



Carbonatação em Estruturas de Concreto Armado

Fernanda Torres Gonçalves Cassavara¹; 0000-0002-7558-4958
José Marcos Rodrigues Filho¹; 0123-0123-0123-0123
Rafaela Dos Santos Costa¹; 0000-1111-2222-3333

1 – UniFOA, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, RJ.
fernandatorresgc@outlook.com

Resumo: Carbonatação é uma patologia recorrente que acomete estruturas de concreto armado, tendo por consequência a corrosão do aço. Este fenômeno foi observado em um pilar da obra de arte especial (passarela) que transpõe a rodovia Lúcio Meira, o parque ferroviário da CSN e a avenida da Integração, no bairro Aterrado em Volta Redonda – RJ. A hipótese foi formulada através do método de Anamnese, Sintomatologia e Etiologia. Tais métodos consistem em uma inspeção minuciosa para coleta de dados sobre o local inspecionado, as manifestações patológicas e a análise de causa e efeito da patologia na estrutura. Após a formulação da hipótese de carbonatação, foi feita sua constatação por meio do teste de fenolftaleína 1% alcoólica. A partir disso, conclui-se que há a necessidade de recalcalinização do concreto. Em síntese, este artigo tem por objetivo apresentar o processo de carbonatação e relatar o caso encontrado nessa passarela.

Palavras-chave: Carbonatação. Corrosão. Concreto Armado. Obras de Artes Especiais (OAE). Pilar.

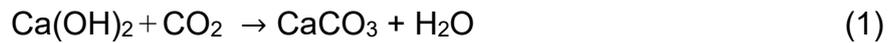
INTRODUÇÃO

Para a realização de uma inspeção em qualquer tipo de estrutura é necessário entender os fundamentos da Engenharia Diagnóstica. Para isto, este artigo baseou-se nos métodos indicados no livro Manual de Engenharia Diagnóstica: desempenho, manifestações patológicas e perícias na construção civil (GOMIDE *et al.*, 2021), utilizando-se, portanto, da Anamnese, Sintomatologia e Etiologia, e gerou o Diagnóstico e Prognóstico da estrutura, indicando, também, a Prescrição adequada. Para que isso fosse possível, também foi necessário o embasamento teórico sobre o que é, qual a causa e os efeitos da carbonatação na estrutura.

Carbonatação é a patologia caracterizada pela diminuição da alcalinidade do concreto a partir da penetração de dióxido de carbono (CO_2), presente na atmosfera, nos poros do concreto, reduzindo seu pH para valores inferiores a 9. O pH característico do concreto está entre 12 e 14, e é fornecido pela reação de hidratação dos silicatos de cálcio, formando hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Este, ao preencher os poros do concreto, fornece sua alcalinidade, geralmente com pH na ordem de 12,6

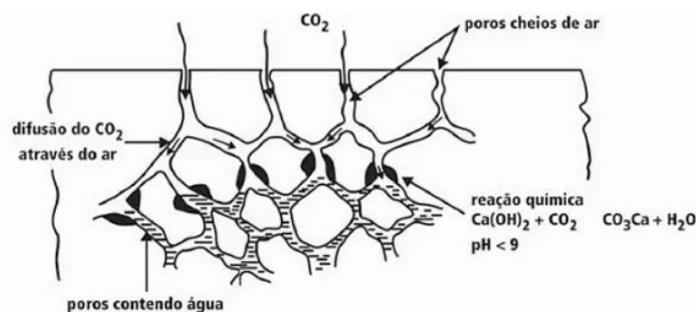


(JÂCOME; MARTINS, 2005). A partir da penetração do dióxido de carbono, há a reação com o hidróxido de cálcio, formando carbonato de cálcio (equação 1), que desestabiliza a camada passivadora do aço formada pelo filme óxido.



Segundo Souza e Ripper (1998), quanto maior o teor de CO_2 absorvido, mais profunda será a região carbonatada e menor será o pH do elemento de concreto. Portanto, a porosidade e permeabilidade do concreto, são fatores de extrema influência para que ocorra a carbonatação e que estão diretamente ligados ao seu fator água/cimento. Quanto mais poroso e permeável o concreto, mais fácil o dióxido de carbono penetrará, tornando mais profunda a região acometida pela carbonatação. A penetração do CO_2 no concreto ocorre por meio de difusão, ou seja, migração molecular, nos poros (figura 1). Logo, quanto maior for sua saturação, menor a probabilidade de o elemento ser acometido por carbonatação (SOUZA; RIPPER, 1998).

Figura 1: Difusão do Dióxido de Carbono



(FUSCO, 2008)

Quando há a redução do pH para valores inferiores a 9, o concreto perde a capacidade de fornecer sua proteção química ao aço que compõe sua armadura, iniciando o processo de corrosão a partir da perda de seu filme óxido. A partir dessa perda, é formado o óxido de ferro hidratado ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), mais conhecido como corrosão ou ferrugem. Este fenômeno é caracterizado por ocasionar uma degradação generalizada na armação e na superfície do concreto, como deslocamento da superfície de concreto e corrosão em uma grande região do aço.

