

IMPACTO DA CORROSÃO POR CARBONATAÇÃO EM PILARES DO VIADUTO FERROVIÁRIO DA LINHA SUL, TRECHO PORTA LARGA / AEROPORTO

Paulo Henrique de Melo Bezerra

phmb@discente.ifpe.edu.br

Profº Drº Ronaldo Faustino da Silva

ronaldofaustino@recife.ifpe.edu.br

RESUMO

A corrosão por carbonatação é um processo químico que ocorre em estruturas de concreto armado quando o pH do concreto diminui devido à penetração de dióxido de carbono (CO₂) atmosférico. Esse processo é uma das principais causas de degradação do concreto e pode levar a uma redução significativa na vida útil da estrutura. O presente trabalho teve como foco, analisar a presença e o estágio da corrosão de armaduras nos pilares de concreto armado do viaduto férreo, trecho da linha sul, na região metropolitana do Recife, possivelmente pelo fenômeno de carbonatação. Para a análise desta patologia, foram realizados diversos procedimentos, incluindo uma inspeção visual, técnicas de avaliação da profundidade da frente de carbonatação com aplicação de fenolftaleína, além de ensaios com esclerômetro para medir a resistência superficial do concreto, na região afetada pela carbonatação, conforme procedimentos estabelecidos pela NBR 7584:2012. Observou-se que nos pontos estudados os resultados apresentaram a existência da patologia bem como sua profundidade. Portanto, estudar a corrosão por carbonatação é uma forma de prevenir possíveis problemas futuros e também de planejar uma manutenção preventiva mais eficaz a fim de que essa patologia não gere algo de maior proporção.

Palavras-chave: concreto armado; patologias; corrosão; carbonatação.

ABSTRACT

Carbonation corrosion is a chemical process that occurs in reinforced concrete structures when the pH of the concrete decreases due to the penetration of atmospheric carbon dioxide (CO₂). This process is one of the main causes of concrete degradation and can lead to a significant reduction in the structure's lifespan. The focus of this study was to analyze the presence and stage of corrosion of reinforcement bars in the reinforced concrete pillars of the railway viaduct, section of the southern line, in the metropolitan region of Recife, possibly due to the carbonation phenomenon. To analyze this pathology, various procedures were

carried out, including visual inspection, evaluation techniques of the depth of carbonation front using phenolphthalein application, as well as sclerometer tests to measure the surface resistance of concrete in the affected region by carbonation, following procedures established by NBR 7584:2012. It was observed that, in the studied points, the results presented the existence of the pathology as well as its depth. Therefore, studying carbonation corrosion is a way to prevent possible future problems and also to plan more effective preventive maintenance so that this pathology does not generate something of greater proportion.

Regenerate response Keywords: reinforced concrete; pathologies; corrosion; carbonation.

1 INTRODUÇÃO

A durabilidade das estruturas está ligada a fabricação com materiais não expansivos e da capacidade de resistir à agressões do meio externo. Grande parte dos mecanismos que agredem o concreto se dá através dos poros e fissuras presentes, e da existência de fatores como a presença de água no interior da massa de concreto e do oxigênio presente na atmosfera. Esses mecanismos são divididos em físicos, como por exemplo: erosão por abrasão, erosão por cavitação e fraturamento por congelamento da água e em químicos, como a solubilização dos elementos do concreto por águas ácidas, ação de águas sulfatadas, reatividade dos agregados com os alcalis do cimento (RAA), corrosão por íons cloretos e carbonatação (FUSCO, 2008).

São várias as causas para a corrosão de armaduras em estruturas de concreto armado e a carbonatação é uma delas, sendo que esse fenômeno responsável por diminuir a proteção das estruturas é bastante preocupante e compromete a durabilidade das mesmas. Para que ocorra esse processo é necessário haver a despassivação da armadura que pode ser ocasionada por presença de cloretos ou diminuição da alcalinidade do concreto, sendo essa diminuição gerada pelo fenômeno de carbonatação. Vale destacar que o fenômeno de corrosão é o mais frequente em estruturas de concreto armado em detrimento de outras patologias deteriorantes, sendo evidente o comprometimento à proteção e a beleza das estruturas (BARBOSA et al, 2012).

A carbonatação é uma reação entre o gás carbônico e o hidróxido de cálcio presente no concreto e que acarreta diversas situações indesejáveis.



O carbonato de cálcio não deteriora o concreto, durante a sua formação ele consome os álcalis da pasta e assim reduz o pH tornando o ambiente ácido. Após a despassivação, o processo de corrosão será iniciado se ao mesmo tempo houver umidade, agentes agressivos como CO₂, Oxigênio e fuligem ao redor da armadura (NEVILLE, 2015). Um parâmetro que pode acelerar esse problema é a umidade relativa já que a maioria das patologias do concreto é desencadeada pelo acúmulo de água em seu interior, fato esse que se agrava em áreas litorâneas as quais possuem altas taxas de umidade (R. MEDEIROS e R. MÜLLER, 2018).

