

INSTITUTO FEDERAL DO SERTÃO PARAIBANO
CAMPUS CAJAZEIRAS

MILENNA SOARES DA SILVA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA CONDIÇÃO SUPERFICIAL DO AÇO NA
CORROSÃO DE ARMADURAS EM CONCRETOS COM ALTO TEOR DE FÍLER
CALCÁRIO À CARBONATAÇÃO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA
LITERATURA**

Cajazeiras-PB
2026

MILENNA SOARES DA SILVA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA CONDIÇÃO SUPERFICIAL DO AÇO NA
CORROSÃO DE ARMADURAS EM CONCRETOS COM ALTO TEOR DE FÍLER
CALCÁRIO À CARBONATAÇÃO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA
LITERATURA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal dos Sertão Paraibano-*Campus* Cajazeiras, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil, sob Orientação do Prof. Dr. Robson Arruda dos Santos.

Cajazeiras-PB
2026

IFPB / Campus Cajazeiras
Coordenação de Biblioteca
Biblioteca Prof. Ribamar da Silva
Catalogação na fonte: Cícero Luciano
Félix CRB-15/750

S586a	Silva, Milenna Soares da. Análise da influência da condição superficial do aço na corrosão de armaduras em concretos com alto teor de fíler calcário à carbonatação : uma revisão sistemática da literatura / Milenna Soares da Silva.– 2026. 36f. : il. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2026. Orientador(a): Prof. Dr. Robson Arruda dos Santos. 1. Construção civil. 2. Análise estrutural. 3. Filer de calcário. 4. Sustentabilidade. I. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba. II. Título.
-------	--

IFPB/CZ

CDU: 624:502(043.2)

MILENNA SOARES DA SILVA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA CONDIÇÃO SUPERFICIAL DO AÇO NA
CORROSÃO DE ARMADURAS EM CONCRETOS COM ALTO TEOR DE FÍLER
CALCÁRIO À CARBONATAÇÃO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA
LITERATURA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Bacharelado em
Engenharia Civil do Instituto Federal dos
Sertão Paraibano-*Campus* Cajazeiras, como
parte dos requisitos para a obtenção do Título
de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 29 de julho de 2026.

BANCA EXAMINADORA



Robson Arruda dos Santos – IFSPB-*Campus* Cajazeiras
Orientador

Documento assinado digitalmente
 CINTHYA SANTOS DA SILVA
Data: 04/08/2026 08:40:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Cinthyia Santos da Silva – IFSPB-*Campus* Cajazeiras
Examinador 1

Documento assinado digitalmente
 KARINA ESTRELA EGIDIO
Data: 03/08/2026 20:03:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Karina Estrela Egídio – IFSPB-*Campus* Cajazeiras
Examinador 2

À minha família, em especial aos meus pais, padrinhos e irmãos, pelo amor, incentivo e apoio durante toda a minha trajetória acadêmica. Ao meu esposo, por estar ao meu lado, pela compreensão nos momentos de ausência, pelo companheirismo e por sempre me incentivar a seguir em frente na busca pelos meus objetivos. A todos aqueles que acreditaram em mim e contribuíram, de alguma forma, para que este sonho se tornasse realidade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por sua presença constante em minha vida, por me conceder força, sabedoria, coragem e perseverança para enfrentar os desafios ao longo desta trajetória acadêmica.

À minha família, especialmente aos meus pais, padrinhos e irmãos, pelo amor, apoio e incentivo em todos os momentos. A vocês, dedico minha eterna gratidão, pois cada gesto de apoio e cada demonstração de confiança foram essenciais ao longo desta trajetória. Esta conquista carrega um pouco de cada um de vocês, esta vitória é nossa.

Ao meu esposo, por ser meu alicerce e por caminhar ao meu lado em todos os momentos. Agradeço por acreditar em mim, por me incentivar a seguir em frente diante dos desafios e por tornar essa caminhada mais leve. Esta conquista é por nós e pela família que estamos construindo juntos.

Ao meu trio da faculdade, agradeço pela amizade, parceria e companheirismo ao longo dessa jornada acadêmica. Dividimos desafios, aprendizados, conquistas e inúmeros momentos que tornaram essa caminhada mais leve. Levo comigo não apenas as experiências vividas, mas também a gratidão por todo o apoio, incentivo e pelos laços de amizade que construímos durante essa etapa tão importante da nossa formação.

Ao meu orientador, pela dedicação, paciência e pelos conhecimentos compartilhados, que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço pelas orientações, contribuições e pelo suporte oferecido durante todas as etapas de elaboração desta pesquisa.

Ao professor responsável pelo Trabalho de Conclusão de Curso, pela disponibilidade, pelos direcionamentos e pelas contribuições fundamentais para a organização e desenvolvimento deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora, agradeço pela disponibilidade, pelas valiosas contribuições e por participarem deste momento tão importante da minha formação.

Aos professores do curso, expresso minha gratidão pelos ensinamentos e pela dedicação ao longo dessa trajetória.

Agradeço, ainda, a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho e para a concretização deste sonho.

Por fim, agradeço a mim mesma, por nunca ter desistido dos meus sonhos, mesmo diante das dificuldades, dos medos e das incertezas. Agradeço pela coragem de enfrentar cada desafio, pela força de vontade de seguir em frente quando desistir parecia mais fácil e pela determinação

de acreditar que eu seria capaz. Cada obstáculo superado fortaleceu minha caminhada e me mostrou que a verdadeira coragem não está na ausência do medo, mas na decisão de continuar apesar dele. Hoje, tenho orgulho da minha trajetória, da pessoa que me tornei e da certeza de que toda luta, esforço e perseverança valeram a pena para transformar este sonho em realidade.

RESUMO

A crescente busca por soluções sustentáveis na construção civil tem impulsionado o desenvolvimento de concretos com menor consumo de clínquer e maior utilização de materiais suplementares, como o fíler calcário. Apesar dos benefícios ambientais associados à redução das emissões de dióxido de carbono, a substituição parcial do cimento por fíler calcário pode influenciar propriedades relacionadas à durabilidade das estruturas, especialmente frente ao processo de carbonatação. Nesse contexto, a condição superficial das armaduras constitui um fator potencialmente relevante, uma vez que diferentes níveis de oxidação podem interferir na formação da película passivadora e no comportamento corrosivo do aço. Diante disso, o presente estudo teve como objetivo analisar, por meio de uma revisão sistemática da literatura, a influência da condição superficial do aço na corrosão de armaduras inseridas em concretos com elevado teor de fíler calcário submetidos à carbonatação. A pesquisa foi conduzida com base nas recomendações do protocolo PRISMA, utilizando as bases de dados Scopus e Google Acadêmico. Após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, foram selecionados 17 artigos científicos para compor a amostra final da revisão. Os resultados indicaram que o aumento do teor de fíler calcário tende a acelerar o avanço da carbonatação devido à redução da reserva alcalina do concreto, favorecendo a despassivação das armaduras. Conclui-se que a interação entre carbonatação, utilização de fíler calcário e condição superficial do aço ainda constitui uma lacuna científica relevante, sendo necessárias novas pesquisas experimentais para aprofundar a compreensão desses mecanismos e contribuir para o desenvolvimento de estruturas sustentáveis e duráveis.

Palavras-chave: concreto sustentável; substituição de clínquer; condição superficial do aço; durabilidade.

ABSTRACT

The growing demand for sustainable solutions in the construction industry has encouraged the development of concrete mixtures with reduced clinker consumption and increased use of supplementary materials, such as limestone filler. Despite the environmental benefits associated with lower carbon dioxide emissions, the partial replacement of cement by limestone filler may affect durability-related properties, particularly regarding the carbonation process. In this context, the surface condition of reinforcing steel becomes a potentially important factor, since different levels of oxidation may influence the formation of the passive layer and the corrosion behavior of steel reinforcement. Therefore, this study aimed to analyze, through a systematic literature review, the influence of steel surface condition on the corrosion of reinforcing bars embedded in concrete with high limestone filler content subjected to carbonation. The research was conducted according to the PRISMA protocol guidelines, using Scopus and Google Scholar databases. It is concluded that the interaction between carbonation, limestone filler incorporation, and steel surface condition remains an important scientific gap, highlighting the need for further experimental studies to improve the understanding of these mechanisms and support the development of more sustainable and durable concrete structures.