Assim como outros agentes despассивadores do aço, a exemplo, íons cloretos, o dióxido de carbono, ao penetrar os poros do concreto gera um ciclo de degradação (figura 2), provocando fissurações na superfície do concreto, devido a expansão do



aço, e ao conseqüente aumento de seção ocasionado pelo óxido de ferro hidratado. As aberturas favorecem a entrada de mais CO₂, acelerando ainda mais o processo corrosivo, de modo que o aço passe a perder seção após sua expansibilidade.

Figura 2: Ciclo de Degradação do Concreto Armado por Carbonatação



Fonte: Autores, 2023

Portanto, para controlar a entrada de agentes deletérios, a norma de projeto de estruturas de concreto armado, NBR 6118 (2014), sugere o controle da fissuração, o uso de concreto de baixa porosidade e o uso do cobrimento adequado. A espessura da camada de concreto e o limite máximo de abertura de fissuras (W_k) varia de acordo com a classe de agressividade ambiental (CAA) a qual a peça estará inserida, como pode ser observado no quadro 1.

Quadro 1: Relação entre Classe de Agressividade Ambiental (CAA), Limite Máximo de Abertura de Fissuras (W_k) e Cobrimento Nominal do Concreto

CAA	INTENSIDADE	AMBIENTE	W_k (mm)	COBRIMENTO NOMINAL (mm)		
				Laje	Viga/Pilar*	Elementos estruturais em contato com o solo
I	Fraca	Rural	$W_k \leq 0,4$	20	25	30
		Submersa				
II	Moderada	Urbana	$W_k \leq 0,3$	25	30	
III	Forte	Marinha		35	40	
		Industrial				
IV	Muito Forte	Industrial	$W_k \leq 0,2$	45	50	40
		Respingo de Maré				

* Para pilares em contato como solo, junto a fundações, o cobrimento nominal mínimo é de 45mm.

Fonte: NBR 6118, 2014

Para recuperação de estruturas atacadas por dióxido de carbono, é necessário submeter a peça ao processo de realcalinização, isto é, elevar seu pH a valores entre 12 e 14. De acordo com Araújo (2009), existe dois métodos de realcalinização, o



químico (RAQ) e o eletroquímico (RAE), sendo o primeiro mais eficaz, tendo mais durabilidade quando exposto a dióxido de carbono, para a autora. Segundo a mesma, este processo pode ser feito por três meios, podendo ser por meio de Solução Alcalina – RAQ, que é realizado por meio de difusão e absorção da solução através de forças hidráulicas e por meio da capilaridade; por meio de Íons Hidroxilas (OH^-) – RAE, que é feito através da ação catódica na superfície do aço; ou por meio de Fluxo Eletro-osmótico – RAE, que consiste no transporte da solução alcalina nos poros do concreto. Por se tratar de Realcalinização Eletroquímica, os processos por meio de OH^- e o por meio de Fluxo Eletro-osmótico utilizam-se corrente elétrica com consequente formação de campo elétrico.

MÉTODOS

Para emblematizar a presente abordagem, foi feita uma inspeção na passarela que transpõe a rodovia Lúcio Meira, o Parque Ferroviário da CSN e a avenida da Integração, no bairro Aterrado, em Volta Redonda – RJ, em que foi detectado um pilar com armadura exposta (figura 3) e em estado de corrosão. A fim de diagnosticar a causa do deslocamento da camada de concreto e corrosão do aço, foi realizado uma inspeção por meio dos métodos da Engenharia Diagnóstica que, segundo Gomide *et al.* (2021), são: anamnese (coleta minuciosa de dados), sintomatologia (análise das manifestações patológicas) e etiologia (análise de causa e efeito da patologia na estrutura). Posteriormente a formulação da hipótese de carbonatação, foi feito o teste com fenolftaleína em solução 1% alcoólica, que tem por determinação o pH 8,0 com aparência de líquido incolor, e o pH 10,0 com aparência em cor rosa.

Figura 3: Pilar com armadura exposta



Fonte: Autores, 2023



A partir dos dados obtidos, foi feito o diagnóstico (constatação da patologia), o prognóstico (evolução da patologia caso não haja uma intervenção adequada), terapêutica (estudo dos possíveis reparos) e a prescrição (indicação do tratamento adequado) da estrutura.

