Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções
CBPAT2016

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DE ESCLEROMETRIA NA AVALIAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO

M.P.R.C. BRANCO
Discente do curso de Engenharia Civil
Universidade Federal de São Carlos
São Paulo; Brasil
mpcastellobranco@hotmail.com

F.G.S. FERREIRA
Docente do Departamento de Engenharia Civil
Universidade Federal de São Carlos
São Paulo; Brasil
fgiannotti@ufscar.br

RESUMO

Para controlar a qualidade do concreto, a propriedade corriqueiramente usada era sua resistência à compressão. Atualmente, além das propriedades mecânicas, a durabilidade do concreto vem sendo bastante discutida em função da ocorrência de deteriorações precoces em estruturas de concreto. O reparo de estruturas deterioradas pode ter custo superior ao de nova estrutura, dado o elevado valor de uma intervenção para aumentar sua durabilidade no período de manutenção corretiva. Em função disso, propôs-se a avaliação de uma estrutura inserida no campus da UFSCar por meio de ensaios não destrutivos. Foi realizado um levantamento histórico e mapeamento das anomalias existentes na estrutura do edifício e, a partir destes, foram escolhidos elementos estruturais para serem realizados ensaios esclerométricos e colorimétricos, a fim de estimar a dureza superficial dos mesmos e verificar a carbonatação superficialmente, respectivamente. Utilizando curvas de correlação adequadas, os parâmetros obtidos no ensaio esclerométrico possibilitam estimar uma resistência mecânica para os elementos e a técnica do ensaio colorimétrico verifica a ocorrência da carbonatação, investigando a influência de tal processo no aumento da resistência mecânica superficial do concreto. Entretanto, os valores de resistência à compressão obtidos através da correlação com o índice esclerométrico foram muito altos, indicando que curvas de correlação utilizadas (do próprio equipamento) não são adequadas. Constatou-se, dos ensaios colorimétricos, que não necessariamente elementos carbonatados possuem índices esclerométricos superiores a elementos não carbonatados, dada a heterogeneidade do concreto e, consequentemente, do processo de carbonatação.

Palavras-chave: concreto, esclerometria, durabilidade.

ABSTRACT

To control the quality of the concrete, the property routinely used was its resistance to compression. Currently, in addition to mechanical properties and durability of concrete has been widely discussed in function of the occurrence of early deterioration of concrete structures. The repair of damaged structures may have cost in excess of the new structure, given the high value of an intervention to increase their durability in corrective maintenance period. As a result, it proposed the evaluation of a structure inserted on the campus of UFSCar through non-destructive testing. This was a historical survey and mapping of anomalies in the building structure, and since these have been chosen structural elements to be performed sclerometric and colorimetric assays in order to estimate the surface hardness thereof and checking the carbonation surface, respectively. Using appropriate correlation curve, the parameters obtained in estimating a rebound hammer test enable mechanical resistance to the elements and technique of colorimetric test checks the occurrence of carbonation by investigating the influence of such a process in increasing the surface strength of the concrete. However, the compressive strength values obtained through correlation with the rebound hammer index were too high, indicating that correlation curves used (from own equipment) are not suitable. It was found, for colorimetric assays, which do not necessarily have elements carbonated, sclerometric levels above non-carbonated elements due the heterogeneity of the concrete and, consequently, the carbonation process.

Keywords: concrete, rebound hammer, durability.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

1. INTRODUÇÃO

A durabilidade e vida útil das estruturas de concreto armado é tema atual relevante, visto que muitas obras civis apresentam deteoriações precoces, podendo comprometer o seu uso seguro e funcional, além de trazer prejuízos à sociedade (SILVA, 2006 [1]). Com isso, há o crescente interesse em projetar estruturas de concreto armado que, além de apresentarem características referentes à resistência mecânica, apresentem também durabilidade (vida útil prevista em projeto), visto que o processo de reparação de estruturas deterioradas pode ser muito caro, assim, vários ensaios têm sido realizados em estruturas de concreto com o intuito de avaliar parâmetros que influenciam em tal quesito. Um dos principais problemas que conduz as estruturas a sua deterioração precoce é a corrosão das armaduras, seja por ação do dióxido de carbono ou dos íons cloreto, cujos prejuízos anuais chegam de 3% a 5% do Produto Interno Bruto (PIB) de cada país (ANDRADE, 1992[2]). Desta forma, propôs-se nesta pesquisa avaliar alguns elementos externos e internos de concreto (pilares e vigas) por meio de ensaios não destrutivos. Duas fotos do edifício são apresentadas a seguir.



Figura 1: Face sul da edificação estudada (DECiv).



Figura 2: Face norte da edificação estudada (DECiv).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Ensaios não destrutivos

O desenvolvimento e utilização de ensaios não destrutivos em estruturas de concreto armado vêm sendo bastante abordado nas últimas décadas (EVANGELISTA, 2002[3]; SILVA FILHO *et al*., 2011[4]; PEREIRA E MEDEIROS, 2012[5]). Tal progresso tem sido lento, principalmente pelo fato do concreto não ser um material homogêneo, e não ter o controle de fabricação tão alto quanto o de um material industrializado (MALHOTRA, 1984[6]). Dentre as propriedades do concreto que podem ser avaliadas por ensaios não destrutivos pode-se citar: módulo de elasticidade, dureza superficial, permeabilidade, existência de vazios, fissuração, além da localização das armaduras. Para um ensaio ser considerado não destrutivo, ele deve não causar dano no elemento ensaiado, ou deixar pequenos danos que não são prejudiciais à estrutura, que são reparados após o ensaio. Podem ser realizados tanto no monitoramento da evolução da resistência de uma estrutura recém-construída, como também em estruturas já existentes e com certa idade, visando avaliar sua integridade e a capacidade de resistir às solicitações. Nesse trabalho, foram utilizados dois métodos de ensaio não destrutivo, sendo eles a esclerometria para mensurar a dureza superficial, e o ensaio colorimétrico, a fim de verificar se o fenômeno é presente na estrutura.

