

# **ANÁLISE DE CARBONATAÇÃO E RESISTÊNCIA MECÂNICA EM PILARES DO VIADUTO FERROVIÁRIO NA ESTAÇÃO PORTA LARGA / AEROPORTO – PE.**

**Luana Rafaela Silva Pontes**

lrsp@discente.ifpe.edu.br

**Prof° Dr° Ronaldo Faustino**

ronaldofaustino@recife.ifpe.edu.br

---

## **RESUMO**

A corrosão em estruturas de concreto armado é uma preocupação significativa para os profissionais da Engenharia Civil, dada sua frequência em edificações e seu potencial comprometedor da integridade estrutural. A carbonatação é um dos principais fenômenos corrosivos, desempenha um papel crucial na durabilidade das estruturas, ao diminuir a alcalinidade do concreto e afetar a estabilidade química da película passiva da armadura. O presente estudo teve como objetivo analisar a presença e o estágio da deterioração das armaduras nos pilares de concreto armado de um viaduto férreo, no trecho da linha sul, na região metropolitana do Recife. Para realizar a análise dessa manifestação patológica, foram conduzidos diversos procedimentos, compostos por inspeção visual, técnicas de medição da profundidade da frente de carbonatação com aplicação de fenolftaleína, bem como ensaios com esclerômetro para avaliar a resistência superficial do concreto, na área afetada pela carbonatação, seguindo os procedimentos estabelecidos pela NBR 7584:2012. Os resultados indicaram a presença da deterioração e sua profundidade nos pontos analisados. Portanto, o estudo da corrosão por carbonatação teve como finalidade investigar a existência e o grau de deterioração das armaduras nos pilares de concreto armado de um viaduto ferroviário.

Palavras-chave: carbonatação; corrosão do aço; concreto armado.

## ABSTRACT

Corrosion in reinforced concrete structures is a significant concern for Civil Engineering professionals due to its frequency in buildings and its potential to compromise structural integrity. Carbonation is one of the main corrosive phenomena and plays a crucial role in the durability of structures by reducing the alkalinity of the concrete and affecting the chemical stability of the passive film on the reinforcement. This study aimed to analyze the presence and extent of reinforcement deterioration in the reinforced concrete pillars of a railway viaduct, located in the southern section of the line, in the metropolitan area of Recife. To conduct the analysis of this pathological manifestation, several procedures were carried out, including visual inspection, measurement techniques for carbonation depth using phenolphthalein, and surface hardness tests using a sclerometer to evaluate the concrete's surface resistance in the areas affected by carbonation, following the procedures established by NBR 7584:2012. The results indicated the presence of deterioration and its depth at the analyzed points. Therefore, the study of carbonation-induced corrosion aimed to investigate the existence and degree of reinforcement deterioration in the reinforced concrete pillars of the railway viaduct.

Keywords: carbonation; steel corrosion; reinforced concrete.

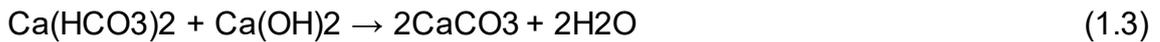
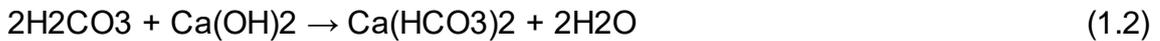
## 1 INTRODUÇÃO

A durabilidade das estruturas de concreto armado é crucial para sua longevidade e desempenho ao longo do tempo. A presença de materiais não expansivos desempenha um papel fundamental nesse aspecto, pois ajudam a prevenir problemas como a reação álcali - agregado (RAA) (Neville 2011). Além disso, diversos mecanismos de deterioração, como a carbonatação e a penetração de íons cloreto, representam sérios desafios para a durabilidade do concreto armado, como afirmado por Mehta e Monteiro (2013). Muitos dos danos que afetam o concreto surgem devido à existência de poros e fissuras na sua estrutura, juntamente com a presença de água no seu interior e a exposição ao dióxido de carbono da atmosfera. Existem várias causas para a corrosão das armaduras em estruturas de concreto armado, sendo a carbonatação um destaque entre suas principais causas.

Esse fenômeno, conforme observado por Barbosa et al. (2012), compromete significativamente a durabilidade das estruturas, pois reduz sua proteção natural. Estudos de Andrade (1992) e Sanjuán (1992) destacam que os principais agentes que promovem a despassivação das armaduras em concreto são a carbonatação e a presença de cloretos.

O processo é iniciado na superfície do concreto, formando a frente de carbonatação, e vai avançando para o interior chegando à armadura. O concreto normalmente possui meio alcalino entre 12,6 e 13,5; este pH pode baixar para próximo de 8,5 quando o processo de carbonatação é iniciado, o que acarreta a despassivação do aço, corrosão das barras da armadura, podendo até mesmo haver um colapso de toda a estrutura de concreto. (POLITO, 2006). Conforme ressaltado por Silva (2019), a corrosão é a manifestação patológica mais comum em estruturas de concreto armado, representando uma ameaça à integridade estrutural e estética dessas construções.

A reação química conhecida como carbonatação no concreto pode ser representada pela equação 1 que representa a equação geral da carbonatação (período de iniciação) e pode ser descrita por três etapas.:



Na primeira etapa do processo de carbonatação (Equação 1.1), o gás carbônico atmosférico é dissolvido na água intersticial do concreto formando o ácido carbônico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ). Na segunda etapa (Equação 1.2) o ácido carbônico reage com o hidróxido de cálcio originando bicarbonato de cálcio e água. Na Equação 1.3, a terceira da carbonatação, o bicarbonato de cálcio e o hidróxido de cálcio dão origem, em uma reação de dupla troca, a carbonato de cálcio e água.

