Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções
CBPAT2016

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

INSPEÇÃO EM UMA ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO USANDO POTENCIAL DE CORROSÃO, PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO E RESISTIVIDADE ELÉTRICA: ESTUDO DE CASO

A. P. BRANDÃO CAPRARO
Engenheira Civil
Universidade Federal do Paraná
Paraná; Brasil
anapcapraro@gmail.com

D. DE CRISTO MIRANDA
Estudante de Engenharia Civil
Universidade Federal do Paraná
Paraná; Brasil
daymiranda05@gmail.com

M. DUTKA HORTEGA
Estudante de Engenharia Civil
Universidade Federal do Paraná
Paraná; Brasil
mar.dhortega@gmail.com

S.K. SILVA ZAU
Estudante de Engenharia Civil
Universidade Federal do Paraná
Paraná; Brasil
stephanie.zau@hotmail.com

M.H.F. DE MEDEIROS
Professor Doutor
Universidade Federal do Paraná
Paraná; Brasil
medeiros.ufpr@gmail.com

RESUMO

As estruturas de concreto armado, assim que expostas ao ambiente, estão sujeitas a diferentes mecanismos de deterioração. Neste contexto, a corrosão de armaduras de aço é um dos mecanismos mais presentes nessas estruturas e, por formar produtos com volume superior do que o material que os originou, ocasiona o surgimento de fissuras no concreto seguido pelo desplacamento. Um dos focos de um trabalho de inspeção é a identificação da origem desse problema, visto que esse fenômeno ocorre sob influência de vários fatores que agem simultaneamente. Isto posto, o presente trabalho tem por objetivo a identificação de zonas que apresentam risco de estarem em um processo ativo de corrosão em uma estrutura de concreto armado que estagnou na fase de execução, não apresentando qualquer revestimento, e encontra-se exposta ao meio ambiente há 6 anos. Para isso, foram aplicadas três técnicas de inspeção em 10 pilares de cada um dos 3 pavimentos da estrutura vistoriada, sendo elas: potencial de corrosão, resistividade elétrica do concreto e profundidade de carbonatação. Ao final do trabalho é apresentado um estudo comparativo entre as técnicas e foi elaborada uma estimativa de vida útil da estrutura de concreto armado com base no avanço do processo de carbonatação. Além disso, foi montado um diagnóstico com relação à corrosão de armaduras com base na inspeção visual e nos ensaios realizados em campo.
Palavras-chave: corrosão, carbonatação, resistividade elétrica, concreto armado, inspeção.

ABSTRACT

The concrete structures, once exposed to the environment, are subject to different deterioration mechanisms. In this context, the corrosion of steel reinforcement is one of the mechanisms present in these structures and causes the formation of cracks followed by the detachment of the concrete. In this context, this study aims to identify areas under risk of an active process of corrosion in a reinforced concrete structure whose construction was paralyzed which presents no coating and is exposed to the environment 6 years ago. For this purpose, three different inspection techniques were used on the structure, namely: corrosion potential, electrical resistivity of concrete and carbonation depth. At the end, this work presents a comparative study between the used techniques and a lifetime estimation of reinforced concrete structure based on the progress of the carbonation process. Additionally, a diagnosis of the corrosion of reinforcing steel were carried out taking into account the data obtained in the visual inspection performed in the field tests.
Keywords: corrosion, carbonation, electrical resistivity, reinforced concrete, inspection.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, as estruturas de concreto armado são construídas visando a vida útil de projeto de 50 anos, porém, uma edificação pode durar muito mais do que isso. Para que isto ocorra é necessário ter atenção especial aos materiais utilizados na edificação, às técnicas construtivas e à manutenção durante toda a vida útil de serviço da estrutura. Quando algum destes fatores é ineficiente, é comum o aparecimento de manifestações patológicas, expressão resultante de um mecanismo de degradação na edificação, que podem ser apenas estéticas ou ainda afetar a funcionalidade da estrutura [1].

Um destes mecanismos de degradação que merece grande atenção do profissional da engenharia civil é a corrosão, devido ao risco que pode proporcionar. Alguns agentes agressivos podem ser causadores da corrosão de armaduras, como o CO_2, responsável pelo processo de carbonatação, que reduz o pH por meio de reações químicas com os compostos alcalinos do cimento hidratado. Além disso, outra causa de corrosão pode ser o ataque por cloretos que, ao ingressar no concreto, também desencadeiam o processo corrosivo proporcionando a despassivação do aço. Outros compostos como os óxidos de enxofre e fuligem presentes na atmosfera do ambiente urbano também contribuem para a corrosão.

Existe uma dificuldade, entretanto, em identificar processos corrosivos. Quando é possível visualizar manchas de produto da corrosão, geralmente o processo já está avançado e já ocasionou fissuras ou desplacamento. Desta forma, é importante a realização de ensaios não destrutivos para verificar áreas possivelmente degradadas que não foram identificadas com a inspeção visual. Adicionalmente, é importante considerar a microrregião onde se encontra o componente estrutural e a própria natureza do componente – laje, viga ou pilares e paredes – os quais devem ser levados em conta. As lajes, por exemplo, localizadas em ambientes úmidos, podem sofrer muito mais o fenômeno de condensação do que elementos verticais [2].

O objeto deste estudo é analisar uma estrutura localizada no campus Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná, a qual não foi concluída e está abandonada há mais de seis anos. A paralisação na execução da obra resultou em grande exposição da estrutura a agentes agressivos,além de ter proporcionado agravantes tais como acúmulo de água por toda a estrutura. Estas condições configuram uma situação propícia para o desenvolvimento de mecanismos de deterioração dos elementos estruturais. Desta forma, há grande importância na identificação de áreas degradadas, estabelecendo regiões críticas que mereçam atenção especial. Assim, o objetivo principal do estudo foi localizar as zonas de maior risco de corrosão das armaduras, através dos ensaios de profundidade de carbonatação, potencial de corrosão e resistividade elétrica do concreto. Dessa forma, com resultados concretos, foi possivel obter um panorama mais detalhado das reais condições da estrutura em estudo. Além disso, buscou-se estabelecer uma comparação entre os três métodos utilizados para identificação dos elementos mais suscetíveis à corrosão das armaduras.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Corrosão

O concreto é um meio alcalino, com pH acima de 12 eessa característica provém do processo de hidratação dos silicatos de calcio (C_3S e C_2S) – presentes no cimento – liberando $Ca(OH)_2$. Isto faz com que seja formada uma camada passivadora no aço presente no concreto armado, que atua como proteção em relação à corrosão. Quando esta película passivadora é rompida, pela influência de agentes agressivos, inicia-se o processo corrosivo [2] [3].

