AVALIAÇÃO DE INGRESSO DE CO_2 EM VIGAS DE CONCRETO REFORÇADAS SEGUNDO À TÉCNICA EBR

DALFRÉ, Gláucia (1); SARTI JUNIOR, Luiz (2); OLIVEIRA, Matusalém (3); ARAÚJO, Ciro (4); MAZZÚ, Amanda (5); PARSEKIAN, Guilherme (6)

(1) Professora Doutora, PPGECiv/UFSCar, glaucia.dalfre@ufscar.br
(2) Mestrando, PPGECiv/UFSCar, luiz.sarti.junior@gmail.com
(3) Mestre, PPGECiv/UFSCar, matusa00@gmail.com
(4) Mestre em Engenharia Civil, Seção de Engenharia de Estruturas (IPT), ciroaraujo@ipt.br
(5) Mestranda, PPGECiv/UFSCar, amandadescobal@hotmail.com
(6) Professor Doutor, PPGECiv/UFSCar, parsekian@ufscar.br

Resumo: *É sabido que a aplicação de qualquer sistema de reforço não se destina a corrigir manifestações patológicas pré-existentes na estrutura. Para além disso, o ingresso de agentes agressivos em elementos de concreto armado convencionais ou reforçados podem levar a despassivação da armadura e instalação de processo corrosivo, com consequente fissuração e destacamento do substrato de concreto que contém o sistema de reforço. Alguns ensaios, tais como o de determinação da frente de carbonatação e cloretos, podem ser utilizados, juntamente com a análise visual, para a avaliação temporal do ingresso de contaminantes e estimativa da real condição do elemento. Neste sentido, quatro pilares curtos de concreto armado, com e sem reforço GFRP EBR, foram avaliados na idade de 6 meses frente ao ingresso de CO_2. Os resultados obtidos indicam frentes de carbonatação médias de 9,6mm e 4,4mm, respectivamente, para os pilares não reforçados e reforçados. Tais valores indicam uma redução do coeficiente de carbonatação de 54% nos elementos reforçados segundo a técnica GFRP EBR. Com relação à análise visual, não foram encontrados indícios de corrosão nas armaduras inspecionadas.*

Palavras-chave: *Controle de qualidade, Sistema de reforço, Ensaios, Previsão de vida útil.*

Área do Conhecimento: *Qualidade e desempenho de componentes, elementos e sistemas construtivos - aspectos de desempenho de elementos e sistemas, diretrizes para avaliação de desempenho, controle da qualidade de produtos e processos, certificação de conformidade.*

1 INTRODUÇÃO

A deterioração de uma estrutura pode ocorrer por diversos motivos como, por exemplo, falhas no projeto e/ou de execução, carência de manutenções periódicas, eventos acidentais (explosões, terremotos, cheias, dentre outros) e degradação dos materiais que constituem o elemento estrutural devido a agentes ambientais agressivos. Além disso, uma readequação da estrutura devido a atualizações nos códigos de dimensionamento (com disposições mais severas) e/ou novas solicitações antes não previstas (como o aumento do tráfego em uma ponte, por exemplo) podem ser necessárias. Por esses motivos, elementos estruturais eventualmente podem necessitar de intervenções de reparo (onde busca-se recuperar o desempenho da estrutura à sua condição inicial ou evitar futuras deteriorações) e/ou reforço (onde busca-se melhorar o desempenho da estrutura em termos de ductilidade ou capacidade resistente) (FIB *Bulletin 14*, 2001; CHASTRE, 2014).