Segundo Pauletti (2007), a carbonatação é um fenômeno no qual o pH de materiais cimentícios é reduzido através da reação físico-química entre os compostos hidratados do cimento e o gás carbônico da atmosfera.

Com isso, a reação principal de carbonatação no concreto ocorre entre o gás carbônico e o hidróxido de cálcio.

Conforme Papadakis et al, (1991a) a corrosão pode começar quando essa camada é destruída pela penetração de cloretos ou devido à redução do pH do concreto para valores inferiores a 9. Essa redução da alcalinidade é devido à reação do  $\text{Ca(OH)}_2$ , presente na massa de concreto, com o  $\text{CO}_2$ , difundido pelos poros do concreto.

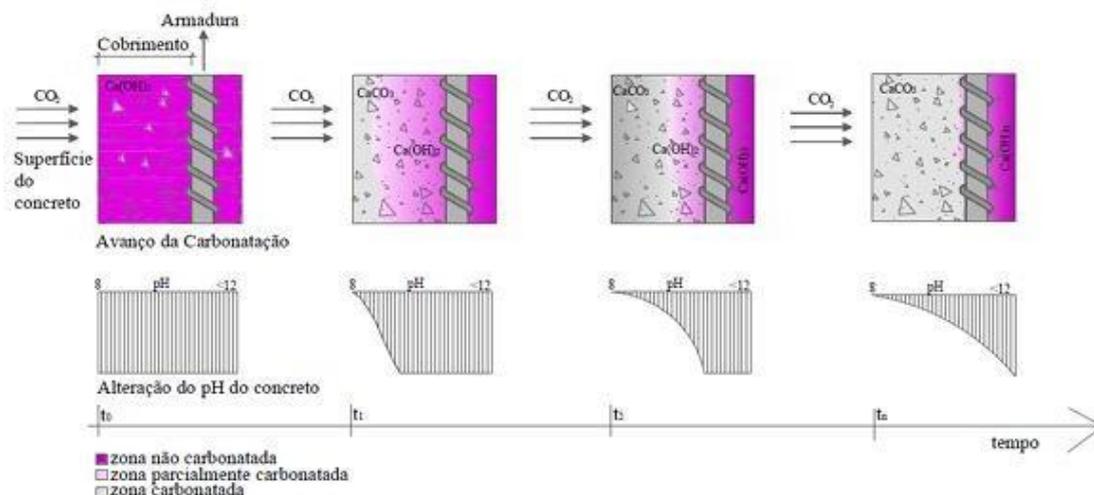
Papadakis et al. (1991) descrevem o processo físico-químico da carbonatação do concreto em várias etapas:

1. O hidróxido de cálcio, formado nas reações de hidratação do cimento é dissolvido pela água presente na solução dos poros.

2. O gás carbônico penetra no concreto e se transporta por difusão através da fase gasosa do poro matriz, e se dissolve na solução aquosa.

3. O gás carbônico dissolvido reage com o dióxido de cálcio dissolvido, bem como com outros produtos carbonatáveis da pasta de cimento. Dessa forma, os produtos oriundos da reação de gás carbônico, bem como os produtos de hidratação, alteram a estrutura de poros da pasta de cimento. Além disso, o vapor d'água contido nos poros condensa e entra em equilíbrio com as condições do ambiente no qual é exposto o concreto.

**Figura 1.** Frente de carbonatação e alteração do Ph do concreto no tempo.



Fonte: Possan, 2024

Conforme figura 1, pode-se observar que a carbonatação se inicia na superfície em direção ao interior do concreto, alterando a alcalinidade e a estrutura porosa do concreto. No avanço da frente de carbonatação é possível identificar três zonas diferentes: a primeira, mais próxima à superfície, carbonatada, a segunda parcialmente carbonatada, e a terceira não carbonatada, com o pH de aproximadamente 8,3, 10 e >12,5, respectivamente (POSSAN, 2010).

Para além da carbonatação, existem diversos ensaios não destrutivos do concreto que permitem verificar sua resistência. Entre eles, a técnica de esclerometria se destaca por ser amplamente utilizada na avaliação da resistência superficial do concreto, fornecendo informações importantes sobre sua qualidade e durabilidade. Neville (2011) descreve essa técnica como uma abordagem não destrutiva eficaz para determinar a resistência à compressão do concreto. A resistência é estimada por meio de curvas de calibração, que relacionam a resistência à compressão do concreto com o índice esclerométrico.

Posto isto, o presente trabalho tem por objetivo verificar a frente de carbonatação em pilares localizados na Estação Porta Larga (Jaboatão dos Guararapes – PE). Além disso, buscou-se avaliar a resistência à compressão estimada das referidas estruturas e sua correlação com o processo de carbonatação.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Caracterização da área de estudo

O foco desta pesquisa foi um viaduto ferroviário de concreto armado, que desempenha um papel fundamental no fluxo da linha sul do metrô do Recife (consulte as figuras 2 e 3). De acordo com as diretrizes estabelecidas na NBR 7188 (ABNT, 2013), essa estrutura se enquadra na categoria de viaduto, uma vez que é projetada para transpor obstáculos artificiais, como avenidas, rodovias etc.

O viaduto objeto da análise localiza-se nas proximidades da estação Porta Larga, no bairro de Jaboatão dos Guararapes-PE.

