carbon Nanotubes: Effect on Corrosion Resistance of Carbon Steel Reinforcement in 3% NaCl. **International Journal of Electrochemical Science**, v. 15, pp. 9003-9012, 2020. <https://doi.org/10.20964/2020.09.35>
- SARVANDANI, M. M.; MAHDIKHANI, M.; AGHABARATI, H.; FATMEHSARI, M. H. Effect of functionalized multi-walled carbon nanotubes on mechanical properties and durability

of cement mortars. **Journal of Building Engineering**, v. 41. n. 102407, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102407>

SUMATHI, A.; ELAVARASI, D.; KARTHIKEYAN, B.; SHOBANA, P.; SELVARAJ, S. K.; DEWANGAN, S.; MOLLA, B. Mechanical, Durability, and Microstructure Investigations on High-Strength Concrete Incorporating Nanosilica, Multi-Walled Carbon Nanotubes, and Steel Fibres. **Advances in Materials Science and Engineering**, n. 2164200, 2023.
<https://doi.org/10.1155/2023/2164200>

VARISHA; MOHD, M. Z.; SYED, D. H. Mechanical and durability performance of carbon nanotubes (CNTs) and nanosilica (NS) admixed cement mortar. **Materials Today: Proceedings**, v. 42, pp. 1422-1431, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.151>

WANG, X.; FENG, D.; SHI, X.; ZHONG, J. Carbon nanotubes do not provide strong seeding effect for the nucleation of C3S hydration. **Materials and Structures**, v. 55, n. 172, 2022. <https://doi.org/10.1617/s11527-022-02008-5>

YU, F.; SUN, T.; DONG, S.; DING, S.; HAN, B. Chloride penetration resistance of ultra-high performance concrete with various multi-walled carbon nanotubes. **Construction and Building Materials**, v. 421, n. 135751, 2024.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135751>