A corrosão que atua sobre as obras civis convencionais é a eletroquímica. Esse processo trata-se de um ataque de natureza eletroquímica, que ocorre em meio aquoso, como resultado de uma pilha ou célula de corrosão, com eletrólito e diferença de potencial entre os trechos da superfície do aço [4]. Devido à presença de umidade na superficie do concreto, forma-se um eletrólito através do qual ocorre difusão iônica ao longo dos trechos da armadura das zonas anódicas (corroídas) para as zonas catódicas (não corroídas).

Para que a corrosão ocorra é necessário que haja, além da água ou umidade para a formação do eletrólito, a presença de oxigênio. Mesmo assim, a corrosão só ocorre se houver a ruptura da película passivadora do aço, formada em meio de elevada alcalinidade. Com a presença de outros agentes agressivos como sulfetos, cloretos, dióxido de carbono, óxidos de enxofre, fuligem, entre outos, o processo corrosivo pode ser iniciado porque estes íons agressivos podem resultar na ruptura da película de proteção.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

2.2 Carbonatação

As edificações no meio urbano são majoritariamente construídas de concreto armado, de modo que a carbonatação é um processo com importante contribuição para degradação das estruturas. Como o concreto apresenta pH alcalino (entre 12 e 13), resultado da hidratação dos silicatos de calcio (C_3S e C_2S) liberando $Ca(OH)_2$ devido ao processo de hidratação do cimento, a armadura presente dentro do concreto fica em estado passivado. Segundo HELENE [5], a passivação pode ser entendida como a resistência à corrosão, proporcionada por uma película fina de um filme de óxido estável e aderente, e formado na superfície do metal.

A alcalinidade do concreto é reduzida ao longo do tempo pela penetração, em seus poros, de agentes agressivos. O principal responsável por essa mudança é o dióxido de carbono (CO_2) que reage com os compostos alcalinos do cimento diminuindo o pH, conforme a Equação (1).

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \qquad \text{Equação (1)}$$

As reações químicas da carbonatação se iniciam na face externa da peça de concreto e, por difusão do CO_2, avançam para o interior da peça com o passar do tempo. A interface entre o concreto que já foi carbonatado e o não carbonatado é chamada de frente de carbonatação [3] [4] [5] [6].

O processo de carbonatação, apesar de diminuir o pH do concreto, tende a aumentar sua resistência superficial e sua impermeabilidade à penetração de agentes agressivos, de modo que não é diretamente prejudicial ao concreto em si [7]. O problema ocorre com a redução da alcalinidade da solução presente nos poros ao redor das armaduras [5]. Com a diminuição do pH as condições de estabilidade química da película passivadora do aço são afetadas e ocorre a despassivação, que pode levar à corrosão da armadura, se outros elementos como umidade, oxigênio e diferença de potencial estiverem presentes.

Portanto, a permeabilidade e a porosidade são fatores que influenciam diretamente na velocidade da carbonatação, uma vez que essa depende da difusão do CO_2 para o interior do concreto. Consequentemente, a relação água/cimento do concreto tem um papel preponderante nesse processo. Concomitantemente, a umidade relativa do ar também afeta a velocidade de corrosão sendo uma condição crítica quando em torno de 65% onde a carbonatação ocorre com mais intensidade [4].

2.3 Resistividade elétrica do concreto

A resistividade elétrica do concreto é uma propriedade volumétrica que indica a capacidade do concreto transportar cargas elétricas. Relaciona-se com a permeabilidade de fluidos e difusividade de íons através dos poros do concreto [8]. Em um concreto saturado, a resistividade elétrica é uma medida indireta da interconectividade entre os poros do concreto [9] [10].

Alguns fatores podem influenciar o resultado da resistividade elétrica, tais como: relação água/cimento, origem e dimensão dos agregados utilizados, hidratação e tipo de cimento, presença de adições minerais, geometria da peça, temperatura e umidade do ambiente ou a presença de íons cloreto [11].

A resistividade elétrica do concreto é um dos principais parâmetros utilizados no monitoramento do desenvolvimento da corrosão de armaduras em estruturas de concreto armado. Muitas vezes ela é decisiva na velocidade de corrosão, pois controla o fluxo de íons que se difundem pelo concreto através da solução aquosa presente nos poros, sendo altamente sensível ao teor de umidade de equilíbrio e à temperatura do concreto, reduzindo-se com o seu aumento [5]. Contudo, a resistividade elétrica do concreto nem sempre é o fator determinante da velocidade de corrosão, o que é uma forte evidência de que não é coerente utilizar a resistividade do concreto como fator único de monitoramento ou diagnóstico de uma estrutura de concreto armado [12].

2.4 Potencial de corrosão

Este método é normalmente utilizado para registrar uma dada situação em termos de probabilidade de corrosão permitindo também acompanhar a evolução no tempo, ou seja, fazer um monitoramento da estrutura ou corpo de prova

em estudo [5]. Esta ferramenta é um meio rápido e de baixo custo para a identificação de zonas de aço despassivado que necessitam análise ou reparos [13].

O método consiste em medir a diferença de potencial elétrico entre o aço da peça em análise e um eletrodo de referência, sendo que o último é capaz de manter seu potencial elétrico estável. Não existe norma que regulamente este ensaio no Brasil, de modo que é comum fazer uso do procedimento de ensaio e critério de avaliação da norma americana ASTM C 876:2009 [14].

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Como base deste estudo, foram realizados 3 ensaios de campo: profundidade de carbonatação, resistividade elétrica do concreto e potencial de corrosão das armaduras. Para isso, foram definidas metodologias particulares de escolha, corte e molhagem dos pilares amostrados para inspeção. Devido à ausência de normas nacionais regulamentando tais ensaios, a metodologia aplicada neste estudo baseou-se em outros estudos já realizados com esta temática. Ao final dos ensaios, todos resultados foram avaliados considerando-se a média aritmética e desvio padrão dos resultados.