O Objeto desse estudo de caso é um viaduto férreo de concreto armado localizado na linha sul do metrô do Recife, trecho Porta Larga sentido Aeroporto, o estudo analisou alguns pilares do viaduto férreo de acordo com a NBR 7188 (ABNT, 2013), a estrutura pode ser classificada como viaduto, pois trata-se de estrutura para transpor um obstáculo artificial (avenida, rodovia, etc.).

O projeto da linha sul do metrô do Recife foi concebido em 1993 junto às empresas MK - Engenharia e Arquitetura Ltda e Jaakko Pöyry, teve sua entrega realizada em 1996. Para a implantação, a Companhia Brasileira de Trens Urbanos (CBTU) dividiu a execução das obras em lotes, iniciando as obras em março de 1998 (CBTU, 2023).

As obras foram paralisadas em 2001 devido a problemas financeiros e com isso a inauguração do primeiro trecho (Recife-Imbiribeira) só ocorreu em 28 de fevereiro de 2005. Os demais trechos da Linha Sul, incluindo o objeto do estudo, foram inaugurados de forma faseada até março de 2009, sendo assim, a idade da estrutura é de aproximadamente 14 anos (CBTU, 2023).

Segundo Vítório (2015), todo viaduto é composto por 3 elementos: superestrutura, mesoestrutura e infraestrutura, o presente estudo foi realizado na mesoestrutura, a qual é formada por pilares, travessas e encontros, cuja função é transmitir as cargas da superestrutura para as fundações.

Os estudos evidenciaram a patologia da carbonatação, com aplicação da fenolftaleína nos pontos onde apresentaram danos visuais e posteriormente ensaio

de esclerometria. A esclerometria é uma técnica que submete a estrutura de concreto a um impacto padronizado aplicando uma determinada massa e energia, o valor medido da reflexão, corresponde ao índice esclerométrico. A resistência é estimada mediante as curvas de calibração, correlacionando a resistência à compressão do concreto com o índice esclerométrico (LOPES, 2016).

Considerando todos os prejuízos que podem advir da corrosão gerada pela carbonatação, o presente trabalho buscou demonstrar o mecanismo de detecção e soluções de prevenção para esse tipo de corrosão.

2 METODOLOGIA

2.1 Caracterização da área de estudo

O viaduto objeto da análise localiza-se nas proximidades da estação Porta Larga, no bairro da Imbiribeira, em Recife/PE (vide figura 1 e 2).

Figura 1. Objeto do estudo de caso



Fonte: Autor, 2023

Figura 2. Mapa metrô Recife



Fonte: Adaptado CBTU, 2023

2.2 Caracterização do modelo de estudo a ser realizado

Para a realização das análises foram escolhidos 4 diferentes pontos da estrutura, considerando as características de deterioração observados na avaliação visual da mesma.

Segundo orientações da NBR 7584:2012 o trabalho foi dividido nas seguintes etapas:

1. Avaliação visual *in loco*;
2. Medição da profundidade da frente de carbonatação com solução de fenolftaleína a 1%;
3. Medição da resistência superficial do concreto pela Técnica de Esclerometria;

2.2.1 Descrição objetiva dos procedimentos realizados

2.2.1.1 Avaliação visual *in loco*

A inspeção e avaliação visual da estrutura permitiram identificar e avaliar os danos existentes, sendo feitas, a caracterização física da obra através de registros fotográficos e a identificação das manifestações patológicas aparentes, utilizando um check list baseado no Anexo B da NORMA DNIT 010/2004 – PRO.

Tabela 1: Modelo de Check list utilizado na avaliação visual dos pilares

INDICAÇÕES VISUAIS				
	P1	P2	P3	P4
Armadura exposta				
Troca de cor				
Fissuração				
Destacamento do cobrimento				
Perda de seção de aço				

Fonte: Adaptado DNIT, 2004

2.2.1.2 Medição da carbonatação com solução de fenolftaleína a 1%

O uso da solução de fenolftaleína seguiu a recomendação da RILEM CPC-18(1988), que indica o preparo de uma solução de álcool etílico 70% com 1% de fenolftaleína.

Inicialmente foi realizada uma preparação na estrutura do viaduto que recebeu o ensaio de carbonatação com fenolftaleína, com esmerilhamento da camada superficial e limpeza com pinceis. Após a limpeza, a solução foi pulverizada na superfície em estudo e foi observada a coloração resultante, como pode ser observado na Figura 3.

