

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MÉTODOS DE ANÁLISE DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO.

COMPARATIVE STUDY BETWEEN ANALYSIS METHODS OF THE CARBONATION FRONT IN CONCRETE STRUCTURES.

SARAIVA, Rafael Ribeiro

Acadêmico de Engenharia Civil, UnirG – Universidade de Gurupi
Rafakauan14@gmail.com

SANTOS, Marlon Silva

Acadêmico de Engenharia Civil, UnirG – Universidade de Gurupi
marlonssantos@unirg.edu.br

Barros, Willian Roque

Acadêmico de Engenharia Civil, UnirG – Universidade de Gurupi
willianrbarros@unirg.edu.br

Fagundes, Fabiano

Engenheiro civil, UnirG – Universidade de Gurupi
fabianofagundes@unirg.edu.br

RESUMO

Sendo uma das manifestações patológicas mais presentes em estruturas de concreto armado, a carbonatação pode causar inúmeros problemas nas edificações, principalmente a corrosão das armaduras. Nessa dinâmica, o presente artigo tem por finalidade replicar um método hipotético dedutível de ensaio de frente de carbonatação em estruturas de concreto armado, baseado num modelo italiano (Carbontest), tendo como objetivo descritivo exploratório, pois o propósito principal foi realizar a comparação da profundidade da frente de carbonatação entre o modelo “italiano” com o método corrente destrutível utilizado no Brasil, de modo que se apresenta inicialmente os meios teóricos e práticos para a obtenção dos dados para análise. Para a execução do modelo proposto, foi produzido um protótipo para a coleta da amostra e, a partir dessa amostra, fez-se a determinação da frente de carbonatação pelo indicador de pH (potencial hidrogeniônico): fenolftaleína, que propiciou, em comparação ao método convencional, uma variação média de 2,7 %, demonstrando ser aceitável a aplicação do método de menor impacto, pelo fato de propiciar menor efeito destrutível nas estruturas, facilidade de reparação da perfuração e a agilidade do ensaio.

Palavras-chave: Carbonatação. Estruturas de concreto. Ensaio da frente de carbonatação.

ABSTRACT

Being one of the most common pathological manifestations in reinforced concrete structures, carbonation can cause numerous problems in buildings, especially reinforcement corrosion. In this dynamic, the purpose of this article is to replicate a hypothetical deducible method of testing the carbonation front in reinforced concrete structures, based on an Italian

model (Carbontest), having as an exploratory descriptive objective, since the main purpose was to compare the depth of the carbonation front between the “Italian” model and the current destructible method used in Brazil, so that the theoretical and practical means for obtaining data for analysis are initially presented. For the execution of the proposed model, a prototype was produced for sample collection and, from this sample, the carbonation front was determined by the pH indicator (hydrogenion potential): phenolphthalein, which provided, in comparison to the method conventional, an average variation of 2.7%, demonstrating that the application of the method of less impact is acceptable, due to the fact that it provides less destructible effect on the structures, ease of repair of the perforation and agility of the test.

Keyword:Carbonation. Structure Concrete. Carbonation front test.

1. INTRODUÇÃO

A NBR 12655/2022 (Concreto de Cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento), descreve o concreto como material formado pela mistura homogênea de cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água, podendo ter ou não a incorporação de componentes minoritários – como os aditivos químicos, por exemplo. Após a sua cura, o mesmo pode ser destinado a confeccionar uma peça com características e propriedades estruturais usadas para compor elementos de uma edificação, como vigas, lajes, pilares e pavimentos, por exemplo.

Ainda que o concreto possa ser considerado um material que não tem uma vida útil pré-estabelecida, Paulo Hellene (1992) corrobora com a ideia, desde que seja realizada as devidas manutenções, evitando possíveis problemas estruturais, mesmo assim, existe a possibilidade de ocorrerem manifestações patológicas em diferentes estágios e intensidades, colocando em risco não apenas o aspecto estético de uma edificação, como também podendo acarretar na redução da capacidade de resistência de uma edificação, de forma que pode resultar, na pior das hipóteses, no colapso parcial ou total da estrutura.