Keywords: sustainable concrete; clinker replacement; steel surface condition; durability.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS.....	12
2.1	OBJETIVO GERAL	12
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
3	MÉTODOS DA PESQUISA.....	13
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA	13
3.2	QUESTÃO NORTEADORA DA PESQUISA.....	14
3.3	ESTRATÉGIA DE BUSCA	15
3.4	CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO.....	16
4	RESULTADOS DA PESQUISA.....	17
4.1	DIAGRAMA DE FLUXO DE SELEÇÃO.....	17
4.2	MAPEAMENTO E CARACTERÍSTICAS GERAIS DA LITERATURA	18
4.3	IMPACTO DO FÍLER CALCÁRIO NA VELOCIDADE DE CARBONATAÇÃO	22
4.4	INFLUÊNCIA DA CONDIÇÃO SUPERFICIAL DO AÇO NA CORROSÃO.....	24
4.5	ESTADO DA LITERATURA SOBRE A CONDIÇÃO SUPERFICIAL DAS ARMADURAS.....	26
5	DISCUSSÃO.....	29
5.1	ANÁLISE CRÍTICA DOS MECANISMOS INTERDEPENDENTES	29
5.2	LIMITAÇÕES DA LITERATURA ATUAL	30
5.3	LIMITAÇÕES DA PRÓPRIA REVISÃO.....	32
6	CONCLUSÃO	33
	REFERÊNCIAS.....	35

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil tem sido amplamente reconhecida como uma das maiores responsáveis pela emissão de gases de efeito estufa. Estimativas internacionais indicam que aproximadamente 37% das emissões globais de CO₂ estão associadas ao setor da construção, sendo que a indústria do cimento contribui cerca de 5 a 8% desse total. No contexto brasileiro, o cenário não é diferente: a construção civil consome cerca de 75% dos recursos naturais extraídos (John; Daniel; José, 2007) e é considerada um dos setores que impactam o meio ambiente (Grigoletti; Sattler, 2003).

Nesse cenário, o uso de adições minerais e materiais de enchimento, como o fíler calcário, destaca-se como alternativa promissora para redução do consumo de clínquer e das emissões de CO₂ associadas à produção de cimento Portland. Além da sustentabilidade, essas estratégias também influenciam propriedades reológicas, mecânicas e de durabilidade dos concretos (Damineli, 2013).

Enquanto a indústria do cimento avança rumo a uma nova geração de materiais com menor impacto ambiental, práticas já consolidadas começam a ganhar espaço no setor produtivo, como a introdução de resíduos industriais e a otimização do empacotamento granular. Para que essas soluções sejam viáveis, torna-se essencial o controle rigoroso da reologia das misturas, observando fatores como a qualidade das matérias-primas, o desenvolvimento de projetos granulométricos que minimizem vazios e a fluidez adequada com menor teor de água (Damineli, 2013).

A durabilidade das estruturas de concreto armado constitui requisito fundamental de desempenho, conforme preconiza a Associação Brasileira de Normas Técnicas por meio da NBR 6118 (ABNT, 2026), que estabelece critérios relacionados à vida útil e à proteção das armaduras frente aos mecanismos de deterioração.

A armadura embutida no concreto possui dupla proteção: física, representada pelo cobrimento, e química, resultante da elevada alcalinidade do meio, que favorece a formação de uma película passivadora de óxidos na superfície do aço (Montemor; Simões; Ferreira, 2003). No entanto, concretos com elevada substituição de cimento por adições minerais apresentam menor reserva alcalina, podendo comprometer essa proteção. Em especial, destaca-se a situação de armaduras que já apresentam oxidação prévia devido às condições inadequadas de transporte e armazenamento, situação frequentemente observada em ambientes de obra.

Apesar dos avanços no desenvolvimento de concretos ecoeficientes com elevado teor de fíler calcário e reduzido consumo de clínquer, ainda são escassos os estudos que avaliam de

forma sistemática a influência da condição superficial prévia das armaduras no desempenho desses concretos frente ao processo de carbonatação. Grande parte das pesquisas concentra-se nos efeitos das adições minerais sobre propriedades mecânicas e cinéticas de carbonatação, desconsiderando que, na prática construtiva, as armaduras frequentemente apresentam diferentes graus de oxidação decorrentes de condições inadequadas de transporte, armazenamento e manuseio em obra. Essa lacuna torna-se ainda mais crítica em concretos com menor reserva alcalina, nos quais a estabilidade da película passiva do aço pode ser comprometida, potencializando o risco de corrosão.

Considerando a necessidade de produzir concretos com desempenho mecânico satisfatório, menor impacto ambiental e adequada durabilidade frente à carbonatação, torna-se essencial compreender os fatores que influenciam o processo de corrosão das armaduras em concretos com elevado teor de fíler calcário. Nesse contexto, a condição superficial do aço pode exercer papel determinante na formação da película passiva e no comportamento eletroquímico das armaduras, influenciando sua resistência à corrosão.

Diante desse contexto, embora existam diversos estudos sobre carbonatação e corrosão em concretos contendo fíler calcário, ainda são limitadas as pesquisas que avaliam especificamente o papel da condição superficial das armaduras nesse processo. A sistematização dessas evidências pode contribuir para identificar tendências, limitações metodológicas e lacunas científicas, fornecendo subsídios para pesquisas futuras. Dessa forma, este estudo teve como objetivo analisar, por meio de uma revisão sistemática da literatura, a influência da condição superficial do aço no processo de corrosão de armaduras inseridas em concretos com elevado teor de fíler calcário submetidos à carbonatação.

2 OBJETIVOS

Nesse capítulo delinea-se os objetivos do Trabalho de Conclusão do Curso.

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a influência da condição superficial do aço na corrosão de armaduras em concretos com elevado teor de fíler calcário submetidos à carbonatação, por meio de uma revisão sistemática da literatura.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral, foram delineados os seguintes objetivos específicos:

- identificar os estudos científicos que abordam a influência do fíler calcário na carbonatação e na corrosão de armaduras em concreto;
- analisar as evidências científicas sobre a influência da condição superficial do aço na iniciação e propagação da corrosão das armaduras;
- comparar os resultados dos estudos quanto aos efeitos do elevado teor de fíler calcário sobre a carbonatação, a durabilidade do concreto e a corrosão das armaduras;
- avaliar a relação entre a condição superficial do aço, a carbonatação e a durabilidade das estruturas de concreto armado;
- identificar as lacunas existentes na literatura e as perspectivas para futuras pesquisas sobre o tema.

3 MÉTODOS DA PESQUISA

Neste capítulo, demonstra-se a metodologia utilizada na pesquisa a fim de atingir com êxito os objetivos propostos.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

A presente pesquisa caracteriza-se como uma revisão sistemática da literatura, desenvolvida com o propósito de reunir, analisar e sintetizar criticamente as evidências científicas disponíveis acerca da influência da condição superficial do aço na corrosão de armaduras inseridas em concretos com elevado teor de filer calcário submetidos à carbonatação. Esse tipo de investigação permite a identificação de tendências, consensos, divergências e lacunas existentes no conhecimento científico sobre determinado tema, contribuindo para a construção de uma visão abrangente e fundamentada do estado atual da literatura.

Quanto ao tipo de pesquisa, o estudo enquadra-se como uma pesquisa bibliográfica, uma vez que foi elaborado a partir da análise de artigos científicos previamente publicados em periódicos especializados. Segundo Gil (2025), a pesquisa bibliográfica é desenvolvida com base em materiais já elaborados, constituindo uma importante estratégia para o aprofundamento teórico e para a compreensão do conhecimento acumulado sobre determinado fenômeno.

Em relação à abordagem metodológica, a pesquisa possui caráter qualitativo. Esse tipo de abordagem busca compreender e interpretar informações presentes nos estudos analisados, priorizando a análise crítica dos resultados e das discussões apresentadas pelos autores. De acordo com Prodanov e Freitas (2013), a pesquisa qualitativa preocupa-se com aspectos da realidade que não podem ser quantificados, concentrando-se na interpretação dos fenômenos e na compreensão de suas relações.

No que se refere à natureza da investigação, trata-se de uma revisão sistemática da literatura. Esse método caracteriza-se pela utilização de procedimentos rigorosos e previamente definidos para a busca, seleção, avaliação e síntese das evidências científicas disponíveis sobre uma questão específica de pesquisa. Diferentemente das revisões narrativas tradicionais, a revisão sistemática busca reduzir vieses e aumentar a transparência do processo de investigação, proporcionando maior confiabilidade aos resultados obtidos.

Para garantir o rigor metodológico da revisão, foram adotados os princípios do protocolo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), amplamente reconhecido na literatura científica como referência para a condução de revisões sistemáticas.

A aplicação desse protocolo permitiu organizar as etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos selecionados, assegurando maior rastreabilidade e reprodutibilidade ao processo de pesquisa.

3.2 QUESTÃO NORTEADORA DA PESQUISA

A definição da questão norteadora constitui uma das etapas importantes de uma revisão sistemática, pois direciona todo o processo de busca, seleção, análise e interpretação dos estudos científicos. A formulação adequada da pergunta de pesquisa permite delimitar o tema investigado, estabelecer critérios de inclusão e exclusão e garantir que as evidências selecionadas estejam alinhadas aos objetivos propostos.