Figura 3. Área do pilar 2



Fonte: Autor, 2023

Após a avaliação visual realizou-se a medição da profundidade carbonatada do concreto com utilização do paquímetro.

2.2.1.3 Medição da resistência superficial do concreto pela técnica de esclerometria

Para medir a resistência superficial do concreto na região afetada pela carbonatação, foi utilizado um esclerômetro digital da marca PROCEQ (Figura 4), modelo Silver Schmidt Tipo N com energia de impacto padrão de 2.207Nm. A faixa de resistência indicada pelo fabricante é de 10 a 100 Mpa.

Figura 4. Esclerômetro

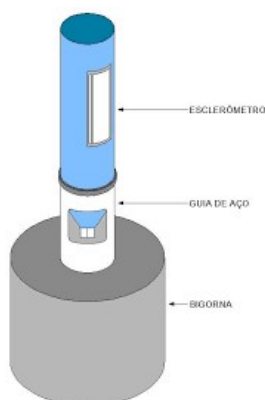


Fonte: Autor, 2023

O teste foi realizado de acordo com a NBR 7584 (ABNT, 2012), o esclerômetro foi aplicado na posição de maior inércia, com espessura mínima de 100 mm sobre a área de impacto. A superfície estudada é rígida e a área de ensaio está entre 8.000 mm² e 40.000 mm², o experimento foi feito nos 4 pontos de estudo e antes da utilização do equipamento foi realizada a calibração de acordo com a recomendação do fabricante.

Conforme a NBR 7584 (ABNT, 2012), antes de sua utilização ou após 300 impactos deve ser efetuada a calibração do esclerômetro para a obtenção do coeficiente de correção do índice esclerométrico (k), empregando-se para tal uma bigorna de aço, realizando 10 leituras. Essa aferição foi feita conforme a Figura 5.

Figura 5. Bigorna de aço



Fonte: ABNT NBR 7584:2012

O equipamento é considerado apto para uso, quando nenhuma das leituras situa-se fora do intervalo estabelecido pelo fabricante. Após as 10 leituras, foi calculado o coeficiente de correção (k) por meio da Equação 3:

$$k = \frac{n \cdot I_{Enom}}{\sum_{i=1}^n I_{Ei}} \quad (3)$$

k: coeficiente de correção do índice esclerométrico;

n: número de golpes na bigorna de aço;

I_{Enom}: índice esclerométrico nominal do aparelho na bigorna de aço, fornecido pelo fabricante (I_{Enom} = 80);

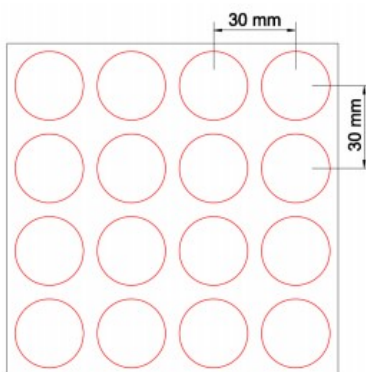
I_{Ei}: índice obtido por cada golpe na bigorna de aço.

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

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

1. Limpeza da área de ensaio utilizando pedra abrasiva para polir e remover toda poeira do local;
2. O posicionamento do gabarito foi realizado com 16 pontos tendo a distância de 30 mm entre cada eixo, conforme Figura 6;

Figura 6. Gabarito para ensaio



Fonte: Adaptado da NBR 7584:2012

3. Com o esclerômetro de reflexão na horizontal, efetuar 16 impactos em cada área ensaiada.

4. 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.
5. Realizar a correlação entre os valores de $Q_{\text{médio}}$ e a resistência à compressão do concreto por meio de uma curva de correlação que é a Equação 4.

$$f_{c,cor} = 8,7746.e^{0,018Q_e} \quad (4)$$

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

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados e discussões estão apresentados de acordo com a seguinte sequência de execução: avaliação visual *in loco*, medição de carbonatação com fenolftaleína 1% e medição da resistência superficial do concreto pela técnica de esclerometria.

3.1 Avaliação visual *in loco*

O resultado da avaliação visual está detalhado na figura 7 e na tabela 2 com o resultado do check list da avaliação visual.

Figura 7. Avaliação visual dos pilares



Fonte: Autor, 2023

Tabela 2: Resultado do Check list da avaliação visual dos pilares

INDICAÇÕES VISUAIS				
	P1	P2	P3	P4
Armadura exposta	✓	✓	✓	✓
Troca de cor	✓	×	×	×
Fissuração	×	×	×	×
Destacamento do cobrimento	✓	✓	✓	✓
Perda de seção de aço	✓	✓	✓	✓

Nota 1 : A mudança de cor, observada no pilar 1, foi devido ao processo de combustão no entorno.