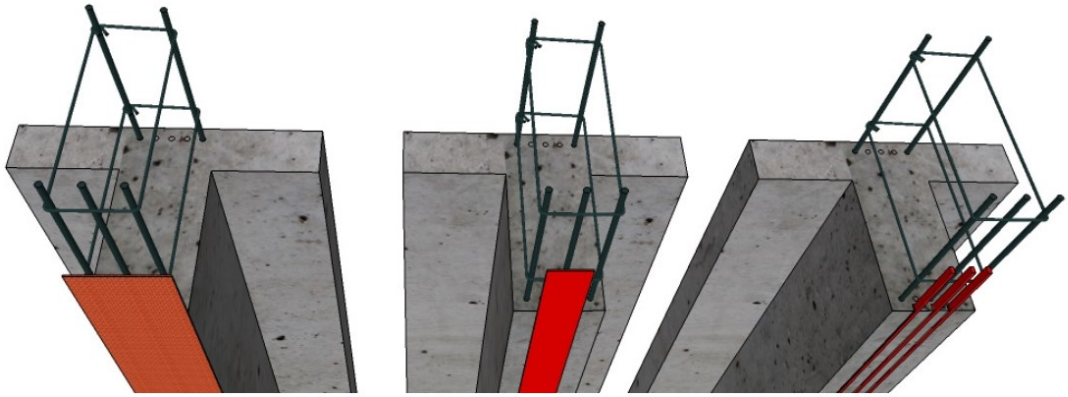
No âmbito do reforço existem várias técnicas para aumento de capacidade portante e desempenho dos elementos. Dentre o desenvolvimento de novos materiais, um maior destaque foi dado à utilização de Polímeros Reforçados com Fibras (PRF ou FRP, *Fiber Reinforced Polymer*, em língua inglesa) que podem substituir, com vantagens técnicas e econômicas, os materiais convencionais utilizados nas técnicas tradicionais de reforço estrutural (DALFRÉ, 2013).

A principal técnica de aplicação de materiais compósitos como reforço de elementos estruturais em concreto armado é a de colagem externa, conhecida na literatura internacional como *Externally Bonded Reinforcement* (EBR), em língua inglesa. As primeiras aplicações dessa técnica surgiram na década de 1980 e se popularizaram, com milhares de aplicações já realizadas até os dias atuais (ACI 440.2R, 2017). Essa técnica tem como princípio a colagem dos FRPs nas faces externas dos elementos que se deseja

reforçar: na face tracionada, no caso de reforço à flexão; nas faces laterais e inferiores, no caso de reforço ao cisalhamento; e no encamisamento da seção, no caso de pilares sobre tensões axiais de compressão (DALFRÉ, 2013). Embora a técnica EBR seja de fácil aplicação, nos elementos reforçados utilizando-se esta técnica o material de reforço encontra-se diretamente expostos aos agentes de degradação do ambiente em que está alocado e a possíveis eventos acidentais, tais como incêndios, explosões, impactos, dentre outros.

Uma técnica mais recente no reforço de elementos estruturais com FRPs é a *Near Surface Mounted* (NSM), em língua inglesa, que tem como princípio a inserção de laminados de FRP em entalhes realizados no concreto de cobrimento da face tracionada no caso de reforço à flexão. A técnica NSM tem como principais vantagens, em relação a técnica EBR, a proteção do FRP do meio externo (por esse estar inserido dentro do concreto) e a maior área de contato entre o FRP e o concreto. Na Figura 1 são ilustradas vigas em concreto armado reforçadas à flexão com compósitos de FRP por diferentes técnicas.

Figura 1 – Técnicas de reforço à flexão de vigas com compósitos de FRP



Mantas, tecidos ou laminados (EBR) Laminados ou barras (NSM)

Fonte: Chastre (2014)

Segundo *fib Bulletin 14* (2001), o estado da estrutura antes do reforço deve ser tomado como referência para o dimensionamento do sistema de reforço. Além disso, como a aplicação do sistema FRP não se destina a corrigir manifestações patológicas pré-existentes na estrutura (como, por exemplo, corrosão do aço devido a carbonatação ou ingresso de cloretos), possíveis danos ou deterioração devem ser identificados, as causas das manifestações patológicas devem ser investigadas e, se necessário, o reparo adequado deve ser realizado antes da aplicação de um sistema de reforço. Desta forma, a estabilidade da estrutura de concreto e a plena funcionalidade do sistema de reforço são garantidas, mitigando, assim, sua degradação.

Alguns ensaios podem ser utilizados como ferramenta no controle de qualidade e manutenção de estruturas, como forma de acompanhamento do ingresso dos agentes agressivos, avaliação da real condição dos materiais que as compõem, e, se necessário, direcionamento das intervenções apropriadas para a reabilitação.

