REVISTA TÓPICOS
ISSN 2965-6672 | Qualis A2

ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL RESIDUAL DE ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO A PARTIR DA ANÁLISE DA CARBONATAÇÃO: ESTUDO DE CASO COM O ENSAIO DE FENOLFTALEÍNA

ESTIMATION OF THE RESIDUAL USEFUL LIFE OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES BASED ON CARBONATION ANALYSIS: CASE STUDY WITH THE PHENOLPHTHALEIN TEST

Engenharias • 26/11/2026

REGISTRO DOI: 10.70773/revistatopicos/795599138

Jefferson Stanley Fernandes Bandeira
Mirella Vitória Nunes Pereira
Danilo Teixeira Mascarenhas de Andrade
Leonardo do Nascimento Cunha

RESUMO

Entre os principais agentes de deterioração do concreto, a carbonatação é um dos principais fatores que favorecem a despassivação das armaduras acelerando a corrosão, esse fenômeno ocorre naturalmente em estruturas antigas de concreto, influenciada por uma série de fatores externos e internos que surgem ao longo da sua vida útil, como infiltrações e fissuras. Além de favorecer para o início da carbonatação, também colaboram para o seu avanço, favorecendo sua entrada pela camada protetora do concreto intitulada de cobrimento nominal, até alcançar a armadura de aço. Este trabalho consiste em analisar uma estrutura de concreto armado, buscando encontrar pontos em que haja suspeita de carbonatação, com intuito de realizar ensaios para analisar o estado de deterioração presente naquele local, e dessa forma realizar cálculos por meio de uma fórmula matemática com o objetivo de estimar o tempo restante em anos para a carbonatação chegar na armadura. O método de ensaio escolhido utiliza como ferramenta para indicar a profundidade da carbonatação a solução de fenolftaleína, um reagente químico que, ao ser aplicado sobre o concreto, permite identificar visualmente a região carbonatada. Dessa forma, o ensaio tem como objetivo determinar a profundidade atingida pela carbonatação no concreto, utilizando como meio interceptador a reação química da fenolftaleina, que reage e demonstra a profundidade alcançada pela carbonatação, a medida obtida será usada posteriormente na fórmula para determinar a estimativa da vida útil residual da estrutura.

Palavras-chave: Carbonatação; Estrutura; Concreto.

ABSTRACT

Among the main deterioration mechanisms affecting concrete, carbonation is one of the primary factors responsible for the

depassivation of steel reinforcement, thereby accelerating corrosion. This phenomenon occurs naturally in older concrete structures and is influenced by several external and internal factors that arise throughout their service life, such as water infiltration and cracking. In addition to contributing to the onset of carbonation, these factors also promote its progression, facilitating its penetration through the protective concrete layer, known as the nominal concrete cover, until it reaches the steel reinforcement. This study aims to analyze a reinforced concrete structure in order to identify areas suspected of carbonation, with the purpose of conducting tests to assess the degree of deterioration present at these locations. Based on the results, mathematical calculations will be performed using a specific formula to estimate the remaining time, in years, until carbonation reaches the steel reinforcement. The selected testing method uses a phenolphthalein solution as an indicator of carbonation depth. This chemical reagent, when applied to the concrete surface, allows the carbonated region to be visually identified. Thus, the test aims to determine the depth of carbonation penetration into the concrete through the chemical reaction of phenolphthalein, which indicates the extent reached by the carbonation process. The measured value will subsequently be used in the mathematical formula to estimate the remaining service life of the structure.
Keywords: Carbonation; Structure; Concrete.

1. INTRODUÇÃO

O concreto armado surgiu mundialmente no ano de 1849, como uma ideia criada por Joseph Monier, a qual constituía em juntar dois materiais diferentes, o aço e o concreto, formando um elemento só, uma ideia que revolucionou os métodos construtivos existentes na época, tornando-se amplamente utilizado em construções a partir

daquela época. Desde então, os estudos e projetos de concreto armado vêm evoluindo, buscando melhorar sua segurança e durabilidade por meio de normas que orientam a execução e a manutenção das estruturas (da Silva, 2021).

A durabilidade das estruturas de concreto armado constitui um aspecto fundamental a ser considerado no âmbito da engenharia civil, uma vez que essas estruturas são projetadas para resistir por longos períodos às ações do ambiente e a diversos agentes agressivos que atuam ao longo de sua vida útil. Essa associação permite que cada material contribua de forma complementar para o desempenho estrutural, visto que o concreto apresenta elevada resistência aos esforços de compressão, enquanto o aço possui significativa resistência à tração (Santos, 2025).

Na prática, o concreto armado é amplamente utilizado na construção civil, estando presente em diversas obras, como residências, edifícios, pontes e outras estruturas. Muitas dessas construções permanecem em funcionamento por várias décadas, demonstrando a eficiência e a durabilidade desse sistema construtivo. Tal fato evidencia a importância do concreto armado no desenvolvimento das obras de engenharia e na garantia da segurança e longevidade das estruturas (Frazão, 2023).

As estruturas de concreto armado são construídas em diferentes ambientes, como zonas urbanas, rurais, industriais e marítimas, cada um com níveis distintos de agressividade ambiental. Esses fatores podem comprometer a durabilidade e a vida útil das estruturas, tornando necessárias inspeções periódicas para identificar possíveis danos e a necessidade de manutenção. Entre os principais mecanismos de deterioração destaca-se a carbonatação, um

processo físico-químico no qual o dióxido de carbono (CO_2) presente na atmosfera penetra nos poros do concreto e reage com seus compostos, formando carbonato de cálcio ($CaCO_3$), (Lacerda *et al.*, 2017).

A carbonatação causa a redução da alcalinidade do concreto por meio da reação do CO_2, diminuindo o pH, essa redução compromete a película passivadora que protege a armadura de aço. Com a perda dessa proteção, as armaduras ficam mais suscetíveis à corrosão devido à presença de umidade e oxigênio, podendo causar fissuras e até o desplacamento do cobrimento no concreto. Embora o concreto seja pouco afetado diretamente por esse fenômeno, as armaduras podem sofrer corrosão, comprometendo a vida útil residual da estrutura (Krug, 2023).

Diante da necessidade de investigar a vida útil residual de estruturas remanescentes de concreto armado afetadas pelo processo de carbonatação, formula-se o seguinte problema de pesquisa: qual é a vida útil residual estimada para uma estrutura consolidada de concreto armado a partir da profundidade de carbonatação determinada pelo ensaio de fenolftaleína? O estudo parte da hipótese de que a vida útil residual pode ser estimada com base na profundidade da frente da carbonatação, um ensaio que é feito por meio de amostras retiradas de estruturas antigas com o uso da solução de fenolftaleína (Ribeiro *et al.* 2023).