Figura 2. Objeto do estudo de caso



Fonte: Autor, 2024

Figura 3. Mapa metrô Recife



Fonte: Companhia Brasileira de Trens Urbanos (CBTU), 2024.

O projeto da Linha Sul do Metrô do Recife foi contratado em 1993 pelas empresas MK - Engenharia e Arquitetura Ltda e Jaakko Pöyry. O projeto consistiu na construção de uma linha de metrô que se estende desde Recife até Cajueiro Seco. Ela possui 12 estações ao longo do percurso, incluindo Joana Bezerra, Imbiribeira, Antônio Falcão, Aeroporto, Porta Larga, Monte dos Guararapes, Prazeres e Cajueiro Seco.

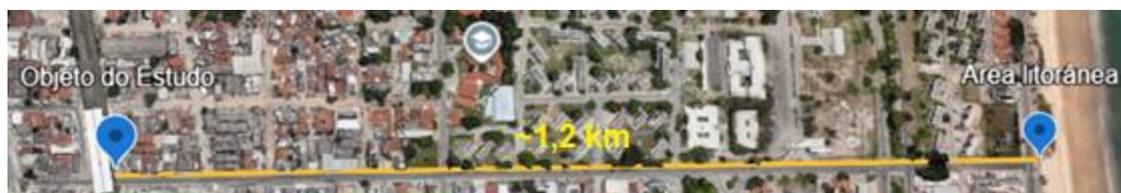
A Companhia Brasileira de Trens Urbanos (CBTU) dividiu a execução das obras em lotes, o objeto deste estudo fez parte do quarto lote. As obras foram paralisadas em 2001 devido a problemas financeiros e apesar destes desafios financeiros, a Linha Sul foi inaugurada em 28 de fevereiro de 2005 e continuou a ser expandida gradualmente até sua conclusão em 23 de março de 2009, sendo assim, a idade da estrutura é de aproximadamente 15 anos (CBTU, 2024).

Segundo Souza (2018) destaca que os viadutos são compostos por três elementos fundamentais: superestrutura, mesoestrutura e infraestrutura. O presente estudo foi realizado na mesoestrutura, que em particular, engloba pilares, travessas e encontros, responsáveis por transmitir as cargas da superestrutura para as fundações, garantindo a estabilidade e segurança da estrutura.

## 2.2 Caracterização do modelo de estudo a ser realizado

Esta pesquisa configura-se como um estudo de caso, cujo propósito é conduzir uma avaliação qualitativa de uma situação específica, permitindo a formulação de conclusões generalistas.

**Figura 4.** Distância do objeto de estudo até a área marítima.



Fonte: Autor, 2024

A carbonatação das estruturas de concreto é significativamente influenciada pela distância em relação ao mar. Segundo Broomfield (2003), a proximidade de estruturas de concreto ao litoral tem um impacto direto na taxa de carbonatação. Andrade (1993) relata que os efeitos da brisa marítima com íons cloreto podem atingir estruturas de concreto localizadas até 2 km do litoral em condições normais, sendo a faixa de maior impacto de até 500 metros, onde a concentração de sais é mais intensa. A estrutura analisada está a uma distância de 1,2 km da costa, fora da faixa de maior impacto. Dessa forma, optou-se por não aplicar o ensaio de nitrato de prata para verificação de corrosão por íons cloreto.

Foi realizada a classificação da estrutura conforme NBR 6118/2024, utilizando-se para isso as tabelas 01 e 02.

### **Tabela 01.** Classe de Agressividade Ambiental (CAA)

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana <sup>a, b</sup>	Pequeno
III	Forte	Marinha <sup>a</sup>	Grande
		Industrial <sup>a, b</sup>	
IV	Muito forte	Industrial <sup>a, c</sup>	Elevado
		Respingos de maré	

<sup>a</sup> Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

<sup>b</sup> Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

<sup>c</sup> Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

**Fonte:** Adaptado da Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2024.

**Tabela 02.** Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para  $\Delta c = 10 \text{ mm}$

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV <sup>c</sup>
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje <sup>b</sup>	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo <sup>d</sup>	30		40	50
Concreto protendido <sup>a</sup>	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

<sup>a</sup> Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

<sup>b</sup> Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal  $\geq 15 \text{ mm}$ .

<sup>c</sup> Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.

<sup>d</sup> No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal  $\geq 45 \text{ mm}$ .

**Fonte:** Adaptado da Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2024.

A estrutura examinada foi categorizada como pertencente à classe de agressividade II devido à sua localização em uma área urbana e ao nível moderado de agressividade (consulte a tabela 01). Isso implica que o recobrimento nominal das armaduras deve ser de no mínimo 30 mm, conforme ilustrado na tabela 02.

O procedimento para esta pesquisa, seguiu as diretrizes da NBR 7584:2012 e foi estruturado nas seguintes etapas:

1. Inspeção visual no local;

2. Determinação da profundidade da frente de carbonatação utilizando solução de fenolftaleína a 1%;

3. Avaliação da resistência superficial do concreto por meio da Técnica de Esclerometria;

Foram selecionados três pontos distintos da estrutura para realizar as análises, conforme apontados na figura 2, levando em conta as características de deterioração identificadas durante a avaliação visual.

## 2.2.1 Descrição objetiva dos métodos empregados

### 2.2.1.1 Avaliação visual in loco

Durante a inspeção e avaliação visual realizada, foi utilizado um checklist baseado na norma DNIT 010/2004-PRO. Foram identificadas as manifestações patológicas aparentes na estrutura e realizados os registros fotográficos. Esse processo permite uma avaliação detalhada dos danos presentes, possibilitando a elaboração de medidas adequadas para sua correção e manutenção.

