Análise da frente de carbonatação em obras de infraestrutura viária: Estudo de caso de uma passarela

Balestra¹, Carlos Eduardo Tino; Medeiros-Junior², Ronaldo A.; Savaris³, Gustavo; Andrade⁴, Juliano Sezar de

¹ Professor Doutor, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, carlosbalestra@utfpr.edu.br

² Professor Doutor, Universidade Federal do Paraná, medeirosjunior.ufpr@gmail.com

³ Professor Doutor, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, gsavaris@utfpr.edu.br

⁴ Engenheiro Civil, ConcreSuper Concretos, vendas.toledo@concreSuper.com.br

Resumo: Apontada como uma das principais causas relacionadas à degradação de estruturas de concreto, a corrosão das armaduras tem motivado diversas pesquisas. Entretanto, um contingente escasso de trabalhos remete às estruturas reais, principalmente no que tange o estado de degradação de obras de infraestrutura viária como, por exemplo, passarelas de pedestres sobre rodovias. Neste sentido, o presente trabalho apresenta uma análise da frente de carbonatação em uma passarela de pedestres que permaneceu em serviço por mais de vinte anos, localizada na BR 116, Rodovia Presidente Dutra, no trecho que atravessa a cidade de São José dos Campos, SP. Os resultados obtidos demonstraram que a adoção de camadas de pintura e a dispersão do CO₂ na atmosfera, ocasionada pelo movimento dos veículos, minimizou a penetração de dióxido de carbono através da rede de poros do concreto, contribuindo assim, para a durabilidade e vida útil da obra em questão.

Palavras-chave: carbonatação, corrosão de armaduras, passarelas, infraestrutura

Abstract: The corrosion of the reinforcement is studied because it is one of the main causes related to the degradation of concrete structures. However, a smaller number of papers refers to real structures, mainly related to the state of degradation of road infrastructure structures, such as pedestrian walkways on highways. In this sense, the present work presents an analysis of the carbonation depth in a pedestrian walkway that has remained in service for more than twenty years. The structure is located on BR 116, Presidente Dutra Highway, in the stretch that crosses the city of São José dos Campos, SP. The results showed that the adoption of layers of paint and the dispersion of CO₂ in the atmosphere caused by the movement of the vehicles minimized the penetration of carbon dioxide through the concrete pore network, thus contributing to the durability and service life of the concrete.

Keywords: carbonation, reinforcement corrosion, concrete walkways, infrastructure.

1. Introdução

A degradação de obras de infraestrutura executadas em concreto armado envolve aportes financeiros significativos para sua reabilitação. Neste ponto, a corrosão das armaduras é apontada como uma das principais causas relacionadas à degradação destas estruturas, incorrendo em sérios riscos à segurança estrutural, visto que, a corrosão promove não apenas uma redução da área de aço da seção transversal das armaduras, mas também leva a uma perda da aderência no sistema aço-concreto, prejudicando a transmissão de esforços entre estes materiais, podendo as estruturas, em estágio avançado de corrosão, apresentar colapsos estruturais repentinos [1-7].

Com relação ao processo corrosivo, em primeira instância, deve ser enfatizado que o concreto fornece um ambiente alcalino e protetor às armaduras, através da formação de um filme passivante que reveste as mesmas dentro do concreto. Todavia, o ingresso de agentes agressivos através da rede de poros do concreto como, por exemplo, o dióxido de carbono (CO_2) presente na atmosfera de centros urbanos, destrói este filme, dando início ao processo corrosivo. À medida que o processo avança, os produtos de corrosão formados acabam gerando tensões internas ao concreto que culminam com a fissuração e lascamento da camada de cobrimento, o que potencializa a entrada de agentes agressivos e acelera o processo corrosivo das armaduras [2, 5-10].

Apostolopoulos, Demis e Papadakis [2], Balestra et al. [6] e Zhu e François [9] demonstraram que mesmo pequenos graus de corrosão (variação de massa das armaduras devido ao processo corrosivo) podem levar a significativas reduções de suas propriedades mecânicas, principalmente no que tange sua ductilidade.