A partir deste ensaio é possível determinar o coeficiente de carbonatação e, com fundamento em modelos teóricos, prever o tempo necessário para que a carbonatação atinja as armaduras e ocorra a despassivação do aço, dando início ao processo de corrosão. Este processo ocasiona a degradação das armaduras fazendo com

que ocorra o desplacamento da superfície do concreto (Cassavara; Rodrigues Filho; Costa, 2022). O objetivo principal deste trabalho é avaliar uma estrutura antiga de concreto armado e estimar a vida útil residual através do ensaio de fenolftaleína.

A avaliação da vida útil residual de estruturas antigas de concreto armado tem sido cada vez mais abordada na engenharia civil, uma vez que, com o passar do tempo, essas estruturas ficam sujeitas a diversos mecanismos de deterioração que podem comprometer sua durabilidade, desempenho e, principalmente, a segurança estrutural, colocando em risco não apenas a integridade da edificação, mas também a segurança dos usuários. É fundamental considerar as exigências de durabilidade estabelecidas pela norma, de modo que as estruturas devem ser projetadas de forma a garantir as condições necessárias de conservação da sua vida útil ABNT, 2023.

Entre os principais agentes de deterioração do concreto, a carbonatação é um dos principais fatores que favorecem a despassivação das armaduras acelerando a corrosão. Nesse contexto, o ensaio com solução de fenolftaleína é amplamente utilizado para identificar a alteração do pH do concreto permitindo determinar a profundidade da frente de carbonatação, correspondente à espessura do concreto carbonatado a partir da superfície exposta ao meio ambiente (Helene, 1993). Estimar a vida útil residual é fundamental, pois essa análise subsidia a tomada de decisões quanto à necessidade de intervenções, reparos ou reforços estruturais em edificações que apresentem desempenho comprometido ao longo do tempo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Fundamentos do Concreto Armado e Suas Patologias

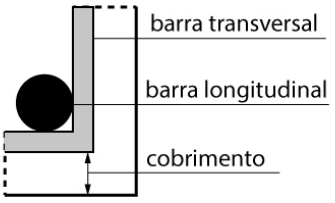
Após a chegada do concreto armado no Brasil, deu-se início ao processo de verticalização das construções nas cidades, que consistia na criação de edifícios com múltiplos pavimentos, além de iniciar a construção de outras estruturas importantes para o desenvolvimento do Brasil, como pontes e viadutos, dentre outras estruturas. Com a utilização desse método de construção, essas estruturas mais complexas foram possíveis de serem criadas e construídas, aplicando-se o método de construção em concreto armado na composição dessas estruturas, transformando a maneira de construir da época (Vergara, 2025).

O método construtivo utilizando concreto armado, desde sua criação, se tornou um dos mais utilizados no mundo, pois se trata de um método com execução moderadamente simples, realizado no próprio canteiro de obras, também conhecido como “in loco”. Após o início da sua implementação na construção civil, buscou-se aprimorara maneira como o concreto armado era produzido no dia a dia das obras, pesquisando maneiras de melhorar sua composição, para melhorar sua resistência e durabilidade, criando padrões de construção para as futuras estruturas que iriam utilizar desse método construtivo (Amescoa, 2025).

Um dos principais padrões criados para a construção civil que envolve o uso do concreto armado, é chamado de cobrimento nominal, conforme **figura 1,** que se refere a criação de uma camada de concreto com espessura normatizada, cuja função é proteger a armadura de aço presente nas estruturas de concreto, criando um escudo protetor em meio as ações e intempéries do ambiente. Vale lembrar que o cobrimento nominal varia de acordo com o local de

execução da estrutura, possuindo espessura conforme o nível de agressividade ambiental, além de variar de acordo com o tipo de elemento estrutural (Brandalize, 2024).

Figura 1. Cobrimento Nominal.



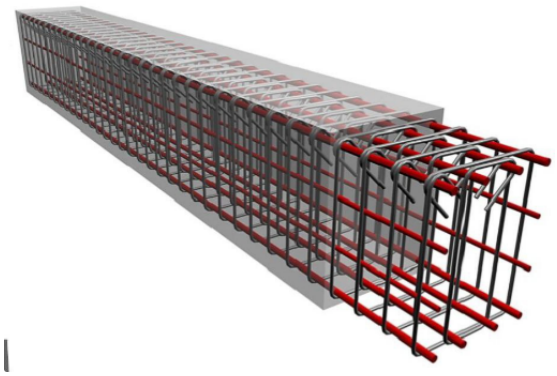
Fonte: Moura, (2021).

As estruturas de concreto armado sofrem com diversos fatores que prejudicam sua vida útil residual, como as patologias, situações que vem a ocorrer desde a fase de concepção da estrutura, na parte de construção da edificação, quando já está em uso ou até décadas após sua conclusão. As patologias devem sempre ser levadas em consideração, pois em algum momento da vida útil da estrutura podem vir a ocorrer, seja por falhas na etapa de construção ou por outros fatores que estejam agredindo a edificação, além de que se deve investigar a patologia, buscando encontrar as causas e fatores que a geraram na estrutura (Matildes, 2022).

O concreto armado por ser composto de dois materiais diferentes vide **figura 2,** com características distintas entre eles, está sujeito a diversas patologias, as quais afetam cada material de maneira diferente, atacando diretamente nas falhas deixadas por má execução ou por defeitos de fabricação. Na maioria das vezes, o concreto armado é produzido no canteiro de obras, ou seja, nem sempre é produzido por uma mão de obra especializada, por se tratar de um método simples, esse tipo de produção, se não realizado corretamente, pode acarretar em falhas na

homogeneização da massa do concreto que será introduzida na estrutura, cedendo espaço para patologias (Pires, 2023).

Figura 2. Concreto e aço, formando o concreto armado.



Fonte: Banca Virtual, (2022).

A estrutura de concreto armado após ser concretada, pode apresentar falhas e defeitos referente aos problemas vindos da sua produção, o concreto deve ser produzido da maneira correta, garantindo que sua homogeneização fique a melhor possível, porém, não será apenas isso que garantirá um concreto com porosidade próxima de zero. Um concreto homogêneo necessita de outros cuidados especiais para se manter impermeável, isto é, deve-se seguir as etapas corretamente, desde sua produção, até o lançamento dentro das formas já preparadas, seguidas da etapa de compactação utilizando equipamentos específicos, além de realizar o processo de cura corretamente (Maines, 2022).