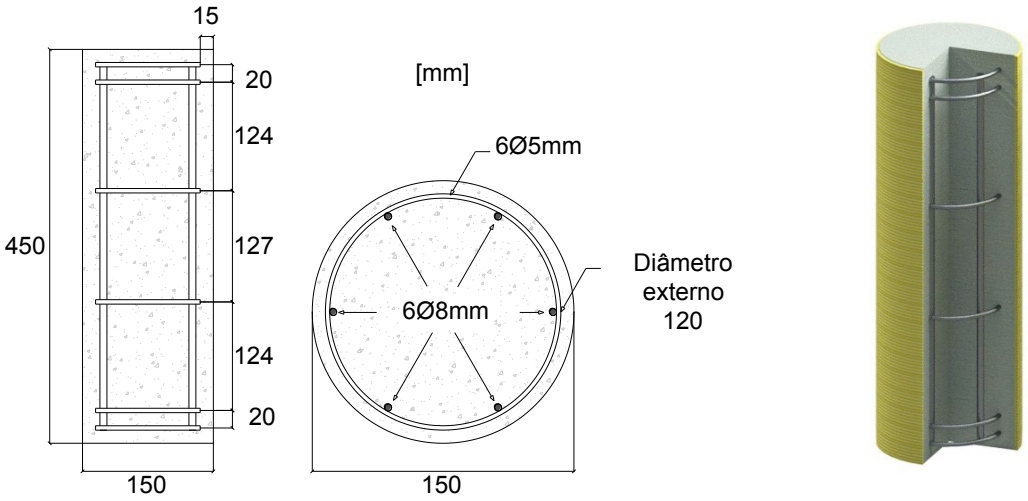
Neste sentido, um programa experimental de longa duração encontra-se em andamento e tem por objetivo a análise do comportamento de pilares de concreto armado reforçados com mantas de GFRP aplicadas segundo a técnica EBR. Neste âmbito, além dos ensaios de compressão axial para verificação temporal do comportamento dos elementos e da caracterização das propriedades mecânicas dos materiais utilizados (concreto, aço, resina e compósitos), ensaios de verificação de frente de carbonatação e análises visuais também têm sido realizados para verificar os efeitos da despassivação da armadura e instalação de processo corrosivos que levam a fissuração e destacamento do substrato de concreto que contém o sistema de reforço.

Neste trabalho são apresentados os resultados obtidos em ensaios de verificação de frente de carbonatação em pilares, com e sem reforço, mantidos em ambiente interno (protegido, com temperatura e umidade monitorados), realizados após 6 meses após a aplicação do sistema de reforço. Por fim, apresentam-se também os resultados de inspeção visual realizadas na armadura existente de tais elementos.

2 METODOLOGIA

Foram confeccionados quatro pilares curtos com seção transversal circular, diâmetro de 150mm e altura de 450mm, cujas armaduras longitudinais foram compostas por 6 barras de aço CA-50 com diâmetro de 8 mm. As armaduras transversais foram compostas por barras de aço CA-60 com diâmetro de 5 mm espaçadas a cada 127 mm, apresentado um cobrimento de 15 mm, o qual foi selecionado para simular um possível deslocamento da armadura no momento da concretagem. Detalhes dos pilares são apresentados na Figura 2.

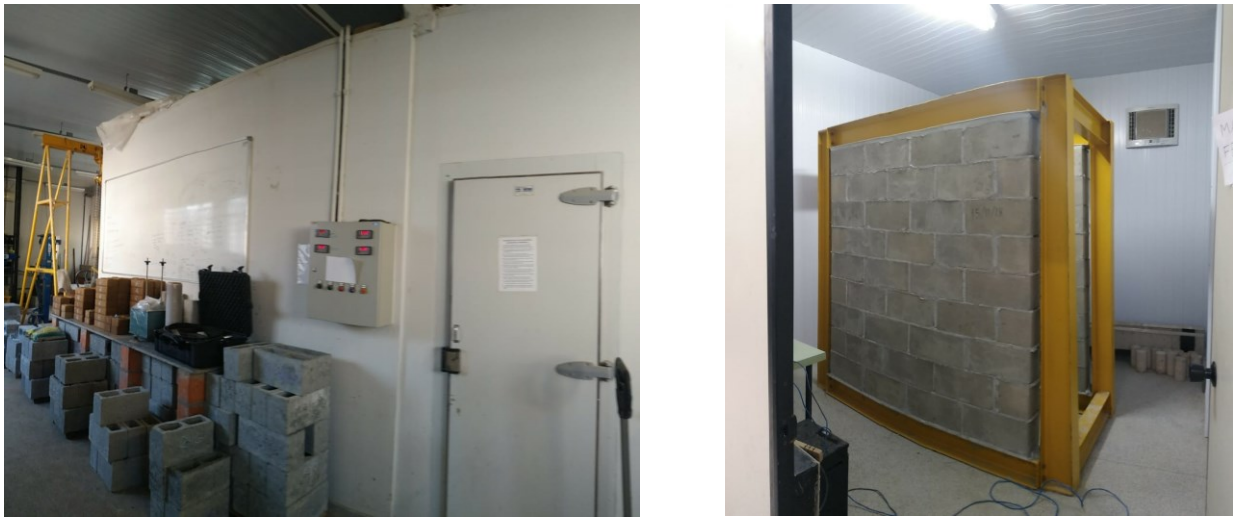
Figura 2 – Detalhes dos pilares curtos analisados