Assim, uma das linhas de pesquisa acerca do estudo da corrosão de armaduras em decorrência da ação do CO_2 , visando a durabilidade e vida útil de estruturas de concreto, está relacionada à aplicação de ensaios não destrutivos (END) em estruturas de concreto reais. Neste ponto, ensaios de carbonatação se destacam por permitir uma análise não apenas quantitativa, mas também qualitativa de uma estrutura de concreto sujeita a processos de degradação, a partir de uma metodologia simples, de rápida operação e com resultados expeditos e confiáveis para análises de durabilidade [11-14].

A carbonatação trata da verificação da alcalinidade do meio onde as armaduras estão presentes no concreto. Neste caso, o dióxido de carbono, presente principalmente em centros urbanos, atua como principal agente responsável por reduzir o pH alcalino do meio onde as armaduras estão presentes. Tal fato acaba destruindo o filme passivante que reveste as mesmas, desencadeando o processo de corrosão das armaduras. Sob esta vertente, diversas são as pesquisas presentes na literatura que correlacionam ensaios de carbonatação à durabilidade e vida útil de estruturas de concreto armado. Neste ponto, podem-se citar pesquisas relacionadas aos materiais, desde a dosagem até o uso de materiais cimentícios suplementares [15-19]; pesquisas relacionadas às condições de meio ambiente [20-21]; pesquisas relacionadas às propriedades mecânicas [20-22], ou ainda, relativas à modelagens numéricas [23].

Embora diversas linhas de pesquisa sejam conduzidas para analisar a relação de ensaios de carbonatação para com a durabilidade e vida útil de estruturas de concreto, muitas destas são baseadas em ensaios acelerados de laboratório, cujas condições diferem da dinâmica do processo corrosivo em situações reais. Além disso, a análise de obras de infraestrutura reais em serviço em um contexto urbano de agressividade é de suma importância para prover informações qualitativas acerca do real risco de degradação a que uma estrutura de concreto está sujeita. Neste caso, podem-se citar como obras de infraestrutura os viadutos, pontes, passarelas de pedestres, entre outros.

Tratando em específico de passarelas de pedestres sobre rodovias, estas obras de infraestrutura estão inseridas em um ambiente com elevada concentração de CO_2 na atmosfera em decorrência dos gases oriundos da combustão interna de motores de veículos leves e pesados, caracterizando, assim, um ambiente de elevada agressividade a estas estruturas. Todavia, embora haja grande concentração de CO_2 na atmosfera, poucos são os estudos encontrados na literatura acerca do tema devido, entre vários motivos, as dificuldades de interrupção de tráfego em rodovias para a realização de inspeções nestas estruturas visando coletar informações para modelos de durabilidade.

Em termos de obras de infraestrutura, destacam-se as pesquisas [24] e [25]. O primeiro trabalho apresenta frentes de carbonatação em estruturas costeiras, onde os autores observaram frentes de carbonatação entre 3 e 15 mm para uma idade de 20 anos. No segundo estudo, os autores avaliaram a carbonatação em 6 edificações em seis diferentes cidades no mundo construídas por volta do ano 2000. Neste caso, modelos foram aplicados com o objetivo de verificar a frente de carbonatação nas estruturas com o passar do tempo, onde os autores observaram frentes de carbonatação entre 3 e 13 mm para as edificações analisadas.

Assim, mediante este contexto, o presente trabalho apresenta uma análise acerca da frente de carbonatação em elementos estruturais de uma passarela construída na rodovia BR 116, formada por vigas e pilares de concreto pré-fabricados, que permaneceu em serviço por mais de vinte anos, visando contribuir com informações acerca da durabilidade e vida útil de obras de infraestrutura rodoviária sob uma perspectiva da corrosão das armaduras por meio da ação do CO_2 .

2. Procedimento experimental do estudo de caso

2.1 Histórico da obra estudada

O histórico da atual rodovia BR 116, denominada Rodovia Presidente Dutra, remete às décadas de 40 e 50 quando foi construída. Sendo inaugurada no dia 19 de janeiro de 1951, pelo então Presidente do Brasil General Eurico Gaspar Dutra, e inicialmente chamada de BR-2, a construção desta Rodovia, de 405 km de extensão, tinha por objetivo interligar a capital federal da época, a cidade do Rio de Janeiro, ao principal pólo industrial do país, a cidade de São Paulo, reduzindo o tempo de viagem de 12 para 6 horas, graças às obras de engenharia na transposição de obstáculos naturais, como vales e formações rochosas [26]. Segundo a atual concessionária desta rodovia [27], mais de 130 milhões de veículos equivalentes trafegam pela rodovia anualmente, caracterizando-se como uma das mais movimentadas do Brasil.