Além dos fatores relacionados a execução e produção do concreto armado, existem outros tipos de agentes causadores de patologias, como no caso os fatores derivados das condições climáticas em que vivemos hoje, como a alta temperatura em vários locais do planeta. A temperatura é um fator de extrema importância que deve ser considerado em uma estrutura, pois ela é responsável pelas movimentações que atuam na estrutura, no caso da expansão

causada pelo aumento da temperatura e na contração da estrutura gerada pela diminuição da temperatura, essas variações de temperatura junto com outros fatores contribuem para que haja patologias (Sousa, 2025).

Juntamente com as variações de temperatura, outro agente causador de patologia derivado de condições climáticas denomina-se umidade, caracterizada por uma quantidade de água presente em um local, mas nem sempre esse agente é derivado do clima, ou seja, pode ter ocorrido como resultado de infiltrações de água, sucedidas de vazamentos de água na estrutura. A umidade pode ser considerada como um fator causador de patologias, contudo, ela não causa patologias, como também abre portas para o surgimento de outras manifestações patológicas, prejudicando ainda mais a estrutura, causando deterioramento, comprometendo a estabilidade da estrutura (Borges, 2023).

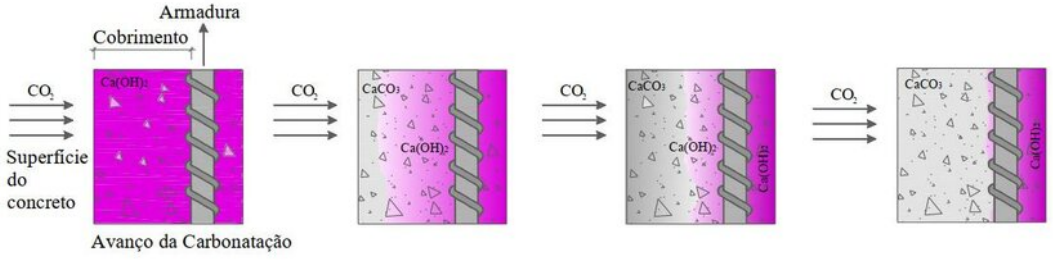
2.2. Carbonatação Como Principal Patologia

Na engenharia, problemas relacionados a patologias ocorrem com frequência, uma vez que as estruturas estão sujeitas, ao longo do tempo, a ações diretas e indiretas que comprometem seu desempenho. A necessidade de investigação dessas estruturas surge em função do avanço das manifestações patológicas, que podem afetar a segurança estrutural e reduzir a vida útil das construções. A identificação tardia dessas manifestações tende a elevar os custos de manutenção. Dessa forma, a investigação deve ser realizada ainda nos estágios iniciais, permitindo a análise e o gerenciamento adequados, a fim de evitar o comprometimento da integridade estrutural (Hirle *et al.*, 2023).

As normas garantem que todas as estruturas atendam aos requisitos mínimos necessários para assegurar durabilidade e segurança estrutural, exigindo que todas as construções sigam rigorosamente as condições estabelecidas pelas normas técnicas, o que é essencial para garantir a estabilidade estrutural das obras. Desta forma, a durabilidade de uma estrutura está relacionada à sua capacidade de se manter em pleno funcionamento ao longo do tempo, sem a necessidade de intervenções que alterem suas condições originais, preservando, assim, seu desempenho estrutural (Machado; Oliveira, 2025).

Diante das manifestações patológicas existentes, a carbonatação se destaca pelo seu elevado grau de gravidade quando atinge as armaduras da estrutura, comprometendo o desempenho estrutural, conforme **figura 3.** A carbonatação é um processo no qual o dióxido de carbono presente no ar reage com os compostos do cimento, formando carbonato de cálcio, o processo de carbonatação ocorre de forma natural, podendo ser acelerado por diversos fatores que atuam sobre a estrutura, desde a umidade do ar até ao descumprimento das normas técnicas (Krug *et al.*, 2023).

Figura 3. Processo de Carbonatação.



Fonte: Souza, (2019).

A aceleração do processo de carbonatação pode ocorrer por diversos fatores, sendo os mais comuns a alta concentração de dióxido de carbono no ambiente e o cobrimento insuficiente das armaduras. O

dióxido de carbono é classificado como um gás de efeito estufa e pode permanecer por anos na atmosfera, sendo o setor da construção civil um dos principais responsáveis pela emissão de gases causadores do efeito estufa (Rodrigues; Rodrigues, 2024).

Conforme as normas técnicas, todas as estruturas de concreto armado devem possuir cobrimento mínimo, que consiste em uma camada de proteção das armaduras contra a corrosão. Os valores de cobrimento devem ser adotados conforme estabelecido em norma, podendo variar de acordo com as condições de exposição e o ambiente em que a estrutura está inserida. Dessa forma, para atender aos critérios normativos, o cobrimento mínimo deve ser respeitado ao longo de todo o dimensionamento e execução da estrutura, garantindo seu adequado desempenho e durabilidade (ABNT, 2023).

O processo químico de carbonatação ocorre quando o dióxido de carbono presente no ar penetra nos poros do concreto e reage com os compostos do cimento. Esse fenômeno provoca a redução do pH do concreto, que, em condições normais, varia entre 12 e 13, podendo cair para valores próximos de 8 devido à carbonatação. Essa alteração afeta diretamente a camada de cobrimento das armaduras, acelerando a corrosão e podendo provocar o desplacamento da camada protetora, comprometendo sua proteção e interferindo na vida útil da estrutura (Rios *et al.*, 2020).

Quando o dióxido de carbono penetra nos poros do concreto e reage com a água presente, forma-se o ácido carbônico, conforme a reação: $CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3$, após sua formação, o ácido carbônico reage com o hidróxido de cálcio, um dos principais produtos da hidratação do cimento, resultando na formação de carbonato de

cálcio: $Ca(OH)_2 + H_2CO_3 \rightarrow CaCO_3 + 2H_2O$. Esse processo contribui para a redução do pH do concreto e a carbonatação passa a afetar diretamente as armaduras, levando à destruição da camada passivadora do aço (Moraes *et al.*, 2024).

Quando a camada passivadora do aço é rompida, ocorre a despassivação das armaduras, deixando o aço exposto a corrosão. Esse fenômeno ocorre principalmente devido à redução da alcalinidade do concreto, causada por processos como a carbonatação que comprometem a proteção natural do aço. Assim, o aço entra em contato com o oxigênio e a umidade, iniciando reações de oxidação que geram ferrugem. A ferrugem ocupa um volume maior que o aço, criando tensões internas que provocam fissuras no concreto e podem levar ao desplacamento do cobrimento e comprometer a integridade estrutural da edificação. Por isso, a despassivação é considerada uma das principais causas de deterioração em estruturas de concreto armado, afetando diretamente sua durabilidade e segurança (Helene, 1986).