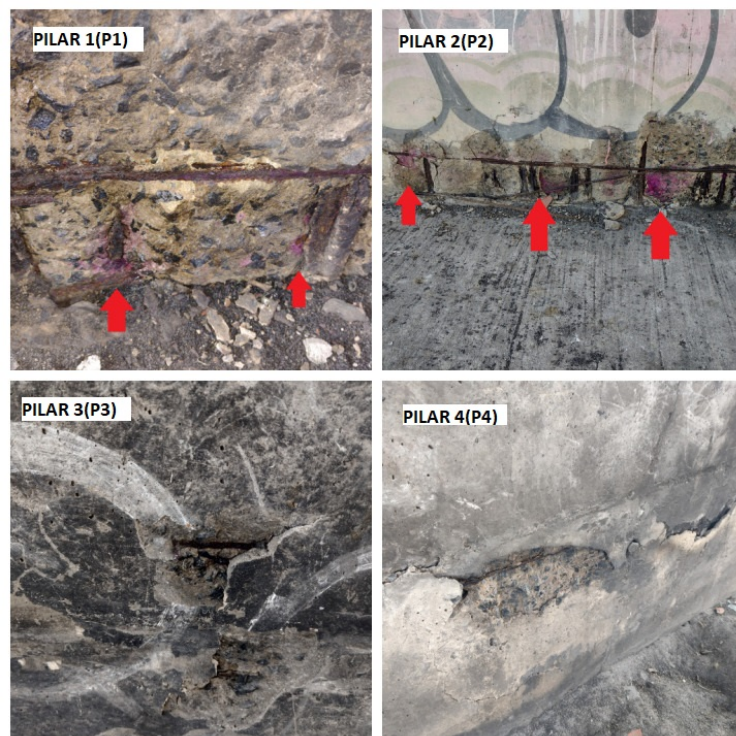
Nota 2: Todas as 4 estruturas apresentaram armadura exposta, destacamento do cobrimento e perda de seção de aço.

Fonte: Adaptado DNIT, 2004

3.2 Medição da carbonatação com fenolftaleína 1%

Os resultados nos 4 pontos estudados podem ser visualizados na figura 8.

Figura 8. Avaliação visual dos pilares após aplicação da fenolftaleína



Fonte: Autor, 2023

A ausência de cor, ao borrifar a solução de fenolftaleína 1%, foi observada em áreas de todos os pilares. Entretanto, em algumas partes dos pilares 1 e 2, indicadas com setas vermelhas nas figuras, houve aparição da coloração rosa carmim.

A ausência de coloração indica que o pH está abaixo de 9, ou seja, que essa região está sofrendo o ataque por carbonatação; já a coloração rosa carmim indica pH superior a 9, e assim demonstra que o concreto encontra-se protegendo a armadura da corrosão por carbonatação.

Após o teste com indicador foi realizada a classificação da estrutura conforme NBR 6118/2003, norma à época utilizada de acordo com o histórico de inauguração, utilizando-se para isso as figuras 9 e 10.

Figura 9. 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 (a,b)	Pequeno
III	Forte	Marinha (a)	Grande
		Industrial (a,b)	
IV	Muito forte	Industrial (a,c)	Elevado
		Respingos de maré	

Fonte: ABNT adaptado, 2003.

Figura 10. Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm

Tipo de Estrutura	Componente ou Elemento	Classe de Agressividade Ambiental (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV(c)
		Cobrimento nominal mm			
Concreto Armado	Laje (b)	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo(d)	30		40	50
Concreto protendido (a)	Laje	25	30	40	50
	Viga/Pilar	30	35	45	55

Fonte: ABNT adaptado, 2003.

A estrutura em estudo foi classificada na classe de agressividade II, por se tratar de estrutura em área urbana e com agressividade moderada (Figura 17), o que indica que o cobrimento nominal das armaduras deve apresentar 30 mm (Figura 18).

Os resultados encontrados para a medição da profundidade estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3: Resultado da medição de profundidade

Área	Ponto	Profundidade (mm)
Face interna do P1	1	57
Face externa do P2	2	54
Face interna do P3	3	35
Face interna do P4	4	33

Fonte: Autor, 2023

Comparando os valores encontrados na Tabela 3 com o valor nominal descrito na norma 6118:2003 (30 mm) foi observado o avanço da carbonatação para o interior do concreto, com o pilar 1 apresentando a maior profundidade para a patologia em estudo.

Os resultados encontrados podem ter relação com a situação de exposição da estrutura, pois ela é feita de concreto armado aparente, ou seja, não possui revestimento e assim fica mais suscetível às intempéries. Diversos estudos demonstram que estruturas revestidas estão mais protegidas do processo de carbonatação, Lo et al. (2016), por exemplo, ressalta a importância das camadas de pintura na proteção contra efeitos do CO₂ no concreto e estudos mais recentes como o realizado por Balestra et al. (2019), que ratificam essa tese.