Não apenas o número de veículos que trafegam pela rodovia é expressivo, mas também a rodovia passa por cidades, além das capitais São Paulo e Rio de Janeiro, com indústrias de grande porte, como por exemplo, Guarulhos (SP), São José dos Campos (SP), Taubaté (SP), Resende (RJ), Volta Redonda (RJ) e Duque de Caxias (RJ), sendo uma importante rota de veículos comerciais. Tais fatos remetem a uma significativa concentração de CO₂ na atmosfera ao longo da rodovia, que acaba impactando na durabilidade e vida útil das obras de infraestrutura presentes ao longo da mesma, como por exemplo, as passarelas de pedestres construídas em concreto armado ou protendido.

Neste sentido, no ano de 2014, uma passarela de pedestres localizada no km 154 desta rodovia, composta por uma viga central e pilares em concreto pré-fabricado com resistência à compressão igual a 38 MPa, foi desconstruída e substituída por uma passarela formada por viga de aço e novos pilares. Estes elementos estruturais retirados foram alocados no canteiro lateral às margens da rodovia, sendo utilizados por estes autores para a realização de ensaios de carbonatação no mesmo ano de sua desconstrução.

2.2 Ensaio de carbonatação

Para a realização do ensaio de carbonatação, furos foram executados na superfície do concreto (Figura 1a), sendo posteriormente limpos com uso de pinceis ou jatos de ar, removendo o material em pó oriundo das perfurações no concreto. Os ensaios de carbonatação foram realizados utilizando uma solução de fenolftaleína, conforme prescreve a recomendação da RILEM CPC-18 (1988) [28]. Imediatamente após a limpeza, uma solução de álcool etílico 70% com 1% de fenolftaleína foi pulverizada na perfuração executada, sendo observada a coloração resultante. A coloração rosa carmim indica que o concreto apresenta-se com pH superior a 9, e portanto, protetor às armaduras frente à corrosão. Caso não se verifique uma coloração (incolor), haverá indicação de pH inferior a 9, indicando a carbonatação do concreto. Em seguida é realizada a medição da profundidade carbonatada do concreto com utilização de um paquímetro (Figura 1b), sendo a frente de carbonatação registrada para determinado ponto.

No caso da viga de concreto da antiga passarela de concreto, foram realizados três pontos para a realização do ensaio de carbonatação (pontos 1, 2 e 3) e em um dos pilares desconstruídos, mais dois pontos (pontos 4 e 5).

Figura 1: Execução do ensaio de carbonatação em segmentos de passarela desconstruídos: (a) realização dos furos; (b) medição com paquímetro.

3. Resultados e Discussões

Nos 5 furos executados, foi observada a coloração rosa carmim nas regiões mais profundas, indicando ausência de carbonatação, e também regiões incolores, como apresentado na Figura 2, correspondente ao ponto 1, indicando a carbonatação da camada superficial do concreto.

Figura 2: Ponto 1 após a realização do ensaio de carbonatação.

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos a partir do ensaio de carbonatação executado nos pontos 1 a 5, onde é possível observar que a frente de carbonatação máxima encontrada foi de 22 mm, correspondendo a uma medida inferior a espessura da camada de cobrimento das armaduras (30 mm), demonstrando que as armaduras permaneceram protegidas em um ambiente alcalino frente à corrosão, dentro do período analisado. observa-se ainda a existência de uma camada de pintura em tinta acrílica na cor cinza revestindo a superfície da estrutura de concreto (Figura 2).

Tabela 1: Medidas de frente de carbonatação.

Elemento	Ponto	Frente de carbonatação (mm)
Pilar	1	12
Pilar	2	22
Viga	3	22
Viga	4	16
Viga	5	19

A existência da camada de pintura ajudou na proteção da estrutura, devido ao preenchimento dos poros superficiais, dificultando assim, a penetração do CO₂ presente na atmosfera através da rede de poros do concreto. Tal afirmativa corrobora com o estudo de Lo et al. [29], que ressalta a importância das camadas de pintura na proteção contra efeitos do CO₂ no concreto. Ademais, o movimento de veículos que trafegam na rodovia acaba gerando deslocamentos de ar que dispersam o CO₂ presente na atmosfera.