2.3. Determinação da Profundidade da Carbonatação Através do Ensaio de Fenolftaleína

Para verificar se a carbonatação atingiu as armaduras, utiliza-se o parâmetro da profundidade de carbonatação, que indica até que ponto o dióxido de carbono conseguiu penetrar nos poros do concreto. A avaliação desse parâmetro permite estimar a durabilidade da estrutura, possibilitando prever a vida útil residual da estrutura analisada, bem como avaliar as possíveis causas da degradação e os reparos necessários para garantir sua integridade. Para sua determinação, existem diversos métodos de análise, destacando-se aqueles que utilizam indicadores de pH da estrutura,

conforme **figura 4,** amplamente empregados na engenharia civil (Gomes, 2020).

Figura 4. Medição da profundidade.



Fonte: Dynamis Techne ([s.d.]).

Um dos principais motivos para a determinação da profundidade de carbonatação é estimar a vida útil remanescente da estrutura, sem necessidade imediata de intervenções. A partir dessa determinação, é possível avaliar o estado de conservação em que a estrutura se encontra, bem como investigar as possíveis causas da manifestação patológica. Além disso, um dos fatores que mais influenciam diretamente a profundidade de carbonatação é a relação água/cimento, pois ela controla a facilidade com que o dióxido de carbono penetra no concreto (Galhardi, 2020).

A relação água/cimento está ligada diretamente à quantidade de água que é colocada no traço, interferindo na porosidade do concreto. A água reage com o aglomerante, realizando a hidratação do concreto; esse processo é fundamental para que o material atinja os níveis de resistência mecânica exigidos, garantindo sua durabilidade e desempenho estrutural. Além disso, a proporção entre água e cimento influencia diretamente a facilidade com que o dióxido de carbono penetra no concreto. Quanto maior a relação água/cimento, maior tende a ser a profundidade da carbonatação,

aumentando o risco de redução do pH e comprometendo a integridade das armaduras e, consequentemente, da própria estrutura (CARDOSO, OLIVEIRA, 2021).

Um dos métodos mais rápidos e fáceis de ser utilizado para determinar a frente da carbonatação é o ensaio de fenolftaleína. O ensaio consiste em através da solução visualizar a alteração do pH da estrutura, utilizando uma solução composta por fenolftaleína em pó e álcool etílico, utilizado como solvente, essa solução permite visualizar uma alteração de cor, que indica se houve a carbonatação. Assim, é possível determinar a profundidade da carbonatação através da distância da superfície externa do concreto, até o final da região que houve a alteração de cor. (Cotomacio, 2024).

O ensaio de fenolftaleína pode ser realizado diretamente na estrutura ou em um fragmento retirado como amostra. A solução utilizada é composta por 1 g de fenolftaleína dissolvida em 100 ml de álcool etílico 95%, podendo ser diluída em água destilada. Após a preparação da amostra, aplica-se a solução, que, dependendo de fatores como umidade, concentração da solução e acabamento da superfície, pode levar alguns minutos até que a mudança de cor se torne visível, indicando a ocorrência da manifestação patológica (Ribeiro *et al.*, 2023).

A carbonatação do concreto gera impactos importantes na engenharia, pois reduz a alcalinidade do material e compromete a proteção natural das armaduras, favorecendo o início da despassivação do aço e, consequentemente, a diminuição da durabilidade das estruturas de concreto armado. Esse processo pode gerar fissuras, vide **figura 5a,** destacamento do cobrimento, vide **figura 5b,** e perda de resistência estrutural ao longo do tempo,

aumentando a necessidade de manutenção e recuperação das edificações, o que reforça a importância do controle tecnológico do concreto e do adequado cobrimento das armaduras durante o projeto e a execução das obras (Mehta; Monteiro, 2014).

Figura 5. Fissura ao longo do cobrimento.



Fonte: Autores, (2026).

Os métodos de avaliação e controle da carbonatação do concreto são essenciais pois garantem a segurança da estrutura. Entre os principais métodos de avaliação além dos ensaios indicadores de pH, destaca-se a importância das medidas de controle, como a utilização de concretos de baixa permeabilidade, com a adequada da solução do fator água/cimento, de modo a preservar a alcalinidade do material. Estudos recentes mostram que a utilização de métodos de monitoramento e técnicas avançadas de medição da carbonatação contribui significativamente para a previsão da durabilidade e para o aumento da vida útil das estruturas de concreto (Wang *et al.*, 2024).

Os cuidados na engenharia são de suma importância, visto que, para evitar a carbonatação das estruturas envolvem principalmente o correto planejamento do projeto, a escolha adequada dos materiais e o controle da execução do concreto, garantindo que atenda as resistências necessárias e cobrimento suficiente das armaduras.

Pesquisas brasileiras destacam que o controle da porosidade, da relação água/cimento e das condições de exposição é essencial para reduzir o avanço da carbonatação e melhorar o desempenho do concreto frente aos agentes agressivos (Ribeiro; Dias; Silva, 2024).

3. METODOLOGIA

A presente metodologia de pesquisa desse trabalho consistiu em avaliar os resultados quantitativos, gerados por meio de ensaios realizados em campo, mediante o uso da solução de fenolftaleína, o principal elemento utilizado para a determinação da profundidade atingida pelo fenômeno da carbonatação, ocorrido principalmente em edificações antigas devido ao tempo de exposição da estrutura (Araújo Filho *et al.*, 2022).

O tipo de pesquisa abordada nesse estudo de caso trata-se de uma pesquisa descritiva, que tem como objetivo principal caracterizar um determinado fenômeno, descrevendo como ele ocorreu e investigando suas possíveis causas e efeitos, retratando todo o ocorrido durante a pesquisa, permitindo-se a avaliar as causas para ocorrências do mesmo tipo futuramente (Lobato, 2024.).

A abordagem do procedimento de pesquisa deste trabalho caracteriza-se como um estudo de caso, permitindo uma análise mais detalhada e aprofundada de um tema específico. Nesse contexto, o estudo trata da estimativa da vida útil de uma estrutura, determinada por meio de um ensaio que busca analisar a profundidade atingida pelo fenômeno da carbonatação (Sousa, 2023).

O local onde serão realizados os ensaios para a determinação da profundidade da carbonatação está situado em um estádio,

localizado em Teresina–Piauí. O objeto de estudo consiste nos elementos construtivos estruturais, presentes por toda parte da estrutura. Trata-se de estruturas de grande importância para a proteção do patrimônio esportivo do Piauí, o que torna essencial que se encontre em adequado estado de conservação, garantindo, assim, a segurança e a integridade do local.

O procedimento de coleta de dados seguirá através da análise da estrutura com visita ao local para realizar registros fotográficos da estrutura, seguidos das escolhas dos corpos de prova, a fim de executar os ensaios in loco com a solução de fenolftaleina, e por fim efetuar as medições das profundidades atingidas pela carbonatação em cada corpo de prova, determinando o tempo de vida útil residual da estrutura analisada.