2.1.1. Método do esclerômetro

As primeiras tentativas de mensurar a dureza superficial do concreto ocorreram em 1930, utilizando métodos que envolviam uma bola de aço fixa num pêndulo, ou atirada de uma pistola, medindo-se o seu retorno. A explicação para os métodos envolve a utilização de uma massa elástica, que dependendo da dureza da superfície em que ela se choca, varia o ricochete da massa elástica (BUNGEY, 1989[7] Pereira e Medeiros, 2012[5].). Atualmente, o esclerômetro de Schimidt é o instrumento que foi difundido em vários países e tem sido utilizado para medir a dureza superficial das estruturas de concreto armado (EVANGELISTA, 2002[3]). Tal aparelho consiste de uma massa-martelo que é impulsionada por uma mola, que se choca através de uma haste, com ponta em forma de calota esférica, com a área do ensaio (NBR 7854: 2012[8]). Na Figura 3 observa-se uma ilustração da composição do aparelho e como é seu funcionamento:

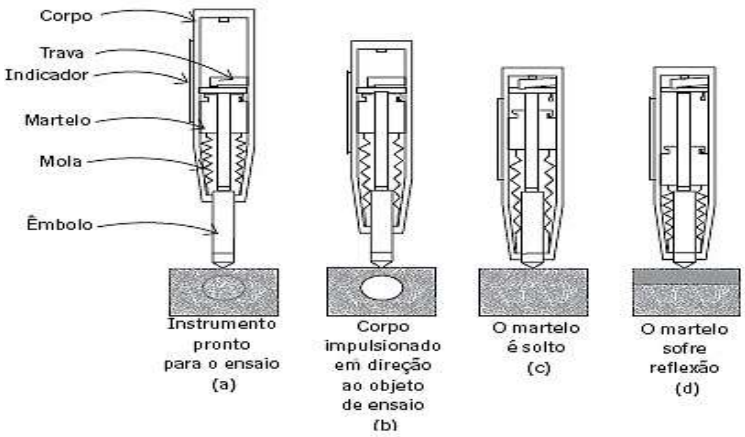

Figura 3: Ilustração da sequência de execução do ensaio de esclerometria (Mehta e Monteiro, 2008).

A realização do ensaio consiste em submeter a superfície do concreto analisado um impacto de forma padronizada, usando o esclerômetro de Schimidt, que possui uma massa padrão, atingindo o substrato com uma dada energia. Do impacto, mede-se o ricochete, ou seja, o índice esclerométrico. O ricochete varia de acordo com a energia cinética antes do impacto e o quanto tal energia é absorvida entre a barra de percussão e o concreto. O que é absorvido está relacionado à rigidez do concreto e sua resistência (ACI 228, 1989[9]).

2.1.2. Fatores que influenciam nos resultados da esclerometria

O ensaio tem como objetivo estimar a resistência e a dureza superficial do concreto, para isso, utilizam-se curvas de correlação. Alguns fatores podem influenciar no resultado, não havendo uma correlação única entre o valor do índice esclerométrico e a resistência à compressão. Pode-se citar tipo e quantidade de cimento, natureza do agregado, tipo de cura, idade, teor de umidade, entre outros (MALHOTRA, 1984[6]; BS 1881: Part 201[10]). Quanto ao fator **idade**, pode-se relacionar o índice esclerométrico com a carbonatação, já que de acordo com a BS:1881:Part 202 (1986)[11], em concretos com idade superior a três meses a influencia de tal processo pode ser significativa, e a camada superficial pode passar a apresentar valores de dureza superficial superiores, não representando o concreto do interior da peça. De acordo com a norma NBR 7584:2012[8], a influência da carbonatação na dureza superficial do concreto é significativa e promove a superestimação da resistência, podendo em alguns casos superar os valores reais em mais de 50%, sendo necessário fazer uma análise dos resultados obtidos para poder validá-los e utilizar curvas de correlação para poder corrigir tais resultados e melhor se aproximar da resistência real do concreto. Também, de acordo com tal norma, é sempre necessário obter novas curvas de correlação quando alterado o tipo de cimento utilizado. Segundo NEVILLE e BROOKS, 2013[12], com o aumento da idade, o grau de hidratação geralmente aumenta, portanto a resistência cresce. Esse efeito pode ser observado na, que mostra a resistência à compressão obtida de diferentes concretos, com diferentes relações de água/cimento, em diferentes períodos (1 dia, 3 dias, 7 dias, 28 dias, 3 meses, 1 ano), mostrando que realmente há o aumento da resistência à compressão ao longo da vida da estrutura de concreto.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

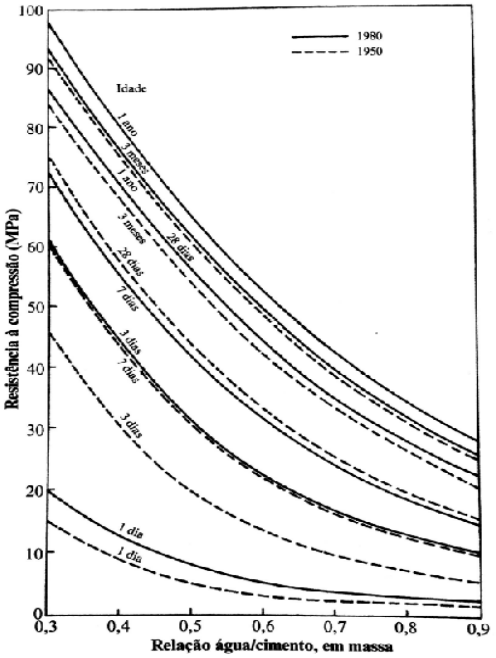

Figura 4: Influência da idade na resistência à compressão de concreto produzido com cimento Portland comum com diferentes relações água/cimento. Dados de cimentos produzidos em 1950 e 1980 (Neville e Brooks, 2013).

Quando não se dispõe de resultados reais de crescimento da resistência do concreto da estrutura em análise, ou seja, os resultados experimentais representativos, pode-se adotar uma previsão conservadora, o modelo matemático sugerido pelo CEB-FIP Model Code 90 (1993), amplamente aceito pela tecnologia de concreto do nosso país (SILVA e HELENE, 2011[13]). Tal fórmula utilizada também é citada na NBR 6118:2014[14], e indica-se que ela seja utilizada para a determinação da resistência característica do concreto, em datas diferentes do que os 28 dias, obtendo-se então o f_{cj}. A fórmula pode ser vista a seguir:

$$\frac{f_{cj}}{f_{c,28}} = e^{s\times\left(1-\sqrt{\frac{28}{j}}\right)}$$

Equação (1)

Em que:

- j: é a idade do concreto em dias;
- f_{cj}: resistência à compressão média do concreto em j dias de idade;
- $f_{c,28}$: resistência à compressão média a 28 dias;
- s: coeficiente que depende do tipo de cimento utilizado.