Ainda conforme o autor, levando em consideração o atual conhecimento e desenvolvimento de processos e de aparelhos que permitem a observação de manifestações patológicas em estruturas, assim como mecanismos destrutivos que agem sobre as mesmas, pode-se diagnosticar com sucesso a manifestação patológica atuante em uma determinada estrutura e, além disso, na maioria das vezes, existem soluções adequadas e viáveis, visando solucionar tal incômodo, de modo que não comprometa a vida útil da edificação.

Segundo registros históricos, a humanidade utiliza o concreto há mais de 20 séculos. Desde então, o homem vem buscando formas de melhorar esse material e, para isso, utiliza-se de ensaios que são regidos por associações técnicas especializadas. Para se ter uma ideia da importância desse material, Mehta (2016) cita que o concreto é o material mais utilizado no mundo depois da água.

Sendo comum em estruturas de concreto armado, a carbonatação, uma reação físico-química em decorrência do processo de lixiviação (fenômeno que descreve as consequências de uma estrutura de concreto quando submetida a ação constante da água), entre os gases de dióxido de carbono (CO_2), o qual se encontra na atmosfera e os compostos cimentícios, principalmente o hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ presentes na pasta de cimento.

Para entender as suas consequências, antes é necessário entender o processo de formação do fenômeno de carbonatação. Para isso, deve-se partir do pressuposto de que o concreto é um material cerâmico, poroso, onde o dióxido de carbono (CO_2) penetra com certa facilidade ao interior do concreto, interagindo com o hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$, dando origem a formação de carbonatos.

Bary e Sellier (2004), explica que a carbonatação ocorre, principalmente devido aos íons cálcio, os quais são contidos na solução aquosa no interior dos poros, que estão em equilíbrio com os produtos de hidratação do cimento. Sabe-se que o concreto apresenta um valor pH inicial entre 11,5 a 13,5 o que o

torna um material altamente alcalino. Entretanto, devido a reação provocada pelo CO₂ com os meios álcalis do material cimentício, tais como hidróxidos de cálcio, sódio e potássio, formam-se carbonatos.

A carbonatação gera duas grandes consequências graves para o estado endurecido do concreto, sendo a primeira: a diminuição do Potencial Hidrogênico (pH) do concreto e a segunda é o avanço da frente de carbonatação, sendo definida como uma zona muito estreita, localizada no concreto, separando dois lados, no qual um deles apresenta um pH elevado, enquanto o outro apresenta um pH baixo e, por consequência, ao alcançar a armadura, leva a quebra da película passivadora do aço no concreto armado deixando-o exposto a corrosão eletroquímica generalizada.

Como consequência, também é comprovado que tal fenômeno gera microfissuras no interior do concreto, provocadas pelo surgimento de novos produtos expansivos, ocasionando no aumento de volume do elemento estrutural.

Sintetizando, a carbonatação em si, não causa a deterioração do concreto, mas provoca algumas alterações no mesmo, como, por exemplo, a redução da permeabilidade e da alcalinidade e, quando se trata de concreto armado, provoca a corrosão das armaduras (NEVILLE, 2016).

A profundidade da carbonatação do concreto é aumentada gradativamente, de acordo, com o tempo, tendo o seu desenvolvimento de acordo com seus parâmetros específicos (VESIKARI, 1988).

Os ensaios de determinação da frente de carbonatação podem ser feitos por meio de pequenas amostras retiradas das estruturas de concreto prontas, ou podendo ser realizado no próprio local, fazendo-se uso de solução contendo fenolftaleína (indicador de pH) em ambos os casos.

