Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções
CBPAT2016

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

INFLUÊNCIA DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO NA RESISTÊNCIA SUPERFICIAL DO CONCRETO OBTIDA PELO MÉTODO DA ESCLEROMETRIA

G. C. RÉUS
Engenheira Civil
Universidade Federal do Paraná
Paraná, Brasil
gio_reus@yahoo.com.br

D. J. SOUZA
Engenheiro Civil
Universidade Federal do Paraná
Paraná, Brasil
diegojesusdesouza@hotmail.com

L. SILVESTRO
Graduanda em Engenharia Civil
Universidade Federal do Paraná
Paraná, Brasil
laurasilvestro@ymail.com

G. R. GOMES
Graduando em Engenharia Civil
Universidade Federal do Paraná
Paraná, Brasil
guga.grg@hotmail.com

M. H. F. de MEDEIROS
Engenheiro Civil Dr.
Universidade Federal do Paraná
Paraná, Brasil
medeiros.ufpr@gmail.com

M. L. SANTOS FILHO
Engenheiro Civil PhD
Universidade Federal do Paraná
Paraná, Brasil
maurolacerda1982@gmail.com

RESUMO

A esclerometria é um método de ensaio não destrutivo utilizado para determinação da resistência superficial do concreto, podendo ser correlacionada à sua resistência à compressão. Contudo, alguns fatores podem influenciar diretamente nos resultados, como por exemplo, a presença de armaduras próximas da superfície, presença de agregado graúdo, umidade em que o concreto se encontra no momento do ensaio, a carbonatação do concreto (foco do presente estudo), entre outros. No presente trabalho foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos de concreto de 10x20cm para cada traço confeccionado, que variaram em relação ao tipo de adição mineral, refletindo em variações nos resultados de resistência à compressão aos 28 dias. Dos 6 corpos de prova moldados, metade deles foram carbonatados enquanto a outra metade permaneceu sem carbonatação. Foram realizados ensaios de esclerometria e propagação de onda ultrassônica para as amostras citadas. O ensaio de esclerometria foi realizado em 16 pontos das amostras, a fim de avaliar a influência da carbonatação no resultado do índice esclerométrico. Com a finalização dos experimentos, foi constatado que a carbonatação altera significativamente os resultados de resistência pela esclerometria, independentemente do traço estudado.

Palavras-chave: Esclerometria, Carbonatação, Ensaios não destrutivos, Concreto, Inspeção.

ABSTRACT

Sclerometry is a nondestrutive test method used to define concrete's superficial resistance, it could be correlated with compressive strength. Although, some factors can directly influence the results, for instance, rebar near surface presence, coarse aggregate presence, concrete moisture during the tests, concrete carbonation (this research focus), and other factors. It was produced 6 cylindrical specimen with 10x20cm for each concrete rate, varying the kind of mineral addition, resulting in compressive strength at 28 days results variance. From 6 specimens produced, a half was carbonated while the other half stay without carbonation. Sclerometry and ultrasonic waves propagation testes was made in this samples. The sclerometry test was made at 16 specimen points, in order to evaluate the carbonation influence in rebound hammer index. When the tests was finished, was got that the carbonation significantly changes strength by sclerometry results, independently of the concrete rate used.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

1. INTRODUÇÃO

A insuficiência da durabilidade se manifesta por uma deterioração que pode ser originada por fatores externos ou por causas internas ao próprio concreto. As diferentes formas de ação podem ser físicas, químicas ou mecânicas e raramente a deterioração do concreto se deve a uma única causa isolada [1]. De acordo com Mehta e Monteiro (2014) [2], há uma estreita relação entre resistência à compressão do concreto e sua durabilidade e, esta última, conceitualmente, é comumente associada à vida útil. Considerando esta premissa, a resistência à compressão do concreto, in-situ, é fundamental para se estimar a qualidade das estruturas e obter parâmetros iniciais de durabilidade, essencialmente, por meio dos ensaios não destrutivos. Ao mesmo tempo, informações como idade, composição do concreto, qualidade na execução e métodos de cura não devem ser menosprezados [3].