Tabela 3 - Coeficientes de crescimento de resistência para diferentes tipos de cimentos (Silva e Helene, 2011).

Tipo cimento	s	f_c a 50 anos	f_c a 1 ano	f_c entre 1 e 50 anos
CPV ARI	s = 0,20	1,21 → 50anos	1,15 → 1ano	1,05 de 1ano a 50anos
CP I / II	s = 0,25	1,28 → 50anos	1,20 → 1ano	1,07 de 1ano a 50anos
CP III / IV	s = 0,38	1,45 → 50anos	1,32 → 1ano	1,10 de 1ano a 50anos
NBR 6118	s =0,1545	1,16 → 50anos	1,11 → 1 ano	1,05 de 1ano a 50anos

Outro fator importante é o **tipo de cimento e o fator água/cimento** utilizado. Para diferentes tipos de cimento Portland, houve pouca variação nos resultados de acordo com a BS1881:Part 202 (1986)[11], não ultrapassando 10% em seus valores. Entretanto, para concretos com cimento aluminoso sua resistência pode ser 100% maior do que poderia indicar a correlação feita para o cimento Portland comum. Outro tipo de cimento estudado é o cimento supersulfatado, que podem ter resistência 50% menor do que indicaria a correlação para o cimento Portland comum (EVANGELISTA, 2012[3]).

Outro aspecto que também é citado na BS1881:Part 202 (1986)[11] é que os concretos com elevados fatores de água/cimento apresentam índices esclerométricos menores do que os concretos de mesma resistência, mas com teores de cimento menores.

O **tipo de agregado** pode também influenciar a dureza do concreto. Segundo a NBR 7584:2012[8], diferentes tipos de agregados podem fornecer concretos de mesma resistência, porém fornecerem índices esclerométricos diferentes, havendo variação se comparados concretos feitos com agregados leves e agregados pesados.

Além dos fatores já destacados, outro parâmetro que influencia nos resultados deste ensaio é a **carbonatação**, que pode ocasionar um aumento da dureza superficial do concreto. A carbonatação é um fenômeno ocorrente em estruturas compostas por materiais cimentícios, devido à penetração, nos poros, de gases como monóxido de carbono (CO) ou dióxido de carbono (CO_2), provenientes da queima de combustíveis fósseis, levando à neutralização do substrato (FIGUEIREDO, 2005[15]). Tais gases não costumam ser corrosivos para materiais metálicos, embora o gás carbônico forme com água o ácido carbônico (H_2CO_3), que é um ácido fraco. Entretanto, combinados com a umidade do ambiente ocasionam a carbonatação do concreto, podendo levar a deterioração da estrutura. O CO_2 presente na atmosfera difunde nos poros e reage com o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), produto das reações de hidratação do cimento e responsável também por sua alta alcalinidade, formando o carbonato de cálcio ($CaCO_3$). A reação característica desse processo é apresentada a seguir de forma simplificada:

$$CO_{2(aq)} + Ca(OH)_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \qquad \text{Equação (2)}$$

O processo de carbonatação depende de vários fatores que alteraram a velocidade que o fenômeno ocorre. Fatores que são ligados com a produção do concreto, como o tipo de cimento ou tipo de aditivo utilizado, ou até mesmo fatores ambientais, como o teor de umidade ou concentração de dióxido de carbono na atmosfera. Atualmente duas normas são utilizadas para se avaliar a resistência à carbonatação de concretos: a EN 13295:2004[16] e a ISO 1920:2015[17].
Como consequência do processo de carbonatação acelerada, observa-se a redução da porosidade do concreto. Isso se deve ao fato de que os volumes molares dos produtos da reação de carbonatação são superiores aos dos produtos hidratados a partir dos quais eles se formam. Por exemplo, o volume molar do hidróxido de cálcio é de 33,2 cm³/mol, enquanto o volume do carbonato de cálcio é de 36,9 cm³/mol, representando um aumento superior a 11%. O volume molar passa de 12 cm³/mol para 16 cm³/mol de um C-S-H não carbonatado para um C-S-H carbonatado, representando mais de 30% de aumento. Os carbonatos formados ocupam, portanto, uma parte dos vazios capilares iniciais. (BAROGHEL-BOUNY, V. *et al,* 2014[18]).

Devido ao efeito da carbonatação superficial dos elementos, tendo como base a NBR 7584:2012, elementos carbonatados podem ter resultados de esclerometria superestimados em mais de 50% do seu real valor. Assim, buscou-se nesta pesquisa avaliar alguns elementos externos e internos de concreto (pilares e vigas) por meio de da técnica de esclerometria, determinando-se, em alguns elementos, a existência ou não da carbonatação do concreto, uma vez que há influência do processo nos resultados da esclerometria. A edificação para avaliação localiza-se no campus da UFSCar de São Carlos, sendo ela o prédio do Departamento de Engenharia Civil (DECiv).

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. Levantamento histórico e características gerais da edificação

Neste item, foi feito um levantamento histórico sobre a edificação e procurou-se determinar algumas características sobre o projeto da mesma que pudessem influenciar em algum processo analisado na pesquisa. Para tal levantamento lançou-se mão da consulta em acervos disponíveis na própria universidade e também a entrevista com professores que trabalham na faculdade desde o período da construção da edificação.

3.2. Ensaio esclerométrico

Para a realização do ensaio esclerométrico, foram escolhidos 28 elementos, sendo eles 17 pilares e 11 vigas, com diferentes características de exposição, para que fossem obtidos resultados diversificados, possibilitando uma melhor análise comparativa. Os ensaios foram realizados seguindo a NBR 7584:2012[8] e o procedimento experimental foi ilustrado por meio de fotografias.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

A NBR 7584:2012[8] indica que as superfícies sejam lisas, e antes de ser feito o desenho da malha, deve-se lixar o elemento estrutural com uma pedra de carborundum com o objetivo de remover pequenas imperfeições superficiais. Depois, deve-se limpar o pó remanescente a seco e fazer o desenho da malha com 16 espaços, que serão golpeados com o esclerômetro.