**Tabela 03.** Check list da avaliação visual dos pilares.

INSPEÇÃO VISUAL DA MESOESTRUTURA			
	P1	P2	P3
<b>Armadura Exposta</b>			
<b>Concreto Desagregado</b>			
<b>Fissuras</b>			
<b>Perda de Seção do Aço</b>			
<b>Troca de Cor (Aplicação Fenolftaleína)</b>			

Fonte: Autor, 2024

### 2.2.1.2 Medição da frente de carbonatação

A aplicação da solução de fenolftaleína seguiu as diretrizes estabelecidas na norma RILEM CPC-18(1988), que prescreve a preparação de uma solução utilizando álcool etílico 70% contendo 1% de fenolftaleína.

**Figura 5.** Solução de Fenolftaleína



**Fonte:** Autor, 2024

Primeiramente, procedeu-se com a preparação da estrutura do viaduto para a aplicação do ensaio de carbonatação com fenolftaleína. Foram aproveitadas as áreas já danificadas e foi feito o esmerilhamento da camada superficial e a limpeza com pincéis. Após a conclusão da limpeza, a solução foi aplicada na superfície em análise, conforme ilustrado na Figura 6.

**Figura 6.** Área do pilar 1



**Fonte:** Autor, 2024

Após a análise visual, procedeu-se à medição da profundidade de carbonatação do concreto, utilizando o paquímetro.

### *2.2.1.3 Medição da resistência superficial do concreto pela Técnica de esclerometria*

Para determinar a resistência superficial do concreto na área impactada pela carbonatação, empregou-se um esclerômetro digital da marca PROCEQ (conforme ilustrado na Figura 7), modelo Silver Schmidt Tipo N, com energia de impacto padrão de 2.207Nm. A ampla faixa de resistência, recomendada pelo fabricante, varia de 10 a 100 Mpa.

**Figura 7.** Esclerômetro



**Fonte:** Autor, 2024

O ensaio foi conduzido em conformidade com a norma NBR 7584 (ABNT, 2012), seguindo as diretrizes estabelecidas para a aplicação do esclerômetro. O equipamento foi posicionado de acordo com as especificações da norma, garantindo uma espessura mínima de 100 mm sobre a área de impacto. A superfície ensaiada é rígida, e a área de teste variou entre 8.000 mm<sup>2</sup> e 40.000 mm<sup>2</sup>, conforme recomendado pela norma. O experimento foi realizado em três pontos de estudo, e a calibração do esclerômetro foi realizada antes da utilização, conforme orientações do fabricante e os requisitos da norma.

De acordo com a NBR 7584 (ABNT, 2012), a calibração do esclerômetro deve ser realizada antes de sua utilização ou após cada 300 impactos, visando obter o coeficiente de correção do índice esclerométrico ( $k$ ).

Para essa finalidade, uma bigorna de aço é empregada, sendo realizadas 10 leituras. A verificação da calibração foi efetuada conforme ilustrado na Figura 8, seguindo as diretrizes estabelecidas pela norma.

**Figura 8.** Bigorna de aço



**Fonte:** NBR 7584 (ABNT, 2012)

O equipamento é considerado adequado para utilização quando nenhuma das leituras está fora do intervalo especificado pelo fabricante. Após as 10 leituras, o coeficiente de correção (k) foi calculado utilizando a equação 2, relacionada abaixo:

$$k = \frac{n \cdot IEnom}{\sum_{i=1}^n IEi} \quad (2)$$

k: coeficiente de correlação do índice esclerométrico;

n: número de golpes na bigorna de aço;

*IEnom*: índice esclerométrico nominal do aparelho na bigorna de aço, fornecido pelo fabricante (*IEnom* = 80);

*IEi*: índice obtido por cada golpe na bigorna de aço.

Dessa maneira, para o esclerômetro de Schmidt utilizado na pesquisa o k foi igual a 1,01.

Para a realização dos ensaios foi adotada a sequência de ações conforme seguem relacionadas:

- a. Limpeza da área de ensaio utilizando pedra abrasiva para polir e remover toda poeira do local;

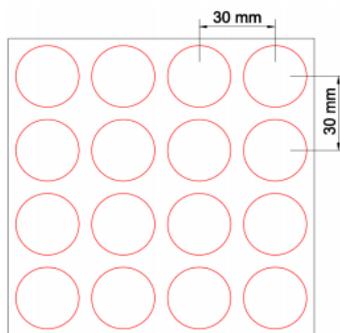
**Figura 9.** Limpeza do Pilar 1



**Fonte:** Autor, 2024

- b. O posicionamento do gabarito foi realizado com 16 pontos tendo a distância de 30 mm entre cada eixo, conforme Figura 10;

**Figura 10.** Gabarito para ensaio



**Fonte:** Adaptado da NBR 7584:2012

**Figura 10.** Gabarito para ensaio Pilar 1



- c. Com o esclerômetro de reflexão na horizontal, foi efetuado 16 impactos em cada área ensaiada.

**Figura 11.** Execução do Ensaio



**Fonte:** Autor, 2024

- d. Calcular as médias dos 16 impactos de cada pilar, desprezando os valores afastados em mais ou menos 10% do valor médio e, a partir deste ajuste, calcular uma nova média.
- e. Realizar a correlação entre os valores de  $Q_{médio}$  e a resistência à compressão do concreto por meio de uma curva de correlação que é a Equação 3.

$$f_{c,cor} = 8,7746.e^{0,018Q_e} \quad (3)$$

- f. Os valores  $Q_e$  foram obtidos multiplicando  $Q$  pelo coeficiente de correção  $k$  (1,01).