3.1 Escolha dos pilares, corte e molhagem

Como mencionado anteriormente, a estrutura estudada apresenta três pavimentos (térreo, primeiro e segundo pavimentos). Assim, foram escolhidos 10 (dez) pilares por pavimento. Destes 10 por andar, 4 localizavam-se nas fachadas principais e os outros 6 foram escolhidos ao longo do centro do pavimento, buscando selecionar os que estavam em piores condições. A escolha ocorreu deste modo para que, ao final, pudessem ser analisados os pontos críticos da estrutura.
Foi preciso cortar os pilares para que os ensaios de profundidade de carbonatação e potencial de corrosão pudessem ser executados. Buscou-se realizar o corte na altura da ordem de 1m acima da base do pilar. Primeiramente utilizou-se uma serra elétrica circular para fazer o corte inicial da quina. Foram realizados 6 cortes horizontais em cada quina. Em seguida foi utilizado um martelete, com broca nº12, para realizar a abertura dos pilares, como apresenta a Figura 1.



Figura 1: Corte de um pilar com a serra (A) e o martelete (B)

De acordo com a revisão bibliográfica usada como base deste trabalho, para os ensaios de potencial de corrosão e resistividade elétrica, é necessário o umedecimento da superfície de concreto. Sendo assim, foi estabelecida a metodologia a seguir apresentada: cada 5 pilares formavam um ciclo, e este ciclo era molhado 15 vezes com uma pisseta de laboratório. Este método foi mantido em todo o procedimento para padronização das condições de acesso à umidade e saturação.

3.2 Profundidade de Carbonatação

A realização do ensaio de profundidade de carbonatação se deu através da leitura de profundidades após a aspersão de 2 borrifadas de um indicador de pH, neste caso, uma solução de fenolftaleína. Tal solução é preparada de acordo com as orientações sugeridas pela RILEM CPC 18 [15], nas quais indica-se diluir totalmente 10 g de reagente em 700 ml de etanol puro e, em seguida, adicionar 300 ml de água destilada à mistura.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

A região que não se encontra rosada, após a aplicação da solução, corresponde à profundidade de concreto carbonatado (Figura 2(A)). Em cada cavidade aberta foram executadas 9 medições da frente carbonatada, sendo que cada uma delas foi realizada com auxílio de um paquímetro posicionado perpendicularmente à superfície de corte, assim como ilustra a Figura 2(B). A partir dessas medições foi calculada a média aritmética da profundidade carbonatada de cada pilar visando a homogeneização dos resultados para a análise comparativa entre os outros pilares em estudo.

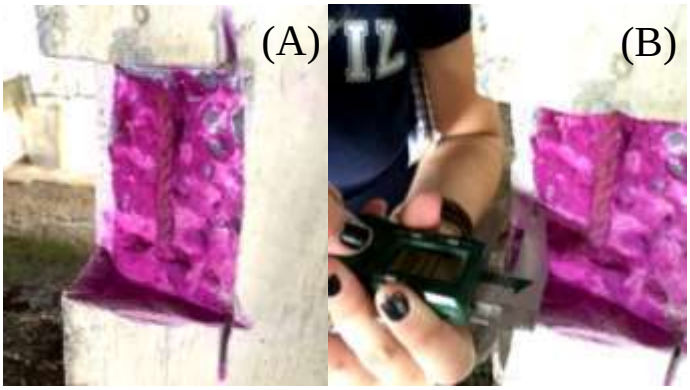


Figura 2: Superfície de corte logo após a aspersão de fenolftaleína (A); Leitura da profundidade da frente carbonatada com auxílio de um paquímetro (B).

Nesta técnica de inspeção, caso detectado nos ensaios que a frente de carbonatação atingiu as barras de aço, pode-se afirmar o processo de carbonatação como uma causa da corrosão de armaduras. Caso a profundidade de carbonatação seja inferior à espessura da camada de cobrimento, a interpretação deve ser no sentido de elaborar uma previsão de vida útil com vista a carbonatação de modo a estimar o tempo necessário para que a frente de carbonatação atinja a espessura de cobrimento existente.

,

Para a avaliação do tempo da vida útil da edificação foi utilizado o modelo de TUUTTI [16]. Este modelo permite calcular o coeficiente de carbonatação da estrutura (Equação (2)), isto é, quantos milímetros ela sofrerá carbonatação ao longo dos anos. Nesta avaliação adotou-se a média que indicava a maior profundidade de carbonatação encontrada na estrutura, por este ser o valor que indicará o tempo de vida útil crítico, ou seja, o menor.

$$k_{CO_2} = \frac{\sqrt{t}}{X_{CO_2}} \qquad \text{Equação (2)}$$

3.3 Resistividade Elétrica

O ensaio de resistividade elétrica do concreto foi realizado através de um procedimento não-destrutivo, que permite estimar o risco de corrosão das armaduras. Para a realização do ensaio, foi utilizado o aparelho Resipod da marca Proceq, o qual consiste em 4 sondas, que seguem o princípio do dispositivo de Wenner, com as sondas espaçadas em 50 mm entre si, como ilustra a Figura 3(A). As sondas externas aplicam uma corrente elétrica com frequência de 40 Hz e as internas medem diferenças de potenciais de até 38 V, no máximo (Figura 3 (B)).

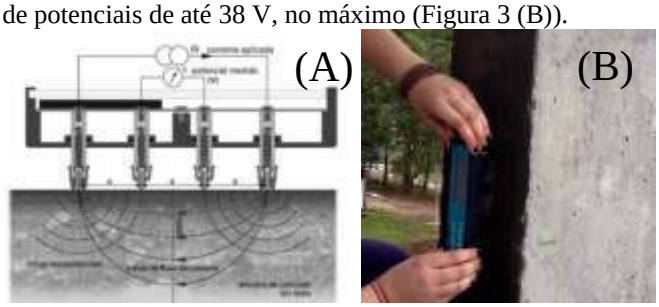


Figura 3 (A e B): Funcionamento do Resipod em uma superfície de concreto) [17]

Foram realizadas três medições por pilar: a 0 cm, 50 cm e 100 cm de altura da base do pilar. Tais leituras foram realizadas após o ciclo de molhagem, descrito na seção 3.1, em posições não coincidentes com o posicionamento das armaduras. Contudo, para a análise final, foram selecionadas apenas as leituras referentes à resistividade elétrica na base dos pilares, uma vez que tais regiões são mais propícias para a ocorrência de corrosão.