Outro fator que pode ter contribuído para esse resultado é a questão ambiental, pois o viaduto está localizado em um ambiente aberto, urbano e próximo ao litoral, esses fatores já são de amplo conhecimento da engenharia como descrito por Bertolini L. et al. (2003), os quais enfatizam, entre outras coisas, que ambientes urbanos possuem altas concentrações de dióxido de carbono onde são mais propícios a desenvolver a corrosão de armaduras pela carbonatação do concreto. Além disso, a umidade do ambiente proporciona na superfície do concreto uma condição favorável, tendo em vista que os poros ficam parcialmente preenchidos com água e o dióxido de carbono do ambiente alcança a armadura e dissolve a película apassivadora que protege a armadura e com isso o metal é corroído se

houver umidade presente no concreto, destaca-se ainda que umidades entre 50% e 70% correspondem à maior velocidade de carbonatação (POURSAEE, 2016).

Além desses fatores, as altas relações a/c, as quais resultam em concretos porosos, e que possivelmente aumenta o avanço do CO₂ entre os poros, pode ser levado em consideração no avanço da patologia.

Por fim, segundo Santos (2009), vale citar a influência da cura do concreto, já que este é um procedimento indispensável na redução do efeito da carbonatação, e que o concreto curado de forma inadequada possui microfissuras que o deixam fraco e essas fissuras facilitam a entrada do CO₂ o que acelera a carbonatação. A pré-existência de fissuras nas estruturas facilita a entrada do CO₂ e pode acelerar a carbonatação. No livro Propriedades do Concreto, Adam Neville cita que através de pesquisas observou-se que o aumento do período da cura, ampliando a molhagem de um dia para três dias, reduziu a profundidade de carbonatação em cerca de 40% (NEVILLE., 2015).

3.3 Medição da resistência superficial do concreto pela técnica de esclerometria

De cada área de ensaio foi obtido um único valor (Q), o qual corresponde à média aritmética dos valores fornecidos pelo esclerômetro em cada impacto, conforme cálculos demonstrados nas figuras (11, 12, 13 e 14).

Figura 11. Cálculo do índice esclerométrico efetivo para o P1

Cálculo conforme Item 5 "RESULTADOS" da NBR 7584:2012										
	Impacto	Índice Esclerométrico Individual	Média	Limite Inferior	Limite Superior	Índice esclerométrico corrigido	Média(*Com mais de 5 dados no mínimo)	Coefficiente de correção aferido na bigorna de aço "K"	Q (índice esclerométrico médio)	Qe(índice esclerométrico efetivo)
P1	1	59,5	56,52	50,87	62,17	59,5	56,52	1,01	56,52	57,08
	2	57,5				57,5				
	3	57,5				57,5				
	4	55				55				
	5	57,8				57,8				
	6	59,5				59,5				
	7	56,5				56,5				
	8	60,5				60,5				
	9	50,5				50,5				
	10	53,5				53,5				
	11	56				56				
	12	55				55				
	13	58				58				
	14	51				51				
	15	61				61				
	16	55,5				55,5				

Fonte: Autor, 2023

Figura 12. Cálculo do índice esclerométrico efetivo para o P2

Cálculo conforme Item 5 "RESULTADOS" da NBR 7584:2012										
	Impacto	Índice Esclerométrico Individual	Média	Limite Inferior	Limite Superior	Índice esclerométrico corrigido	Média(*Com mais de 5 dados no mínimo)	Coefficiente de correção aferido na bigorna de aço "K"	Q (índice esclerométrico médio)	Qe(índice esclerométrico efetivo)
P2	1	63	57,84	52,06	63,63	63	57,84	1,01	57,84	58,42
	2	52,5				52,5				
	3	58,5				58,5				
	4	57				57				
	5	61				61				
	6	55				55				
	7	59,5				59,5				
	8	57,5				57,5				
	9	61				61				
	10	56,5				56,5				
	11	57				57				
	12	62,5				62,5				
	13	52,5				52,5				
	14	53,5				53,5				
	15	60				60				
	16	58,5				58,5				

Fonte: Autor, 2023

Figura 13. Cálculo do índice esclerométrico efetivo para o P3

Cálculo conforme Item 5 "RESULTADOS" da NBR 7584:2012										
	Impacto	Índice Esclerométrico Individual	Média	Limite Inferior	Limite Superior	Índice esclerométrico corrigido	Média(*Com mais de 5 dados no mínimo)	Coefficiente de correção aferido na bigorna de aço "K"	Q (índice esclerométrico médio)	Qe(índice esclerométrico efetivo)
P3	1	54,5	52,94	47,65	58,24	54,5	53,52	1,01	53,52	54,06
	2	55,5				55,5				
	3	57,5				57,5				
	4	47,5								
	5	53				53				
	6	45								
	7	56,5				56,5				
	8	51				51				
	9	53,5				53,5				
	10	55,5				55,5				
	11	58,8								
	12	51,8				51,8				
	13	48,5				48,5				
	14	53,5				53,5				
	15	50,5				50,5				
	16	54,5				54,5				