Cada espaço da malha deve ser golpeado uma única vez, obtendo-se, assim, 16 valores. Para a determinação do índice esclerométrico do elemento estrutural, calculou-se a média aritmética dos valores obtidos. Com tal média, verificam-se os valores que diferem mais que 10% para mais ou para menos, tais valores devem ser desconsiderados e assim calcular nova média. Deve-se repetir o processo até que todos os valores se encontrem na faixa de 10%. Foi utilizado o Esclerômetro de Schmidt, fabricado na pela empresa Proceq, na Suíca. As fotos do equipamento são apresentadas a seguir, bem como o processo de execução do ensaio. Destaca-se que foram utilizadas malhas de 160 x 160 mm (25600 mm²) ou 200 x 200 mm (40000 mm²), dependendo da dimensão do elemento.


Figura 5: Esclerômetro de Schmidt utilizado.


Figura 6: Passagem do disco de carborundum para remover imperfeições superficiais.

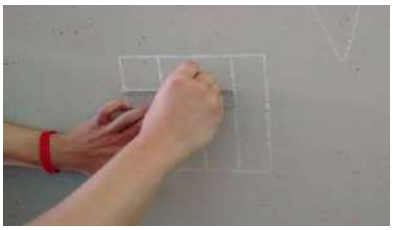
Figura 7: Desenho da malha para realização do ensaio.


Figura 8: Impacto com o esclerômetro.

3.3. Ensaio colorimétrico

O ensaio colorimétrico foi realizado removendo parte da camada de cobrimento de concreto do elemento estrutural e, após limpeza, foi feita a aspersão da solução indicadora fenolftaleína, com concentração de 1% em 70% de álcool isopropílico e 29% de água destilada. A aspersão foi realizada na região recém-fraturada do concreto, para evitar que o hidróxido de cálcio reaja com o CO_2 presente na atmosfera. O ensaio colorimétrico não possui uma norma brasileira específica que regulariza o ensaio, porém foram utilizados métodos encontrados na literatura internacional, que serão detalhados posteriormente.

Primeiramente, os elementos estruturais escolhidos para a realização dos ensaios colorimétricos foram os mesmos que foram realizados os ensaios esclerométricos, a fim de identificar possíveis elementos carbonatados que tenham apresentado dureza superficial elevada em razão da existência da carbonatação. Para a abertura de pequenas janelas de inspeção, foram utilizados um Localizador de Barras de Aço da marca Bosch, uma furadeira da mesma marca, um paquímetro da marca Starrett, papel e plástico para recolher o pó de concreto, a solução de fenolftaleína e também uma picareta. A abertura das janelas de inspeção e a aspersão na área de ensaio são ilustradas nas fotos a seguir. A solução de fenolftaleína foi aspergida na região em que parte do concreto de cobrimento foi retirada (Figura) e, após alguns segundos, determinou-se a ocorrência ou não da carbonatação através da mudança da coloração do concreto. Cada elemento estrutural foi analisado separadamente, com seus respectivos pontos de perfuração e fratura. Como a profundidade da frente de carbonatação é heterogênea, preferiu-se aferir mais pontos no mesmo elemento estrutural, com o objetivo de identificar se o mesmo estava realmente carbonatado ou não.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459



Figura 9: Utilização da picareta para remoção do cobrimento.



Figura 10: Aspersão de fenolftaleína no ponto fraturado.

4. RESULTADOS

4.1. Levantamento histórico e características gerais da edificação

De acordo com o levantamento realizado, o projeto da edificação é de 1982, com início da execução no mesmo ano e seus elementos estruturais são de concreto moldado *in loco*. Verificou-se que as dimensões dos pilares é a mesma para todos os elementos, assim como o seu cobrimento e o tipo de aço utilizado, com variação na quantidade de barras de aço, de acordo com sua solicitação. As dimensões das vigas são diversas tanto nas dimensões da base e quanto na altura, variando de 15 centímetros até 30 centímetros na base e de 50 centímetros até 55 centímetros na altura, sendo que todas possuem a mesma dimensão de cobrimento e tipo de aço utilizado. Todos os elementos da estrutura analisados possuem a mesma resistência característica à compressão (f_{ck}) de 15 MPa. Feita análise das dimensões dos cobrimentos utilizados, pode-se concluir que as espessuras utilizadas referiam-se à antiga NBR 6118:1978, que não havia conceitos quanto à durabilidade das estruturas. O novo texto da norma introduziu novos conceitos ao projeto das estruturas, exemplificando o conceito de Classe de Agressividade do Ambiente (CAA), que interfere no valor da Classe do concreto e do cobrimento das armaduras. A NBR 6118:2014, atualmente em vigor, recomenda o cobrimento mínimo de 30 mm para vigas e pilares de concreto armado expostos para ambiente urbano (Classe de agressividade ambiental II).

4.2. Determinação do índice esclerométrico

Os resultados dos 28 ensaios esclerométricos e seus respectivos índices esclerométricos podem ser vistos nas Figuras 11 e 12, ressaltando-se que os valores representados em vermelho são os valores desconsiderados para o cálculo da média, por serem diferentes em 10%, para mais ou para menos, da mesma, de acordo com a NBR 7584:2012. Analisando-se os dados dos ensaios, observa-se que os valores de índices esclerométricos para pilares externos variaram de 45,4 a 60,5; para pilares internos, de 44,5 a 59,0; para vigas internas, de 47,4 a 57,2 e para vigas externas variam de 41,5 a 55,7.
Em geral, os valores dos índices esclerométricos dos elementos ensaiados tiveram valores próximos, considerando a sua taxa de variação. Observa-se que os valores para pilares externos foi um pouco superior do que os valores para pilares internos, o que pode ser explicado pelo efeito da carbonatação do concreto de tais elementos externos, já que tal fenômeno aumenta a dureza superficial do elemento, como já foi explicado anteriormente.

Já para as vigas, os valores de índice esclerométrico para vigas internas foi um pouco superior do que os para vigas externas, contrariando os resultados esperados. Destaca-se que onze pilares externos foram analisados, seis pilares internos, seis vigas externas e cinco vigas internas. O pilar interno que apresentou o menor índice esclerométrico faz parte da estrutura de ampliação do DECiv. Os índices esclerométricos das vigas das escadas apresentam, em média, valores superiores à média das outras vigas.