Para a análise da probabilidade de corrosão dos pilares utilizou-se como base a tabela de resistividade indicada no CEB 192 [4], na qual os valores das leituras da diferença de potencial, em kΩ.cm, indicam a probabilidade de corrosão que varia de desprezível a muito alta.

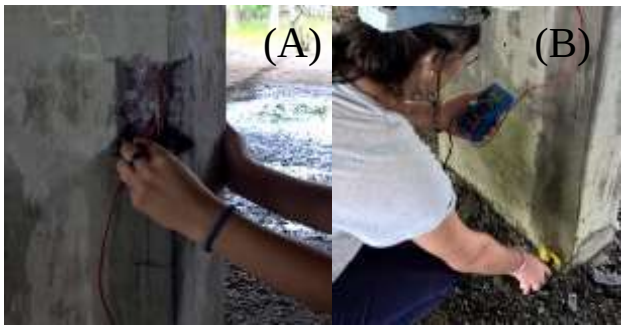
Tabela 1: Relação entre a resistividade elétrica do concreto e a probabilidade de corrosão da armadura [4]

Resistividade Elétrica do Concreto (kΩ.cm)	**Indicação da probabilidade de corrosão**
> 20	Desprezível
10 a 20	Baixa
5 a 10	Alta
< 5	Muito Alta

3.4 Potencial de Corrosão

O ensaio foi realizado após o procedimento de molhagem descrito anteriormente e foi utilizado um eletrodo de referência de prata/cloreto de prata acoplado a um multímetro digital de alta impedância, como ilustrado na Figura 4. O eletrodo de referência, ligado ao polo positivo do multímetro, foi posicionado acima do local da armadura em que se desejava medir o potencial de corrosão e o polo negativo do multímetro era acoplado na barra de aço objeto de medição. Em cada pilar, as leituras foram executadas em três pontos, sendo um na base do pilar (0 m), outro a 0,5 m da base e o último a 1,0 m da base.

Como critério de avaliação foi usada a classificação indicada pela ASTM C 876: 2009 [18], representada na Tabela 2. É importante ressaltar que, assim como o ensaio de resistividade elétrica do concreto, os dados efetivamente utilizados para indicar a probabilidade de corrosão foram referentes às medições dos pilares, já que esta é a região mais sujeita à corrosão.



Figuras 4: Contato com a armadura (A); Utilização do eletrodo e do multímetro (B)

Tabela 2: Correlação dos valores de ddp e da probabilidade de corrosão [18]

Tipo do Eletrodo				**Probabilidade de Corrosão**
Cobre/Sulfato de Cobre (mV)	Prata/Cloreto de Prata (mV)	Hidrogênio (mV)	Calomelano saurado (mV)	
> - 200	> - 106	> + 116	> - 126	Baixa (até 10% de risco de corrosão)
- 200 até – 350	- 200 até – 256	+ 116 até – 34	- 126 até – 276	Intermediária
- 350 até – 500	- 256 até – 406	- 34 até – 184	- 276 até – 426	Alta (até 90% de risco de corrosão)
< - 500	< - 406	< - 184	< - 426	Corrosão Severa

4. RESULTADOS

4.1 Carbonatação

A análise da profundidade de carbonatação dos pilares avaliados foi realizada comparativamente com o cobrimento especificado em projeto. O cobrimento, superior a 30mm, atenderia, pela NBR 6118 [19], um ambiente de agressividade moderada, o que ocorre por tratar-se de uma estrutura construída em ambiente urbano.

Nas Figuras 5 a 7, representando os três pavimentos da edificação, respectivamente, são apresentadas as médias das nove leituras de profundidade de carbonatação, realizadas em cada pilar analisado. Foi possível perceber que entre os pavimentos não houve grande discrepância entre os valores obtidos, indicando certa homogeneidade na qualidade do concreto e mesmo nível de agressividade entre os pavimentos, em relação à exposição ao dióxido de carbono. Ainda, de acordo com as médias das leituras realizadas nos pilares, os pavimentos térreo, primeiro e segundo apresentaram, respectivamente, profundidades máximas de carbonatação de 14 mm, 18 mm e 14 mm, o que mostra que, em todos os pavimentos, não houve um valor que atingisse o cobrimento de 30 mm, tal como especificado em projeto. Isso pode ser explicado pelo fato do processo da carbonatação ser lento e da estrutura em questão ter apenas seis anos em exposição. Deste modo, é aceitável que a frente de carbonatação ainda não tenha atingido as armaduras.

Outra analise pode ser feita com relação ao posicionamento dos pilares, internos ou de fachada. Para isto fez-se o uso do teste de Tukey com 95% de confiança, onde a diferença significativa de Tukey (TSD) obtida (2,07) foi maior que a diferença entre as médias das profundidades de carbonatação dos pileres internos e osde fachada (1,51). Isto indica que as duas condiçoes de exposição podem ser consideradas iguais, não havendo maior agresividade nos pilares da fachada do edificio.

Como descrito anteriormente, para análise da vida útil da estrutura, adotou-se a média individual (entre os pilares inspecionados) com o maior valor de profundidade carbonadata encontrada na estrutura. Este valor foi obtido no primeiro pavimento, pilar 36 (interno) e foi aproximadamente 18 mm. Considerando-se a idade da estrutura igual a seis anos, obtem-se um resultado igual a 0,1361 mm/√ano (Equação (3)). Com o cálculo do coeficiente de carbonatação é possível se ter uma previsão de vida útil da estrutura, uma vez que a mesma estará protegida até que a profundidade de carbonatação atinja a armadura. Considerando o cobrimento de projeto igual a 30 mm, tem-se que a vida útil da estrutura é igual à 16 anos (Equação (4)).