Considerando a crescente utilização de concretos com elevado teor de fíler calcário como alternativa para a redução do consumo de clínquer e das emissões de dióxido de carbono associadas à produção de cimento Portland, torna-se necessário compreender os possíveis impactos dessa tecnologia sobre a durabilidade das estruturas de concreto armado. Entre os principais mecanismos de deterioração relacionados a esses materiais destaca-se a carbonatação, fenômeno capaz de reduzir a alcalinidade do concreto e comprometer a proteção natural das armaduras contra a corrosão.

Nesse contexto, foi definida a seguinte questão norteadora para esta pesquisa: “como a condição superficial prévia do aço influencia o processo de corrosão de armaduras em concretos com elevado teor de fíler calcário submetidos à carbonatação?”

A escolha dessa questão fundamenta-se na necessidade de compreender a interação entre dois fatores que exercem influência direta sobre a durabilidade das estruturas: as características do concreto contendo fíler calcário e o estado superficial das armaduras. Embora existam diversos estudos investigando os efeitos do fíler calcário sobre a carbonatação e o desempenho dos materiais cimentícios, observa-se que são escassas as pesquisas que avaliam simultaneamente a influência da condição superficial do aço nesse contexto.

A relevância da questão investigada também está associada às condições encontradas na prática construtiva. Em muitas situações, as armaduras são armazenadas em ambientes expostos às intempéries, podendo apresentar diferentes graus de oxidação antes mesmo de serem incorporadas ao concreto. Quando associada a concretos com menor reserva alcalina, essa condição pode influenciar a formação da película passivadora e alterar o comportamento corrosivo do aço ao longo da vida útil da estrutura.

3.3 ESTRATÉGIA DE BUSCA

A busca dos estudos científicos foi realizada de forma sistemática e estruturada, visando identificar publicações relevantes relacionadas à influência da condição superficial do aço na corrosão de armaduras inseridas em concretos com elevado teor de fíler calcário submetidos à carbonatação. Para garantir a abrangência e a confiabilidade da revisão, foram selecionadas bases de dados reconhecidas pela ampla cobertura de periódicos científicos nas áreas de Engenharia Civil, Ciência dos Materiais e Durabilidade das Estruturas.

As buscas foram conduzidas nas bases de dados Scopus e Google Acadêmico. A Scopus foi escolhida por ser uma das maiores bases de indexação científica do mundo, reunindo periódicos de elevado impacto e relevância acadêmica. O Google Acadêmico foi utilizado como ferramenta complementar para ampliar a recuperação de estudos potencialmente relevantes e identificar publicações que eventualmente não estivessem indexadas na base principal.

Para a realização das buscas foram empregados descritores relacionados aos principais temas abordados nesta pesquisa, considerando termos em língua portuguesa e inglesa, conforme Quadro 1. A escolha dos descritores foi baseada na questão norteadora da pesquisa e nos conceitos centrais associados à durabilidade dos concretos, carbonatação, corrosão das armaduras e utilização de fíler calcário.

Quadro 1 – Descritores utilizados na pesquisa

Português	Inglês
Durabilidade	<i>Durability</i>
Corrosão	<i>Corrosion</i>
Carbonatação	<i>Carbonation</i>
Fíler calcário	<i>Limestone filler</i>

Fonte: Autoria própria, 2026.

A seleção dos estudos foi realizada mediante a aplicação de critérios de inclusão e exclusão, considerando publicações entre 2000 e 2025, disponíveis nos idiomas português e inglês, e que abordassem a influência da condição superficial do aço, da carbonatação e da corrosão de armaduras em concretos com elevado teor de fíler calcário.

Com o objetivo de refinar os resultados obtidos, foram utilizados operadores booleanos, permitindo combinar os descritores e restringir a busca aos estudos que abordassem simultaneamente os temas de interesse. O operador *AND* foi empregado para estabelecer a interseção entre os termos pesquisados, enquanto o operador *OR* foi utilizado para ampliar a recuperação de publicações relacionadas a conceitos equivalentes.

A principal estratégia de busca adotada foi: (*"durability" OR "corrosion"*) AND *"carbonation"* AND *"limestone filler"*.

Essa combinação permitiu identificar estudos relacionados à durabilidade dos concretos, aos mecanismos de corrosão das armaduras e ao comportamento de materiais cimentícios contendo fíler calcário submetidos à carbonatação.

3.4 CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO

Os critérios de inclusão e exclusão foram definidos previamente para garantir maior rigor metodológico na seleção dos estudos e assegurar que apenas publicações alinhadas aos objetivos da pesquisa fossem incorporadas à revisão sistemática.

Foram incluídos estudos que apresentassem relação direta com os seguintes temas:

- a) concretos com elevado teor de fíler calcário;
- b) materiais cimentícios com redução do teor de clínquer;
- c) carbonatação natural ou acelerada;
- d) corrosão de armaduras em concreto armado;
- e) comportamento eletroquímico do aço;
- f) durabilidade de estruturas de concreto;
- g) avaliação da influência de adições minerais sobre a carbonatação e a corrosão.

Foram excluídos da revisão os estudos que apresentavam uma ou mais das seguintes características:

- a) artigos duplicados identificados durante a etapa de triagem;
- b) dissertações, teses, monografias e trabalhos de conclusão de curso;
- c) resumos simples ou expandidos publicados em anais de eventos;
- d) estudos sem acesso ao texto completo;
- e) publicações sem relação direta com a temática da pesquisa;
- f) trabalhos focados exclusivamente em propriedades mecânicas dos concretos, sem abordagem de aspectos relacionados à durabilidade, carbonatação ou corrosão das armaduras;
- g) estudos que não envolviam materiais cimentícios contendo fíler calcário ou substituições relevantes de clínquer.

4 RESULTADOS DA PESQUISA

Os resultados da revisão sistemática da literatura são apresentados nesta seção, organizados em subtópicos temáticos que contemplam os principais aspectos abordados pelos estudos selecionados.

4.1 DIAGRAMA DE FLUXO DE SELEÇÃO

O processo de seleção dos estudos foi conduzido conforme os princípios do protocolo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), com o objetivo de garantir transparência, rastreabilidade e rigor metodológico na composição da amostra final da revisão sistemática.

Inicialmente, as buscas foram realizadas nas bases de dados Scopus e Google Acadêmico, utilizando combinações de descritores relacionados à durabilidade, corrosão, carbonatação e fíler calcário, como descrito na metodologia. A aplicação das estratégias de busca resultou na identificação de diversos trabalhos potencialmente relevantes para a temática proposta. Em seguida, procedeu-se à leitura dos títulos, resumos e palavras-chave, visando verificar a aderência dos estudos à questão norteadora da pesquisa.

Na etapa de triagem, foram excluídos os trabalhos que não abordavam concretos com fíler calcário, estudos focados exclusivamente em propriedades mecânicas sem relação com durabilidade ou corrosão, publicações duplicadas e pesquisas que não apresentavam informações compatíveis com os objetivos desta revisão. Também foram desconsiderados documentos que não possuíam acesso ao texto completo ou que não apresentavam resultados relacionados à carbonatação, corrosão das armaduras ou comportamento de materiais cimentícios contendo fíler calcário.

Após a aplicação dos critérios de elegibilidade, foram selecionados 17 artigos científicos para compor a amostra final desta revisão sistemática. Os estudos incluídos contemplam pesquisas experimentais, revisões de literatura e análises de durabilidade envolvendo concretos com substituição parcial do cimento por fíler calcário, abrangendo temas como profundidade de carbonatação, difusão de dióxido de carbono, resistência à corrosão, reabsorção de CO₂, propriedades mecânicas e comportamento eletroquímico das armaduras.

A seleção final foi composta pelos trabalhos de Araruna (2023), Batić *et al.* (2013), Fante *et al.* (2022), Isaia (2021), Jiang *et al.* (2024), Li e Jiang (2022), Lollini, Redaelli e Bertonini (2014), Lopes *et al.* (2022), Marinković, Radović e Carević (2023), Medeiros (2002),

Radović *et al.* (2024a), Radović *et al.* (2024b), Rezende *et al.* (2023), Steiner *et al.* (2022), Teodoro e Carrazedo (2025), Tsivilis *et al.* (2000) e Zhang, Scott e Panesar (2024) os quais forneceram embasamento científico para a análise dos efeitos do fíler calcário na durabilidade dos concretos e nos mecanismos associados à corrosão das armaduras.

O Quadro 2 apresenta o fluxo de seleção dos estudos incluídos na revisão sistemática.

Quadro 2 – Fluxo de seleção de estudos

Etapas	Quantidade
Estudos identificados nas bases de dados	35
Estudos após remoção de duplicidades	28
Estudos avaliados por título e resumo	28
Estudos excluídos por não atenderem aos critérios	11
Estudos selecionados para leitura completa	17
Estudos incluídos na revisão sistemática	17

Fonte: Autoria própria, 2026.

