

# **AVALIAÇÃO DA INTERFERÊNCIA DA CARBONATAÇÃO NA RESISTÊNCIA DO CONCRETO ATRAVÉS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS**

Myrela Vieira de Araújo (UFPA) E-mail: myrelav.araujo@gmail.com

Eduardo Aurélio Barros Aguiar (UEMA) E-mail: eduardoaguiar.eng@live.com

Raimundo Nonato Rodrigues de Araújo Netto (Instituto Navigare) E-mail: raimundon.araujo@gmail.com

**Resumo:** O estudo visa encontrar a resistência à compressão por meio do ensaio de ultrassom e esclerometria em corpos de prova e cubos de concreto carbonatados e não carbonatados, com o objetivo de analisar a influência que a carbonatação produz nos resultados. Posteriormente, são comparadas as resistências entre as amostras submetidas a aplicação de dióxido de carbono com as que não são através de gráficos de dispersão e a profundidade de carbonatação através dos gráficos de colunas. Mediante os resultados, o fenômeno da carbonatação interferiu na resistência à compressão para os ensaios não destrutivos, melhorando a dureza superficial do concreto. As amostras que envolviam maiores resistências, apresentaram menores profundidades de carbonatação e menor porosidade.

**Palavras-chave:** Carbonatação, resistência à compressão, concreto.

## **EVALUATION OF CARBONATING INTERFERENCE IN CONCRETE RESISTANCE THROUGH NON-DESTRUCTIVE TESTS**

**Abstract:** The study aims to find the compressive strength by means of the ultrasonic and sclerometry test in test specimens and carbonated and non-carbonated concrete cubes, in order to analyze the influence of carbonation on the results. Subsequently, are compared the resistances between the samples subjected to carbon dioxide application with those that are not through dispersion graphs and the depth of carbonation through the column graphs. Through the results, the carbonation phenomenon interfered in the compressive strength for the non-destructive tests, improving the surface hardness of the concrete. The samples that involved higher resistances had lower carbonation depths and lower porosity.

**Keywords:** Carbonation; compressive strength; concrete.

### **1. INTRODUÇÃO**

Um dos materiais mais utilizados em estruturas produzidos no mundo é o concreto armado, devido à sua versatilidade e custo relativamente baixo (SAETTA; VITALIANI, 2004). Com o decorrer dos anos, o concreto sofre alterações pelas interações entre seus constituintes com o meio externo. Por esse motivo, o estudo sobre durabilidade e o gerenciamento da manutenção dessas estruturas é um aspecto significativo no campo da engenharia civil.

A durabilidade e a vida útil do concreto estrutural estão relacionadas às condições ambientais e aos fatores de degradação presentes no meio ambiente (MARTINS et al., 2018). Um dos agentes agressores mais preocupantes na indústria da construção civil é o dióxido de carbono (MARTINS et al., 2018) que presente na atmosfera, produz a carbonatação, um fenômeno natural provocado pela interação desse agente atmosférico com os hidróxidos alcalinos de cálcio da pasta de cimento em estruturas de concreto, resultando na formação de precipitação de água e carbonato de cálcio (LO; LEE, 2016; SINGH; SINGH, 2016). As emissões de dióxido de carbono geradas por várias atividades humanas aumentaram ao longo

de décadas (SHENG; GUO, 2016) e a carbonatação é uma das causas mais presentes do início de deterioração em estruturas de concreto armado (BAMFORTH, 2004).

A armadura de aço é física e quimicamente protegida no concreto armado contra a corrosão pelo concreto circundante (VILLAIN et al., 2007). Porém, após a carbonatação, o pH do concreto que apresenta valores superiores a 12,5, é reduzido, chegando a valores inferiores a 8,5 (MEHTA; MONTEIRO, 2008), diminuindo a proteção passiva das armaduras. Em muitos casos, as construções devem ser reparadas ou reconstruídas em algumas décadas, causado por problemas decorrentes da geração, além de questões técnico-econômicas.