O valor encontrado na Equação 4, 16,67 anos, está bem abaixo do recomendado pela norma brasileira de estruturas de concreto armado, 50 anos. Isto se deve principalmente às condições às quais a estrutura está exposta, uma vez que não recebeu nenhum sistema de proteção pela paralização de sua execução. Desta forma, mesmo que a profundidade carbonatada não tenha atinjido as armaduras em nenhum dos casos avaliados, cabe ressaltar que as condições não são favoráveis à estrutura, sendo sua integridade diretamente afetada por este motivo.

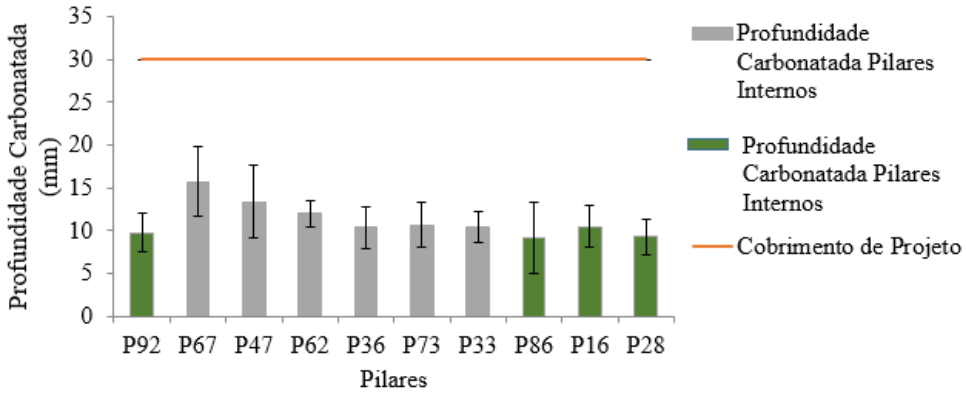


Figura 5: Profundidade de carbonatação nos pilares do pavimento térreo

ISSN 2448-1459

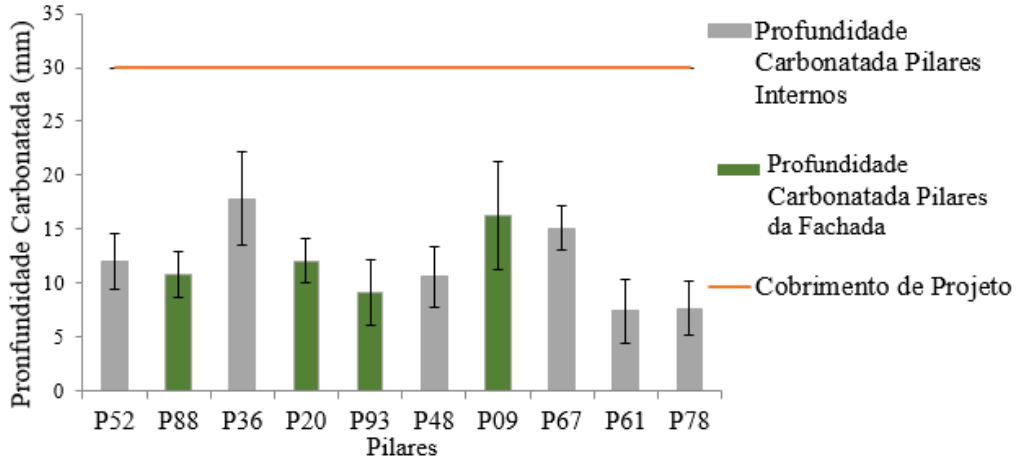


Figura 6: Profundidade de carbonatação nos pilares do primeiro pavimento

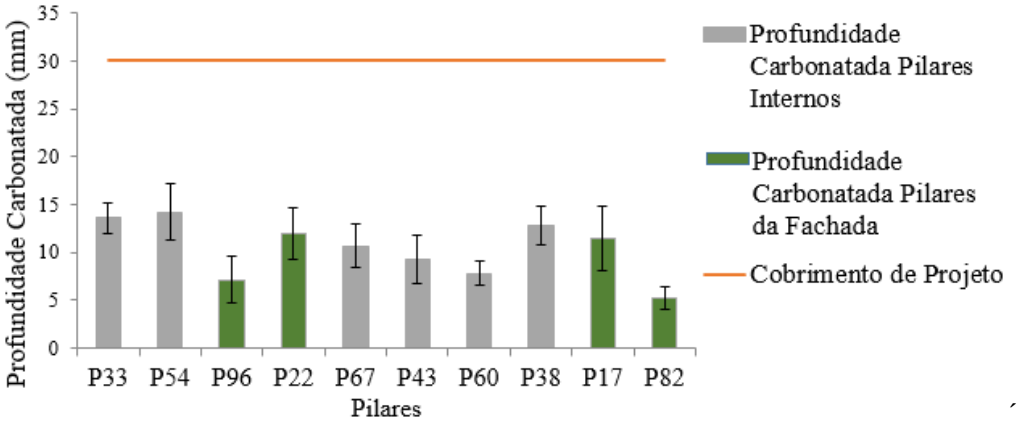


Figura 7: Profundidade de carbonatação nos pilares do segundo pavimento

$$k_{CO_2} = \frac{\sqrt{t}}{X_{CO_2}} \rightarrow k_{CO_2} = \frac{\sqrt{6}}{18} = 0{,}1361\ mm/\sqrt{ano} \qquad \text{Equação (3)}$$

$$k_{CO_2} = \frac{\sqrt{t}}{X_{CO_2}} \rightarrow 0{,}1361 = \frac{\sqrt{t}}{30} = 16{,}67\ anos \qquad \text{Equação (4)}$$

4.2 Resistividade elétrica do concreto

Para análise da probabilidade de corrosão do elemento estrutural, através da resistividade elétrica do concreto, optou-se pela adoção dos valores críticos obtidos. Em todos os casos observou-se que os menores valores de resistividade elétrica se encontravam na base dos pilares, havendo aumento desses valores ao longo da altura do elemento.