Mediante a este contexto, apresenta-se uma análise referente à frente de carbonatação em elementos de concreto armado, visando replicar e comparar um método de menor impacto às estruturas com o método convencional (destrutível). Convencionalmente, para isso, utiliza-se uma solução de fenolftaleína (1 g da mesma em 50 ml de álcool etílico, no qual ambas serão diluídas em água destilada, de modo que complete 100 ml).

Para o ensaio pelo método convencional (Método I), é necessário romper um corpo de prova de concreto, efetuar a sua limpeza e aspergir a solução. A norma DIN EM 14630 (2006) recomenda que a aspersão da solução de fenolftaleína seja feita perpendicularmente à área fraturada, tornando o concreto saturado. Vale ressaltar que se deve evitar o escorrimento dessa solução na superfície do corpo de prova.

O Método II apresentado neste estudo, apresenta a principal vantagem de não ser destrutivo, pois não precisa da extração de um corpo de prova. O método é desenvolvido a partir de uma pequena perfuração com uma broca na estrutura onde o material retirado (pó) é coletado, e a partir desse ponto é feito o ensaio no próprio local com o uso da solução de fenolftaleína, aplicada por um conta gotas.

Andrade (1992) redige que, a partir do uso da solução de fenolftaleína, pode-se detectar no concreto a região carbonatada, a qual pode ser definida como aquela que não apresenta alteração de coloração, apresentando um pH inferior a 8,3. Consequentemente, a região que não apresenta carbonatação, ou seja, aquela que se manifesta entre as cores rosa a vermelho-carmim, detém um potencial

hidrogeniônico acima de 9,5

Figura 1: Corpo de prova apresentando frente carbonatada.



Fonte: Engenharia & Construção, 2023.

2. MATERIAISEMÉTODOS

Para a determinação da frente de carbonatação propôs-se a realização dos ensaios em quatro obras distintas, todas contendo estruturas em concreto armado. É válido ressaltar que houve cautela na escolha da localização das edificações para a realização dos ensaios, no qual estas foram selecionadas de forma que não fossem próximas umas das outras, permitindo uma análise dinâmica da possível propagação da carbonatação.

Figura 2: Imagem satélite da área urbana de Gurupi – TO com a indicação dos locais onde se realizaram os ensaios de frente de carbonatação.



Fonte: Google Maps Airbus Landsat (2023).

Para a determinação da frente de carbonatação, foram realizados ensaios do tipo *in loco* em estruturas de concreto armado de quatro obras distintas em diferentes bairros do município de Gurupi – TO, no qual, em cada uma, foram realizados 4 (quatro) conjuntos de ensaios por dois tipos de métodos diferentes, de forma que totalizaram 32 ensaios.

Tabela 1: Seções dos pilares de concreto que foram ensaiados.

ID	Descrição do Local	Seção do Pilar (mm)
1	1° Obra	120x300
		120x300
		120x300
		120x300
2	2° Obra	90x240
		90x240
		90x240
		90x240
3	3° Obra	90x260
		90x260
		90x260
		90x260
4	4° Obra	120x300
		120x300
		120x300
		120x300

Fonte: Autoria própria (2023).

Como referência, utilizou-se das recomendações da NBR 6118:2014 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento, que especifica em sua Tabela 6.1 a Classe de Agressividade Ambiental – CAA, deste modo, as obras em questão estão dentro da CAA II – Moderada. A mesma recomenda o cobrimento mínimo de 30mm, se tratando de pilares, para o ambiente urbano.

Para a realização dos ensaios, utilizou-se os seguintes equipamentos:

- ✓ Coletor de resíduo da estrutura (protótipo desenvolvido para fazer a coleta do pó extraído da estrutura);
- ✓ Proveta de coleta (diâmetro interno 10 mm e comprimento de 100 mm);
- ✓ Furadeira de impacto tipo martetele 800 w;
- ✓ Paquímetro (precisão de 0,05 mm);
- ✓ Broca 6mm;
- ✓ Marreta 1 kg;
- ✓ Talhadeira de aço;
- ✓ Trincha 25 mm;
- ✓ Solução de fenolftaleína;
- ✓ Conta gotas.