### 3 RESULTADOS E ANÁLISES

Os resultados e discussões serão apresentados seguindo a sequência de execução a seguir: avaliação visual in loco, medição de carbonatação com fenolftaleína 1% e medição da resistência superficial do concreto utilizando a técnica de esclerometria.

#### 3.1 Avaliação visual in loco

Os resultados da avaliação visual serão detalhados abaixo.

**Figura 12.** Avaliação visual dos Pilares 01,02 e 03.



**Fonte:** Autor, 2024

Tabela 3: Check list da avaliação visual dos pilares

INSPEÇÃO VISUAL DA MESOESTRUTURA			
	P1	P2	P3
Armadura Exposta	✓	✓	✓
Concreto Desagregado	✓	✓	✓
Fissuras	✓	✓	✓
Perda de Seção do Aço	✓	×	✓
Troca de Cor (Aplicação Fenolftaleína)	×	×	✓

Fonte: Autor, 2024

### 3.2 Medição da carbonatação com fenolftaleína 1%

Os resultados nos 3 pontos estudados podem ser visualizados nas figuras 14, 15 e 16.

Figura 14. Aplicação da fenolftaleína no Pilar 1



Figura 15. Aplicação da fenolftaleína no Pilar 2



**Figura 16.** Aplicação da fenolftaleína no Pilar 3



**Fonte da Imagens:** Autor,2024

A ausência de cor, ao borrifar a solução de fenolftaleína 1%, foi observada em áreas de todos os pilares. A falta de coloração indica que o pH está abaixo de 9, indicando que essas regiões estão sofrendo o ataque por carbonatação. Com a aplicação da solução de fenolftaleína, pode-se detectar no concreto a região carbonatada, a qual pode ser definida como aquela que não apresenta alteração de coloração, apresentando um pH inferior a 9,0 conforme constatado por Andrade (1992). Podemos observar que o pilar 03 apresentou uma pequena aparição da coloração rosa carmim, o que indica um falso positivo, visto que visualmente a estrutura sofre processo elevado de corrosão com perda de seção do aço no estribo.

Esse pilar é submetido a contato diário com urina, o que pode ter contribuído para o avanço da corrosão, bem como perda de seção do estribo. A urina, segundo Cunha et al (2013), é composta por água, em maior percentual, e ureia, com pH variando de ácido a básico. O cloreto de amônio ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) presente na urina reage com o hidróxido de cálcio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  o qual é consumido, diminuindo o pH e propiciando a corrosão da armadura e consequente desagregação do concreto, sabendo que, quanto menor for o pH mais intensa será a corrosão da armadura. Exemplo de comprometimento de estruturas em detrimento a urina foi relatado em sites como o G1 pelo jornalista Glauco Araújo (2009), onde a urina comprometeu os pilares do viaduto e de passarelas em Salvador.

Os resultados encontrados para a medição da profundidade estão descritos na Tabela 4.

**Tabela 4:** Resultado da medição de profundidade

<b>Medição da Profundidade</b>	
	<b>Profundidade em (mm)</b>
<b>Face Externa PILAR 01</b>	<b>59</b>
<b>Face Externa PILAR 02</b>	<b>47</b>
<b>Face Externa PILAR 03</b>	<b>32</b>

**Fonte:** Autor, 2024

Comparando a medição da profundidade de carbonatação, ilustrados na Tabela 04 com cobrimento nominal descrito em norma que deve ser de (30 mm) foi observado o avanço da carbonatação para o interior do concreto, sendo o pilar 01 identificado como aquele com a maior profundidade da manifestação patológica em questão.

Diante dos resultados apresentados, é possível inferir uma correlação entre a situação de exposição da estrutura e os danos observados. A escolha do concreto armado aparente, sem revestimento, torna-a mais suscetível às intempéries, o que pode ter contribuído para o avanço do processo de carbonatação. Este fenômeno, amplamente estudado na literatura, é atenuado em estruturas revestidas, como destacado por Lo et al. (2016), que ressalta a importância das camadas de pintura na proteção contra os efeitos do CO<sub>2</sub> no concreto.

Essa tese é corroborada por Smith et al. (2018) enfatizam que o uso de revestimentos apropriados pode reduzir significativamente a taxa de carbonatação e, conseqüentemente, prolongar a vida útil das estruturas. Ademais, Jones e Silva (2020) destacam que a aplicação de revestimentos adequados não só protege contra a carbonatação, mas também oferece resistência adicional a outros agentes agressivos, como cloretos e sulfatos, proporcionando uma proteção abrangente contra a deterioração da estrutura. Assim, a escolha adequada de técnicas de proteção e manutenção preventiva se apresenta essencial para garantir a integridade e a longevidade das estruturas expostas às intempéries.

A cidade do Recife, com sua alta umidade relativa do ar e índices pluviométricos significativos, exemplifica essa condição propícia para processos de corrosão. O clima da cidade apresenta uma umidade média anual superior a 80%, e a precipitação ultrapassa os 2.000 mm anuais (INMET, 2023). De acordo com (Mohammed et al., 2003), a combinação entre umidade e a presença de cloretos – transportados pela brisa marinha – favorece a penetração desses íons pelo concreto, facilitando a degradação do aço das armaduras. Esse cenário cria condições ideais para a penetração de cloretos e a corrosão das armaduras em estruturas de concreto armado. Andrade et al. (2011) destacam que a presença de alta umidade em ambientes costeiros favorece a formação de eletrólitos no concreto, aumentando a velocidade de corrosão.