Em relação aos elementos, pilares e vigas, a taxa de variação dos valores obtidos não foi muito alta, destacando-se que a resistência do concreto de projeto foi a mesma (15 MPa) para todos os elementos.

Ensaio N° 1 - P96 L			
50	49	48	50
45	54	50	46
46	54	52	51
46	53	51	48
IE = 49,87			

Ensaio N° 2 - P96 O			
50	54	51	47
50	54	51	48
55	47	54	52
45	52	50	60
IE = 51,07			

Ensaio N° 3 - P95 L			
58	59	56	58
59	58	58	60
58	60	59	60
59	58	56	58
IE = 58,38			

Ensaio N° 4 - P91 L			
62	62	60	59
60	60	60	58
60	57	62	64
61	62	61	60
IE = 60,5			

Ensaio N° 5 - P78 O			
58	59	55	64
56	60	59	59
59	57	57	56
56	58	58	58
IE = 58,06			

Ensaio N° 6 - P_{Dema} L			
55	55	52	56
58	54	57	56
52	53	54	54
50	56	54	54
IE = 54,38			

Ensaio N° 7 - P39 O			
56	56	55	58
56	54	53	57
56	54	56	57
55	58	56	56
IE = 55,81			

Ensaio N° 8 - P80 L			
56	58	57	58
57	56	58	58
59	56	56	58
58	56	57	56
IE = 57,13			

Ensaio N° 9 - P82 N			
60	56	64	62
60	58	58	58
62	60	59	60
60	60	60	62
IE = 59,94			

Ensaio N° 10 - P82 L			
59	62	56	60
59	61	60	59
59	62	59	58
60	64	60	61
IE = 59,94			

Ensaio N° 11 - P84 L			
42	46	45	45
48	51	44	45
44	46	49	47
42	46	48	44
IE = 45,40			

Ensaio N° 12 - $V_{escada1}$ S			
46	44	48	48
44	52	44	46
47	48	46	50
48	52	56	53
IE = 47,36			

Ensaio N° 13 - $V_{escada2}$ O			
52	44	48	46
52	42	48	49
51	45	54	46
50	50	48	46
IE = 48,21			

Ensaio N° 14 - V16 L			
56	54	48	54
52	45	56	62
56	52	58	54
56	54	54	58
IE = 54,92			

Ensaio N° 15 - $V_{escada3}$ N			
47	50	48	56
49	58	50	60
44	55	50	54
56	45	55	54
IE = 52,00			

Ensaio N° 16 - $V_{escada4}$ O			
52	56	50	52
54	50	52	52
54	49	56	46
55	53	49	51
IE = 52,33			

Ensaio N° 17 - $V_{escada5}$ S			
50	62	60	54
58	60	56	60
53	58	56	57
57	56	58	53
IE = 57,20			

Ensaio N° 18 - P64 L			
59	60	58	59
54	56	60	54
51	56	54	52
56	58	54	59
IE = 56,25			

Ensaio N° 19 - P92 S			
57	49	52	56
53	50	55	52
48	54	51	58
54	54	58	55
IE = 53,87			

Ensaio N° 20 - P_{exp} S			
46	44	46	44
42	42	42	36
46	36	48	50
44	46	46	43
IE = 44,54			

Ensaio N° 21 - V15 O			
40	38	36	42
45	36	48	40
45	38	46	40
43	42	46	44
IE = 41,55			

Ensaio N° 22 - V3 S			
50	40	46	47
44	45	46	47
44	52	40	46
49	41	48	47
IE = 46,58			

Ensaio N° 23 - P85 L			
60	60	62	59
59	58	58	58
58	58	60	60
58	60	57	59
IE = 59,00			

Ensaio N° 24 - P87 O			
58	58	56	57
57	57	60	58
57	56	58	56
56	56	62	56
IE = 57,38			

Ensaio N° 25 - V14 L			
44	46	43	40
38	42	45	45
46	43	43	42
40	44	46	45
IE = 43,60			

Ensaio N° 26 - V8 O			
45	42	47	45
44	45	42	44
47	46	44	45
45	45	46	44
IE = 44,75			

Ensaio N° 27 - $V_{escada6}$ N			
58	54	57	54
52	50	58	56
55	57	55	48
58	56	55	55
IE = 55,71			

Ensaio N° 28 - P90 L			
54	52	47	50
49	52	48	58
48	54	47	48
49	50	49	48
IE = 49,67			

Figura 11: Quadro de resumo do ensaio esclerométrico 1

4.3. Determinação da resistência à compressão a partir do índice esclerométrico

Para a obtenção dos valores de resistência à compressão dos elementos estruturais ensaiados a partir dos índices esclerométricos medidos, foi utilizada a curva de correlação do aparelho, que é fornecida pelo fabricante do equipamento.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

Apresenta-se a seguir uma tabela resumo (Tabela 2), que relaciona os ensaios com os respectivos elementos estruturais, o ambiente em que se encontra e o valor da resistência à compressão obtida através da curva de correlação do aparelho.

Para melhor compreensão e análise dos resultados obtidos, optou-se por analisar separadamente os elementos estruturais de acordo com o ambiente em que está inserido, apresentando-se as Tabelas 3, 4, 5 e 6). A Tabela 4 possui uma linha em vermelho, pois tal valor de resistência à compressão encontrando foi desconsiderado para o cálculo da média das resistências, isso porque foi identificada uma camada de revestimento no elemento estrutural, o que poderia comprometer a veracidade do resultado.

Tabela 2 - Tabela resumo que relaciona a resistência à compressão obtida com os índices esclerométricos.