Figura 3: Materiais e equipamentos utilizados para os ensaios.



Fonte: Autoria própria (2023).

Os métodos utilizados nesse presente trabalho foram:

O primeiro método, aqui neste artigo denominado Método I, é o mais utilizado no Brasil, qualifica-se como destrutivo, no qual o ensaio consiste nas seguintes etapas: Primeiro é retirado uma parte da estrutura com a quebra do concreto próximo a aresta, em ângulos de 90° (ortogonais) em duas direções de cobertura, de forma que se expõem a armadura. Em seguida, a peça é limpa com o auxílio de uma trincha ou pincel (figura 2). Logo após é aplicada a solução de fenolftaleína e mensurada a frente de carbonatação. Por último, é feito o reparo com grout no local que foi retirado o concreto.

Figura 4: Exposição da armadura em um pilar de concreto armado para ensaio pelo Método I



Fonte: Autoria própria (2022).

O segundo método, denominado aqui de Método II, é um ensaio de menor impacto, pois corresponde a uma perfuração da espessura do diâmetro de uma broca de 6mm, com profundidade pré estabelecida de 100 mm. A perfuração foi realizada com o auxílio de uma furadeira martetele comum adaptada com um coletor tipo proveta. Sequencialmente foi realizada a aplicação da solução de fenolftaleína na amostra coletada e feita a mensuração da frente de carbonatação, por último, fez-se o preenchimento do furo com grout para que garanta o reparo adequado do elemento

Figura 5: Realização da perfuração em uma estrutura de concreto utilizando o Método II de ensaio.



Fonte: Autoria própria (2023).

3. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A tabela 2 apresenta o resultado dos ensaios de frente de carbonatação:

ID	Descrição do Local	Amostra	Seção do Pilar (mm)	Frente de Carbonatação – Método I (mm)	Frente de Carbonatação – Método II (mm)
1	Obra 1	P1	120 x 300	15,1	16,4
		P2	120 x 300	18,0	18,1
		P3	120 x 300	34,0	35,0
		P4	120 x 300	22,0	22,0
2	Obra 2	P1	90 x 240	3,0	3,0
		P2	90 x 240	1,0	1,0
		P3	90 x 240	2,0	1,8
		P4	90 x 240	3,7	4,0
3	Obra 3	P1	90 x 260	3,8	4,0
		P2	90 x 260	5,0	4,0
		P3	90 x 260	13,0	12,0
		P4	90 x 260	9,0	10,0
4	Obra 4	P1	120 x 300	29,5	32,0
		P2	120 x 300	25,0	26,0
		P3	120 x 300	29,0	28,0
		P4	120 x 300	19,0	21,0

Fonte: Autoria própria (2023).

Em cada uma das quatro obras, foi realizado o ensaio de frente de carbonatação em quatro pilares distintos das respectivas edificações, em todos eles, para o Método II, foram retiradas amostras iguais pela perfuração de 100 mm alocados na proveta, a partir de então aplicou-se a solução de fnoftaleína e mensurou-se a frente de carbonatação.