Para prevenir a deterioração prematura das estruturas de concreto, atualmente, pesquisas são realizadas para entender os mecanismos físicos e químicos de deterioração através de estudos experimentais e simulações numéricas (ALEXANDER et al., 2007; DINAKER et al., 2007; KIM et al., 2009; YOUNSI et al., 2011) e têm concentrando-se nos efeitos de muitos parâmetros, incluindo relação água/cimento (*a/c*) (ATIS, 2003) condições de cura (JIA et al., 2012), carregamento (LEI et al., 2018), teor de cimento no concreto, compactação, umidade e temperatura. Quando há maior relação *a/c*, a velocidade de carbonatação aumenta, por exemplo, quando a relação *a/c* cresce de 0,4 para 0,8, o volume de poros expande cerca de cinco vezes (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Além disso, existe uma relação da profundidade de carbonatação e a concentração de CO<sub>2</sub> (CUI et al., 2015).

Para evitar a carbonatação, é necessário um estudo do traço, a qualidade de execução, assegurar ao concreto uma cura apropriada, essencial para minimizar o aparecimento de fissuras. Para concreto endurecido, por exemplo, em lajes, é recomendado conservar uma camada de água na face superior, isto é, elaborando uma cura submersa.

Nesta perspectiva, a presente pesquisa visa apresentar e correlacionar métodos já existentes de avaliação da resistência à compressão de amostras de concreto que passaram pelo processo de carbonatação e as amostras que não passaram pelo processo, elaborados com materiais da cidade de São Luís. A correlação foi desenvolvida através dos resultados obtidos do ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos (NBR 5739, 2018) com os parâmetros resultantes do ensaio de ultrassom (NBR 8802, 2019) e ensaio de esclerometria (NBR 7584, 2012), analisando posteriormente a profundidade de carbonatação.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Caracterização dos materiais

A fim de determinar a resistência a compressão das amostras de concreto submetidas ao processo de carbonatação acelerada e as amostras que não foram sujeitas, a pesquisa produziu 138 moldes de concreto, divididos em 120 corpos de prova e 18 cubos de concreto, sujeitos a dois distintos dias de cura úmida, distribuídos em dois traços, sendo três relações água/cimento (*a/c*) para cada traço, conforme apresenta a tabela 1. Essa etapa formou-se pelos ensaios realizados em laboratório. O aglomerante utilizado para a confecção do concreto foi o Cimento Portland (CP) II E 32 RS, os agregados graúdo e miúdo empregados foram brita 1 e areia fina, respectivamente.

Tabela 1 – Relação da quantidade das amostras de concreto com o traço.

Nº	Traço	Relação <i>a/c</i>	Dias de cura úmida	Quantidade de corpos de prova	Quantidade de cubos de concreto
I	1:1:2	0,4	7	10	2
			28	10	2

II	1:1:2	0,6	7	10	2
			28	10	2
III	1:1:2	0,8	7	10	2
			28	10	2
IV	1:2:3	0,4	7	10	2
			28	10	-
V	1:2:3	0,6	7	10	2
			28	10	-
VI	1:2:3	0,8	7	10	2
			28	10	-

## 2.2 Produção das amostras – carbonatação do concreto

Na moldagem dos corpos de prova (NBR 5738, 2016), foram utilizados moldes cilíndricos metálicos com diâmetros de 10 cm e altura de 20 cm. Os moldes dos cubos de concreto apresentaram dimensões de 20x20x20 cm. O modo de adensamento do concreto nos moldes foi manual e após 24 horas, as amostras foram desmoldadas, identificadas e colocadas em um tanque para o processo de cura úmida, de 7 e 28 dias.

Após a cura úmida, as amostras foram submetidas ao processo de carbonatação. Esta etapa formou-se quando a metade de cada espécie de amostra, ou seja, 60 corpos de prova e 9 cubos de concreto foram divididos e dispostos em três câmaras de carbonatação, simuladas por três isopores de duzentos e noventa litros, aplicando dióxido de carbono em um mesmo intervalo de tempo por três extintores de incêndio, um para cada câmara, no período de dois meses, conforme a figura 1.



Figura 1 – Câmaras de carbonatação.