O Além disso, estudos sobre a carbonatação em áreas urbanas apontam que a elevada concentração de CO<sub>2</sub>, resultado da intensa circulação de veículos, também é um fator agravante. Tal como afirmam Ferreira e Holanda (2017), o CO<sub>2</sub> emitido pelo tráfego se dissolve nas camadas superficiais do concreto e contribui para a redução do pH, fenômeno conhecido como carbonatação. Esse processo cria condições propícias para a corrosão das armaduras, especialmente em cidades com trânsito elevado e próximo ao litoral.

Essa análise ressalta a relação entre as condições atmosféricas e os processos de degradação das estruturas de concreto armado, enfatizando a necessidade de contemplar não apenas o planejamento e a execução, mas também o contexto ambiental, ao avaliar a durabilidade e aplicar medidas de proteção adequadas. Conforme descreve Paulo Helene (2008), a durabilidade de uma estrutura de concreto está diretamente relacionada ao seu desempenho em ambiente agressivo. Essa citação destaca a importância de considerar os fatores ambientais na preservação da integridade das estruturas de concreto armado.

### **3.3 Avaliação da resistência superficial do concreto por meio da técnica de esclerometria**

O processo consistiu em extrair um único valor (Q) de cada área de ensaio, determinado como a média aritmética dos resultados fornecidos pelo esclerômetro em cada impacto. Os cálculos detalhados podem ser observados nas tabelas (5,6 e 7) correspondentes.

**Tabela 5.** Cálculo do índice esclerométrico efetivo para o Pilar 1.

P1- CÁLCULO BASEADO NA NBR 7584:2012 - ITEM 5 RESULTADOS											
IMPACTO	ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO INDIVIDUAL	CÁLCULO MÉDIA 1	LIMITE INFERIOR -10%	LIMITE SUPERIOR +10%	CÁLCULO MÉDIA 2	LIMITE INFERIOR -10%	LIMITE SUPERIOR +10%	ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO MÉDIO	COEFICIENTE DE CORREÇÃO AFERIDO NA BIGORNA DE AÇO "K"	ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO EFETIVO	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (ÁBACO)
1	51	53,4375	48,09375	58,78125	53	47,7	58,3	53	1,01	53,53	22,76
2	53										
3	49,5										
4	51,5										
5	52,5										
6	54										
7	56,5										
8	52										
9	46										
10	49										
11	53										
12	55,5										
13	67										
14	56,5										
15	55										
16	53										

Fonte: Autor, 2024

**Tabela 6.** Cálculo do índice esclerométrico efetivo para o Pilar 2

P2- CÁLCULO BASEADO NA NBR 7584:2012 - ITEM 5 RESULTADOS														
IMPACTO	ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO INDIVIDUAL	CÁLCULO MÉDIA 1	LIMITE INFERIOR - 10%	LIMITE SUPERIOR +10%	CÁLCULO MÉDIA 2	LIMITE INFERIOR -10%	LIMITE SUPERIOR +10%	CÁLCULO MÉDIA 3	LIMITE INFERIOR - 10%	LIMITE SUPERIOR +10%	ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO MÉDIO	COEFICIENTE DE CORREÇÃO AFERIDO NA BIGORNA DE AÇO "K"	ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO EFETIVO	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (ÁBACO)
1	54,5	51,4062	46,265625	56,546875	52,5	47,25	57,75	53,1875	47,8687	58,5062	53,1875	1,01	53,71938	22,84
2	52													
3	47													
4	42,5													
5	52													
6	57													
7	45													
8	41													
9	61													
10	55													
11	55,5													
12	58,5													
13	55													
14	49,5													
15	45													
16	52													

Fonte: Autor, 2024

**Tabela 7.** Cálculo do índice esclerométrico efetivo para o Pilar 3

P3- CÁLCULO BASEADO NA NBR 7584:2012 - ITEM 5 RESULTADOS											
IMPACTO	ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO INDIVIDUAL	CÁLCULO MÉDIA 1	LIMITE INFERIOR -10%	LIMITE SUPERIOR +10%	CÁLCULO MÉDIA 2	LIMITE INFERIOR -10%	LIMITE SUPERIOR +10%	ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO MÉDIO	COEFICIENTE DE CORREÇÃO AFERIDO NA BIGORNA DE AÇO "K"	ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO EFETIVO	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (ÁBACO)
1	52	56,96875	51,271875	62,665625	54,75	49,275	60,225	54,75	1,01	55,2975	23,51
2	63										
3	63										
4	51										
5	52,5										
6	68										
7	68,5										
8	58,5										
9	52,5										
10	63,5										
11	51										
12	52,5										
13	56,5										
14	57,5										
15	45,5										
16	56										

Fonte: Autor, 2024

Os valores em cor laranja apresentados nas Tabelas 6, 7 e 8, respectivamente, foram desprezados por estarem afastados em mais ou menos 10% da média, conforme preconizado na NBR 7584:2012. O índice esclerométrico efetivo está representado nas tabelas pela cor verde.

A Tabela 8 apresenta os valores de resistência à compressão estimada para cada área de estudo.

**Tabela 8.** Resistência à compressão estimada

Pilar	Q	Qe	fc,esc (MPa)	fc,cor (MPa)
P1	53,00	53,53	22,76	22,9876
P2	53,18	53,71	22,84	23,0684
P3	54,75	55,29	23,51	23,7451

Fonte: Autor, 2024

Q: Índice esclerométrico médio.