O processo de seleção permitiu reunir estudos representativos sobre a utilização do fíler calcário em materiais cimentícios e seus impactos na durabilidade das estruturas de concreto. A amostra final apresenta pesquisas desenvolvidas em diferentes países e contextos experimentais, possibilitando uma visão abrangente sobre os mecanismos de carbonatação, corrosão e desempenho de concretos com elevado teor de fíler calcário. Além disso, a análise dos artigos evidenciou que, embora existam numerosos estudos sobre carbonatação e durabilidade, ainda são limitadas as pesquisas que investigam especificamente a influência da condição superficial prévia das armaduras em concretos ecoeficientes com alto teor de fíler calcário, evidenciando uma importante lacuna científica a ser explorada em trabalhos futuros.

4.2 MAPEAMENTO E CARACTERÍSTICAS GERAIS DA LITERATURA

Após a aplicação dos critérios de seleção, foram incluídos 17 estudos científicos que abordam diferentes aspectos relacionados à utilização do fíler calcário em materiais cimentícios, com ênfase nos mecanismos de carbonatação, durabilidade, corrosão das armaduras e desempenho de concretos com redução do teor de clínquer. Os trabalhos selecionados foram publicados entre os anos de 2000 e 2025, evidenciando o crescente interesse da comunidade científica pela utilização de materiais cimentícios sustentáveis e pela compreensão dos impactos dessa substituição sobre a vida útil das estruturas de concreto armado.

Observa-se que a maior parte das pesquisas foi desenvolvida em países da Europa, Ásia, América do Norte e América do Sul, com destaque para o Brasil em relação a quantidade de estudos selecionados, refletindo a preocupação global com a redução das emissões de dióxido de carbono provenientes da indústria do cimento. Em relação aos métodos empregados, predominam estudos experimentais envolvendo ensaios de carbonatação acelerada, avaliação da resistência à compressão, monitoramento eletroquímico da corrosão, análises de difusão de gases e investigações sobre a durabilidade dos concretos contendo elevados teores de fíler calcário.

O Quadro 3 apresenta uma síntese dos estudos selecionados, destacando autores, ano de publicação, país de origem e principais metodologias empregadas.

Quadro 3 – Caracterização geral dos estudos incluídos na revisão sistemática

Autor(es)	Ano	Título do estudo	Objetivo	Tipo de estudo	País
Araruna	2023	<i>Prevenção e recuperação de estruturas de concreto armado afetadas pela corrosão das armaduras: uma revisão da literatura</i>	Revisar mecanismos de corrosão e técnicas de prevenção e recuperação de estruturas de concreto armado	Revisão de literatura	Brasil
Batić <i>et al.</i>	2013	<i>Rebar corrosion in mortars with high limestone filler content</i>	Avaliar o comportamento da corrosão das armaduras em argamassas contendo elevado teor de fíler calcário	Experimental	Argentina
Fante <i>et al.</i>	2022	<i>Behavior of cementitious mixtures with filler carbonate subjected to accelerated carbonation</i>	Investigar o comportamento de misturas cimentícias com fíler carbonático submetidas à carbonatação acelerada	Experimental	Brasil
Isaia	2021	A carbonatação de concretos com elevados teores de fíler calcário protegidos por película protetora	Avaliar a carbonatação de concretos com elevado teor de fíler calcário e o efeito de revestimentos protetores	Experimental	Brasil
Jiang <i>et al.</i>	2024	<i>Limestone filler as a mineral additive on the</i>	Avaliar resistência mecânica e	Experimental	China

Autor(es)	Ano	Título do estudo	Objetivo	Tipo de estudo	País
		<i>compressive strength and durability of self-compacting concrete with limestone manufactured sand</i>	durabilidade de concretos autoadensáveis com fíler calcário		
Li e Jiang	2022	<i>Effect of limestone powder addition on corrosion initiation time of reinforced concrete</i>	Avaliar a influência do pó calcário no tempo de iniciação da corrosão das armaduras	Experimental	China
Lollini, Redaelli e Bertolini	2014	<i>Effects of Portland cement replacement with limestone on the properties of hardened concrete</i>	Investigar os efeitos da substituição parcial do cimento por fíler calcário nas propriedades do concreto endurecido	Experimental	Itália
Lopes <i>et al.</i>	2022	Modelos preditivos de vida útil de estruturas de concreto sujeitas à iniciação da corrosão de armaduras por cloretos: contribuição ao estado da arte	Revisar modelos de previsão da vida útil de estruturas de concreto	Revisão de literatura	Brasil
Marinković, Radović e Carević	2023	<i>Carbonation of limestone powder concrete: state-of-the-art overview</i>	Apresentar o estado da arte sobre carbonatação em concretos com pó calcário	Revisão de literatura	Sérvia
Medeiros	2002	Estruturas de concreto com corrosão de armaduras por carbonatação: comparação de argamassas de reparo quanto à proteção do aço	Comparar argamassas de reparo para estruturas com corrosão induzida por carbonatação	Dissertação experimental	Brasil
Radović <i>et al.</i>	2024a	<i>Prediction model for calculation of the limestone powder concrete carbonation depth</i>	Desenvolver modelo preditivo para estimativa da profundidade de carbonatação em concretos com fíler calcário	Experimental	Sérvia
Radović <i>et al.</i>	2024b	<i>Influence of curing period on some mechanical and durability-related</i>	Avaliar a influência do período de cura nas propriedades mecânicas e de	Experimental	Sérvia

Autor(es)	Ano	Título do estudo	Objetivo	Tipo de estudo	País
		<i>properties of limestone powder concrete</i>	durabilidade do concreto com fíler calcário		
Rezende <i>et al.</i>	2023	<i>Evaluation of reinforcement corrosion in cementitious composites containing ornamental stone waste</i>	Avaliar a corrosão das armaduras em compósitos cimentícios contendo resíduos de rochas ornamentais	Experimental	Brasil
Steiner <i>et al.</i>	2022	<i>Effect of limestone fillers on CO₂ and water vapour diffusion in carbonated concrete</i>	Investigar a difusão de CO ₂ e vapor d'água em concretos carbonatados contendo fíler calcário	Experimental	Alemanha
Teodoro e Carrazedo	2025	<i>Impact of carbonation on reinforced concrete structures in urban environments considering the Brazilian standard ABNT NBR 6118:2023</i>	Avaliar o impacto da carbonatação na vida útil de estruturas de concreto armado conforme a ABNT NBR 6118:2023	Experimental	Brasil
Tsivilis <i>et al.</i>	2000	<i>Properties and behavior of limestone cement concrete and mortar</i>	Investigar o comportamento de concretos e argamassas produzidos com cimento contendo fíler calcário	Experimental	Grécia
Zhang, Scott e Panesar	2024	<i>Carbonation and CO₂ reabsorption of cement-based materials: influence of limestone filler and ground-granulated blast-furnace slag</i>	Avaliar a carbonatação e a reabsorção de CO ₂ em materiais cimentícios contendo fíler calcário e escória de alto-forno	Experimental	Canadá

Fonte: Autoria própria, 2026.

A análise do conjunto de estudos demonstra que a carbonatação constitui o principal tema investigado quando se trata da utilização de fíler calcário em materiais cimentícios. Diversos autores buscaram compreender como a redução do teor de clínquer influencia a reserva alcalina do concreto, a profundidade de carbonatação e a proteção das armaduras contra processos corrosivos. Além disso, observou-se uma crescente preocupação com o desenvolvimento de modelos preditivos capazes de estimar a vida útil das estruturas produzidas com concretos de menor impacto ambiental.

Outro aspecto relevante identificado foi a predominância de pesquisas experimentais realizadas em laboratório, especialmente por meio de ensaios acelerados de carbonatação e monitoramento da corrosão. Entretanto, poucos estudos analisaram diretamente a influência da condição superficial prévia das armaduras sobre o comportamento corrosivo em concretos com elevado teor de fíler calcário. Essa constatação reforça a existência de uma lacuna científica importante e evidencia a necessidade de novas investigações que integrem os efeitos da carbonatação, da redução da reserva alcalina e das características superficiais do aço na durabilidade das estruturas de concreto armado.

Além da influência da carbonatação, o estado inicial da superfície das armaduras pode modificar a formação e a estabilidade da película passivadora. Armaduras com superfícies limpas e isentas de produtos de corrosão tendem a desenvolver uma camada passiva mais uniforme, enquanto barras previamente oxidadas apresentam maior heterogeneidade superficial. Carvalho *et al.* (2022) demonstraram que a condição superficial do aço influencia significativamente a eficiência da repassivação das armaduras, evidenciando que diferentes estados superficiais podem alterar o restabelecimento da película passiva e, consequentemente, o comportamento frente à corrosão.