## 2.3 Ensaio nas amostras de concreto

Após o período de dois meses de carbonatação, as amostras foram retiradas da câmara e deu-se início aos ensaios não destrutivos e ao ensaio de compressão em corpos de prova cilíndricos. O primeiro ensaio realizado nos corpos de prova foi de ultrassom, aferindo a velocidade de propagação ultrassônica. Para uma correta verificação dos resultados, realizou-se duas etapas importantes: calibração do dispositivo ultrassônico e medição do comprimento de cada corpo de prova (NBR 8802, 2019). Em seguida, foi realizado o ensaio de resistência à compressão axial através da prensa eletrohidráulica, comprimindo o corpo de prova com taxa constante de  $0,45 \pm 0,15$  MPa/s.

Para os cubos de concreto, o ensaio executado foi de esclerometria (NBR 7584, 2012) com a finalidade de determinar o índice esclerométrico. Antes de iniciar o ensaio, foi

analisado e escolhido a melhor área para fazer a medição, livres de irregularidades e superfícies ásperas. A figura 2 ilustra os equipamentos utilizados para a aferição da velocidade de propagação ultrassônica e índice esclerométrico.

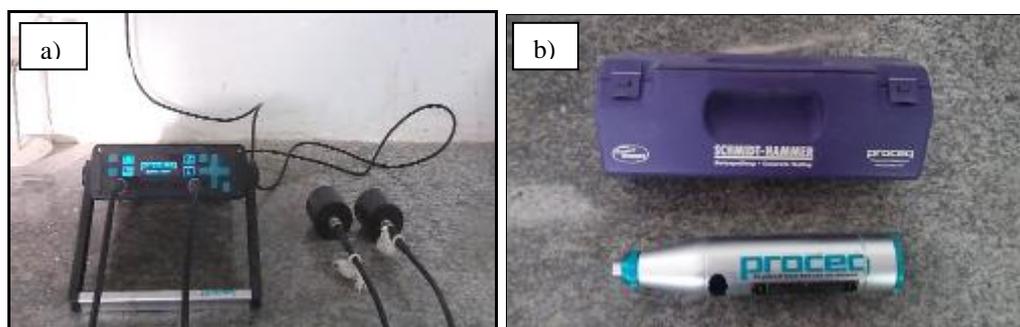


Figura 2 – Equipamentos a) ultrassom, b) esclerômetro

Logo após o alcance dos parâmetros resultantes dos ensaios não destrutivos e destrutivo, a profundidade de carbonatação do concreto nas amostras foram medidas por meio da aspersão de fenolftaleína no plano de ruptura transversal dos corpos de prova e longitudinal dos cubos de concreto.

### 3. RESULTADOS

Por meio dos dados encontrados pelos ensaios não destrutivo e destrutivo, foram realizadas as curvas de correlação. Aquele que conteve o maior coeficiente de determinação ( $r^2$ ) entre todas as regressões simples analisadas, foi a melhor curva que descreveu as correlações. A tabela 2 desenvolve a interpretação para os valores de  $r^2$  (ASSIS, 2011).

Tabela 2 – Interpretação para os valores do coeficiente de determinação ( $r^2$ )

Intervalo do coeficiente de determinação	Dependência
$0,00 \leq r^2 \leq 0,20$	dependência insignificante
$0,21 \leq r^2 \leq 0,40$	dependência fraca
$0,41 \leq r^2 \leq 0,70$	dependência marcante
$0,71 \leq r^2 \leq 1,00$	dependência forte

#### 3.1 Velocidade de propagação ultrassônica x resistência à compressão simples

Os valores resultantes do ensaio de ultrassom e ensaio de resistência à compressão axial foram organizados no software Microsoft Excel, e posteriormente confeccionados dois gráficos de dispersão, inicialmente para os corpos de prova carbonatados e em seguida para os não carbonatados, verificando diferentes curvas de correlação através da regressão simples. As melhores curvas que representaram as correlações foram a linear e de potência para os corpos de prova não carbonatados e carbonatados, respectivamente. Seguem abaixo as equações 1 e 2 que correlacionam a resistência ( $f_{ce}$ ) com a velocidade ( $V$ ):

a) Para os corpos de prova não carbonatados:

$$f_{ce} = 0,038.V - 141,94 \quad (1)$$

Em que  $f_{ce}$  é a resistência em megapascals (MPa),  $V$  é a velocidade de propagação ultrassônica apresentada em metro por segundo (m/s).