Fonte: Autor, 2023

Figura 14. Cálculo do índice esclerométrico efetivo para o P4

Cálculo conforme Item 5 "RESULTADOS" da NBR 7584:2012										
	Impacto	Índice Esclerométrico Individual	Média	Limite Inferior	Limite Superior	Índice esclerométrico corrigido	Média(*Com mais de 5 dados no mínimo)	Coefficiente de correção aferido na bigorna de aço "K"	Q (Índice esclerométrico médio)	Qe(Índice esclerométrico efetivo)
P4	1	54,5	55,83	50,25	61,41	54,5	54,88	1,01	54,88	55,43
	2	64,8								
	3	51,5				51,5				
	4	66								
	5	55				55				
	6	52,5				52,5				
	7	57,5				57,5				
	8	54				54				
	9	56				56				
	10	61				61				
	11	52,5				52,5				
	12	49								
	13	54				54				
	14	56				56				
	15	57				57				
	16	52				52				

Fonte: Autor, 2023

Os valores em vermelho nas figuras 13 e 14, referentes aos pilares P3 e P4, foram desprezados por estarem afastados em mais ou menos 10% da média, conforme preconizado na NBR 7584:2012.

A Tabela 4 apresenta os valores de resistência à compressão estimada para cada área de estudo.

Tabela 4. Resistência à compressão estimada

Área	Q	Qe	fc,esc (MPa)	fc,cor (MPa)
P1	56,52	57,08	24,27	24,52
P2	57,84	58,42	24,84	25,11
P3	53,52	54,06	22,98	23,21
P4	54,88	55,43	23,57	23,79

Q: Índice esclerométrico médio.

Qe : Índice esclerométrico efetivo.

fc,esc: Resistência à compressão pelo esclerômetro.

fc,cor: Resistência à compressão estimada pela correlação.

Fonte: Autor, 2023

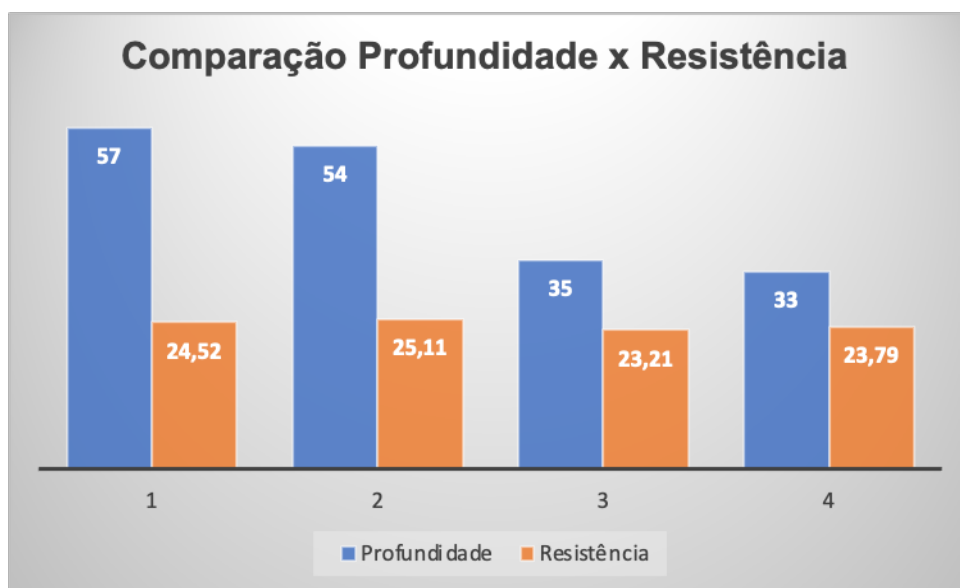
A estimativa de resistência corrigida (fc,cor) foi encontrada utilizando a equação 1 detalhada na metodologia. Os valores encontrados(fc,cor) indicam uma diminuição da resistência do concreto, tomando como base o Fck de 25Mpa, considerando a ISF(instrução de serviço ferroviário) – 216: Projeto de Obra de Arte

Especiais – DNIT, que considera essa resistência para mesoestrutura de pontes e viadutos.