As Figuras 8 a 10 apresentam os valores de resistividade elétrica obtidos em cada pavimento analisado. A aleatoriedade dos resultados entre os pavimentos não torna possível a identificação do que apresenta maior agressividade na edificação.Vale salientar que somente dois pilares, sendo um no primeiro (P36) e outro no segundo pavimento (P38), obtiveram resistividade menor que 20 kΩ.cm, indicando respectivamente 14,3 kΩ.cm e 12,8 kΩ.cm. Entretanto, nestes dois casos, a resistividade foi superior a 10 kΩ.cm, indicando uma baixa probabilidade de corrosão.

Ao analisar a localização dos pilares, observou-se que, no primeiro pavimento, os de menor resistividade estão na fachada do edifício, como é o caso do pilar P93, ou estão abaixo da junta de dilatação não estanque, como o pilar P36. O mesmo acontece com alguns pilares do segundo pavimento, como pode ser visto no pilar P82. Além disso, observa-se

que alguns dos pilares localizados na parte externa da estrutura possuem valores de resistividade menores que os internos. De forma geral, os pilares que estão em maior contato com a água ou na fachada do edifício possuem valores de resistividade mais baixos. Deve-se destacar que a metodologia usada na inspeção de padronizar o umedecimento do concreto tem a tendência de tornar todos com mesmo grau de umidade, que é um fator de forte influência na diferenciação da resistividade elétrica dos elementos estruturais. Porém, esta prática acaba dificultando a mensuração do efeito dos diferentes micro climas que atuam em condições de serviço. Uma boa alternativa para a continuidade deste trabalho de inspeção seria realizar medidas de resistividade sem o umedecimento do concreto, obtendo-se a resistividade real dos elementos em um dado momento de modo a investigar, por exemplo, a diferença real em condições de campo que pilares de fachada apresentam.

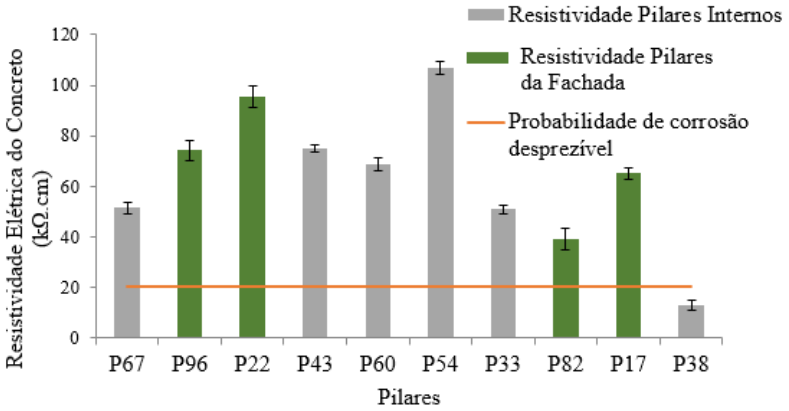


Figura 8: Resistividade elétrica do concreto nos pilares do pavimento térreo

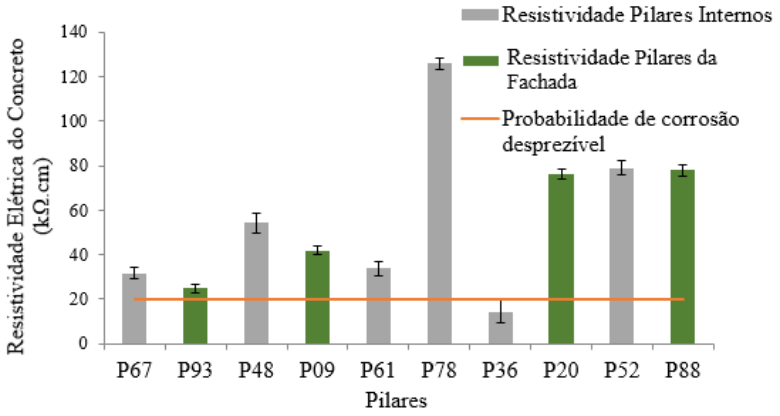


Figura 9: Resistividade elétrica do concreto nos pilares do primeiro pavimento

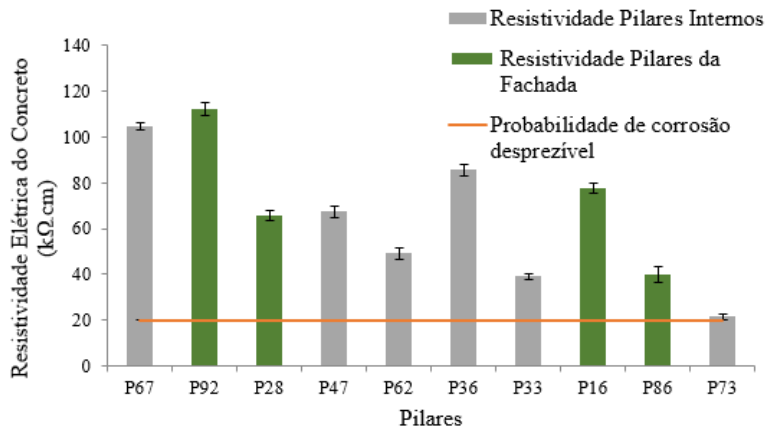


Figura 10: Resistividade elétrica do concreto nos pilares do segundo pavimento

4.3 Potencial de Corrosão

A análise do potencial de corrosão se deu de forma semelhante à da resistividade elétrica no que diz respeito aos valores analisados. Optou-se, também, pela adoção dos valores críticos obtidos na base dos pilares inspecionados. As Figuras 11 a 13 apresentam os valores de potencial de corrosão obtidos em cada pavimento analisado. A aleatoriedade dos resultados entre os pavimentos dificulta a classificação de um andar com agressividade superior à outra. Os pilares P67 e P86 do pavimento térreo, P93, P61, P20 e P88 do primeiro pavimento e P67, P43 e P17 do segundo pavimento apresentaram potenciais mais negativos que -106 mV. Novamente, os pilares com menores potenciais de corrosão estão localizados na parte externa da edificação ou estão abaixo de uma junta de dilatação não estanque a água de chuva. Entretanto, em todos esses casos o valor obtido foi superior a -256 mV, indicando uma classe intermediária deprobabilidade de corrosão. O fato de as leituras não indicarem armaduras em estado de corrosão é natural e de acordo com os dados de carbonatação, que mostrou que a armadura ainda está imersa em concreto com elevada alcalinidade.