b) Para os corpos de prova carbonatados:

$$f_{ce} = 5.10^{-23}.V^{6,4971} \quad (2)$$

Em que  $f_{ce}$  é a resistência em megapascais (MPa),  $V$  é a velocidade de propagação ultrassônica apresentada em metro por segundo (m/s). A figura 3 abaixo apresenta as curvas de correlação definidas para os corpos de prova não carbonatados e carbonatados, respectivamente.

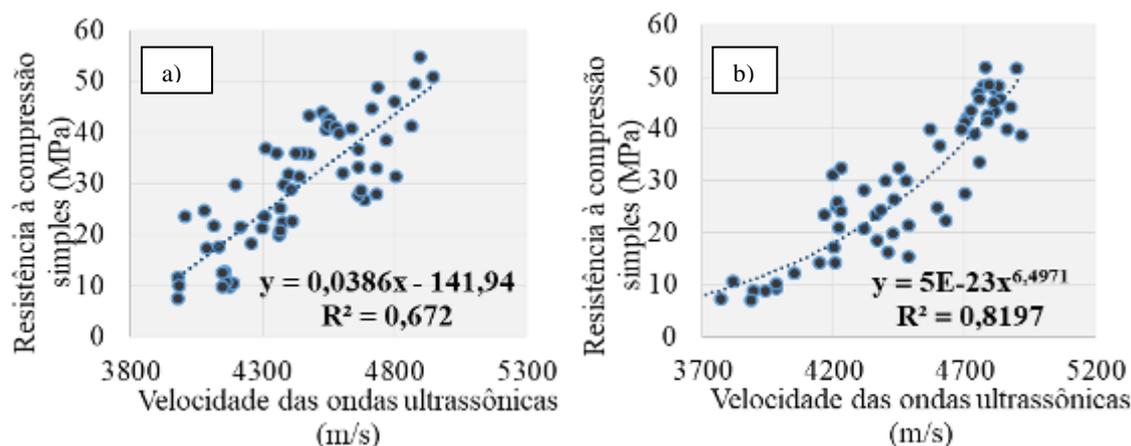


Figura 3 – Gráfico de dispersão para corpos de prova a) não carbonatados e b) carbonatados.

Substituindo os dados da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas em metro por segundo (m/s) de cada amostra do corpo de prova nas suas correspondentes equações, são estabelecidas as resistências do concreto.

### 3.2 Índice esclerométrico x resistência à compressão simples

Os valores resultantes do ensaio de esclerometria e ensaio de resistência à compressão axial foram organizados no software Microsoft Excel, semelhante ao item 3.1 e posteriormente confeccionados dois gráficos de dispersão, primeiramente para os cubos de concreto carbonatados, e em seguida para os não carbonatados, verificando diferentes curvas de correlação por meio da regressão simples. As melhores curvas que descreveram as correlações para as duas situações de exposição ou não ao dióxido de carbono foram as polinomiais. Seguem abaixo as equações 3 e 4 que correlacionam a resistência ( $f_{ce}$ ) com o índice esclerométrico, que possui unidade de medida adimensional.

c) Para os cubos de concreto não carbonatados:

$$f_{ce} = -0,0916.IE^2 + 7,1001.IE - 91,751 \quad (3)$$

d) Para os cubos de concreto carbonatados:

$$f_{ce} = -0,0477.IE^2 + 5,1587.IE - 78,885 \quad (4)$$

A figura 4 ilustra as curvas de correlação definidas para os cubos de concreto não carbonatados e carbonatados, respectivamente. Substituindo os dados do índice esclerométrico de cada amostra do cubo de concreto nas suas correspondentes equações, são estabelecidas as resistências do concreto.