A resistência de 23,21 encontrada no P3 foi a menor dos 4 pontos estudados. diversos fatores podem influenciar nesse resultado e não apenas a carbonatação já que ensaios de resistência à compressão e esclerometria realizados por Martins et al., 2014 indicaram que a carbonatação pode não influenciar na resistência a compressão, mas aumentar uma resistência superficial. O que leva a crer que este processo pode levar a um falso diagnóstico de elevação de resistência de uma estrutura.

Correlacionando os valores da resistência aos valores da medição de profundidade da carbonatação temos o gráfico 1.

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



Fonte: Autor, 2023

Era de se esperar que a resistência superficial do concreto e a profundidade de carbonatação se correlacionassem de maneira inversa, pois a carbonatação diminui o pH do concreto, o que pode resultar em uma redução da resistência do material (FONSECA, 2016).

Quando a carbonatação ocorre na superfície do concreto, ela pode afetar a camada superficial do material, que é responsável pela resistência superficial. Isso pode levar a uma diminuição da resistência superficial do concreto. Por outro lado, a profundidade de carbonatação pode ser utilizada como um indicador da penetração de dióxido de carbono no concreto. Quanto mais profunda for a carbonatação, maior

a penetração do dióxido de carbono, o que pode levar a uma redução da resistência em camadas mais profundas do concreto (FONSECA, 2016).

Entretanto, os resultados apresentados pelo gráfico 1 demonstram que essa correlação não aconteceu, o P1, por exemplo, teve a maior profundidade, porém não apresentou a menor resistência. Esse fato pode ocorrer porque os valores estimados para a resistência, quando há carbonatação, podem superar os valores reais em mais de 50%, em função da espessura da camada carbonatada. Sabe-se também que a resistência pode não estar relacionada somente ao processo de carbonatação (NBR 7584:2012).

4 CONCLUSÕES

Levando em consideração os resultados encontrados para o estudo de caso da presente pesquisa foi possível verificar a importância de se estudar o fenômeno da carbonatação nas estruturas de concreto armado tendo em vista os diversos impactos gerados, como, a diminuição da vida útil da estrutura e a perda de resistência do concreto.

A medição da carbonatação com fenolftaleína nos quatro pontos de estudo demonstrou que a estrutura sofreu carbonatação e que diversos fatores podem ter influenciado esse resultado, como, a falta de revestimento, questões ambientais e a relação a/c do concreto. Além disso, o estudo da resistência utilizando a técnica de esclerometria ratificou os resultados encontrados com a fenolftaleína, já que foi possível detectar a diminuição da resistência do concreto, a qual, pode caracterizar que a estrutura sofreu carbonatação.

Ficou evidenciado pelos resultados apresentados nesse trabalho, que a estrutura precisa de atenção e providência do órgão público responsável, como por exemplo, a realização de análises mais concisas em relação a comparação das resistências atual e original, a utilização de outros métodos não-destrutivos como o uso do ultrassom ou, se possível, métodos destrutivos como a extração de corpos de prova para estudos e aprofundamentos técnicos. Além disso, pode-se utilizar de metodologias como a GDE (Grau de Deterioração) para saber o grau de risco das patologias e assim elaborar um plano de intervenção, tendo em vista a importância para o transporte público e a comunidade usuária, além da responsabilidade de se preservar o patrimônio público.

Desse modo, estudar a corrosão por carbonatação é uma forma de prever possíveis problemas e também de planejar uma manutenção preventiva mais eficaz a fim de que essa patologia não gere algo de maior proporção.