A análise da carbonatação será realizada por meio de corpos de prova extraídos da estrutura em estudo. Após a aplicação da fenolftaleína, será possível identificar as regiões do concreto que sofreram ou não o processo de carbonatação, na sequência, será efetuado o registro fotográfico de todas as etapas, com o objetivo de complementar a análise. As imagens junto com o corpo de prova permitirão a medição da profundidade de carbonatação com o auxílio de uma régua, possibilitando uma avaliação quantitativa da patologia. Por fim, com base nos valores determinados, será realizada a estimativa da vida útil residual da estrutura por meio de modelos e cálculos apropriados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização da Estrutura Estudada e dos Pontos de Analise

Para obter amostras com resultados satisfatórios e de grande relevância para desenvolver esse estudo, o ideal é escolher uma estrutura que aparentemente possua manifestações patológicas que possam dá indícios de carbonatação. A estrutura escolhida para realizar essa analise trata-se de um estádio municipal do estado do Piauí, construído no século 20, possuindo cerca de 53 anos de existência, conforme as informações do governo do estado do Piauí. Assim como outras estruturas de concreto armado com a mesma idade, essa já sofreu bastante agressões devido as intempéries ao longo dessas décadas, possibilitando a análise do estado de carbonatação (Almeida, 2019).

Uma estrutura desse tipo chama muita atenção não apenas pelo seu porte estrutural, mas também pela curiosidade em saber como anda o seu estado de conservação. A estrutura evidenciava manifestações patológicas em alguns pontos, tornando-se possível a visualização de fissuras, infiltrações e desplacamento que foram surgindo ao longo do tempo, devido a idade estrutural avançada. Os pontos de análise foram escolhidos baseados nessas patologias, indicando uma possível carbonatação naquele local.

Devido à presença dessas manifestações patológicas na estrutura, foram realizados vários ensaios em pontos diferentes como vigas, escadas e paredes estruturais localizadas no subsolo da estrutura, local que apresentava maior parte das patologias. Ao analisarmos cada ponto da estrutura de concreto armado determinamos os locais para a aplicação da solução de fenolftaleina na própria estrutura analisada, sem a necessidade de retirar corpos de prova, e assim observar a reação química, com o propósito de determinar o quão carbonatado está a região. Dentre os locais analisados no decorrer do ensaio, foram escolhidas três amostras para serem

analisadas, uma para cada tipo de elemento observado no subsolo da estrutura.

4.2. Descrição das Amostras Analisadas

Para a amostra de número 1, o primeiro elemento a ser analisado foi uma viga com cobrimento medido de 3cm, como mostrado na **figura 6,** onde podemos observar a profundidade em que a carbonatação chegou e medir com o uso de uma trena.

Figura 6. Amostra 1 – Viga



Fonte: Próprios Autores, (2026).

A amostra de número 2 foi analisada em uma parede estrutural de concreto armado, mostrada na **figura 7a,** onde foi observado que o estado de carbonatação já está avançado, chegando a corroer a armadura, o cobrimento medido para a amostra foi de 3cm, observado na **figura 7b.**

Figura 7. Amostra 2 - Parede de Concreto Armado



Fonte: Próprios Autores, (2026).

Por fim, a amostra de número 3 foi analisada a partir de uma escada de concreto armado, evidenciada na f**igura 8a,** que assim como na amostra anterior, essa também apresentou um estado de carbonatação avançado, com corrosão da armadura, o cobrimento medido foi de 1.5cm, ilustrado na **figura 8b.**

Figura 8. Amostra 3 – Escada



Fonte: Próprios Autores, (2026).

4.3. Preparação da Solução de Fenolftaleina

Para medir a profundidade da carbonatação no concreto, o ideal é utilizar soluções indicadoras de PH, como a solução de fenolftaleina, que após serem aplicadas, revelam por meio da ausência de cor, as reações químicas sofridas pelo concreto, indicando a área carbonatada onde ouve redução do PH. A solução mais empregada e utilizada nesse trabalho foi a fenolftaleina a 1% em álcool etílico, preparada dentro de um borrifador necessário para a aplicação sobre a amostra (Dilonardo, 2015).

Materiais utilizados:

- 1 grama de fenolftaleina em pó;
- 70 ml de álcool etílico;
- 30 ml de água destilada;
- Borrifador para aplicação;
- Balança para medir as quantidades;
- Trena para medir a profundidade da carbonatação.

Figura 9. Borrifador, Água Destilada, Álcool Etílico e Fenolftaleina



Fonte: Próprios Autores, (2026).

Figura 10. Balança e Trena



Fonte: Próprios Autores, (2026).

O preparo da solução consiste em separar os materiais descritos anteriormente, nas quantidades especificadas utilizando a balança, e mistura-los dentro do borrifador de forma que a solução fique homogênea e pronta para a aplicação sobre a amostra a ser analisada.

4.4. Determinação da Profundidade de Carbonatação

A profundidade em que a carbonatação penetrou no concreto é determinada conforme a aplicação da solução de fenolftaleina, que reage quimicamente com o concreto, mostrando a área

carbonatada. Após a aplicação da solução, é possível identificar a região em que o concreto sofreu redução do PH, fator determinante para apontar a profundidade da carbonatação. A região que ainda possui PH acima de 9 é caracterizada pela coloração rosa avermelhada, indicando um concreto ainda protegido, diferente da região com PH abaixo de 9, que permanece incolor, evidenciando que ouve a entrada de CO2, reagindo com o concreto (Pauletti, 2004).

Para cada uma das amostras, mediu-se a profundidade da região que permanecia incolor, indicando carbonatação, e foram encontrados os seguintes valores para cada amostra, ilustrados na **Tabela 1:**

Tabela 1. Dados do Ensaio

Amostra	Cobrimento Medido	Profundidade Medida da Carbonatação
Amostra 1 - Viga	3 cm	3 cm
Amostra 2 - Parede de Concreto	3 cm	3 cm
Amostra 3 - Escada	1,5 cm	1,5 cm

Com o uso dos valores de profundidade da carbonatação, espessura do cobrimento e idade da estrutura, realizamos o cálculo para estimar o tempo necessário para a carbonatação atingir a armadura. O cálculo é efetuado com o uso da seguinte formula (Couto, 2025):

$$Xc = k \times \sqrt{t} \quad (01)$$

Onde:

- Xc é a profundidade da carbonatação em mm ;
- k é o coeficiente da carbonatação em $\frac{mm}{\sqrt{ano}}$;
- t é a idade da estrutura em $anos$;