N° do ensaio	Elemento	Face ensaiada	Ambiente	Índice Esclerométrico	Resistência à compressão [MPa]
1	Pilar P96	Leste	Externo	49,9	61
2		Oeste		51,1	63
3	Pilar P95	Leste	Externo	58,4	75
4	Pilar P91	Leste	Externo	60,5	79
5	Pilar P78	Oeste	Externo	58,1	75
6	Pilar PDema	Leste	Externo	54,4	68
7	Pilar P39	Oeste	Externo	55,8	71
8	Pilar P80	Leste	Externo	57,1	73
9	Pilar P82	Norte	Externo	59,94	78
10		Leste		59,94	78
11	Pilar P84	Leste	Externo	45,4	53
12	Viga Vescada1	Sul	Interno	47,36	56
13	Viga Vescada2	Oeste	Interno	48,21	58
14	Viga V16	Leste	Interno	54,92	69
15	Viga Vescada3	Norte	Externo	52	64
16	Viga Vescada4	Oeste	Interno	52,33	65
17	Viga Vescada5	Sul	Interno	57,2	73
18	Pilar P64	Leste	Interno	56,25	72
19	Pilar P92	Sul	Interno	53,87	68
20	Pilar Pexp	Sul	Interno	44,54	51
21	Viga V15	Oeste	Externo	41,55	45
22	Viga V3	Sul	Externo	46,58	55
23	Pilar P85	Leste	Interno	59	75
24	Pilar P87	Oeste	Interno	57,38	73
25	Viga V14	Leste	Externo	43,6	49
26	Viga V8	Oeste	Externo	44,75	51
27	Viga Vescada6	Norte	Externo	55,71	71
28	Pilar P90	Leste	Interno	49,7	60

Ressalta-se que nas Tabelas apresentadas a seguir, há uma coluna que indica a existência de carbonatação superficial nos elementos, detectada nos ensaios esclerométricos.

Tabela 3 - Tabela resumo de pilares externos.

Tabela resumo de pilares EXTERNOS					
Nº do Ensaio colorimétrico	Nomenclatura Planta Baixa	Índice Esclerométrico	Resistência à compressão [MPa]	Carbonatação superficial	OBS
1	P96	49,9	61	-	antigo
2	P96	51,1	63	-	antigo
3	P95	58,4	75	-	antigo
4	P91	60,5	79	-	antigo
5	P78	58,1	75	0	antigo
6	Pdema	54,4	68	-	antigo
7	P39	55,8	71	sim	antigo protegido
8	P80	57,1	73	sim heterogêneo	antigo
9	P82	59,9	78	0	antigo
10	P82	59,9	78	-	antigo
11	P84	45,4	53	sim	antigo

Tabela 4 - Tabela resumo de pilares internos.

Tabela resumo de pilares INTERNOS					
Nº do Ensaio colorimétrico	Nomenclatura Planta Baixa	Índice Esclerométrico	Resistência à compressão [MPa]	Carbonatação superficial	OBS
18	P64	56,3	72	-	antigo
19	P96	53,9	68	-	antigo
20	P_{exp}	44,5	51	-	novo
23	P85	59,0	75	-	antigo
24	P87	57,4	75	-	antigo
28	P90	49,7	60	-	novo

Tabela 5 - Tabela resumo de vigas externas.

Tabela resumo de vigas EXTERNAS					
Nº do Ensaio colorimétrico	Nomenclatura Planta Baixa	Índice Esclerométrico	Resistência à compressão [MPa]	Carbonatação superficial	OBS
15	Vescada3	52,0	64	sim	novo
21	V15	41,6	45	-	antigo
22	V3	46,6	55	-	antigo
25	V14	43,6	49	-	antigo
26	V8	44,8	51	-	antigo
27	Vescada6	55,7	71	-	antigo

Tabela 6 - Tabela resumo de vigas internas.

Tabela resumo de vigas INTERNAS					
Nº do Ensaio colorimétrico	Nomenclatura Planta Baixa	Índice Esclerométrico	Resistência à compressão [MPa]	Carbonatação superficial	OBS
12	Vescada1	47,4	56	-	antigo
13	Vescada2	48,2	58	sim	antigo
14	V16	54,9	69	sim	antigo
16	Vescada4	52,3	65	0	novo
17	Vescada5	57,2	73	0	novo

As Tabelas de 3 a 6 resumem significativamente os resultados obtidos com os ensaios, tanto esclerométricos quanto colorimétricos, indicando a resistência à compressão obtida com a curva de correlação, se há ou não carbonatação (indicados com sim ou zero, visto que as células preenchidas com um traço não houve a realização do ensaio colorimétrico), o ambiente inserido e se o elemento ensaiado é antigo, proveniente da obra de 1982 ou foi construído na expansão do departamento, realizada em meados dos anos 2000. Observa-se que os valores de resistência à compressão obtidos a partir do índice esclerométrico foram extremamente altos para todos os elementos. Os valores para pilares externos variaram de 53 MPa a 79 MPa; para pilares internos, de 51 MPa a 75 MPa; para vigas internas, de 56 MPa a 73 MPa e para vigas externas variam de 45 a 71 MPa.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

4.4. Análise dos resultados considerando efeitos da carbonatação, idade do concreto e desvio padrão

Neste tópico, foi feita uma análise dos resultados obtidos levando em consideração os fatores que podem influenciar no resultado dos ensaios esclerométricos. Os fatores principais considerados são a carbonatação e a idade avançada dos elementos ensaiados, além do desvio padrão que deve ser considerado ao comparar com o f_{ck} de projeto, devido às condições de produção do concreto. Devido ao efeito da carbonatação superficial dos elementos, tendo como base a NBR 7584:2012, elementos carbonatados podem ter resultados de esclerometria superestimados em mais de 50% do seu real valor. No presente trabalho, o valor considerado para a obtenção dos valores corretos de resistência do concreto foi de 50%, e os novos valores calculados podem ser vistos nas tabelas a seguir, também foi considerado, para efeito de análise, que todos os elementos estruturais ensaiados possuíam alguma influência em sua dureza superficial, devido o fenômeno da carbonatação. Para considerar o aumento da resistência do concreto pelo efeito da idade, foi utilizada a equação 1, descrita na revisão bibliográfica. Os cálculos que serão feitos a seguir, para a determinação da resistência à compressão média do concreto na idade atual, será considerado o CP-II, cimento que é comumente utilizado na região de São Carlos.

Utilizando a equação 1, considerando o cimento CP-II com valor s de 0,25, o j, em dias, equivalente a 33 anos (12045 dias), o $f_{c,28}$ como 15 MPa, obtém-se o valor de $f_{c,j}$ equivalente a 19,03 MPa. Assim, o aumento de resistência obtido ao longo dos 33 anos de construção da estrutura foi de aproximadamente 27%.