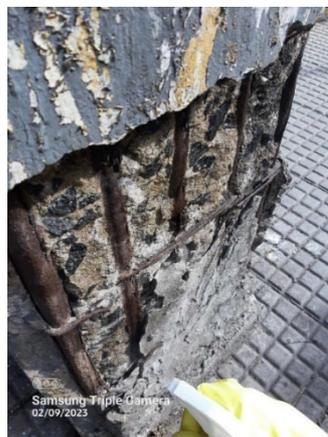
RESULTADOS E DISCUSSÃO

O pilar analisado está localizado em região com classe de agressividade ambiental II (urbano). Ou seja, local em que há grande quantidade de emissão de dióxido de carbono na atmosfera, proveniente, no caso de Volta Redonda, tanto da indústria siderúrgica localizada na cidade, quanto do grande fluxo de veículos rodoviários e ferroviários.

Em primeira análise, percebe-se que em uma vasta região houve deslocamento da camada de cobertura do concreto, expondo a armadura a mais agentes deletérios. É possível observar também, na figura 3, que o aço está em processo de corrosão, já com a formação de óxido de ferro hidratado.

Devido à grande área afetada, a carbonatação foi a primeira hipótese levantada por possuir a característica de atacar a estrutura de forma generalizada. Portanto, após aplicação de fenolftaleína em solução 1% alcoólica, percebeu-se que o líquido permaneceu incolor (figura 4), indicando que o pilar está com pH 8,0, caracterizando que está acometido por carbonatação. (Diagnóstico)

Figura 4: Indicação de carbonatação por meio de teste com fenolftaleína em solução 1% alcoólica



Fonte: Autores, 2023



CONCLUSÕES

A carbonatação do concreto e a corrosão da armadura da peça armado leva a fragilização da estrutura devido a perda de resistência, colocando-a em risco de colapso caso o ciclo de degradação não seja interrompido (Prognóstico). Portanto, o ensaio de esclerometria é indicado para verificar a resistência do concreto após intenso ataque por dióxido de carbono e desp passivação do aço.

No caso de estruturas carbonatadas, além do tratamento que vislumbre a recuperação da resistência do aço perdida pela corrosão, é necessário fazer o tratamento para elevar novamente o pH do concreto (realcalinização), a fim de evitar nova corrosão da armadura por carbonatação ou por ataques de outros agentes deletérios. (Prescrição 1)

Outrossim, é essencial o tratamento de fissuras e trincas existentes no pilar analisado e em outros que fazem parte da mesoestrutura (figura 5), a fim de prevenir mais ataques por dióxido de carbono ou por outros agentes nocivos ao concreto armado (Prescrição 2). Segundo a norma de inspeção de pontes, viadutos e passarelas – NBR 9452, é necessário que haja investimento em inspeções rotineiras (periódicas), especiais (a cada cinco anos), extraordinárias (em casos de impactos de veículos ou eventos da natureza, como inundações ou vendavais), seguindo as diretrizes estabelecidas por ela. Também é necessário que haja manutenções preventivas e que se utilizem outras normas aplicáveis a inspeção de obras de arte especiais, análise de patologias em estruturas de concreto e análise de medidas profiláticas.

Figura 5: Pilar com Trinca



Fonte: Autores, 2023



AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Deus, em primeiro lugar, por sempre estar conosco, independente da situação, nos fortalecendo em todo processo. Agradecemos a nossas famílias por todo investimento que fizeram em cada uma de nós e em nossos estudos, e por todo amor, carinho e compreensão. Agradecemos também ao nosso orientador, José Marcos Rodrigues Filho, por todo auxílio durante a escrita desse artigo e durante os nossos cinco anos de graduação em Engenharia Civil.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de Estruturas de Concreto — Procedimento**. ABNT NBR 6118: Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Inspeção de Pontes, Viadutos e Passarelas de Concreto – Procedimento**. ABNT NBR 9452: Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2019.

ARAÚJO, Fernanda Wanderley Corrêa de. **ESTUDO DA REPASSIVAÇÃO DA ARMADURA EM CONCRETOS CARBONATADOS ATRAVÉS DA TÉCNICA DE REALCALINIZAÇÃO QUÍMICA**. 2009. 217 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-18122009-154958/publico/Tese_2009_Fernanda.pdf. Acesso em: 08 set. 2023.

FUSCO, Péricles Brasiliense. **Tecnologia do concreto estrutural: tópicos aplicados**. 1ª ed. São Paulo: PINI, 2008.

GOMIDE, Tito Lívio Ferreira *et al.* **MANUAL DE ENGENHARIA DIAGNÓSTICA: desempenho, manifestações patológicas e perícias na construção civil**. 2. ed. São Paulo: Leud, 2021.

JÂCOME, C.C.; MARTINS, J.G. **Reabilitação: Identificação e Tratamento de Patologias em Edifícios**. 1. ed. 2005.

SOUZA, Vicente Custódio Moreira de; RIPPER, Thomaz. **PATOLOGIA, RECUPERAÇÃO E REFORÇO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO**. São Paulo: Pini, 1998.