Em contrapartida, observa-se, comparando a frente de carbonatação máxima obtida na passarela analisada (22mm), com as frentes de carbonatação obtidas para estruturas de mesma idade nas referências [24] e [25], que o ambiente rodoviário é de fato severo às estruturas de concreto, uma vez que a profundidade atingida pelo dióxido de carbono neste estudo foi superior as frentes observadas nas referências [24] e [25].

Nota-se portanto que a atuação conjunta da adoção de camadas de pintura e os deslocamentos das massas de ar pelos veículos em movimento acabam por proteger a obra de infraestrutura citada durante os mais de vinte anos de sua vida útil, mesmo estando inserida em um ambiente com grande concentração de CO₂ na atmosfera. Isso revela a importância dos estudos de casos em estruturas reais, uma vez que os processos de degradação no ambiente natural são mais complexos e diversas variáveis ambientais podem interferir nos mecanismos de entrada de agentes agressivos, inclusive aspectos relacionados ao microclima, como incidência de insolação, proteção contra a precipitação, dentre outros.

4. Conclusões

Com base nos resultados obtidos nos ensaios de carbonatação realizados na passarela de pedestres, pode-se concluir que:

- Após vinte anos de utilização, as armaduras presentes na estrutura de concreto armado apresentam-se protegidas da corrosão promovida pelo ambiente em meio urbano, visto que a frente de carbonatação máxima constatada foi inferior à espessura da camada de cobrimento das armaduras nos pontos analisados.
- A camada de pintura dificultou, mas não foi suficiente para impedir por completo a penetração de CO₂ nos poros do concreto.

5. Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a CCR Nova Dutra, a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), ao CNPQ e a Fundação Araucária pelo suporte às pesquisas.

6. Referências

- [1] Medeiros-Junior, R.A., Lima, M.G., Medeiros, M.H.F., 2014. Service life of concrete structures considering the effects of temperature and relative humidity on chloride transport. *Environment, Development and Sustainability*. 17, 1103-1119, DOI: 10.1007/s10668-014-9592-z.
- [2] Apostolopoulos, C.A., Demis, S., Papadakis, V.G., 2013. Chloride-induced corrosion of steel reinforcement: mechanical performance and pit depth analysis. *Construction and Building Materials*. 38, 139-146, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.087.
- [3] Han, S.J. et al., 2014. Degradation of flexural strength in reinforced concrete members caused by steel corrosion. *Construction and Building Materials*. 54, 572-583, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.12.101.
- [4] Andrade, C., d'Andreia, R., 2010. Electrical Resistivity as Microstructural parameter for the modelling of service life of reinforced concrete structures. *2nd International Symposium on Service Life Design for Infrastructure*, Delft, The Netherlands.
- [5] Rehman, S., Al-Hadhrami, L.M., 2013. Web-based national corrosion cost inventory system for Saudi Arabia. *Anti Corrosion Methods and Materials*. 61, 77-92, DOI: 10.1108/ACMM-04-2013-1254.
- [6] Balestra, C.E.T., Lima, M.G., Medeiros-Junior, R.A., 2016. Corrosion degree effect on nominal and effective strengths of reinforcement naturally corroded. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 28, 04016103. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001599.
- [7] Mazer, W., Lima, M.G., Medeiros-Junior, R.A., 2017. Fuzzy logic for estimating chloride diffusion in concrete. *Proceedings of the ICE - Structures and Buildings* in press, available online (October 27, 2017) DOI: 10.1680/jstbu.16.00153.
- [8] Khan, I., François, R., Castel, A., 2014. Prediction of reinforcement corrosion using corrosion induced cracks width in corroded reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*. 56, 84-96. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.11.006.
- [9] Zhu, W., François, R., 2014. Experimental investigation of the relationship between residual cross-section shapes and the ductility of corroded bars. *Construction and Building Materials*. 69, 335-345. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.059.
- [10] François, R., Khan, I., Dang, V.H., 2013. Impact of corrosion on mechanical properties of steel embedded in 27-year-old corroded reinforced concrete beams. *Materials and Structures*. 46, 889-910. DOI: 10.1617/s11527-012-9941-z.