Outro fator a ser considerado para a presente análise é o desvio padrão existente devido às condições de preparo do concreto. Para efeito de análise deste relatório, considerou-se a condição de preparo B, segundo a NBR 12655:2015, que é aplicável para concretos de classe C10 até C25, e o desvio padrão a ser considerado é de 5,5 MPa. Levando em consideração o efeito da carbonatação superficial e também a idade avançada da edificação, obteve-se uma nova tabela, com novos valores de resistência à compressão para cada elemento estrutural ensaiado. A Tabela possui uma linha em vermelho, em que novamente este valor foi descartado.

Ressalta-se os coeficientes de correção utilizados para a obtenção dos valores de resistência à compressão nas Tabelas de 7 a 10, sendo de 50% para o efeito da carbonatação superficial e 27% para o aumento de resistência devido a idade do concreto.

Tabela 7 - Tabela resumo com os pilares externos e suas respectivas resistências à compressão considerando os efeitos de carbonatação e idade do concreto.

Tabela resumo de pilares EXTERNOS								
Nº do Ensaio colorimétrico	Nomenclatura Planta Baixa	Índice Esclerométrico	Resistência à compressão [MPa]	Coeficiente de correção devido à carbonatação superficial	Resitência à compressão corrigida devido à carbonatação [MPa]	Coeficiente de correção devido à idade do concreto	Resistência à compressão corrigida devido à idade [MPa]	Resultado devido a junção dos dois efeitos [MPa]
1	P96	49,9	61	50%	31	27%	45	22
2	P96	51,1	63		32		46	23
3	P95	58,4	75		38		55	27
4	P91	60,5	79		40		58	29
5	P78	58,1	75		38		55	27
6	Pdema	54,4	68		34		50	25
7	P39	55,8	71		36		52	26
8	P80	57,1	73		37		53	27
9	P82	59,9	78		39		57	28
10	P82	59,9	78		39		57	28
11	P84	45,4	53		27		39	19

Tabela 8 - Tabela resumo com os pilares internos e suas respectivas resistências à compressão considerando os efeitos de carbonatação e idade do concreto.

Tabela resumo de pilares INTERNOS								
Nº do Ensaio colorimétrico	Nomenclatura Planta Baixa	Índice Esclerométrico	Resistência à compressão [MPa]	Coeficiente de correção devido à carbonatação superficial	Resitência à compressão corrigida devido à carbonatação [MPa]	Coeficiente de correção devido à idade do concreto	Resistência à compressão corrigida devido à idade [MPa]	Resultado devido a junção dos dois efeitos [MPa]
18	P64	56,3	72	50%	36	27%	53	26
19	P96	53,9	68		34		50	25
20	P_{exp}	44,5	51		25,5		37	19
23	P85	59,0	75		37,5		55	27
24	P87	57,4	75		37,5		55	27
28	P90	49,7	60		30		44	22

Tabela 9 - Tabela resumo com as vigas externas e suas respectivas resistências à compressão considerando os efeitos de carbonatação e idade do concreto.

Tabela resumo de vigas EXTERNAS								
Nº do Ensaio colorimétrico	Nomenclatura Planta Baixa	Índice Esclerométrico	Resistência à compressão [MPa]	Coeficiente de correção devido à carbonatação superficial	Resitência à compressão corrigida devido à carbonatação [MPa]	Coeficiente de correção devido à idade do concreto	Resistência à compressão corrigida devido à idade [MPa]	Resultado devido a junção dos dois efeitos [MPa]
15	Vescada3	52,0	64	50%	32	27%	47	23
21	V15	41,6	45		22,5		33	16
22	V3	46,6	55		27,5		40	20
25	V14	43,6	49		24,5		36	18
26	V8	44,8	51		25,5		37	19
27	Vescada6	55,7	71		35,5		52	26

Tabela 10 - Tabela resumo com as vigas internas e suas respectivas resistências à compressão considerando os efeitos de carbonatação e idade do concreto.

Tabela resumo de vigas INTERNAS								
Nº do Ensaio colorimétrico	Nomenclatura Planta Baixa	Índice Esclerométrico	Resistência à compressão [MPa]	Coeficiente de correção devido à carbonatação superficial	Resitência à compressão corrigida devido à carbonatação [MPa]	Coeficiente de correção devido à idade do concreto	Resistência à compressão corrigida devido à idade [MPa]	Resultado devido a junção dos dois efeitos [MPa]
12	Vescada1	47,4	56	50%	28	27%	41	20
13	Vescada2	48,2	58		29		42	21
14	V16	54,9	69		34,5		50	25
16	Vescada4	52,3	65		32,5		47	24
17	Vescada5	57,2	73		36,5		53	27

As Tabelas de 8 a 11 resumem significativamente os resultados obtidos com os ensaios esclerométricos, relacionando o tipo de elemento estrutural ensaiado, sua localização quanto ambiente interno ou externo, sua respectiva nomenclatura relacionada com a planta baixa e indica a resistência à compressão obtida com a curva de correlação. Observa-se que os valores de resistência à compressão obtidos a partir do índice esclerométrico foram extremamente altos para todos os elementos, e para que isso fosse corrigido permitindo uma melhor análise dos resultados, foram utilizados coeficientes de correção devido à carbonatação superficial dos elementos e também pela idade avançada do concreto ensaiado.

Os valores para pilares externos considerando os coeficientes de correção variaram de 19 MPa a 29 MPa; para pilares internos, de 22 MPa a 27 MPa; para vigas internas, de 20 MPa a 27 MPa e para vigas externas variam de 16 a 26 MPa. Conclui-se dos ensaios, que os índices esclerométricos obtidos foram em geral bastante elevados, obtendo valores de resistência à compressão extremamente altos. Porém, alguns fatores devem ser considerados na análise dos resultados, como a idade do concreto ensaiado e a presença da carbonatação, ao menos superficial, também devido à idade elevada da estrutura. Assim, tais coeficientes de correção foram implementados aos resultados, permitindo uma melhor análise dos mesmos. Vale ressaltar, que apesar da existência de tais coeficientes de correção, para que os resultados fossem ainda mais precisos, seria necessária a criação das curvas de correlação para a utilização do esclerômetro, sendo essa específica para os materiais constituintes utilizados na confecção dos concretos. Com os resultados da média da

resistência à compressão dos elementos ensaiados, pode-se ainda levar em conta o desvio padrão de 5,5 MPa, devido às condições de preparo do concreto, segundo a NBR 12655:2015, obtendo os seguintes resultados.

Tabela 11 - Média da resistência à compressão considerando o desvio padrão.