4.1. Primeira obra

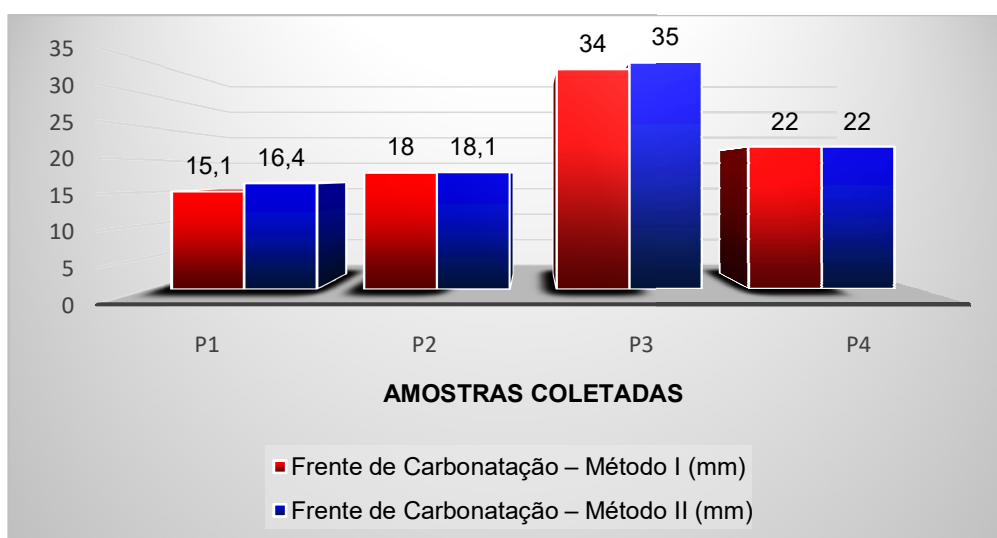
No primeiro pilar, pelo Método II, foi mensurado a frente de carbonatação de 16,4 mm. Posteriormente, foi realizado o ensaio pelo Método I e medido a frente de carbonatação de 15,1 mm.

No segundo pilar, pelo Método II, foi mensurado a frente de carbonatação de 18,1 mm. Posteriormente, foi realizado o ensaio pelo Método I e medido a frente de carbonatação de 15,0 mm.

No terceiro pilar, pelo Método II, foi mensurado a frente de carbonatação de 35,0 mm. Posteriormente, foi realizado o ensaio pelo Método I e medido a frente de carbonatação de 34,0 mm.

No quarto pilar, pelo Método II, foi mensurado a frente de carbonatação de 35,0 mm. Posteriormente, foi realizado o ensaio pelo Método I e medido a frente de carbonatação de 34,0 mm.

Gráfico 1: Comparação da frente de carbonatação entre os Métodos I e II da obra 1.



Fonte: Autoria própria (2023).

4.2. Segunda obra

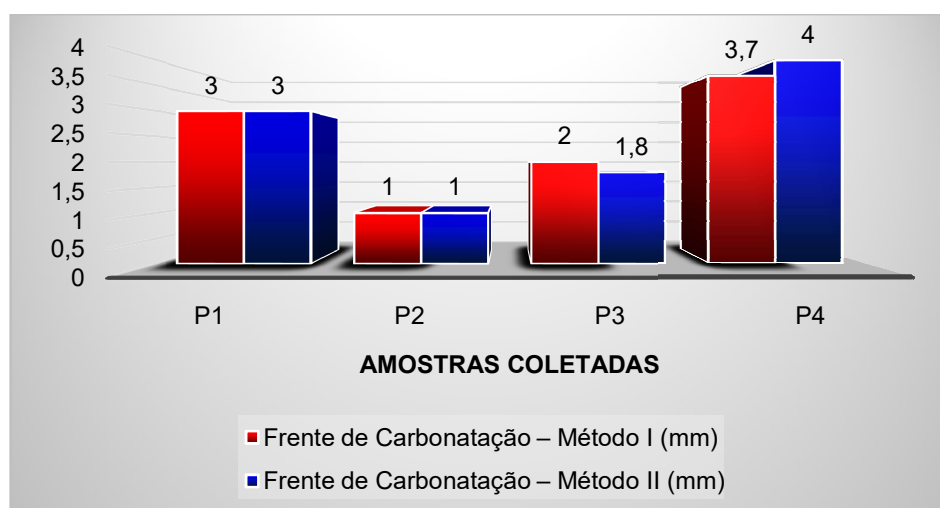
No primeiro pilar, pelo Método II, foi mensurado a frente de carbonatação de 3,0 mm. Posteriormente, foi realizado o ensaio pelo Método I e medido a frente de carbonatação de 3,0 mm.