4.4.1. Estimativa da Vida Útil para a Amostra 1 - Viga

Dados:

- Idade = 53 anos
- Cobrimento medido (c) = 30 mm
- Profundidade da carbonatação = 30 mm

i) Primeiro é determinado o coeficiente de carbonatação (k):

$$k = \frac{Xc}{\sqrt{t}} \quad (02)$$

Substituindo os valores:

$$k = \frac{30}{\sqrt{53}}$$

Resultado:

$$k = 4,12 \frac{mm}{\sqrt{ano}}$$

ii) Estimativa para a carbonatação atingir a armadura:

$$c = k * \sqrt{tf}$$

Arrumando a equação:

$$tf = (\frac{C}{K})^2 \quad (03)$$

Substituindo os valores:

$$tf = (\frac{30}{4,12})^2$$

Resultado:

$$53\ anos$$

iii) Vida útil remanescente:

$$t\ rem. = tf - t\ atual$$

Substituindo os valores:

$$t\ rem. = 53 - 53$$

Resultado:

$$0\ anos$$

4.4.2. Estimativa da Vida Útil para a Amostra 2 – Parede Estrutural

Dados:

- Idade = 53 anos
- Cobrimento medido (c) = 30 mm
- Profundidade da carbonatação = 30 mm

i) Primeiro é determinado o coeficiente de carbonatação (k):

$$k = \frac{Xc}{\sqrt{t}}$$

Substituindo os valores:

$$k = \frac{30}{\sqrt{53}}$$

Resultado:

$$k = 4,12 \frac{mm}{\sqrt{ano}}$$

ii) Estimativa para a carbonatação atingir a armadura:

$$c = k * \sqrt{tf}$$

Arrumando a equação:

$$tf = (\frac{C}{K})^2$$

Substituindo os valores:

$$tf = (\frac{30}{4,12})^2$$

Resultado:

$$53\ anos$$

iii) Vida útil remanescente:

$$t\ rem. = tf - t\ atual$$

Substituindo os valores:

$$t\ rem.\ = 53 - 53$$

Resultado:

$$0\ anos$$

4.4.3. Estimativa da Vida Útil para a Amostra 3 - Escada

Dados:

- Idade = 53 anos
- Cobrimento medido (c) = 15 mm
- Profundidade da carbonatação = 15 mm

i) Primeiro é determinado o coeficiente de carbonatação (k):

$$k = \frac{Xc}{\sqrt{t}}$$

Substituindo os valores:

$$k = \frac{15}{\sqrt{53}}$$

Resultado:

$$k = 2,06 \frac{mm}{\sqrt{ano}}$$

ii) Estimativa para a carbonatação atingir a armadura:

$$c = k * \sqrt{tf}$$

Arrumando a equação:

$$tf = (\frac{C}{K})^2$$

Substituindo os valores:

$$tf = (\frac{15}{2,06})^2$$

Resultado:

$$53\ anos$$

iii) Vida útil remanescente:

$$t\ rem. = tf - t\ atual$$

Substituindo os valores:

$$t\ rem. = 53 - 53$$

Resultado:

$$0\ anos$$

Tabela 2. Resultado

Amostra	Cobrimento Medido	Profundidade Medida da Carbonatação	Situação da Frente de Carbonatação	Estimativa de vida útil residual
Amostra 1 - Viga	3 cm	3 cm	Atingiu o cobrimento	0 Anos
Amostra 2 - Parede de Concreto	3 cm	3 cm	Atingiu o cobrimento	0 Anos

Amostra 3 - Escada	1,5 cm	1,5 cm	Atingiu o cobrimento	0 Anos

4.5. Avaliação da Carbonatação e Conservação da Estrutura

Após a análise dos cálculos para a estimativa da vida útil residual, verificou-se que as três amostras apresentaram resultado igual a zero anos. Esse resultado mostra que a frente de carbonatação atingiu 100%, indicando que o concreto se encontra totalmente carbonatado em relação ao cobrimento medido considerado nas três amostras analisadas, evidenciando que o processo avançou até a região das armaduras.

Dessa forma, a vida útil residual estimada pelo modelo de cálculo é nula para as três amostras, indicando o esgotamento do período até o avanço da frente da carbonatação. Ressalta-se que esse resultado, isoladamente, não comprova a ocorrência de corrosão do aço e nem que perdeu sua capacidade de resistência, mas indica a perda da proteção química proporcionada pela camada passivadora, tornando as armaduras suscetíveis a esse processo. Para compreender os possíveis fatores que contribuíram para que a frente de carbonatação atingisse 100% da profundidade de cobrimento do concreto ao longo dos 53 anos de existência da estrutura, é necessário analisar seu histórico de exposição e as condições físicas em que se encontra atualmente.

As amostras foram coletadas no primeiro pavimento de um estádio de futebol, em uma área localizada no subsolo. Esse ambiente pode apresentar condições favoráveis ao desenvolvimento de manifestações patológicas, especialmente quando há deficiência de impermeabilização, presença de umidade e ausência de medidas

adequadas de proteção e manutenção. Além disso, o contato direto do concreto com o solo ou com águas subterrâneas pode favorecer sua exposição a agentes químicos agressivos, como os íons sulfato, cuja presença pode contribuir para a deterioração do concreto (Júnior *et al.*, 2010).

Além disso, é importante considerar o período em que a estrutura foi construída, uma vez que sua execução ocorreu no século XX, quando os conhecimentos técnicos e os critérios normativos relacionados à construção civil ainda estavam em desenvolvimento. Naquele período, as normas técnicas apresentavam abordagens distintas das atualmente adotadas, com maior ênfase nos aspectos relacionados ao dimensionamento e à segurança estrutural, enquanto os conceitos e requisitos de durabilidade ainda passavam por um processo de aprimoramento.

Ao longo das décadas, houve avanços significativos nas normas técnicas, nos materiais empregados e nos métodos construtivos. A atualização contínua das normas técnicas de engenharia estrutural demonstra a importância dos avanços científicos e tecnológicos, bem como a busca pelo alinhamento às diretrizes e pelo atendimento aos requisitos cada vez mais rigorosos de segurança, desempenho e durabilidade das estruturas de concreto armado (Ferreira, 2025). Nesse contexto, o período de construção constitui um aspecto relevante para a análise das condições de conservação da estrutura estudada.

4.6. Manutenção e Intervenções para a Recuperação Estrutural

Diante dos resultados obtidos nas três amostras analisadas, verificou-se que, de acordo com o modelo de cálculo adotado, as

armaduras já teriam atingido o estágio de corrosão, evidenciando a necessidade de intervenções. Atualmente, o estádio encontra-se em fase de manutenção, com a realização de reformas e intervenções de engenharia voltadas à conservação da edificação, à preservação de suas condições de uso e ao aumento de sua durabilidade, visando garantir a segurança e a integridade da estrutura.