4.3 IMPACTO DO FÍLER CALCÁRIO NA VELOCIDADE DE CARBONATAÇÃO

A carbonatação é um dos principais mecanismos de deterioração das estruturas de concreto armado, especialmente em concretos produzidos com redução do teor de clínquer. Esse fenômeno ocorre pela penetração do dióxido de carbono (CO_2) presente na atmosfera nos poros do concreto, reagindo com os compostos alcalinos da matriz cimentícia e reduzindo o pH do material. Como consequência, ocorre a despassivação das armaduras, tornando-as suscetíveis ao processo de corrosão (Damineli, 2013).

Os estudos analisados nesta revisão demonstram que a incorporação de fíler calcário influencia a velocidade de carbonatação dos concretos. De maneira geral, verificou-se que o aumento do teor de substituição do cimento por fíler calcário tende a elevar a profundidade e a velocidade de avanço da frente de carbonatação. Esse comportamento está relacionado principalmente à redução da quantidade de clínquer disponível para hidratação e, consequentemente, à diminuição da reserva alcalina responsável pela neutralização do CO_2 .

Lollini, Redaelli e Bertolini (2014) observaram que concretos contendo substituições de 15% e 30% de cimento por calcário apresentaram menor resistência à carbonatação quando comparados aos concretos convencionais. Os autores verificaram que a redução dos produtos

hidratados disponíveis para reagir com o dióxido de carbono favoreceu o avanço da frente carbonatada.

Resultados semelhantes foram encontrados por Isaia (2021), que avaliou concretos com elevados teores de fíler calcário submetidos à carbonatação acelerada. O estudo demonstrou que o aumento do teor de fíler provocou crescimento progressivo da profundidade carbonatada e do coeficiente de carbonatação (k_c), evidenciando maior vulnerabilidade à penetração do CO_2 . Entretanto, a aplicação de revestimentos protetores reduziu esses efeitos, contribuindo para o aumento da durabilidade das estruturas.

Fante *et al.* (2022) também verificaram que a velocidade de carbonatação foi fortemente influenciada pela relação água/cimento. Embora o teor de fíler exercesse influência no comportamento do material, os autores concluíram que concretos com maiores relações água/cimento apresentaram profundidades de carbonatação superiores devido ao aumento da porosidade e da conectividade dos poros.

De acordo com Marinković, Radović e Carević (2023), substituições moderadas de cimento por fíler calcário, na faixa de 10% a 15%, podem apresentar desempenho semelhante ao dos concretos convencionais quando associadas a um adequado controle da dosagem e da distribuição granulométrica dos materiais. Entretanto, para teores elevados de substituição, a literatura aponta um aumento consistente da velocidade de carbonatação, exigindo ajustes na composição dos concretos e medidas adicionais de proteção.

Os trabalhos desenvolvidos por Radović *et al.* (2024a) reforçam essa tendência. Os autores observaram que concretos contendo entre 45% e 65% de pó calcário apresentaram profundidades de carbonatação superiores às observadas em concretos produzidos exclusivamente com cimento Portland. Os resultados indicaram que, após dois anos de exposição, o aumento da profundidade carbonatada variou entre 8% e 67%, dependendo do percentual de substituição utilizado.

Steiner *et al.* (2022) contribuíram para a compreensão desse fenômeno ao demonstrar que a difusão de CO_2 está diretamente relacionada à estrutura de poros do concreto. Embora o fíler calcário possa promover efeito de preenchimento dos vazios e melhorar a compactação da matriz em determinadas proporções, substituições excessivas favorecem o efeito de diluição, reduzindo a quantidade de produtos hidratados responsáveis pela manutenção da alcalinidade do sistema.

Alguns estudos identificaram situações em que o fíler calcário apresentou efeitos benéficos. Tsivilis *et al.* (2000) observaram que substituições moderadas, inferiores a 20%,

podem reduzir a porosidade e contribuir para o refinamento da microestrutura, retardando parcialmente a penetração de agentes agressivos. Contudo, esse benefício tende a diminuir à medida que o teor de substituição aumenta.

Os estudos analisados indicam que a utilização do fíler calcário apresenta potencial para reduzir o impacto ambiental da produção de concreto, porém sua incorporação deve ser realizada de maneira criteriosa. Os resultados demonstram que elevados teores de substituição tendem a acelerar o processo de carbonatação em razão da menor reserva alcalina disponível, enquanto substituições moderadas podem apresentar desempenho satisfatório quando associadas a baixas relações água/cimento, adequada cura e otimização da distribuição granulométrica dos materiais.

4.4 INFLUÊNCIA DA CONDIÇÃO SUPERFICIAL DO AÇO NA CORROSÃO

A corrosão das armaduras constitui um dos principais mecanismos de deterioração das estruturas de concreto armado, sendo responsável pela redução da capacidade resistente, perda da aderência entre o aço e o concreto e diminuição da vida útil das edificações. Embora a carbonatação seja amplamente reconhecida como um dos principais fatores responsáveis pela despassivação das armaduras, a literatura demonstra que o comportamento corrosivo também depende das características superficiais do aço antes de sua incorporação ao concreto. Dessa forma, a condição superficial das armaduras representa uma variável importante para a compreensão dos mecanismos de iniciação e propagação da corrosão, especialmente em concretos produzidos com elevado teor de fíler calcário (Araruna, 2023; Batić *et al.*, 2013).

A elevada alcalinidade da solução dos poros do concreto, geralmente com valores de pH superiores a 12,5, favorece a formação de uma película passivadora estável sobre a superfície do aço, protegendo as armaduras contra processos corrosivos. Entretanto, durante o avanço da carbonatação ocorre a redução progressiva da alcalinidade em decorrência da reação entre o dióxido de carbono atmosférico e os compostos hidratados da pasta cimentícia, promovendo a ruptura dessa camada protetora. Esse fenômeno aumenta significativamente a suscetibilidade das armaduras à corrosão, principalmente quando associado à elevada permeabilidade do concreto (Fante *et al.*, 2022; Steiner *et al.*, 2022).

Além da influência da carbonatação, o estado inicial da superfície das armaduras pode modificar a formação e a estabilidade da película passivadora. Armaduras com superfícies limpas e isentas de produtos de corrosão tendem a desenvolver uma camada passiva mais uniforme, enquanto barras previamente oxidadas ou armazenadas em condições inadequadas

apresentam irregularidades superficiais que podem favorecer a formação de regiões anódicas e catódicas, acelerando o desenvolvimento das reações eletroquímicas responsáveis pela corrosão (Batić *et al.*, 2013; Medeiros, 2002).

Apesar da importância dessa variável, observa-se que a maior parte das pesquisas concentra seus esforços na avaliação da carbonatação, da resistência mecânica, da permeabilidade e da durabilidade do concreto, deixando em segundo plano a investigação das condições superficiais das armaduras. Lopes *et al.* (2022) ressaltam que os modelos preditivos de vida útil normalmente consideram parâmetros relacionados ao concreto e às condições ambientais, mas raramente incorporam características da superfície do aço, o que limita a representação das condições encontradas em estruturas reais.

Entre os estudos analisados nesta revisão, verificou-se que apenas uma pequena parcela aborda, ainda que de forma indireta, a influência da condição superficial das armaduras. Batić *et al.* (2013) observaram que concretos contendo elevados teores de fíler calcário podem modificar a composição da película passivadora formada sobre o aço, alterando seu comportamento eletroquímico em ambientes carbonatados. Segundo os autores, a redução da reserva alcalina favorece a despassivação das armaduras e aumenta a probabilidade de ocorrência da corrosão quando associada a condições ambientais agressivas.

Resultados semelhantes foram apresentados por Li e Jiang (2022), que verificaram redução do tempo necessário para o início da corrosão em concretos contendo pó de calcário. Embora os autores não tenham avaliado diretamente armaduras previamente oxidadas, os resultados indicam que a diminuição da alcalinidade e das concentrações críticas de cloretos acelera o processo de despassivação, tornando a condição superficial do aço uma variável potencialmente relevante para o desempenho das estruturas.

Os trabalhos desenvolvidos por Isaia (2021), Steiner *et al.* (2022), Fante *et al.* (2022), Radović *et al.* (2024b) e Zhang, Scott e Panesar (2024) demonstram que elevados teores de fíler calcário favorecem o avanço da carbonatação em razão da redução da reserva alcalina do concreto. Contudo, esses estudos concentram suas análises nas propriedades da matriz cimentícia e no comportamento da carbonatação, sem avaliar experimentalmente a influência do estado superficial das armaduras, evidenciando uma importante lacuna científica.

A literatura brasileira recente apresenta cenário semelhante. Araruna (2023) afirma que a corrosão das armaduras permanece entre as principais causas de deterioração das estruturas de concreto armado, enquanto Medeiros (2002) destaca que a carbonatação compromete a proteção natural do aço ao reduzir a alcalinidade do concreto. Entretanto, ambos os estudos

apontam que ainda são escassas as pesquisas que investigam diretamente o comportamento de armaduras previamente oxidadas ou submetidas a diferentes condições superficiais antes da concretagem.