No segundo pilar, pelo Método II, foi mensurado a frente de carbonatação de 1,0 mm. Posteriormente, foi realizado o ensaio pelo Método I e medido a frente de carbonatação de 1,0 mm.

No terceiro pilar, pelo Método II, foi mensurado a frente de carbonatação de 1,8 mm. Posteriormente, foi realizado o ensaio pelo Método I e medido a frente de carbonatação de 2,0 mm.

No quarto pilar, pelo Método II, foi mensurado a frente de carbonatação de 4,0 mm. Posteriormente, foi realizado o ensaio pelo Método I e medido a frente de carbonatação de 3,7 mm.

Gráfico 2: Comparação da frente de carbonatação entre os Métodos I e II da obra 2.



Fonte: Autoria própria (2023).

4.3. Terceira obra

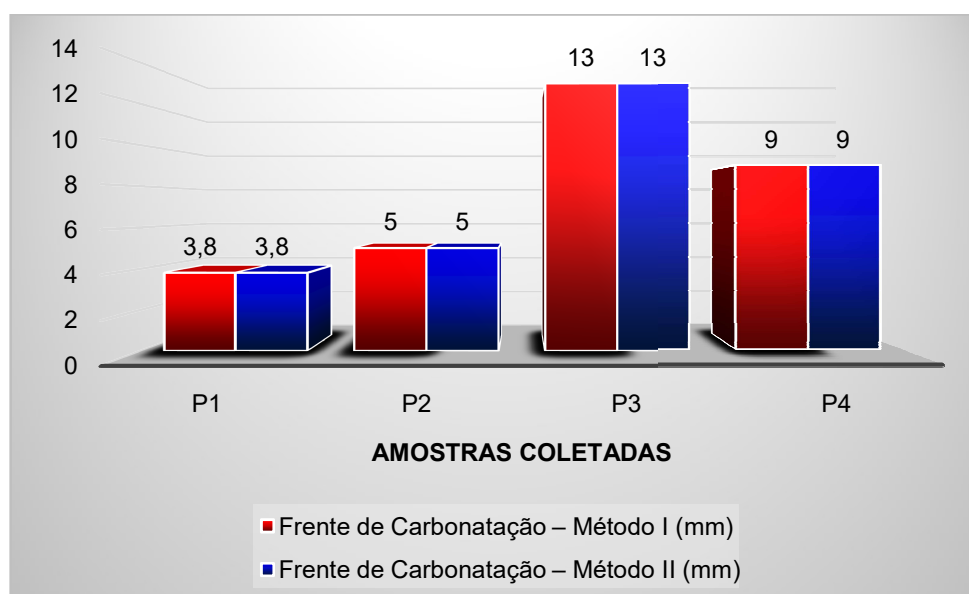
No primeiro pilar, pelo Método II, foi mensurado a frente de carbonatação de 4,0 mm. Posteriormente, foi realizado o ensaio pelo Método I e medido a frente de carbonatação de 3,8 mm.

No segundo pilar, pelo Método II, foi mensurado a frente de carbonatação de 4,0 mm. Posteriormente, foi realizado o ensaio pelo Método I e medido a frente de carbonatação de 5,0 mm.

No terceiro pilar, pelo Método II, foi mensurado a frente de carbonatação de 12,0 mm. Posteriormente, foi realizado o ensaio pelo Método I e medido a frente de carbonatação de 13,0 mm.

No quarto pilar, pelo Método II, foi mensurado a frente de carbonatação de 10,1 mm. Posteriormente, foi realizado o ensaio pelo Método I e medido a frente de carbonatação de 9,0 mm.

Gráfico 3: Comparação da frente de carbonatação entre os Métodos I e II da obra 3.