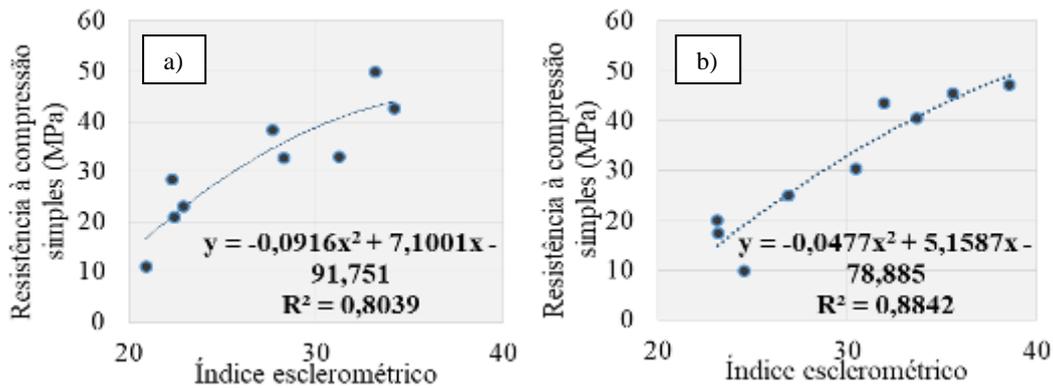


Figura 4 – Gráfico de dispersão para cubos de concreto a) não carbonatados e b) carbonatados.

#### 4. ANÁLISE DOS DADOS OBTIDOS

##### 4.1 Resistência à compressão

Através dos resultados alcançados da resistência à compressão dos ensaios de ultrassom e esclerometria, confeccionou-se gráficos de dispersão, conforme as figuras 5 e 6. Cada ponto se refere a resistência da amostra para estabelecido traço com sua relação a/c, comparando a resistência das amostras carbonatadas com as não carbonatadas.

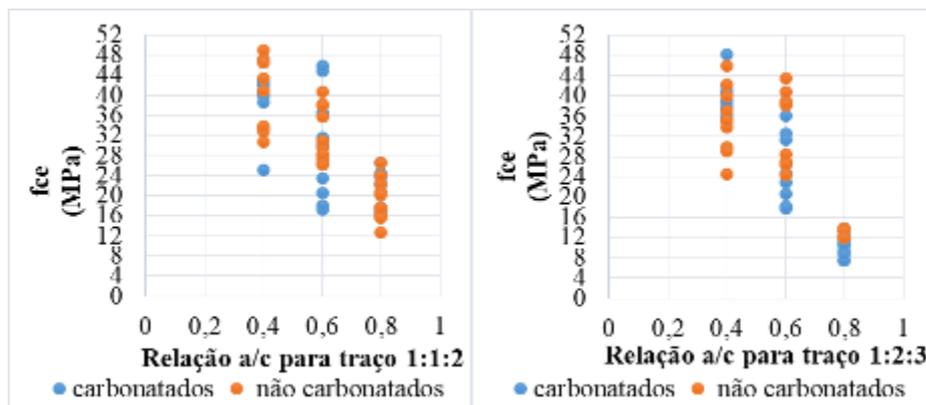


Figura 5 - Resistência à compressão pelo ensaio de ultrassom.

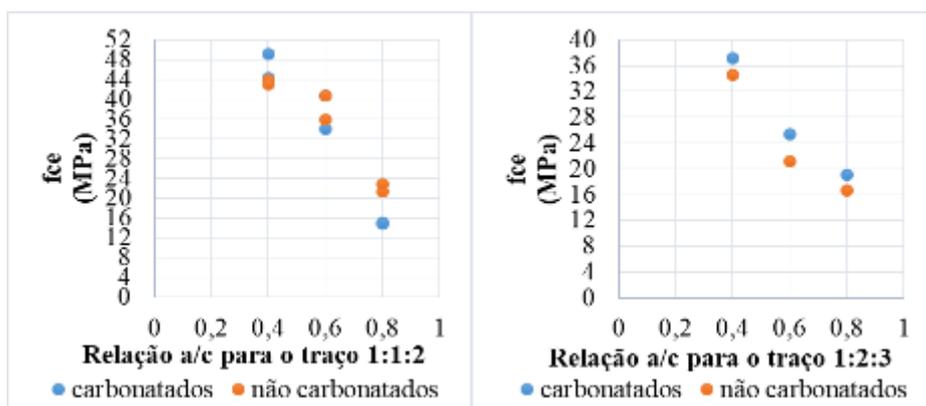


Figura 6 - Resistência à compressão pelo ensaio de esclerometria.