Os dois principais métodos para estimativa da resistência do concreto em campo são: 1 - Esclerometria, que trabalha com o princípio do ricochete do martelo de Hammer, que se baseia no princípio de que o retorno de uma massa elástica depende da dureza da superfície onde ela se choca. Assim, se determina a dureza superficial do concreto, podendo, em determinados casos, ser feitas correlações para estimativa da resistência à compressão do concreto estudado [4]; 2 – Ultrassom, que se baseia na medição da velocidade de transporte de ondas ultrassônicas longitudinais [5] [6]. Entretanto, deve-se ter em vista que tais métodos estimam características mecânicas de forma indireta e que modificações causadas por mecanismos de degradação, como por exemplo a carbonatação, podem ter influência na resposta destes métodos de ensaio não destrutivo.

A carbonatação é o resultado da reação entre a portlandita [$Ca(OH)_2$] e o dióxido de carbono presente na atmosfera em concentrações que variam de acordo com cada região. Isto ocorre porque o $Ca(OH)_2$ tende a voltar ao seu estado mais estável, ou seja, o calcário ($CaCO_3$).

O teor de dióxido de carbono no ambiente varia bastante em função do tipo de ambiente em que a estrutura de concreto armado está inserida. Em ambiente rural, o teor médio de CO_2 na atmosfera é de 0,03%. Já em ambiente urbano, o teor é de 0,30% e em um ambiente urbano-industrial este valor pode chegar a 1,0% [7]. Baseando-se nestes dados, Carvalho (2015) [8]destaca o fato de que existe uma diferença de 10 vezes para cima se comparar o ambiente urbano com o ambiente rural e uma diferença que pode chegar a 33 vezes quando se compara a agressividade quanto ao CO_2 da atmosfera urbana-industrial com o ambiente rural.

Mesmo tendo sido citada anteriormente a relação direta entre resistência mecânica e a durabilidade do concreto, deve-se ter muitas ressalvas e ter a real noção de que simplesmente relacionar estes dois indicadores pode ser uma premissa falha em algumas situações. Raisdorfer (2015)[9], por exemplo, mostrou em seu estudo que a velocidade de carbonatação é maior em concretos com adições pozolânicas, se comparados com o concreto de referência, sem adições. Complementando o tema, pode-se citar que algumas adições podem incrementar a resistência mecânica, mas quando se avalia o aspecto da durabilidade das estruturas, algumas adições podem ter um efeito de redução da durabilidade pelo consumo da reserva alcalina do concreto. Desse modo, as adições pozolânicas, que por um lado promovem o aumento da resistência mecânica e refinamento da estrutura porosa, consomem o hidróxido de cálcio, fato que pode facilitar a carbonatação e, por consequência, comprometer a vida útil das estruturas em concreto armado [10] [11] [12] [13].

A carbonatação representa um dos fatores mais importantes iniciadores de corrosão das armaduras. Contudo, ocorre em uma velocidade lenta, atenuando-se com o tempo [14]. Isso pode ser explicado por dois fatores: o primeiro deles é devido à hidratação crescente do cimento Portland. Já o outro é dependente dos efeitos do próprio agente degradante, isto porque há a colmatação dos poros superficiais pelo $CaCO_3$, de volume consideravelmente maior que o da portlandita [15][16]. Logo, este último pode exercer influência direta nos resultados obtidos com ensaios de resistência superficial, como a esclerometria.

Somado a estas resultantes há, consequentemente, a redução do pH das soluções presentes nos poros do concreto, devido, essencialmente, à redução da reserva alcalina da matriz hidratada. Em condições sem efeito da carbonatação, o pH interno do concreto fica em torno de 12,6 [1] [2], o que proporciona proteção eletroquímica passiva do aço. A reação com o dióxido de carbono pode diminuir esse valor para aproximadamente 8,5 e, nesse caso, a armadura é despassivada e fica sujeita às ações da corrosão, desde que hajam as condições ambientais necessárias que constituem uma célula galvânica [11] [17] [18] [19].

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

Deste modo, o presente trabalho tem por objetivo avaliar quantitativa e qualitativamente o aumento médio da resistência superficial do concreto, para os diferentes traços estudados, dos corpos de prova carbonatados em relação aos não carbonatados, através do ensaio de esclerometria. Além disso, a influência da frente de carbonatação na velocidade de transporte de ondas ultrassônicas também foi investigada.