Qe : Índice esclerométrico efetivo.

fc,esc: Resistência à compressão pelo esclerômetro.

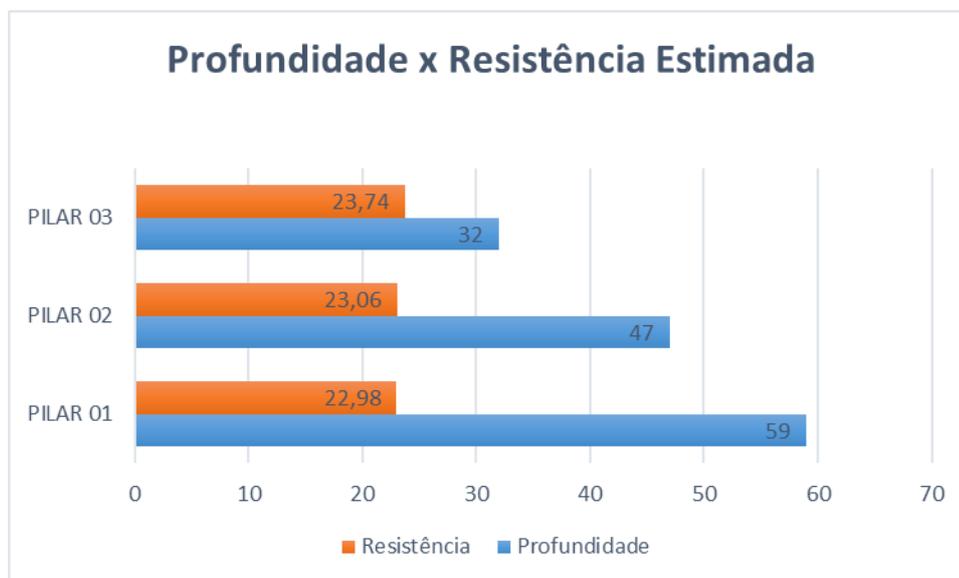
fc,cor: Resistência à compressão estimada pela correlação.

A estimativa de resistência corrigida (fc,cor) foi calculada utilizando a equação 1 descrita na metodologia.

Os resultados obtidos para a resistência corrigida (fc,cor) revelam uma diminuição na resistência do concreto em relação ao Fck mínimo de 25 MPa, conforme estabelecido pela Instrução de Serviço Ferroviário (ISF) – 216 do DNIT, que adota essa resistência como referência para a mesoestrutura de pontes e viadutos. Embora tenha sido encontrada a resistência de 22,98 MPa, no pilar P1 (valor mais baixo encontrado), esse valor não representa diretamente a resistência à compressão, uma vez que estruturas com elevada carbonatação podem apresentar uma resistência superficial maior. Esse processo ocorre devido à formação de carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) após a reação do hidróxido de cálcio Ca(OH)<sub>2</sub> com o CO<sub>2</sub>. Portanto, ainda que superficialmente possa ter uma determinada resistência, a corrosão do aço pode resultar, na verdade, em uma redução da resistência à compressão. Dessa forma, torna-se necessário realizar uma avaliação complementar com uso de ensaios semi-destrutivos e uma avaliação da armadura. Essas medidas são essenciais para evitar interpretações equivocadas sobre a resistência do concreto e garantir que as condições reais das estruturas sejam corretamente compreendidas e abordadas.

O Gráfico 1 abaixo, apresenta a correlação entre os valores da resistência estimada e os valores da medição de profundidade da carbonatação.

**Gráfico 1.** Comparação entre a profundidade da carbonatação e a resistência estimada



Fonte: Autor, 2024

No gráfico observa-se que a resistência parece aumentar à medida que a profundidade diminui. Isso sugere que os pilares mais próximos da superfície (menor profundidade) possuem uma resistência ligeiramente maior.

No entanto, com base na norma NBR 7584:2012 sabemos que a resistência do concreto pode não estar exclusivamente relacionada ao processo de carbonatação, esses resultados podem ser influenciados por outros fatores, como a qualidade do concreto, a técnica de construção e a idade da estrutura.

Bertolini (2004) destaca que os efeitos da carbonatação são importantes, mas a resistência do concreto também é fortemente influenciada pela composição do concreto, métodos de construção e condições ambientais durante o endurecimento. Papadakis (1992), aborda a complexidade das interações que influenciam a resistência do concreto. Observa que o envelhecimento da estrutura, a umidade e a temperatura ambiente são variáveis que também afetam significativamente as propriedades mecânicas do concreto. Conclui-se que a carbonatação, embora significativa, é apenas um dos muitos fatores que podem influenciar a resistência do concreto, sendo imprescindível considerar o contexto mais amplo em que o concreto é utilizado.

## 4 CONCLUSÕES

Ao analisar os achados deste estudo de caso, é evidente a relevância de investigar a carbonatação em estruturas de concreto armado, dada sua influência significativa em diversos aspectos, tais como a redução da durabilidade da estrutura e a deterioração da resistência do material. Essa relação ressalta a importância de compreender e mitigar os efeitos da carbonatação para garantir a integridade e longevidade das construções de concreto.