Fonte: Oliveira (2019)

Dois pilares curtos foram reforçados com uma camada de manta de GFRP, aplicadas segundo a técnica EBR, e mantidos em ambiente laboratorial (interno e protegido, com monitorização da temperatura ambiente) pelo período de 6 meses, tal como apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Ambiente laboratorial (câmara isolada e protegida)



(a) (b)

Após a realização de ensaios de compressão axial para verificação do comportamento dos pilares, ensaios de verificação de frente de carbonatação foram realizados para a idade de 6 meses após a aplicação do sistema de reforço. O ensaio com o uso de indicadores, embora apresente deficiências como a

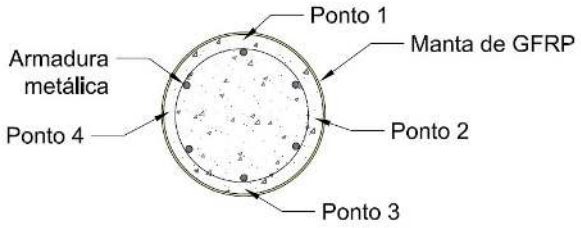
de subestimar a frente de carbonatação real e razoável dispersão das leituras, é o método mais utilizado. Entretanto, a petrografia, diferença de massa, difração de raios-x, análise térmica diferencial, a termogravimetria, a determinação de pH por meio de titulação da solução dos poros e espectrofotometria no infravermelho são ensaios que também podem ser realizados para determinação da profundidade de carbonatação. Entretanto, alguns destes ensaios podem apresentar custo elevado e difícil execução (ISAIA, 1999).

Neste sentido, devido a facilidade e baixo custo, utilizou-se um marcador colorimétrico, neste caso, fenolftaleína (solução composta por 1g de fenolftaleína, 50ml álcool 99,5% e 50ml água destilada), o qual foi cautelosamente aspergido no sentido perpendicular às superfícies recém fraturadas do concreto, sem que houvesse escorrimento da solução (DIN EN 14630, 2007). Com o uso da solução de fenolftaleína é possível detectar a região carbonatada do concreto, a qual não apresenta alteração de coloração, enquanto a região não carbonatada assume coloração entre rosa e vermelho-carmim, com pH entre 8,3 e 9,5, ou somente vermelho carmim, com pH superior a 9,5. A profundidade de ingresso de CO_2 foi avaliada nos pontos indicados na Figura 4, na zona de transição entre tonalidades distintas, com o uso de paquímetro digital e régua graduada.

Posteriormente, com o uso do modelo de previsão da frente de carbonatação desenvolvido por TUUTTI (1982), o coeficiente de carbonatação foi obtido por meio da Equação 1, onde e é a profundidade da frente de carbonatação experimentalmente obtida (mm), k_{CO_2} é o coeficiente de carbonatação (mm/ano½) e t é a idade do elemento analisado (anos). Por fim, a análise visual das armaduras longitudinais e verticais para verificação de existência de processos corrosivos também foi realizada.

$$e = k_{CO_2} \cdot \sqrt{t} \qquad \text{(Equação 1)}$$

Figura 4 - Pontos de aferição



Fonte: Os autores

3 RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos nos ensaios colorimétricos realizados com o uso de solução de fenolftaleína para obtenção da frente de carbonatação de pilares curtos, sem reforço e reforçados com uma camada de manta de GFRP, mantidos em ambiente protegido. Note-se que a aplicação do sistema de reforço se deu com a idade de 100 dias, enquanto os ensaios dos pilares foram realizados com idade de 306 dias (0,84 anos).