Elemento	Ambiente	Média da resistência à compressão[MPa]	Desvio padrão [MPa]	Menor valor [MPa]	Maior valor [MPa]
Pilar	Interno	25,4	5,5	19,9	30,9
Pilar	Externo	25,5		20,0	31,0
Viga	Interno	20,3		14,8	25,8
Viga	Externo	23,4		17,9	28,9

Como uma análise geral dos resultados, esperava-se que os elementos externos tivessem maior resistência à compressão, devido maior influência do efeito da carbonatação na dureza superficial, o que ocorreu levando em consideração os resultados das vigas internas e externas, observados na Tabela em que média da resistência à compressão das vigas externas é superior ao das vigas internas. Quanto ao resultado dos pilares, houve pequena diferença de resultado, comparando a média dos pilares internos e externos, podendo considerar suas médias praticamente iguais, contrariando as expectativas. Com a consideração de tais coeficientes de correção e também do desvio padrão devido às condições de produção do concreto, obtiveram-se resultados mais próximos da resistência à compressão de projeto de 15 MPa.

5. CONCLUSÕES

Após realização dos ensaios e análise dos resultados obtidos, conclui-se que, apesar da idade da edificação, que é mais de 30 anos, seus elementos estruturais, em geral, apresentam bom estado de conservação. Quanto aos ensaios esclerométricos, pode-se concluir que os valores de resistência à compressão encontrados com a curva de correlação do equipamento, Esclerômetro de Schmidt, são extremamente altos, visto que a resistência à compressão característica de projeto é de 15 MPa para todos os elementos de concreto armado.

Os valores encontrados para os índices esclerométricos para os pilares externos variaram de 45,4 a 60,5, para os pilares internos variaram entre 44,5 e 59,0, para as vigas externas variaram de 41,6 a 55,7 e para as vigas internas variaram de 47,4 a 54,9.

Os valores encontrados de resistência à compressão para os pilares externos variou de 53 MPa até 79 MPa, para os pilares internos variou de 51 MPa até 75 MPa, para as vigas externas teve variação entre 45 MPa e 71 MPa e para as vigas internas variou entre 56 MPa e 73 MPa.

Com a consideração dos coeficientes de correção que estão diretamente ligados com a idade avançada da edificação e também a presença da carbonatação superficial dos elementos, os valores encontrados ficaram mais próximos da resistência de projeto. Para os pilares externos variou de 19 MPa até 29 MPa, para os pilares internos variou de 22 MPa até 27 MPa, para as vigas externas teve variação entre 16 MPa e 26 MPa e para as vigas internas variou entre 20 MPa e 27 MPa. Considerando-se ainda o desvio padrão de 5,5 MPa em relação à média dos valores encontrados, consegue-se um resultado muito próximo do especificado em projeto, concluindo-se que a técnica de esclerometria pode ser utilizada na avaliação superficial de estruturas de concreto. Destaca-se que a grande influência do efeito da carbonatação e também do ganho de resistência com a idade da estrutura de concreto.

Em relação aos ensaios colorimétricos, não houve constância nos resultados, havendo elementos carbonatados em ambientes tanto internos quanto externos. Ainda assim, considerou-se que o concreto dos elementos da edificação estavam carbonatados, influenciando diretamente nos resultados de esclerometria.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Silva, F. G. – *Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos.* Tese (Doutorado) em Ciência e Engenharia de Materiais, USP, São Carlos, 2006.

[2] Andrade, M. – *Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras.* São Paulo: PINI, 1992.
[3] Evangelista, A. C. J. – *Avaliação da Resistência do Concreto Usando Diferentes Ensaios Não* Destrutivos *Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras.* Rio de Janeiro, 2002, 219 p.
[4] Silva Filho, L. C. P., *et al. – Estudos de caso sobre avaliação de estruturas de concreto através da utilização de ensaios não destrutivos.* Revista ALCONPAT, Volume 1, Número 3, p. 188-200, 2011.
[5] Pereira, E., Medeiros, M.H.F. – Ensaio de "Pull Off" para avaliar a resistência à compressão do concreto: uma alternativa aos ensaios normalizados no Brasil. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, Volume 5, Número 6, p. 757-780, ISSN 1983-4195, 2012.
[6] Malhotra, V. M. - "In Situ/ Nondestructive Testing of Concrete – A Global Review", *In Situ/Nondestructive Testing of Concrete*, Special Publication SP-82, American Concrete Institute, Detroit, 1984, pp. 1-16.
[7] Bungey, J. H. *The Testing of Concrete in Structures*, 2 Ed., London, 1989, Surrey University Press.
[8] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). – *Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão – Método de ensaio*. NBR 7584. Rio de Janeiro, 2012.
[9] American Concrete Institute (ACI). – *Nondestructive Test for Evaluation of Concrete in Structures.* ACI 228.2R-2-98. 1998 (Reapproved 2004).
[10] British Standard Institution, BS 1881: Part 201. – *Guide to the use of non-destructive methods of test for hardened concrete.* London, 1986.
[11] British Standard Institution, BS 1881: Part 202. – *Recommendations for surface hardness testing by rebound hammer.* London, 1986.
[12] Neville, A. M., Brooks, J. J. - *Tecnologia do Concreto*, 2ª Edição, Porto Alegre, 2013, p. 117-118.
[13] Silva Filho, L. C. P., Helene, P. – *Concreto: Ciência e Tecnologia.* São Paulo, 2011, cap.32, p. 1129-1174.
[14] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). – *Projeto de estruturas de concreto – Procedimento.* NBR 6118. Rio de Janeiro, 2014.
[15] Figueiredo, E. P. – "Efeitos da carbonatação e de cloretos no concreto". *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*, v. 2, cap. 27, p 829-855. São Paulo: IBRACON, 2005
[16] European Committee for Standardization (CEN), EN 13295 - *Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test methods – Determination of resistance to carbonation.* Bruxelas, 2004.
[17] International Organization for Standardization. ISO 1920:2015 – *Testing of concrete – Part 12: Determination of carbonation resistance of concrete – Accelerated carbonation method*. Genebra, 2015.
[18] BAROGHEL-BOUNY, V., *et al. – "A durabilidade das armaduras e do concreto de cobrimento". Durabilidade do Concreto – Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente.* Volume 1, cap. 9, p. 257-326. São Paulo: IBRACON, 2014.