5 REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS(ABNT). **NBR 6118** - Projeto de estruturas de concreto. Procedimento. 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS(ABNT). **NBR 7188** - Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas, Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS(ABNT). **NBR 7584** - Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão, Rio de Janeiro 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS(ABNT). **NBR 15575** - 2013, Edificações Habitacionais – *Desempenho*, Rio de Janeiro, 2013.
- BALESTRA, C.T.E., et al. **Análise da Frente de Carbonatação em Obras de Infraestrutura Viária: Estudo de Caso de uma Passarela**. 2019.
- BERTOLINI, L., et al. - **Repasivation of steel in carbonated concrete induced by cathodic protection**. *Materials and Corrosion* (2003).
- CASTRO, T.F.C, **Manutenção em estruturas de concreto armado baseado no conceito de manutenção centrada em confiabilidade**, 2016, São Paulo.
- COMPANHIA BRASILEIRA DE TRENS URBANOS (CBTU), <https://www.cbtu.gov.br/index.php/pt/sistemas-cbtu/recife> , acesso em: 12/04/2023.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES(DNIT)- Norma 010/2004-PRO – **Inspeções em Pontes e Viadutos de Concreto Armado e Protendido – Procedimento**, Rio de Janeiro, 2004
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES(DNIT)- **Instrução de Serviço Ferroviário:ISF-216: PROJETO DE OBRA DE ARTE ESPECIAIS**, 2005.
- F. R. BARBOSA, J. CARVALHO, A. COSTA e SILVA, A. FRANCO e J. M. 2. MOTA, **Corrosão de armadura em estruturas de concreto armado devido ao ataque de íons cloreto.**, Maceió: 54º Congresso Brasileiro do Concreto, 2012.
- FONSECA, Nuno; DE BRITO, Jorge; AGUIAR, J. L. Barroso. **Carbonation and chloride ingress: prediction of reinforced concrete durability**. *Construction and Building Materials*, v. 125, p. 1047-1058, 2016.
- FUSCO, P. B., **Tecnologia do concreto estrutural: tópicos aplicados**, São Paulo: PINI, 2008.
- GOMES, B. M. C.; NEVES, Y. T.; DINIZ, M. I. L.; SENA, T. S. **Análise das principais causas de manifestações patológicas em edificações residenciais em João Pessoa-PB: classificação e prevenção**. In: Conferência Nacional de Patologia e Recuperação de Estruturas. Anais... Recife, Pernambuco, 2017.
- LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL. **E391: Determinação da profundidade de carbonatação de betões, argamassas ou outros materiais cimentícios – Método de ensaio**. Procedimento. 2019, 2 p.

LO, T.Y., LIAO, W., WONG, C.K., Tang, W., **Evaluation of carbonation resistance of paint coated concrete for buildings. Construction and Building Materials.** 107, 299-306. 2016.

LOPES YD. **Estimativa da resistência do concreto à compressão por meio de ensaios não destrutivos: estudos de caso.** 2016. 172f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2016.

MEIRA, G. R. **Corrosão de armaduras em estruturas de concreto: fundamentos, diagnóstico e prevenção.** João Pessoa. IFPB. 2017, 130 p.

MENEGHETTI, L. C. PEF – 2503 **Estruturas Danificadas: Segurança e Ações Corretivas.** 2016. 45 slides. Disponível em: <[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3041369/mod_resource/content/1/PEF2503 - Aula_2_fissuras.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3041369/mod_resource/content/1/PEF2503-Aula_2_fissuras.pdf)>. Acesso em : 27 de fevereiro de 2023.

NEVILLE, A.M., 2015. **Propriedades do concreto-5ª Edição.** Bookman Editora.

PAULETTI, Cristiane; POSSAN, Edna; DAL MOLIN, Denise Carpena Coitinho.

Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil. Ambiente construído, v. 7, n. 4, p. 7-20, 2007.

POURSAEE, A. (2016). **Carbonation of concrete: A review of principles and mechanisms. Journal of materials in civil engineering**, 28(1), 04015145SOUZA, V.C.M; RIPPER, Thomas. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto.** São Paulo: Pini, 1998

R. MEDEIROS e R. MÜLLER, “**Estimativa da umidade relativa através de modelo estudo de caso do litoral brasileiro,**” *revista tecnológico-científica do CREA-PR*, 2018.

R. O.G. MARTINS; G.E. S. de LIMA; L. G. PEDROTI*; R. de C. S. S. ALVARENGA; W. E. H. FERNANDES; J.M.F.de **CARVALHO Análise do Comportamento da Resistência a Compressão do Concreto Carbonatado**, 21º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais 09 a 13 de novembro de 2014, Cuiabá, MT, Brasil

RAMALHO, F. C. **Identificação das patologias na ponte de concreto armado situado no bairro Pedra Velha no município de Delmiro Gouveia – AL.** Monografia – Universidade Federal de Alagoas. Delmiro Gouveia. 2017, 55 p.

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

SABAI, A. **Problemas causados pela lixiviação do concreto.** 2017. Matéria digital. Disponível em: <<https://www.mapadaobra.com.br/capacitacao/os-problemas-causados-pela-lixiviacao-do-concreto/>>. Acesso em 27 de fevereiro de 2023.

SANTOS A., **Carbonatação do Concreto**, 2009. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/carbonatacao-do-concreto/> acessado em 27/02/2023.

SILVA, Rafael Alves da. **Análise das manifestações patológicas da ponte sobre o rio Pedra no município de Delmiro Gouveia – AL: estudo de caso.** 2020. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Unidade Delmiro Gouveia-Campus do Sertão, Universidade Federal de Alagoas, Delmiro Gouveia, 2019.

SRINIVASAN, S., & HOOTON, R. D. (2016). **The impact of carbonation on reinforced concrete structures**. *Cement and Concrete Research*, 85, 25-38.

VITÓRIO, J. A. P. – **PONTES E VIADUTOS RODOVIÁRIOS: Conceituação, conservação, segurança e reforço estrutural**, Recife, 2015.