Através da análise conjunta dos ensaios de resistividade elétrica e potencial de corrosão, foi possível observar que os piores resultados indicaram uma probabilidade intermediária de corrosão, o que dificulta o diagnostico final da estrutura, uma vez que ela pode ou não estar passível de corrosão.

No pavimento térreo, os pilares P73 e P62 tiveram negativa notoriedade, isso deve-se à presença de uma junta de dilatação nas vigas acima destes, o que facilita a percolação de água até o pilar e o torna um ambiente favorável para corrosão da armadura. Além disso, o pilar P73 está localizado ao lado das escadarias, local que permite que as águas provenientes dos andares superiores percorram pelo pilar, auxiliando também na ocasião propícia para que ocorra a corrosão das armaduras. No primeiro pavimento, P36 e P67 também apresentaram resultados que indicam que, futuramente, estes podem se tornar pilares críticos com relação ao potencial de corrosão. O pilar P36 também acaba sendo atingido pela água que atravessa a junta das vigas que estão acima dele, sendo que a entrada é facilitada pelas fissuras existentes ao longo desse elemento. O pilar P67 está no poço do elevador que, por ser um local aberto, também permite que as águas de outros pavimentos atinjam este pilar. Os pilares P33 e P38, no segundo pavimento, apresentaram os piores resultados de ambos os ensaios em relação aos demais. Isto pode ser explicado pela grande umidade existente nesse pavimento e uma boa quantidade de poças de água nas lajes deste piso, principalmente na base do pilar P33.

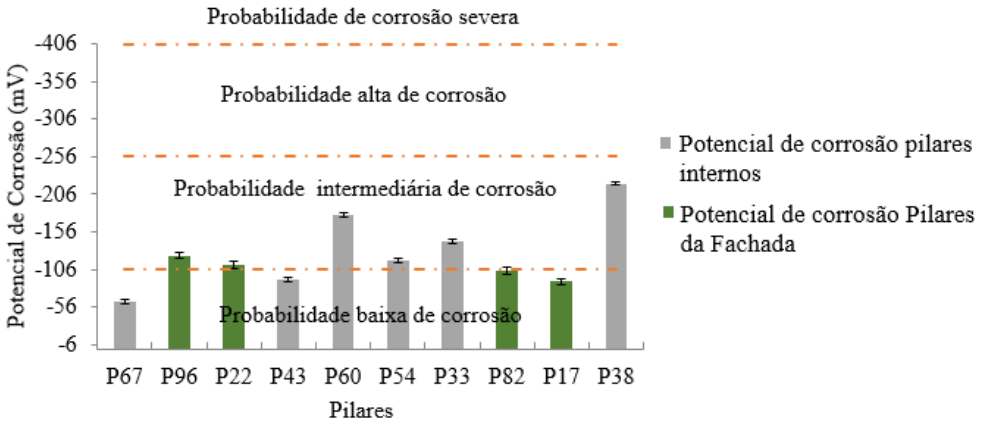


Figura 11: Potencial de corrosão nos pilares do pavimento térreo

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

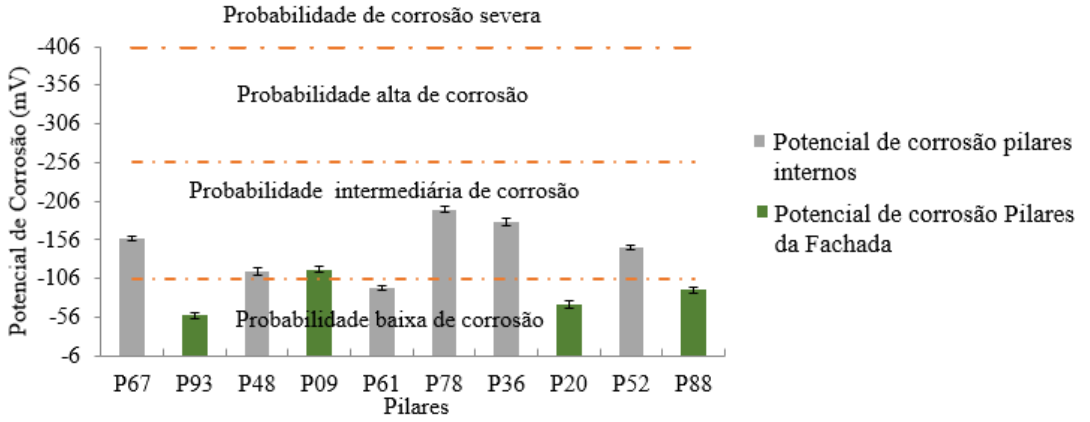


Figura 12: Potencial de corrosão nos pilares do primeiro pavimento

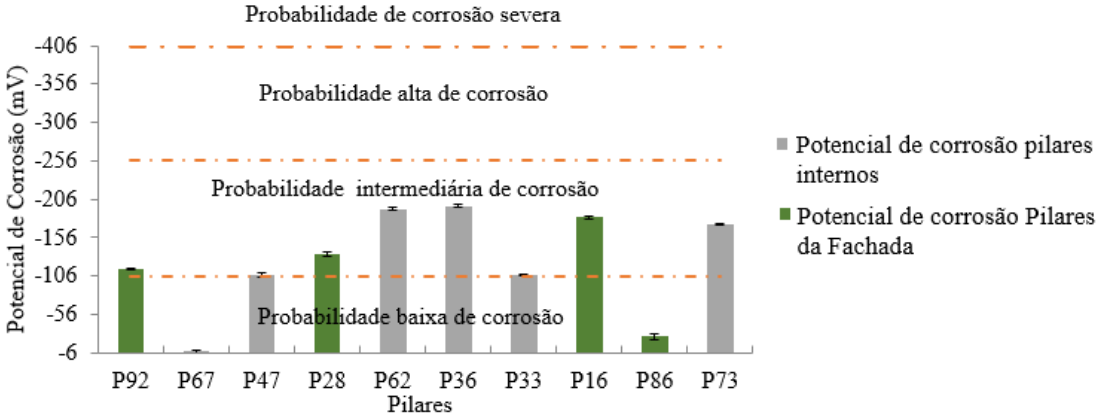


Figura 13: Potencial de corrosão nos pilares do segundo pavimento.