Outro aspecto relevante refere-se à interface entre o aço e o concreto. Rezende *et al.* (2023) demonstraram que alterações na microestrutura da matriz cimentícia influenciam diretamente o comportamento eletroquímico das armaduras e a estabilidade da interface aço-concreto. Embora os autores não tenham comparado diferentes estados superficiais das barras, os resultados indicam que modificações nessa região interferem no transporte de umidade, oxigênio e dióxido de carbono, fatores diretamente relacionados ao desenvolvimento da corrosão.

Sob o ponto de vista da prática construtiva, essa discussão torna-se ainda mais relevante, uma vez que as armaduras frequentemente permanecem armazenadas por longos períodos em ambientes expostos à umidade e às intempéries antes da concretagem. Nessas condições, a presença de oxidação superficial pode comprometer a formação da película passivadora e potencializar os efeitos da carbonatação em concretos com menor reserva alcalina, reduzindo a vida útil das estruturas caso medidas preventivas não sejam adotadas (Teodoro *et al.*, 2025; Medeiros, 2002).

De forma geral, a análise da literatura evidencia que a condição superficial do aço constitui uma variável com potencial influência sobre a durabilidade das estruturas de concreto armado, porém permanece insuficientemente explorada em pesquisas envolvendo concretos com elevado teor de fíler calcário. Os estudos analisados demonstram consenso quanto aos efeitos da carbonatação sobre a despassivação das armaduras, mas ainda não fornecem evidências experimentais suficientes para quantificar a influência da superfície inicial do aço nesse contexto. Essa lacuna reforça a necessidade de novas pesquisas que integrem, simultaneamente, carbonatação, condição superficial das armaduras e concretos ecoeficientes, contribuindo para o desenvolvimento de estruturas mais duráveis e sustentáveis (Araruna, 2023; Lopes *et al.*, 2022; Batić *et al.*, 2013).

4.5 ESTADO DA LITERATURA SOBRE A CONDIÇÃO SUPERFICIAL DAS ARMADURAS

A condição superficial das armaduras de aço tem sido reconhecida como um fator que pode influenciar o desempenho e a durabilidade das estruturas de concreto armado, especialmente em ambientes favoráveis ao processo de carbonatação. Entretanto, a análise dos

estudos selecionados demonstra que essa variável ainda é pouco explorada de forma isolada, sendo frequentemente abordada apenas como um fator secundário em pesquisas sobre corrosão, carbonatação e vida útil das estruturas.

Na literatura nacional recente, observa-se uma predominância de estudos voltados aos mecanismos de deterioração do concreto e aos processos de iniciação e propagação da corrosão das armaduras. Araruna (2023), ao realizar uma revisão sobre prevenção e recuperação de estruturas de concreto armado afetadas pela corrosão, destacam que fatores como cobrimento inadequado, elevada permeabilidade do concreto e avanço da carbonatação favorecem a despassivação do aço, embora a condição superficial inicial das armaduras ainda seja pouco considerada nas avaliações experimentais.

Da mesma forma, Lopes *et al.* (2022) ressaltam que os modelos preditivos de vida útil das estruturas de concreto normalmente utilizam parâmetros relacionados à penetração de cloretos, à carbonatação e às propriedades do concreto, sem incorporar características da superfície das armaduras. Segundo os autores, essa limitação pode influenciar a precisão das estimativas de iniciação da corrosão, principalmente em estruturas submetidas a condições ambientais agressivas.

Em estudo, Medeiros (2002) analisou o comportamento de argamassas de reparo em estruturas com corrosão induzida por carbonatação, demonstrando que a perda da alcalinidade do concreto compromete a proteção natural das armaduras. Embora o foco da pesquisa tenha sido a eficiência dos materiais de reparo, os resultados reforçam que o estado inicial do aço pode influenciar o desempenho dos sistemas de recuperação, indicando a necessidade de investigações específicas sobre superfícies previamente oxidadas.

Rezende *et al.* (2023) avaliaram a corrosão de armaduras em compósitos cimentícios contendo resíduos de rochas ornamentais e verificaram que alterações na microestrutura do concreto influenciam diretamente o comportamento eletroquímico do aço. Os autores enfatizam que a interação entre a matriz cimentícia e a superfície metálica constitui um aspecto determinante para a durabilidade das estruturas, embora a condição superficial prévia das barras não tenha sido objeto específico da investigação.

Complementando essa discussão, Teodoro e Carrazedo (2025) demonstraram que o avanço da carbonatação continua sendo um dos principais fatores responsáveis pela despassivação das armaduras em ambientes urbanos. Os autores ressaltam que a previsão da vida útil das estruturas depende da consideração simultânea de fatores relacionados ao concreto, ao ambiente de exposição e às características das armaduras, evidenciando que a inclusão da

condição superficial do aço pode contribuir para modelos mais representativos do comportamento estrutural.

5 DISCUSSÃO

Nesta seção, os resultados são discutidos de forma crítica e comparativa, considerando as evidências apresentadas pelos estudos selecionados.

5.1 ANÁLISE CRÍTICA DOS MECANISMOS INTERDEPENDENTES

A durabilidade das estruturas de concreto armado depende da interação entre diversos fatores relacionados tanto às características do concreto quanto às condições das armaduras nele inseridas. No contexto dos concretos com elevado teor de fíler calcário, a análise conjunta dos estudos revisados demonstra que o processo de corrosão das armaduras não pode ser explicado apenas pelo aumento da carbonatação ou exclusivamente pela condição superficial do aço. Na realidade, ambos os fatores atuam de forma interdependente, influenciando diretamente o desempenho e a vida útil das estruturas.

Os estudos analisados apresentam consenso quanto ao fato de que o aumento da substituição do cimento por fíler calcário reduz a reserva alcalina disponível no concreto, favorecendo o avanço da frente de carbonatação. Trabalhos desenvolvidos por Lollini, Redaelli e Bertolini (2014), Fante *et al.* (2022), Steiner *et al.* (2022), Marinković, Radović e Carević (2023) e Radović *et al.* (2024a) demonstram que concretos contendo maiores percentuais de fíler calcário apresentam maior suscetibilidade à carbonatação quando comparados aos concretos convencionais. Essa condição favorece a redução do pH da solução dos poros e aumenta a probabilidade de despassivação das armaduras.

Para que o processo corrosivo se desenvolva de maneira significativa, fatores relacionados à superfície da armadura também exercem papel determinante. Nesse aspecto, os trabalhos analisados sugerem que armaduras previamente oxidadas tendem a apresentar maior vulnerabilidade após a perda da alcalinidade do concreto. A existência de produtos de corrosão preexistentes pode gerar descontinuidades na película passiva e favorecer a formação de regiões anódicas e catódicas, criando condições propícias ao desenvolvimento das reações eletroquímicas responsáveis pela corrosão (Batić *et al.*, 2013).

Embora essa tendência seja amplamente aceita do ponto de vista teórico, verificou-se que poucos estudos avaliaram experimentalmente a influência da condição superficial do aço em concretos com elevado teor de fíler calcário submetidos à carbonatação. A maior parte das pesquisas concentra-se na análise da carbonatação e dos parâmetros de durabilidade do concreto, sem investigar detalhadamente as condições iniciais das armaduras. Dessa forma,

observa-se uma divergência entre o conhecimento consolidado sobre os mecanismos de corrosão e a disponibilidade de evidências experimentais específicas para esse tipo de material.

Outro ponto de consenso entre os autores refere-se à influência da microestrutura do concreto sobre a velocidade de carbonatação. Estudos como os de Steiner *et al.* (2022) e Fante *et al.* (2022) demonstram que fatores como relação água/cimento, distribuição granulométrica dos materiais e qualidade da cura podem modificar a porosidade da matriz cimentícia. Em determinadas condições, o fíler calcário pode promover refinamento dos poros e melhorar a compactação do concreto, reduzindo parcialmente a difusão de gases. Entretanto, quando utilizado em elevados teores, predomina o efeito de diluição, reduzindo a quantidade de compostos alcalinos capazes de neutralizar o dióxido de carbono.

Essa observação ajuda a explicar algumas divergências encontradas na literatura. Enquanto determinados estudos relatam aumento expressivo da carbonatação com a incorporação de fíler calcário, outros apontam que substituições moderadas, geralmente inferiores a 15% ou 20%, podem apresentar desempenho semelhante ao concreto convencional quando associadas a um adequado controle tecnológico. Portanto, a influência do fíler calcário não depende exclusivamente do percentual de substituição, mas também da qualidade da dosagem, da cura e das condições de exposição ambiental.