A análise da carbonatação por meio do indicador fenolftaleína nos três pontos de observação revelou a presença desse fenômeno na estrutura, suscitando a consideração de diversos fatores que potencialmente influenciaram esse resultado, Instituto Federal de Pernambuco. Campus Recife. Curso de Engenharia Civil. 08 de Outubro de 2024.

tais como a ausência de revestimento, umidade, ações da urina, tráfego intenso e local de exposição. Além disso, a aplicação da técnica de esclerometria forneceu informações valiosas sobre a resistência superficial do concreto, embora essa técnica tenha suas limitações. Os resultados da esclerometria, podem não refletir com precisão a resistência à compressão do concreto em profundidade, especialmente em áreas onde a carbonatação é severa. A deterioração interna, causada pela carbonatação e pela despassivação das armaduras (esta última encontrada principalmente no pilar 03) é significativa. Portanto, é essencial considerar esses fatores inter-relacionados.

Visando alcançar uma precisão mais apurada, é recomendável obter o projeto estrutural original do viaduto ferroviário para embasar análises comparativas mais detalhadas entre as resistências atuais encontradas pela técnica de esclerometria e as originais. Além disso, explorar outros métodos não destrutivos, como o ultrassom, ou considerar abordagens destrutivas, como a extração de corpos de prova, pode contribuir para estudos mais aprofundados e técnicos. A aplicação de metodologias como o Grau de Deterioração (GDE) pode fornecer maiores detalhes sobre o grau de risco das patologias, subsidiando assim o desenvolvimento de um plano de intervenção adequado.

Os resultados expostos neste estudo evidenciam a necessidade de intervenção por parte do órgão público responsável pela estrutura, dada a relevância econômica que a via proporciona ao município, bem como a responsabilidade de preservar o patrimônio público. Portanto, a investigação da corrosão por carbonatação emerge como uma ferramenta essencial para antecipar potenciais problemas e implementar estratégias de manutenção preventiva mais eficazes, visando evitar complicações de maior magnitude no futuro. Essa abordagem está alinhada com a prática recomendada em estudos anteriores, que enfatizam a importância da manutenção preventiva e da preservação de infraestruturas públicas.

## 5 REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR 7188:** Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas. Rio de Janeiro, 2013.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7584:2012:** Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão. Rio de Janeiro, 2012.
- BALESTRA, C. T. E.** et al. Análise da frente de carbonatação em obras de infraestrutura viária: estudo de caso de uma passarela. 2019.
- BARBOSA, F. R.; CARVALHO, J.; COSTA E SILVA, A.; FRANCO, A.; MOTA, J. M.** Corrosão de armadura em estruturas de concreto armado devido ao ataque de íons cloreto. In: *Congresso Brasileiro do Concreto, 54.*, Maceió, 2012.
- BERTOLINI, L.** et al. Repassivation of steel in carbonated concrete induced by cathodic protection. *Materials and Corrosion*, 2003.
- CANTUÁRIA, L.; CARDOSO, E.** Análise do processo de passivação das armaduras. Goiânia: Cefet Goiás, 2005. 81 p.
- CARMONA, T.** Modelos de previsão da despassivação das armaduras em estruturas. 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994. 88 p.
- COMPANHIA BRASILEIRA DE TRENS URBANOS – CBTU.** Sistemas CBTU. Disponível em: <https://www.cbtu.gov.br/index.php/pt/sistemas-cbtu/recife>. Acesso em: 11 mar. 2024.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES – DNIT.** Instrução de Serviço Ferroviário: ISF-216: Projeto de Obra de Arte Especiais.
- DNIT.** Norma 010/2004-PRO – Inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.
- FUSCO, P. B.** Tecnologia do concreto estrutural: tópicos aplicados. São Paulo: Pini, 2008.
- HELENE, P. R. L.** Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto. São Paulo: Pini, 1992.
- LO, T. Y.; LIAO, W.; WONG, C. K.; TANG, W.** Evaluation of carbonation resistance of paint coated concrete for buildings. *Construction and Building Materials*, v. 107, p. 299-306, 2016.
- MARTINS, R. O. G.; LIMA, G. E. S.; PEDROTI, L. G.; ALVARENGA, R. C. S. S.; FERNANDES, W. E. H.; CARVALHO, J. M. F.** Análise do comportamento da resistência à compressão do concreto carbonatado. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 21.*, Cuiabá, 2014.
- MEDEIROS, R.; MÜLLER, R.** Estimativa da umidade relativa através de modelo estudo de caso do litoral brasileiro. *Revista Tecnológico-Científica do CREA-PR*, 2018.
- NEVILLE, A. M.** Propriedades do concreto. Trad. de Salvador E. Giammusso. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997.
- OLIVEIRA, D. F.** Levantamento de causas de patologias na construção civil. 2013.

**PAULETTI, C.; POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C. C.** Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil. *Ambiente Construído*, v. 7, n. 4, p. 7-20, 2007.

**RILEM RECOMMENDATION CPC-18.** Measurement of hardened concrete carbonation depth. *Materials and Structures*, v. 21, p. 453-455, 1988. ISSN: 1359-5997.

**SIQUEIRA, M. V.; AQUINO, J. T.; SANTOS, A. M.; MOTA, J. M. F.** Análise de carbonatação e corrosão por íons cloreto em uma passarela da zona oeste do Recife. *Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada*, v. 2, p. 1, 2017.

**SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T.** Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto. São Paulo: Pini, 1998.

**VERBECK, G.** Carbonation of hydrated portland cement. *Special Technical Publication*, n. 205, ASTM, 1958. 36 p.

**VITÓRIO, J. A. P.** Pontes e viadutos rodoviários: conceituação, conservação, segurança e reforço estrutural. Recife, 2015.