5. CONCLUSÃO

A análise conjunta dos três ensaios permite, de forma mais segura, avaliar o risco de corrosão da estrutura estudada. Percebe-se, através de todos os resultados, que por mais que a estrutura não tenha sido concluída e que esteja sujeita a exposição de intempéries, ela não possui um processo ativo de corrosão.

Os resultados da profundidade de carbonatação permitem concluir que a armadura de aço utilizada, ainda está passiva uma vez que o processo de carbonatação não superou o cobrimento. Isto ocorre pelo fato do estudo se tratar de uma estrutura ainda nova e também pela carbonatação ser um processo lento. Quanto a vida útil, obtida através do ensaio de carbonatação, pode-se perceber que o valor é baixoquando comparado a recomendação normativa nacional.

A grande maioria dos resultados de resistividade elétrica do concreto resultou numa probabilidade desprezível quanto à corrosão, indicando assim a qualidade e a integridade do material. Apesar disso, os pilares que apresentaram os menores valores de resistividade estão mais expostos a agentes externos, ou por comporem a fachada do edifício, ou por possuírem uma junta de dilatação não estanque que permite a entrada de agentes agressivos dissolvidos na água da chuva. Vale ressaltar que estes mesmos pilares possuem manifestações patológicas como manchas de corrosão, matéria orgânica, manchas por gotejamento e até acumulo de água na base do pilar.

De forma semelhante à resistividade, os resultados do potencial de corrosão indicaram uma probabilidade baixa de ocorrência do mecanismo de corrosão. No pavimento térreo, o potencial de corrosão é maior nospilares externos, enquanto no primeiro e no segundo pavimento os internos é que apresentaram um maior potencial de corrosão. Não foi possível identificar um pavimento com maior agressividade, isso se deu pela aleatoriedade dos resultados entre os pavimentos, porém, os ensaios de potencial de corrosão e de resistividade elétrica do concreto foram capazes de indicar

regiões cuja possibilidade de corrosão pode aumentar significativamente caso nenhuma providência seja tomada. Logo, as técnicas se mostraram interessantes quando aplicadas conjuntamente e satisfatórias no que diz respeito ao diagnóstico de uma estrutura.

Cabe ainda destacar que este trabalho visou especificadamente a inspeção de pilares, sendo necessários trabalhos complementares focando vigas e lajes para complementar o diagnóstico.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Ministério da Educação pelas bolsas concedidas no Programa de Educação Tutorial (PET) e no Mestrado. Além disso, agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento dos equipamentos que deram suporte aos trabalhos de campo.

7. REFERÊNCIAS

[1] FRANÇA, A*et al*. "Patologia das construções: Uma especialidade na Engenharia Civil". *Revista Techne*, 2011,v.174, p. 72-77.
[2] HELENE, P. "Corrosão em armaduras para concreto armado"**.** São Paulo: Editora Pini, 1986.
[3] MEDEIROS, M. H. F. "Estruturas de concreto com corrosão de armaduras por carbonatação: comparação de argamassas de reparo quanto a proteção do aço"**.** Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002
[4] CASCUDO, O. "O controle da corrosão de armaduras em concreto, inspeção e técnicas eletroquímicas". São Paulo Editora Pini, 1997.
[5] HELENE, P."Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado". Tese de Livre Docência, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993.
[6] ANDRADE, C. "Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras".São Paulo, Editora Pini, 1992.
[7] MEDEIROS, M. H. F.; HELENE, P. R. D. L. "Estudo da carbonatação em concretos e argamassas". Revista Engenharia, Ciência & Tecnologia, Vitória - Espirito Santo, v. 4, n.número 4, p. 3-12, 2001.
[8] ANDRADE, C.; D'ANDREA, R. "Electrical resistivity as microstructual parameter for the modeling of the service life of reinforced concrete structures". 2° International Symposium on Service Life Design for Infrastructure, Delft, 2010.
[9] MEDEIROS JR, R. A. "Estudo da resistividade do concreto para proposta de modelagem de vida útil – corrosão de armaduras devido à penetração de cloretos". Tese (Doutorado, qualificação), Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São Paulo, 2014.
[10] ANDRADE, C. "Calculation of Initation and Propagation Periods of Service Life of Reinforcements by Using the Electrical Resistivity". RILEM Publications SARL, 2004.
[11]LEOCINI, J. W. "Estudos sobre resistividade elétrica superficial em concreto: análise e quantificação de parâmetros intervenientes nos ensaios". Tese (doutorado), Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2011.
[12] MEDEIROS, M. H. F. "Estudo de variáveis que influenciam nas medidas de resistividade de estruturas de concreto armado". Revista Engenharia Civil da Universidade do Minho, v.12, Guimarães, 2001.
[13] MEDEIROS, M. H. F.; KNUUTILA, M.; PEREIRA, E.; HELENE, P. "Inspection of Buildings in Rio de Janeiro-Brazil: Proving the greater tendency of corrosion at the base of reinforced concrete columns using potential corrosion technique". American Journal of Engineering Research (AJER), v. 2, p. 102-112, 2013.
[14] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.ASTM C-876: Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. Philadelphia, 2009.
[15] RÉUNION INTERNATIONALE DES LABORATORIES D'ESSAIS DE RECHERCHES SUR LES MATÉRIAUX ET LES CONSTRUCTIONS – RILEM. "Measurement of hardened concrete carbonation depth: RILEM CPC-18". Materials and Structures, 1988, v. 21, n. 6, p. 453-55
[16] TUUTTI, K. "Corrosion of Steel in Concrete". Swedish Cement and Concrete Research, Fo nº 504, p. 469. Stokholm, 1982.
[17] PROCEQ. " Instruções de Operação: Teste de Durabilidade do Concreto". P. 4. 2013.
[18] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.ASTM C-876: Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. Philadelphia, 2009.
[19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.