Ao relacionar os resultados sobre carbonatação com aqueles associados ao comportamento das armaduras, percebe-se que concretos com elevada velocidade de carbonatação representam um ambiente potencialmente agressivo para armaduras previamente oxidadas. Nessas condições, a redução da alcalinidade ocorre de forma rápida, comprometendo a estabilidade da película passiva e favorecendo o desenvolvimento de processos corrosivos. Em contrapartida, armaduras com superfície limpa e adequadamente passivada tendem a apresentar maior resistência inicial, ainda que permaneçam suscetíveis à corrosão após a carbonatação atingir a região do cobrimento (Damineli, 2013).

5.2 LIMITAÇÕES DA LITERATURA ATUAL

A análise dos estudos selecionados permitiu identificar avanços significativos na compreensão dos efeitos do fíler calcário sobre a carbonatação e a durabilidade dos concretos. Entretanto, também foram observadas importantes limitações metodológicas e lacunas científicas que dificultam a comparação direta entre os resultados disponíveis e restringem a formulação de conclusões abrangentes acerca da influência da condição superficial das armaduras em concretos com elevado teor de fíler calcário.

Uma das principais limitações encontradas refere-se à ausência de padronização nos métodos utilizados para avaliação da carbonatação. Os estudos analisados empregaram diferentes concentrações de dióxido de carbono, períodos de exposição, níveis de umidade relativa e procedimentos de cura, fatores que influenciam diretamente a velocidade de avanço da frente carbonatada. Como consequência, os coeficientes de carbonatação obtidos pelos diferentes autores nem sempre são comparáveis, dificultando a consolidação de parâmetros universais para concretos contendo fíler calcário.

Outra limitação observada está relacionada à grande variabilidade dos teores de substituição de cimento por fíler calcário utilizados nas pesquisas. Enquanto alguns estudos investigaram substituições inferiores a 15%, outros avaliaram concretos contendo 50% de fíler calcário na composição cimentícia. Além disso, diferenças na granulometria, na pureza mineralógica e nas características físicas do material empregado contribuem para a heterogeneidade dos resultados encontrados na literatura.

Também foi constatada a ausência de consenso quanto aos limites seguros de substituição do cimento por fíler calcário. Alguns autores relatam que substituições moderadas apresentam comportamento semelhante ao concreto convencional, enquanto outros identificam reduções significativas na resistência à carbonatação mesmo para percentuais relativamente baixos. Essas divergências demonstram que o desempenho do material depende da interação entre múltiplos fatores, incluindo relação água/cimento, qualidade da cura, empacotamento de partículas e condições ambientais de exposição.

No que se refere especificamente à corrosão das armaduras, verificou-se que a maioria dos estudos concentra suas análises na influência da carbonatação sobre a alcalinidade do concreto e na perda da passivação do aço. Entretanto, poucos trabalhos investigam diretamente a condição superficial prévia das armaduras. Em geral, os pesquisadores utilizam barras de aço novas e limpas em seus programas experimentais, sem considerar situações frequentemente encontradas em obras, nas quais as armaduras podem apresentar diferentes graus de oxidação decorrentes do armazenamento, transporte ou exposição prévia ao ambiente.

Essa limitação torna-se particularmente relevante porque a condição superficial inicial do aço pode influenciar a formação da película passivadora, a distribuição de regiões anódicas e catódicas e a velocidade de propagação dos processos corrosivos após a carbonatação. Apesar de existirem fundamentos teóricos que indicam maior vulnerabilidade de armaduras previamente oxidadas, os estudos disponíveis ainda não fornecem evidências experimentais suficientes para quantificar essa influência em concretos com elevado teor de fíler calcário.

5.3 LIMITAÇÕES DA PRÓPRIA REVISÃO

Embora a presente revisão sistemática tenha sido conduzida de forma estruturada e baseada nos princípios do protocolo PRISMA, algumas limitações metodológicas devem ser consideradas na interpretação dos resultados apresentados.

Uma das principais limitações refere-se às bases de dados utilizadas para a busca dos estudos. A pesquisa foi realizada exclusivamente nas plataformas Scopus e Google Acadêmico, selecionadas por sua ampla cobertura de publicações científicas nas áreas de Engenharia Civil, Ciência dos Materiais e Durabilidade das Estruturas. Entretanto, a utilização de apenas duas bases de dados pode ter restringido a identificação de estudos relevantes indexados em outras plataformas especializadas, como *Web of Science*, *ScienceDirect*, *SpringerLink* ou *Engineering Village*.

Outra limitação está relacionada aos idiomas adotados como critério de inclusão. Foram considerados apenas estudos publicados em português e inglês, o que pode ter resultado na exclusão de pesquisas relevantes divulgadas em outros idiomas, especialmente em países que apresentam forte produção científica na área de materiais cimentícios, como China, Argentina, Sérvia, Alemanha, Grécia e Canadá. Dessa forma, parte do conhecimento produzido internacionalmente pode não ter sido contemplada nesta revisão.

O recorte temporal estabelecido entre os anos de 2000 e 2025 também representa uma limitação. Embora essa delimitação tenha sido adotada com o objetivo de priorizar pesquisas recentes e alinhadas às tecnologias atuais de concretos sustentáveis, alguns estudos clássicos e contribuições relevantes anteriores a esse período podem não ter sido incluídos na etapa principal de seleção. Ainda assim, determinadas referências históricas foram utilizadas de forma complementar na fundamentação teórica devido à sua reconhecida relevância científica.

Outra restrição diz respeito à disponibilidade dos estudos, uma vez que trabalhos potencialmente relevantes foram excluídos por não apresentarem acesso ao texto completo ou por estarem disponíveis apenas na forma de resumo, impossibilitando o emprego de seus resultados. Além disso, a exclusão de dissertações, teses e trabalhos de conclusão de curso também constitui uma limitação desta revisão, uma vez que esses documentos podem apresentar resultados originais e evidências ainda não publicadas em periódicos científicos. Essas limitações podem influenciar a abrangência do conjunto de evidências analisado.

6 CONCLUSÃO

A presente revisão sistemática teve como objetivo analisar a influência da condição superficial do aço no processo de corrosão de armaduras inseridas em concretos com elevado teor de fíler calcário submetidos à carbonatação. A partir da análise dos estudos selecionados, foi possível reunir e integrar evidências científicas relevantes sobre os mecanismos que relacionam a utilização de materiais cimentícios com baixo teor de clínquer, o avanço da carbonatação, a condição superficial das armaduras e a durabilidade das estruturas de concreto armado.

Os resultados demonstraram que a incorporação de fíler calcário representa uma alternativa promissora para a redução do impacto ambiental associado à produção de cimento Portland, contribuindo para a diminuição das emissões de dióxido de carbono e para o desenvolvimento de concretos mais sustentáveis. Entretanto, verificou-se que elevados teores de substituição do cimento por fíler calcário tendem a reduzir a reserva alcalina do concreto e favorecer o avanço da frente de carbonatação, aumentando o risco de despassivação das armaduras ao longo da vida útil das estruturas.

A análise da literatura evidenciou que a velocidade de carbonatação depende da interação entre diversos fatores, incluindo o teor de fíler calcário, a relação água/cimento, as condições de cura, a porosidade da matriz cimentícia e as condições ambientais de exposição. Em substituições moderadas, o fíler calcário pode contribuir para o refinamento da microestrutura do concreto e apresentar desempenho satisfatório. Contudo, em teores elevados, predomina o efeito de diluição do cimento, resultando em maior suscetibilidade à carbonatação.

No que se refere à condição superficial das armaduras, verificou-se que a literatura científica ainda apresenta escassez de estudos específicos que avaliem diretamente a influência da oxidação prévia do aço em concretos contendo elevados teores de fíler calcário. Apesar dessa limitação, os mecanismos eletroquímicos descritos pelos autores indicam que armaduras previamente oxidadas tendem a apresentar maior vulnerabilidade aos processos corrosivos após a perda da alcalinidade do concreto, quando comparadas às armaduras com superfície limpa e adequadamente passivada.

A síntese das evidências permitiu concluir que a durabilidade de concretos produzidos com elevado teor de fíler calcário não depende exclusivamente do teor de substituição do cimento ou da velocidade de carbonatação, mas da interação entre as características da matriz cimentícia, as condições de exposição e a condição superficial das armaduras. Dessa forma, os mecanismos de carbonatação e corrosão devem ser analisados de maneira integrada, uma vez

que a redução da reserva alcalina favorece a despassivação do aço e pode potencializar os efeitos de condições superficiais desfavoráveis.

Embora esta revisão tenha sido conduzida de forma sistemática, seguindo as recomendações do protocolo PRISMA, os resultados devem ser interpretados considerando algumas limitações, como a utilização de um número restrito de bases de dados, o recorte temporal adotado e, principalmente, a reduzida disponibilidade de estudos experimentais que investiguem simultaneamente a condição superficial das armaduras e concretos com elevados teores de fíler calcário submetidos à carbonatação.