Essas intervenções são fundamentais para identificar e corrigir manifestações patológicas, reduzir a deterioração e preservar a estabilidade e o desempenho estrutural da edificação. Nesse sentido, as recomendações para a conservação de estruturas históricas ressaltam a importância de preservar não apenas os materiais e a aparência da construção, mas também compreender e manter seus mecanismos de resistência estrutural (Lourenço, 2022).

Para dar início as medidas de intervenções, é fundamental realizar a anamnese da edificação, a fim de reunir informações técnicas relevantes sobre seu histórico construtivo, os projetos executivos existentes, as reformas realizadas e as manutenções anteriores, entre outros aspectos. Com base nesses dados, torna-se possível identificar as possíveis causas das manifestações patológicas, estabelecer as intervenções mais adequadas e determinar o grau de urgência de cada medida, visando à recuperação, à durabilidade e à segurança estrutural da edificação (Bernardo *et al.*, 2025).

Além disso, as normas técnicas estabelecem diretrizes para a realização de inspeções periódicas nas estruturas, as quais devem ser conduzidas por profissionais ou empresas devidamente capacitados e especializados. Essas inspeções têm como objetivo acompanhar as condições de conservação e desempenho da edificação, contribuindo para a identificação de possíveis

manifestações patológicas e para a adoção de medidas preventivas e corretivas, de modo a preservar, ao longo do tempo, o desempenho previsto em projeto ABNT, 2024.

5. CONCLUSÃO

Com base no estudo de caso realizado e considerando o método de avaliação da profundidade de carbonatação por meio da aplicação de fenolftaleína, verificou-se que as três amostras analisadas apresentaram indícios de carbonatação do concreto, indicando que as armaduras estejam com altos níveis de corrosão nos pontos analisados e, consequentemente, prejudicando o desempenho adequado da estrutura. Esses resultados evidenciam a importância de investigações complementares para avaliar as condições reais das armaduras e verificar possíveis impactos na integridade estrutural da edificação.

Entre os fatores analisados que podem contribuir para a evolução desse processo, destaca-se a localização do trecho analisado no subsolo, ambiente que pode apresentar condições favoráveis à presença de umidade e à ocorrência de manifestações patológicas. Tais fatores, associados às características do concreto e às condições ambientais, podem influenciar os mecanismos de deterioração da estrutura e comprometer sua durabilidade ao longo do tempo.

Durante a realização do estudo, foi possível observar que o estádio se encontra em processo de reformas e manutenções, com a execução de serviços voltados à conservação da edificação. Assim, os resultados obtidos reforçam a importância da realização de inspeções periódicas, do diagnóstico adequado das manifestações patológicas e da adoção de medidas preventivas e corretivas,

visando à manutenção da durabilidade, da estabilidade e do desempenho estrutural da edificação.

O estudo contribuiu para o meio científico e para a sociedade ao ampliar o conhecimento acerca do processo de carbonatação em estruturas antigas de concreto armado, destacando a importância da realização de manutenções preventivas e corretivas, especialmente em estruturas que, muitas vezes, não recebem a devida atenção quanto à sua conservação.

Como limitações do estudo, destaca-se a análise de pontos específicos da estrutura, não sendo possível avaliar sua totalidade devido às restrições de acesso a determinadas áreas. Para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de análises em outros elementos da estrutura, possibilitando uma avaliação mais abrangente de suas condições, bem como a realização de ensaios complementares que possam contribuir para uma melhor caracterização e compreensão do estado de conservação da estrutura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento.** Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ALMEIDA, Débora Marx de. Análise de variáveis que influenciam na carbonatação natural de amostras de laboratório e de estruturas de concreto. 2019.

AMESCOA, Ane Caroline Tavares Nobre. **Processos construtivos de estruturas de concreto armado e suas consequências.** 2025.

ARAÚJO FILHO, Jurandir Ferreira; SILVA, Moises Ferreira Eleutério; MARIANI, Bruna Bueno. ENSAIO DE POTENCIAL DE CORROSÃO E METODOLOGIA GDE/UnB PARA ANÁLISE DA ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO: ESTUDO DE CASO EM LAURO DE FREITAS–BA. REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 18, n. 2, p. 185-198, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5674:2024: Manutenção de edificações — Requisitos para o sistema de gestão de manutenção. 3. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

BANCA VIRTUAL. Tensões normais em vigas de concreto armado / Flexão assimétrica. *Udemy*, 2022. Disponível em: https://www.udemy.com/course/analise-das-tensoes-normais-em-vigas-de-concreto-armado/. Acesso em: 18 nov. 2026.

BERNARDO, João Marcelo Evangelista *et al.* Patologias em estruturas de concreto armado: Diagnóstico, intervenções e estudo de caso em edifício comercial. **Research, Society and Development,** v. 14, n. 6, p. e5114649057-e5114649057, 2025.

BORGES, Paulo Eduardo Varanda; DE MATOS PEDREIRO, Marcelo Rodrigo. **Análise das principais patologias recorrentes em estruturas de concreto armado devido à ação da umidade.** Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação, v. 9, n. 10, p. 6007-6028, 2023.

BRANDALIZE, Deborah Claudiane; SAVARIS, Gustavo; BALESTRA, Carlos Eduardo Tino. **Carbonatação em concretos produzidos com LC3 considerando a agressividade ambiental.** Revista Foco, v. 17, n. 8, p. E5832-E5832, 2024.

CARDOSO, Gabriel Pavini; OLIVEIRA, Gustavo Dias de. **Análise da influência da adição de grampos metálicos em concreto de traço com baixa relação água-cimento.** 2021.

CASSAVARA, R.; RODRIGUES FILHO, P.; COSTA, L. **Avaliação da corrosão em armaduras de concreto armado: estudo de caso.** São Paulo: Pini, 2022.

COTOMACIO, André Carrara. **Engenharia diagnóstica aplicada à Perícia Criminal em local de desabamento: um ensaio de carbonatação com o uso de fenolftaleína.** Revista Brasileira de Criminalística, v. 13, n. 1, p. 125-134, 2024.

COUTO, Anderson Costa. **Cálculo da Vida Útil Remanescente em Estruturas de Concreto pela Carbonataçã**o: Uma Abordagem Técnica. Brumadinho, 10/2/2025

DA SILVA, ALLAN JOSÉ. CONCRETO ARMADO, 2021.

DILONARDO, Isabella *et al.* Avaliação Metodológica da Medida de Carbonatação em Microconcretos. In: **57° CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO.** 2015.