Fonte: Autoria própria (2023).

4.4. Quarta obra

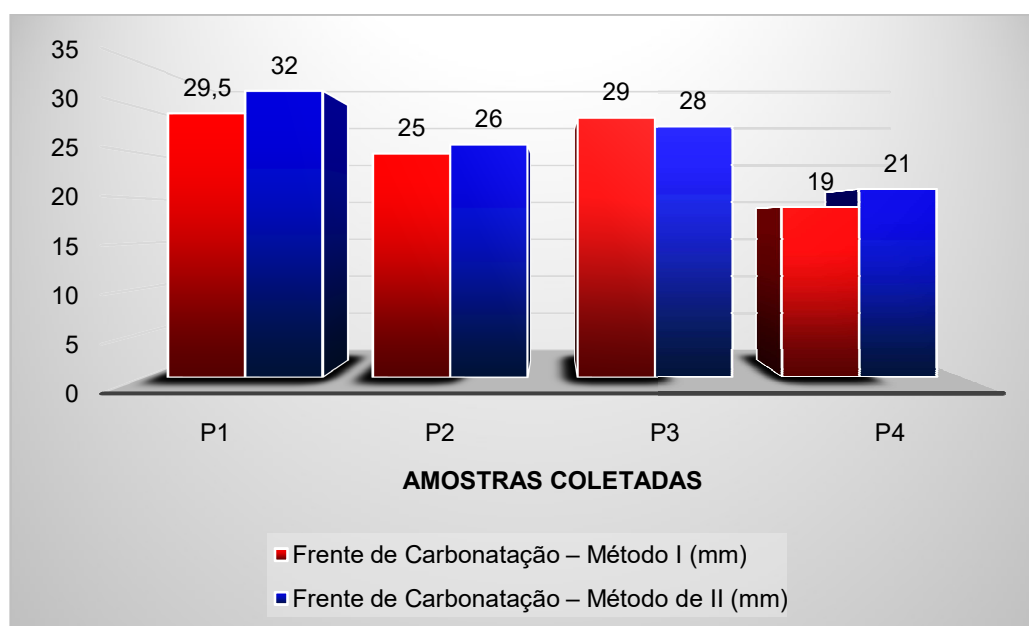
No primeiro pilar, pelo Método II, foi mensurado a frente de carbonatação de 32,0 mm. Posteriormente, foi realizado o ensaio pelo Método I e medido a frente de carbonatação de 29,5 mm.

No segundo pilar, pelo Método II, foi mensurado a frente de carbonatação de 26,0 mm. Posteriormente, foi realizado o ensaio pelo Método I e medido a frente de carbonatação de 25,0 mm.

No terceiro pilar, pelo Método II, foi mensurado a frente de carbonatação de 28,0 mm. Posteriormente, foi realizado o ensaio pelo Método I e medido a frente de carbonatação de 29,0 mm.

No quarto pilar, pelo Método II, foi mensurado a frente de carbonatação de 21,0 mm. Posteriormente, foi realizado o ensaio pelo Método I e medido a frente de carbonatação de 19,0 mm.

Gráfico 4: Comparação da frente de carbonatação entre os Métodos I e II da obra 4.



Fonte: Autoria própria (2023).

Para se obter a variação percentual dos ensaios de frente de carbonatação entre os dois métodos, aplicou-se a seguinte equação 1:

$$V = \left(\frac{\text{Método I} - \text{Método II}}{\text{Método I}} \right) \times 100$$

Onde:

V = Variação percentual (%);

Método I = Método destrutivo;

Método II = Método de mínimo impacto.

Portanto, ao realizar a aplicação dos valores da primeira obra, obteve-se uma variação de 2,69 %. Na segunda obra a variação observada foi de 1,03 %. Os valores da terceira obra, apresentaram variação de 2,60 %. Por fim, a quarta obra apresentou uma variação de 4,40 %.