Apesar dessas limitações, esta revisão sistemática contribui para ampliar o conhecimento sobre a durabilidade de concretos ecoeficientes, ao reunir e discutir de forma integrada evidências que normalmente são tratadas de maneira isolada na literatura. Os resultados obtidos fornecem subsídios para pesquisadores e profissionais da Engenharia Civil na avaliação do desempenho de concretos com elevado teor de fíler calcário, contribuindo para o desenvolvimento de estruturas que conciliem sustentabilidade ambiental, desempenho mecânico e vida útil adequada.

Como recomendação para pesquisas futuras, sugere-se o desenvolvimento de estudos experimentais que avaliem diretamente o comportamento de armaduras com diferentes níveis de oxidação superficial inseridas em concretos contendo variados teores de fíler calcário. Recomenda-se ainda a realização de ensaios de longa duração em condições naturais de exposição, permitindo a validação dos resultados obtidos em testes acelerados de carbonatação.

Também se mostra relevante o desenvolvimento de modelos preditivos capazes de integrar variáveis relacionadas à composição do concreto, ao avanço da carbonatação e às características superficiais das armaduras, possibilitando estimativas mais precisas da vida útil das estruturas. Além disso, novas pesquisas poderão contribuir para a definição de limites seguros de substituição do cimento por fíler calcário, conciliando sustentabilidade ambiental, desempenho mecânico e durabilidade.

Assim, conclui-se que o emprego de concretos com elevado teor de fíler calcário constitui uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente relevante para a construção civil, desde que sua utilização seja acompanhada por critérios adequados de dosagem, controle tecnológico e avaliação da durabilidade. Nesse contexto, a condição superficial das armaduras desponta como um fator potencialmente determinante para o desempenho das estruturas, reforçando a necessidade de sua incorporação em futuras pesquisas e em modelos de previsão da vida útil do concreto armado.

REFERÊNCIAS

- ARARUNA, J. C. M. Prevenção e recuperação de estruturas de concreto armado afetadas pela corrosão das armaduras: uma revisão da literatura. **Revista Principia**, João Pessoa, n. 64, 2023. Disponível em: <https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/download/6633/1975>. Acesso em: 5 jun. 2026.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
- BATIĆ, O. R.; SOTA, J. D.; FERNÁNDEZ, J. L.; BELLOTTI, N.; ROMAGNOLI, R. Rebar corrosion in mortars with high limestone filler content. **Anti-Corrosion Methods and Materials**, v. 60, n. 1, p. 3-13, 2013.
- DAMINELLI, B. L. **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes**: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2013.
- FANTE, M.; RIBEIRO, F. R. C.; NUNES, D. B.; MODOLO, R. C. E.; KAZMIERCZAK, C. S.; MANCIO, M.; TOGNOLI, F. M. W.; AZEVEDO, A. R. G.; KULAKOWSKI, M. P. Behavior of cementitious mixtures with filler carbonate subjected to accelerated carbonation. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, e01300, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01300>. Acesso em: 17 jun. 2026.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 7. ed. Barueri: Atlas, 2025.
- GRIGOLETTI, G. C.; SATTLER, M. A. Estratégias ambientais para indústrias de cerâmica vermelha do Estado do Rio Grande do Sul. **Ambiente Construído**, v. 3, n. 3, p. 19–32, 2003.
- ISAIA, G. A. **A carbonatação de concretos com elevados teores de filer calcário protegidos por película protetora**. 2021.
- JIANG, Z.; YANG, Q.; WANG, B.; LI, C.; ZHANG, J.; REN, Q. Limestone filler as a mineral additive on the compressive strength and durability of self-compacting concrete with limestone manufactured sand. **Journal of Building Engineering**, v. 94, 109965, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.109965>. Acesso em: 17 jun. 2026.
- JOHN, V. M.; DANIEL, P. O.; JOSÉ, A. R. L. **Tecnologias para construção habitacional mais sustentável Habitação mais Sustentável**. Levantamento do estado da arte: Seleção de materiais. FINEP, 2007.
- LI, C.; JIANG, L. Effect of limestone powder addition on corrosion initiation time of reinforced concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 59, 105132, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.105132>. Acesso em: 17 jun. 2026.
- LOLLINI, F.; REDAELLI, E.; BERTOLINI, L. Effects of Portland cement replacement with limestone on the properties of hardened concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 46, p. 32-40, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.10.016>. Acesso em: 17 jun. 2026.

LOPES, R. C.; OLIVEIRA, A. M. de; CASCUDO, O. Modelos preditivos de vida útil de estruturas de concreto sujeitas à iniciação da corrosão de armaduras por cloretos: contribuição ao estado da arte. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 27, n. 2, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/y9bPXtvMBLM4DGS3fXCnbDx/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 5 jul. 2026.

MARINKOVIĆ, M.; RADOVIĆ, A.; CAREVIĆ, V. Carbonation of limestone powder concrete: state-of-the-art overview. **Building Materials and Structures**, v. 66, 2300005M, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.5937/GRMK2300005M>. Acesso em: 17 jun. 2026.

MEDEIROS, M. H. F. de. **Estruturas de concreto com corrosão de armaduras por carbonatação**: comparação de argamassas de reparo quanto à proteção do aço. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-03042025-131922/pt-br.html>. Acesso em: 5 jul. 2026.

CARVALHO, M. R.; MEIRA, G. R.; FERREIRA, P. R. R.; MEDEIROS, M. Study of the effectiveness of realkalisation treatment on reinforcement repassivation by using simulated concrete pore solution. **Construction and Building Materials**, v. 321, 126318, 2022.

MONTEMOR, M. F.; SIMÕES, A. M. P.; FERREIRA, M. G. S. Chloride-induced corrosion on reinforcing steel: from the fundamentals to the monitoring techniques. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, n. 4- 5 SPEC, p. 491–502, 2003.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. de. Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico. 2. **Ed. Novo Hamburgo: Feevale**, 2013.

RADOVIĆ, A.; CAREVIĆ, V.; MARINKOVIĆ, S.; PLAVŠIĆ, J.; TEŠIĆ, K. Prediction model for calculation of the limestone powder concrete carbonation depth. **Journal of Building Engineering**, v. 86, 108776, 2024a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.108776>. Acesso em: 17 jun. 2026.

RADOVIĆ, A.; CAREVIĆ, V.; RADEVIĆ, A.; STUPAR, B.; VELIČKOV, D. Influence of curing period on some mechanical and durability-related properties of limestone powder concrete. **Building Materials and Structures**, v. 67, 2400007R, 2024b. Disponível em: <https://doi.org/10.5937/GRMK2400007R>. Acesso em: 17 jun. 2026.

REZENDE, M. de A. M.; GROMBONI, P. P.; CORRADINI, P. G.; SALES, A.; MASCARO, L. H. Evaluation of reinforcement corrosion in cementitious composites containing ornamental stone waste. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 34, n. 8, 2023. Disponível em: https://jbcs.sbq.org.br/audiencia_pdf.asp?aid2=11450&nomeArquivo=2022-0331AR.pdf. Acesso em: 5 jul. 2026.

STEINER, S.; PROSKE, T.; WINNEFELD, F.; LOTHENBACH, B. Effect of limestone fillers on CO₂ and water vapour diffusion in carbonated concrete. **Cement**, v. 8, 100027, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cement.2022.100027>. Acesso em: 17 jun. 2026.

TSIVILIS, S.; BATIS, G.; CHANIOTAKIS, E.; GRIGORIADIS, G.; THEODOSSIS, D. Properties and behavior of limestone cement concrete and mortar. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 1679-1683, 2000.

TEODORO, C. P.; CARRAZEDO, R. Impact of carbonation on reinforced concrete structures in urban environments considering the Brazilian standard ABNT NBR 6118:2023. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, 2025. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/riem/a/NF5pxzt9nLhqBWcn4wzDVBC/?lang=en>. Acesso em: 5 jul. 2026.

ZHANG, R.; SCOTT, A. N.; PANESAR, D. K. Carbonation and CO₂ reabsorption of cement-based materials: influence of limestone filler and ground-granulated blast-furnace slag. **Construction and Building Materials**, v. 416, 135166, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135166>. Acesso em: 17 jun. 2026.

	INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
	Campus Cajazeiras - Código INEP: 25008978
	Rua José Antônio da Silva, 300, Jardim Oásis, CEP 58.900-000, Cajazeiras (PB)
	CNPJ: 10.783.898/0005-07 - Telefone: (83) 3532-4100

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

TCC final

Assunto:	TCC final
Assinado por:	Milenna Silva
Tipo do Documento:	Projeto
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência:	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Milenna Soares da Silva, DISCENTE (202122200014) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL - CAJAZEIRAS**, em 11/08/2026 22:36:46.

Este documento foi armazenado no SUAP em 11/08/2026. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1946550
Código de Autenticação: a46ce725f4