2. METODOLOGIA

Para a preparação do concreto, foi utilizada areia natural proveniente do município de Balsa Nova, na região metropolitana de Curitiba. O agregado graúdo empregado foi basalto, com dimensão máxima característica de 19 mm, e o cimento adotado foi do tipo CP V-ARI. Foi necessário a utilização de aditivo superplastificante de terceira geração, para que todos os traços atingissem 100±20mm de slump. O traço base para a fabricação do concreto foi de 1:2,25:3,00 com relação água/cimento de 0,5.

Foram moldados corpos de prova cilíndricos de 10x20 cm, com 6 diferentes traços, sendo eles:

- Referência (sem nenhuma adição);
- 10% de substituição do cimento por metacaulim;
- 10% de substituição do cimento por fíler quartsozo;
- 10% de substituição do cimento por cinza de casca de arroz;
- 30% de substituição do cimento por cinza volante;
- 30% de adição de cinza volante em relação à massa de cimento.

Após a moldagem das amostras, foi realizado o ensaio de resistência à compressão [20] aos 28 dias de 3 dos corpos de prova cilíndricos para cada traço estudado.
Outras 6 amostras de cada traço foram confeccionadas para os ensaios de esclerometria e de determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica, sendo que metade destas amostras foram submetidas à carbonatação acelerada em câmara de carbonatação, enquanto a outra metade permaneceu sem carbonatação. A câmara de carbonatação foi ajustada à temperatura de 40±0,1ºC, teor de CO_2 de 5±1% e umidade de 60±2%. A verificação da profundidade de carbonatação foi realizada por meio da aspersão de solução aquosa de fenolftaleína contendo 10g de fenolftaleína, 700 ml de etanol, e 300 ml de água destilada.

Para os ensaios de esclerometria [21], foram adotados 16 pontos de medida para cada amostra, sendo esses pontos mostrados na Figura 5.

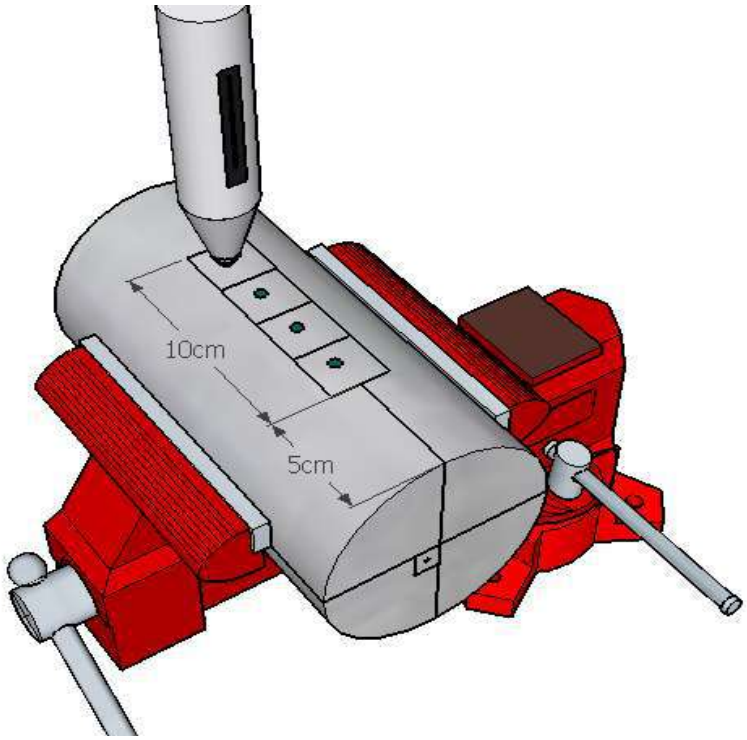


Figura 5 – Localização das medições para o ensaio de esclerometria.

Os corpos de prova foram fixados com auxílio de uma morsa e as leituras foram realizadas na posição vertical. Primeiramente, foram feitas quatro marcações simétricas no corpo de prova, nos ângulos de 0º, 90º, 180º e 270º da circunferência da base. Em cada uma destas marcações foram desenhados quadrados de 25x25mm, espaçados 50mm das bordas dos corpos de prova. Com isso, foram obtidos os resultados dos índices esclerométricos e a consequente correlação com a resistência à compressão das amostras estudadas.