- [11] Yu, B., Liu, J., Chen, Z., 2017. Probabilistic evaluation method for corrosion risk of steel reinforcement based on concrete resistivity. *Construction and Building Materials*. 138, 101-113. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.100.
- [12] Nguyen, A.Q., Klyz, G., Derby, F., Balayssac, J-P., 2017. Evaluation of water content gradient using a new configuration of linear array four-point probe for electrical resistivity measurement. *Cement and Concrete Composites*. 83, 308-322. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.07.020.
- [13] Tang, S.W., Yao, Y., Andrade, C., Li, Z.J., 2015. Recent durability studies on concrete structure. *Cement and Concrete Research*. 78, 143-154. DOI: 10.1016/j.cemconres.2015.05.021.
- [14] Chen, C.T., Chang, J.J., Yeh, W., 2014. The effects of specimen parameters on the resistivity of concrete. *Construction and Building Materials*. 71, 35-43. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.08.009.
- [15] Bucher, R., Diederich, P., Escadeillas, G. Cyr, M., 2017. Service life of metakaolin-based concrete exposed to carbonation – Comparison with blended cement containing fly ash, blast furnace slag and limestone filler. *Cement and Concrete Research*. 99, 18-29. DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.04.013.
- [16] Shi, C., He, T., Zhang, G., Wang, X., Hu, Y., 2016. Effects of superplasticizers on carbonation resistance of concrete. *Construction and Building Materials*. 108, 48-55. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.037.
- [17] Silva, R.A., Neves, R., de Brito, J., Dhir, R.K., 2015 Carbonation behavior of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*. 62, 22-32. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2015.04.017.
- [18] Li, Z., Li, S. 2018. Carbonation resistance of fly ash and blast furnace slag based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*. 163, 668-680. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.127.
- [19] Leemann, A., Nygaard, P., Kaufmann, J., Loser, R., 2015. Relation between carbonation resistance, mix design and exposure of mortar and concrete. *Cement and Concrete Composites*. 62, 33-43. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2015.04.020.
- [20] Li, D. et al., 2018. Evaluating the effect of external and internal factors on carbonation of existing concrete building structures. *Construction and Building Materials*. 167, 73-81. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.127.
- [21] Andrade, J.J.O, Possan, E., Squiavon, J.S., Ortolan, T.L.P., 2018. Evaluation of mechanical properties and carbonation of mortars produced with construction and demolition waste. *Construction and Building Materials*. 161, 70-83. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.089.
- [22] Silva, S.R., Andrade, J.J.O., 2017. Investigation of Mechanical Properties and Carbonation of concretes with construction and demolition waste and fly ash. *Construction and Building Materials*. 153, 704-715. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.143.

- [23] Paul, S.C., Panda, B., Huang, Y., Garg, A., Peng, X., 2018. An empirical model design for evaluation and estimation of carbonation depth in concrete. *Measurement*. 124, 205-210. DOI: 10.1016/j.measurement.2018.04.033.
- [24] Han, S.H., Park, W.S., Yang, E.I., 2013. Evaluation of concrete durability due to carbonation in harbor concrete structures. *Construction and Building Materials*. 48, 1045-1049. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.07.057.
- [25] Talukdar, S., Banthia, N., 2013. Carbonation in concrete infrastructure in the context of global climate change: Development of a service lifespan model. *Construction and Building Materials*. 40, 775-782. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.026.
- [26] CCR NOVA DUTRA. 2016. Financial demonstrative referent to 2015. Available in:
http://www.novadutra.com.br/resources/files/misc/ad04a657a48647b3ac995c18316ecd53_af-ndu-revista-03.pdf. Accessed in May 04 2018. (In Portuguese)
- [27] CCR NOVA DUTRA. 2016. Life on the Road. Available in:
http://www.novadutra.com.br/resources/files/misc/9d0982112b384c6880cbddff07a15580_ipe-2015-novadutra.pdf. Accessed in May 04 2018. (In Portuguese)
- [28] RILEM RECOMMENDATION CPC-18, 1988. Measurement of hardened concrete carbonation depth. *Materials and Structures*. 21, 453-455. ISSN: 1359-5997.
- [29] Lo, T.Y., Liao, W., Wong, C.K., Tang, W., 2016. Evaluation of carbonation resistance of paint coated concrete for buildings. *Construction and Building Materials*. 107, 299-306. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.026.