Através das análises dos gráficos, no ensaio de esclerometria para o traço 1:2:3 e relações a/c distintas, a resistência dos cubos de concreto carbonatados foram todas maiores que os não carbonatados. Contudo, no traço 1:1:2, a resistência das amostras carbonatadas ultrapassou apenas para a relação a/c de 0,4, confirmando que a carbonatação afeta o ensaio,

proporcionando índices esclerométricos mais altos que os valores reais, uma vez que, a carbonatação aumenta a resistência do concreto (CASTRO, 2009).

No ensaio de ultrassom, a resistência de alguns corpos de prova carbonatados foram superiores em comparação aos não carbonatados, por exemplo, para o traço 1:1:2 com relação a/c de 0,6 e 0,8 e traço 1:2:3 com relação a/c de 0,4. Além disso, foi evidenciado que os cubos de concreto carbonatados que possuam um menor teor de cimento, as resistências foram maiores relacionando com os não carbonatados. Para os corpos de prova, a mesma análise não foi localizada, visto que foram encontradas quantidades de corpos de prova carbonatados com resistências maiores aos não carbonatados exclusivamente para o traço 1:2:3 com relação a/c de 0,4.

#### 4.2 Profundidade de carbonatação das amostras de concreto

Foram extraídas medidas no plano de ruptura transversal dos corpos de prova e longitudinal dos cubos de concreto. Com sua abertura, aplicou-se fenolftaleína e aqueles que ficaram com a coloração violeta, determinou a área sem carbonatação, enquanto os que permaneceram incolor, determinou a área carbonatada, conforme a figura 7.



Figura 7 - Seções transversais e longitudinais carbonatadas dos corpos de prova e cubos de concreto, respectivamente.

Com a disponibilidade de três câmaras de carbonatação, descrito no item 2.2, cada câmara recebeu 20 corpos de prova e 3 cubos de concreto. De acordo com os dados da profundidade de carbonatação de cada amostra de concreto, foram executados gráficos de colunas, conforme as figuras 8 e 9, contendo a média da profundidade carbonatada das amostras com seu determinado traço, relação a/c e dias de cura úmida.

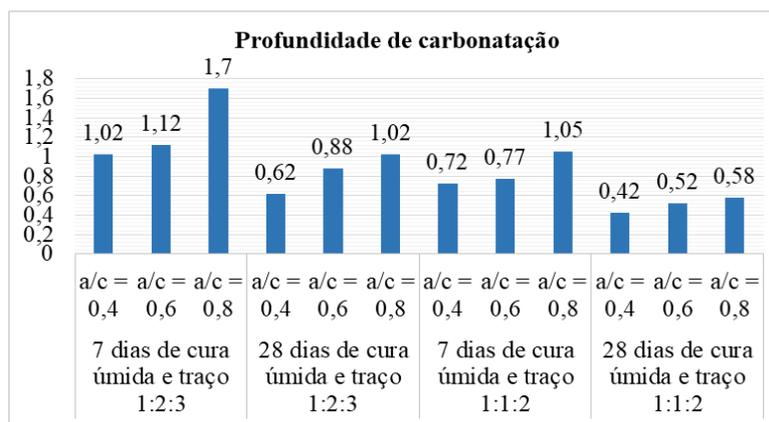


Figura 8 - Profundidade de carbonatação dos corpos de prova.