DYNAMIS TECHNE. Teste de carbonatação do concreto com solução de fenolftaleína. Belém: DynTech Engenharia Ltda., [s.d.]. Disponível em: https://dynamistechne.com/servicos-executados/tanque-de-concreto-imerys-rio-capim-caulim/teste-de-carbnatacao-no-concreto/. Acesso em: 18 nov. 2026.

FERREIRA, Maria Clara Genú de Araújo. Atualizações na norma ABNT NBR 6118: 2023 com impacto direto na análise dos pavimentos de

edifícios em concreto armado: estudo comparativo. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso.

FRAZÃO, Yuri Leandro Abas; DE SOUZA PICANÇO, Marcelo. Análise qualitativa da agressividade de intempéries do meio ambiente em concreto na cidade de São Luís-MA. **REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil,** v. 19, n. 2, p. 186-199, 2023.

GALHARDI, Daniel; BOMBARDIN, Jean Aparecido; SARTI JUNIOR, Luiz Antonio. **Avaliação da profundidade de carbonatação e previsão da vida útil de estruturas de concreto armado no município de Bebedouro, SP.** 2020.

GOMES, Lara Poliana Melo. **Análise do uso de indicador natural de pH à base de betalaína em comparação com a fenolftaleína para a avaliação da profundidade de carbonatação do concreto.** 2020.

HELENE, Paulo RL. Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado. 1993.

HELENE, Paulo RL. Corrosão em armaduras para concreto armado. 1986.

HIRLE, A.; SILVA, B.; CARVALHO, C. **Patologias em estruturas de concreto armado: análise e prevenção.** Rio de Janeiro: LTC, 2023.

JÚNIOR, Fuad Carlos Zarzar *et al.* Patologias de Fundações de Edifícios Causadas por Ações Ambientais. In: VI CONGRESO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGIA Y RECUPERACION DE ESTRUCTURAS, Córdoba-Argentina. 2010.

KRUG, F.; MENDES, L.; ALMEIDA, R. **Carbonatação em estruturas de concreto: causas e efeitos.** São Paulo: Pini, 2023.

KRUG, Lucas Fernando *et al.* **Processo de carbonatação no concreto e modelos para sua previsão: uma revisão.** Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão, v. 8, n. 2, 2023.

LACERDA, E. *et al.* Acompanhamento do avanço da frente de carbonatação em compósito cimentício com sua estrutura de poros analisada por microtomografia computadorizada de raios X (μ-CT). **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais,** v. 10, p. 653-668, 2017.

LOBATO, Éder Vinícius do Carmo. Análise das manifestações patológicas em estruturas de concreto armado-Estudo de caso: Macapá Hotel. 2024.

LOURENÇO, P. Conservação das estruturas do património cultural: Sismos, aplicações e outros desafios. Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas. Ed. LNEC. Série III. n. o, v. 18, 2022.

MACHADO, J.; OLIVEIRA, P. **Durabilidade e desempenho estrutural de construções de concreto armado.** Porto Alegre: Bookman, 2025.

MAINES, Alexandre *et al.* **Estudo de autocicatrização de fissuras em concreto com fibras metálicas utilizando aditivo cristalizante.** Revista da UNIFEBE, v. 1, n. 27, 2022.

MATILDES, C. **Concreto armado e suas patologias.** Fortaleza-CE, v. 10, edição, v. 225, 2022.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MORAES, Maryah Costa de *et al.* Realcalinização do concreto sujeito à carbonatação: Revisão sistemática da literatura sobre os métodos de tratamento, eficácia e mecanismos da reação. **Matéria (Rio de Janeiro),** v. 29, n. 3, p. e20240240, 2024.

MOURA, José de. **Detalhamento de vigas de concreto: seção transversal.** *Guia da Engenharia*, 2 nov. 2021. Disponível em: https://www.guiadaengenharia.com/detalhamento-vigas-transversal/. Acesso em: 18 nov. 2026.

PAULETTI, Cristiane. Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação. 2004.

PIAUÍ. Teresina: Governo do Estado do Piauí, Publicado em: 26/08/2025 às 13:42; Disponível em: Albertão celebra 52 anos com investimentos de R$15 milhões em revitalização – pi.gov. Acesso em: 15 nov. 2026.

PIRES, Mariana Silva. **Patologia em concreto armado: principais manifestações, causas e soluções para garantir a durabilidade das estruturas.** Revista Contemporânea, v. 3, n. 12, p. 28394-28402, 2023.

RIBEIRO, D. V.; DIAS, C.; SILVA, A. **Concreto com gradação funcional: gradação na porosidade para o aumento da durabilidade frente à carbonatação.** Ambiente Construído, v. 24, 2024.

RIBEIRO, J.; SILVA, M.; OLIVEIRA, F. **Ensaios de fenolftaleína para avaliação da carbonatação em estruturas antigas de concreto armado.** Revista Brasileira de Engenharia Civil, v. 25, n. 3, p. 45-57, 2023.

RIBEIRO, Rafael *et al.* **Estudo comparativo entre métodos de análise da frente de carbonatação em estruturas de concreto.** Construindo, v. 15, n. 2, 2023.

RIOS, T.; LIMA, F.; COSTA, M. **Efeitos da carbonatação sobre a vida útil de estruturas de concreto armado.** Revista Engenharia Estrutural, v. 21, n. 3, p. 45-60, 2020.

RODRIGUES, P.; RODRIGUES, A. **Gases de efeito estufa na construção civil e impactos ambientais.** São Paulo: Pini, 2024.

SANTOS, Kayque Guimarães dos. **Estudo da estrutura de concreto armado.** 2025.

SOUSA, Sabrina Silva de *et al.* Manifestações patológicas em edificações com estruturas de concreto armado causadas pela maresia: um estudo de caso em uma edificação no litoral de Fortaleza. Engenharia & Ação, v. 1, n. 1, p. 1-20 (e2303), 2023.

SOUZA, Murilo Marques de. Principais patologias estruturais e atuais metodologias de controle na construção civil. *Inter-American Journal of Development and Research*, v. 2, n. 1, p. 57–73, 2019. DOI: https://doi.org/10.32916/iadrj.v2i1.69. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/339597638_PRINCIPAIS_PATOLOGIAS_ESTRUTURAIS_E_ATUAIS_METODOLOGIAS_DE_CONTROLE_NA_CONSTRUCAO_CIVIL. Acesso em: 18 nov. 2026.

VERGARA, Felipe Pereira. **Avaliação de diferentes soluções de contraventamento para estruturas de concreto armado de edifícios altos com a utilização do método dos elementos finitos.** 2025.

WANG, X.; YANG, Q.; PENG, X.; QIN, F. **A review of concrete carbonation depth evaluation models.** Coatings, v. 14, n. 4, 2024.