Pela análise dos resultados verifica-se, como esperado, que a velocidade de ingresso de CO_2 é reduzida com a presença de um sistema de reforço, neste caso, baseado na colagem de compósitos no substrato de concreto. Os pilares não reforçados e reforçados apresentaram uma frente de carbonatação média de 9,6mm e 4,4mm, respectivamente, demonstrando uma redução do coeficiente de carbonatação de 54% nos reforçados segundo a técnica GFRP EBR. Considerando-se os valores de k_{CO_2} calculados à data do ensaio e cobrimento de 15mm, estima-se que a despassivação da armadura mais externa (neste caso, dos estribos) para os elementos não reforçados ocorra com idade de 2 anos.

Tabela 1 - Resultados do ensaio de frente de carbonatação para os pilares

Sem reforço				Com reforço			
Identificação do elemento	e (mm)	**Média (mm)**	k_{CO_2} **(mm/ano$^{1/2}$)**	Identificação do elemento	e (mm)	**Média (mm)**	k_{CO_2} **(mm/ano$^{1/2}$)**
P1	13,2	9,6 (24,5)	10,5	P3	6,5	4,4 (29,6)	4,8
	9,3				3,9		
	8,6				3,0		
	5,6				2,5		
P2	9,1			P4	5,7		
	8,5				4,6		
	10,2				4,7		
	12,4				4,6		

(valor) Coeficiente de Variação (COV) = (Desvio-padrão/Média) × 100

Fonte: Os autores

Embora o ensaio de carbonatação com solução de fenolftaleína seja adequado para investigar a corrosão, recomenda-se que os seus resultados sejam analisados em conjunto com outros ensaios, tal como pelo exame visual da armadura. Assim, pela análise visual dos quatro pilares apresentados neste trabalho, não foram verificados pontos de corrosão nas armaduras longitudinais ou verticais existentes.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho tem por objetivo alertar sobre a necessidade de verificação temporal do ingresso de agentes contaminantes, neste caso, de CO_2, em elementos de concreto armado reforçados segundo a técnica EBR a fim de se garantir a estabilidade da estrutura de concreto e a plena funcionalidade do sistema de reforço. Para isso, ensaios de determinação da profundidade da frente de carbonatação juntamente com análise visual, foram utilizados para avaliar o ingresso dos agentes causadores dos problemas patológicos que poderão causar danos internos (corrosão da armadura metálica, por exemplo) ou até mesmo superficiais, devido a fissuração e consequentemente destacamento do substrato de concreto que contém o sistema de reforço. Apesar das diferenças que podem ser obtidas pelos diferentes tipos de ensaios para análise da carbonatação, o uso de indicadores químicos, tal como a fenolftaleína, mostra-se um método prático, de baixo custo, e adequado para a avaliação temporal de elementos de concreto armado, podendo-se também, ser expandido para estruturas reabilitadas ou reforçadas.

5 REFERÊNCIAS

ACI COMMITTEE 440.2R. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. American Concrete Institute, ACI Committee 440, 116p. 2017.

Chastre, C., Materiais e tecnologias de reforço de estruturas de betão - potencialidade e limitações, in REHABEND 2014 - Congresso Latinoamericano "Patología de la construcción, Tecnología de la rehabilitacíon y gestión del patrimonio". 2014: Santander. 10p.

DIN - DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG. DIN EN 14630: products and systems for the protection and repair of concrete, structures – Test methods – determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method, English version, DIN. Berlin, 2007. 10 p.

DALFRÉ, G. M. Flexural and shear strengthening of RC elements. 2013. 432 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.

FIB Bulletin 14. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures – Technical report, Lausanne, Switzerland, 2001.

ISAIA, G. C. Carbonatação do concreto: uma revisão. Santa Maria, 41p. 1999.

TUUTTI, K. Corrosion of steel in concrete. Sweden: CBI, 1982. 468 p.