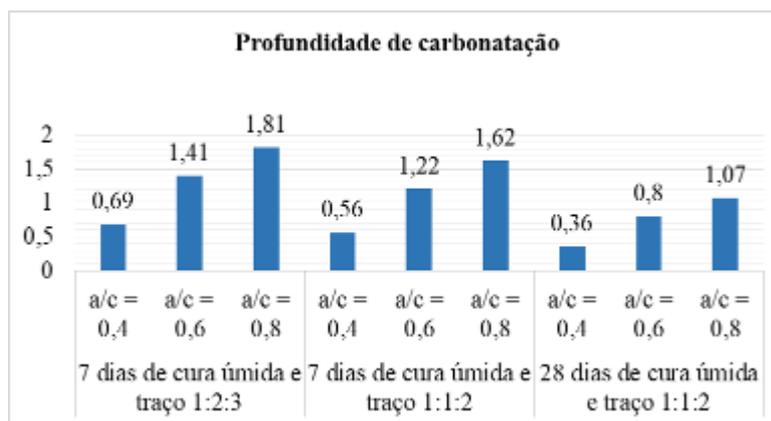


Figura 9 - Profundidade de carbonatação dos cubos de concreto.

Por meio da análise dos gráficos de colunas, foi verificado na figura 9 para os cubos de concreto que possuíam traços distintos, mas com a mesma relação a/c, a profundidade de carbonatação aumentou para aqueles cujo teor de cimento foi menor. Por exemplo, no traço 1:2:3, as profundidades de carbonatação foram todas maiores, em comparação aos outros cubos de concreto carbonatados. O mesmo resultado foi encontrado para os corpos de prova, pois relações água/cimento de 0,8 com cura úmida de 28 dias, a diferença da profundidade de carbonatação foi de 75,86%.

Além disso, vale ressaltar que a quantidade de dias de cura úmida é um outro fator que influencia a velocidade de carbonatação nas amostras de concreto e foi verificada nos gráficos. Os cubos e corpos de prova que passaram por 28 dias de cura imersa, obtiveram menor profundidade de carbonatação em comparação as outras amostras de mesmo traço e 7 dias de cura úmida. A profundidade da camada carbonatada no concreto depende do processo de cura empregado nele, pois esse processo afeta as propriedades de hidratação do cimento Portland (PAULETTI, 2009).

Vale ressaltar que em todas as situações, a profundidade de carbonatação se desenvolvia nos cubos de concreto e corpos de prova à medida que a relação a/c crescia também. Isso ocorre pelo fato do aumento da relação água/cimento elevar a porosidade, que por sua vez aumenta a difusão de gases para o interior dos poros da pasta hidratada, resultando em uma maior velocidade de carbonatação nos concretos (PAPADAKIS et al., 1991).

## 5. CONCLUSÃO

Com base nas análises dos gráficos de dispersão, a carbonatação interferiu nos resultados da resistência à compressão para ambos ensaios e melhorou a dureza superficial do concreto, provocando influência na leitura da resistência à compressão pelo esclerômetro e originando um falso diagnóstico de elevação da resistência, pois quanto mais a carbonatação avança para o interior do concreto, sua durabilidade fica comprometida.

Constatou-se que em relações água/cimento de 0,4, as maiores resistências apresentaram menores profundidades de carbonatação e menor porosidade no concreto. Além disso, em amostras de concreto mais porosas, que possuíam a relação água/cimento de 0,8, obtiveram uma frente de carbonatação maior no concreto, por exemplo, nos cubos, houve aproximadamente 65% em média de diferença em comparação aos que apresentavam relação água/cimento 0,4, ocasionando em resistências mais baixas.

À vista disso, é importante realizar um estudo do traço para evitar ou retardar o fenômeno da carbonatação, pois os materiais e sua fração de uso são fatores que influenciam na velocidade e profundidade de carbonatação, podendo ocasionar em uma falsa resistência e

mais elevada que a resistência real do concreto.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEXANDER, M. G.; MACKECHNIE, J. R.; YAM, W. Carbonation of concrete bridge structures in three South African localities. *Cement and Concrete Composites*, v. 29, n. 10, p. 750-759, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.06.005>

ARAÚJO, M. V.; REIS, L. C.; AGUIAR, E. A. B. Evaluation of carbonating interference in concrete resistance through non-destructive tests. In: 9<sup>th</sup> International Conference on Concrete Under Severe Conditions – Environment & Loading, p. 1-12, 2019. <https://doi.org/10.31808/5ca6e03e5ca4f0d406ac88b5>

ASSIS, A. P. *Regressão e Correlação*. (Apostila do curso Métodos Estatística em Geotecnia). Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, 2011

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. NBR 5738. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. NBR 5739. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão – Método de ensaio*. NBR 7584. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Concreto Endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica*. NBR 8802. Rio de Janeiro, 2019.