4. CONCLUSÕES

O objetivo geral desse artigo científico foi realizar uma comparação entre dois métodos do ensaio de carbonatação (método destrutivo e método de mínimo impacto), no qual os autores visaram observar quais destes seria o mais prático e de maior assertividade.

Na aplicação prática, o Método II se apresentou bem mais simples em sua execução, não necessitando de número demasiado de ferramentas, assim como esforços físicos na sua realização. A produção de entulho foi praticamente nula, ficando restrita a um número ínfimo de pó de concreto. O reparo foi imediato, com a injeção de micro concreto, por seringa e/ou espátula e a depender da estrutura, podendo ser feito com a injeção de resina poliuretânica.

Ficou evidenciado que para a utilização em estruturas de concreto, em observação aos resultados das variações entre os dois métodos, que apontaram um percentual médio de 2,7 %, demonstrando dessa forma ser aceitável a aplicação do Método I, por apresentar essa pequena margem de variação entre métodos e por propiciar um menor efeito destrutível na estrutura, maior facilidade em reparar, na estrutura, uma perfuração feita por uma broca, assim como a agilidade do ensaio como um todo.

REFERÊNCIAS

BERENGUER, ROMILDO. **RAA em estrutura de concreto armado de uma edificação residencial. CONCRETO E CONSTRUÇÕES**, 17 ago. 2022. Disponível em: http://ibracon.org.br/Site_revista/Concreto_Construcoes/ebook/edicao83/files/assets/basic-html/page1.html. Acesso em: 21 mar. 2022.

HELENE, Paulo R. L. **Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini. Acesso em: 27 jan. 2023.

FAGUNDES, Fabiano. **O que é o concreto?** Disponível em: <https://sei.unirg.edu.br/visaoAluno/downloadArquivo.xhtml/>. Acesso em: 26 jan. 2023.

Engenharia & Construção. Carbonatação do Concreto (Curiosidade Rápida). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=NyEuvLjsPZs&t=94s/>. Acesso em: 26 jan. 2023.

FAGUNDES, Fabiano. **Corrosão do Concreto – Carbonatação**. Disponível em: <https://sei.unirg.edu.br/visaoAluno/downloadArquivo.xhtml/>. Acesso em: 26 jan. 2023.

Neville, A. M. (2016), **“Propriedades do concreto”**, São Paulo: PINI, p. 828.

OSPINA, C. M. M, ERAZO, C. H. B. Resistencia mecánica y condiciones de obra del concreto poroso en los pavimentos según El tipo de granulometría. Medellín, 2007

Vesikari, E. (1988), **“Service life prediction of concrete structures with regard to corrosion of reinforcement”**. Technical Research Centre of Finland, report n. 553, Finland p. 53.

ENGENHARIA, T. **Inspeção rotineira de estruturas de concreto armado expostas a atmosferas agressivas** | Takna Engenharia., 20 jun. 2017. Disponível em: <https://www.taknaengenharia.com.br/noticias/inspecao-rotineira-de-estruturas-de-concreto-armado-expostas-a-atmosferas-agressivas/>. Acesso em: 26 jan. 2023.

TECNOSIL, M. O que é e como ocorre a carbonatação do concreto? -, 1 maio 2018. Disponível em: <<https://www.tecnosilbr.com.br/o-que-e-e-como-ocorre-a-carbonatacao-do-concreto/>>. Acesso em: 26 jan. 2023

ZAMPA, G. N. Ensaio de Fenolftaleína para detectar Carbonatação no Concreto -. , 15 jul. 2020. Disponível em: <<https://www.engenheirocivillondrina.com.br/ensaio-fenolftaleina-carbonatacao-concreto/>>. Acesso em: 26 jan. 2023

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto: procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655: **Concreto de Cimento Portland – Preparo, controle e recebimento**. Rio de Janeiro, 2022.

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, 2006. 10 p.