ATIS, C. D. Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash. *Construction and Building Materials*, v. 17, n. 3, p. 147–152, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00116-2](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00116-2)

BAMFORTH, P. *Enhancing reinforced concrete durability: Guidance on selecting measures for minimising the risk of corrosion of reinforcement in concrete*. Concrete Society Technical Report No. 61, Camberley, United Kingdom, 2004.

CASTRO, E. *Estudo da resistência à compressão do concreto por meio de testemunhos de pequeno diâmetro e esclerometria*. 119f. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

CUI, H. Z.; TANG, W. C.; LIU, W.; DONG, Z. J.; XING, F. Experimental study on effects of CO<sub>2</sub> concentrations on concrete carbonation and diffusion mechanisms. *Construction Building Materials*, v. 93, p. 522–527, 2015.

DINAKAR, P.; BABU, K. G.; SANTHANAM, M. Corrosion behaviour of blended cements in low and medium strength concretes. *Cement and Concrete Composites*, v. 29, n. 2, p. 136–145, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.10.005>

JIA, Y.; ARUHAN, B.; YAN, P. Natural and accelerated carbonation of concrete containing fly ash and GGBS after different initial curing period. *Magazine of Concrete Research*, v. 64, n. 2, p. 143–150, 2012. <https://doi.org/10.1680/mac.10.00134>

KIM, J.-K.; KIM, C.-Y.; YI, S.-T.; LEE, Y. Effect of carbonation on the rebound number and compressive strength of concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 31, n. 2, p. 139–144, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.10.001>

LEI, B.; LI, W.; LI, Z.; WANG, G.; SUN, Z. Effect of Cyclic Loading Deterioration on Concrete Durability: Water Absorption, Freeze-Thaw, and Carbonation. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 30, n. 9, 2018. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002450](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002450)

LO, Y.; LEE, H. M. Curing effects on carbonation of concrete using a phenolphthalein indicator and Fourier-transform infrared spectroscopy. *Building and Environment*, v. 37, n. 5, p. 507–514, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00052-X](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00052-X)

MARTINS, R. O. G.; ALVARENGA, R. de C. S. S.; PEDROTI, L. G.; OLIVEIRA, A. F. de; MENDES, B. C.; AZEVEDO, A. R. G. de. Assessment of the durability of grout submitted to accelerated carbonation test. *Construction and Building Materials*, 159, 261–268, 2018.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 3. ed. São Paulo: IBRACON. 2008.

**PAPADAKIS, V.G.; VAYENAS, C.G.; FARDIS, M.N.** *Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation*. ACI Materials Journal, p. 363 – 373, 1991.

**PAULETTI, C.** *Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição*. Tese de Doutorado em co-tutela (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2009.

**SAETTA A.V.; VITALIANI R.V.** *Experimental investigation and numerical modeling of carbonation process in reinforced concrete structures Part II: Practical applications*. Cement and Concrete Research, v. 35, p. 958 – 967, 2005.

**SHENG, P.; GUO, X.** *The Long-run and Short-run Impacts of Urbanization on Carbon Dioxide Emissions*. Economic Modelling, v. 53, p. 208–215, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2015.12.006>

**SING, N.; S. P. SING.** *Reviewing the carbonation resistance of concrete*. Journal of Materials and Engineering Structures, v. 3, n. 2, p. 35–57, 2016.

**VILLAIN, G.; THIERY, M.; PLATRET, G.** *Measurement methods of carbonation profiles in concrete: Thermogravimetry, chemical analysis and gammadensimetry*. Cement and Concrete Research, v. 37, n. 8, p. 1182–1192, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.04.015>

**YOUNSI, A.; TURCRY, P.; ROZIÈRE, E.; AIT-MOKHTAR, A.; LOUKILI, A.** *Performance-based design and carbonation of concrete with high fly ash content*. Cement and Concrete Composites, n. 33, v. 10, p. 993–1000, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.07.005>