Foi realizado, também, o ensaio de determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica [22]. Para este ensaio foram utilizadas as mesmas amostras do ensaio de esclerometria, devido a ambos os testes serem não destrutivos.

4. RESULTADOS

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão das amostras não carbonatadas e da profundidade de carbonatação são apresentados na Figura 6 e Figura 7, respectivamente.

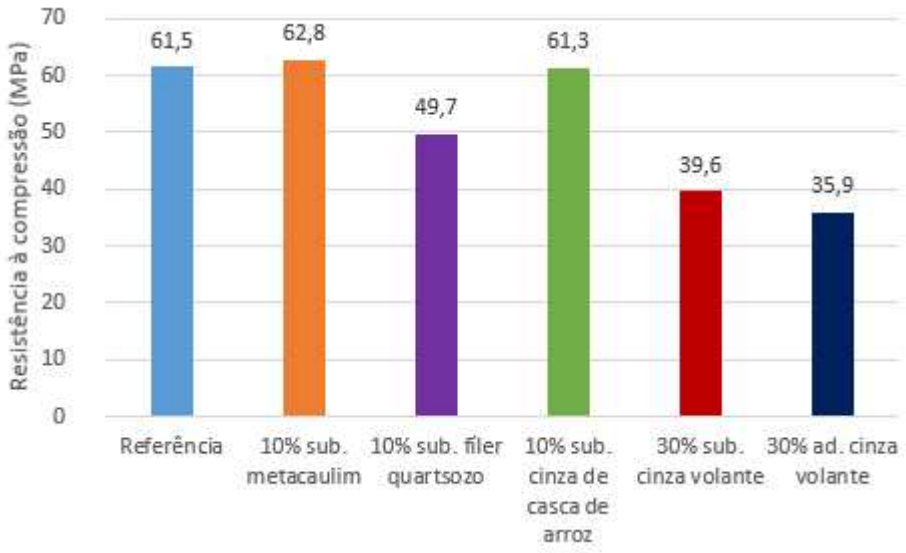


Figura 6 - Resistência à compressão aos 28 dias.

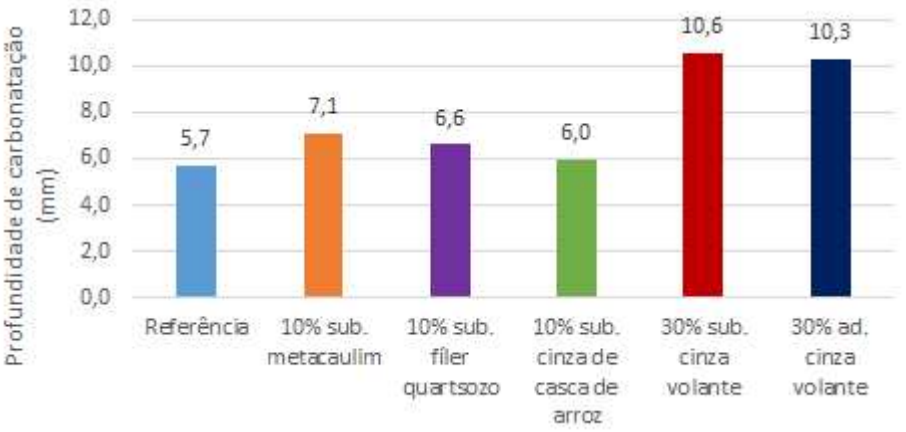


Figura 7 - Profundidade de carbonatação.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

É possível observar que as amostras com menor resistência à compressão obtiveram a maior profundidade de carbonatação. Em média, haja vista, o inverso no caso de 10% de substituição por metacaulim em relação aos traços de referência e de 10% de substituição por cca. Isso ocorre devido às amostras com menor resistência à compressão geralmente apresentarem maior porosidade, o que facilita a entrada de CO_2 no concreto.

Os resultados dos ensaios de esclerometria são apresentados na
Figura 8, sendo que os corpos de prova submetidos à carbonatação acelerada encontram-se nas colunas da direita, enquanto que as amostras sem carbonatação encontram-se nas colunas da esquerda.

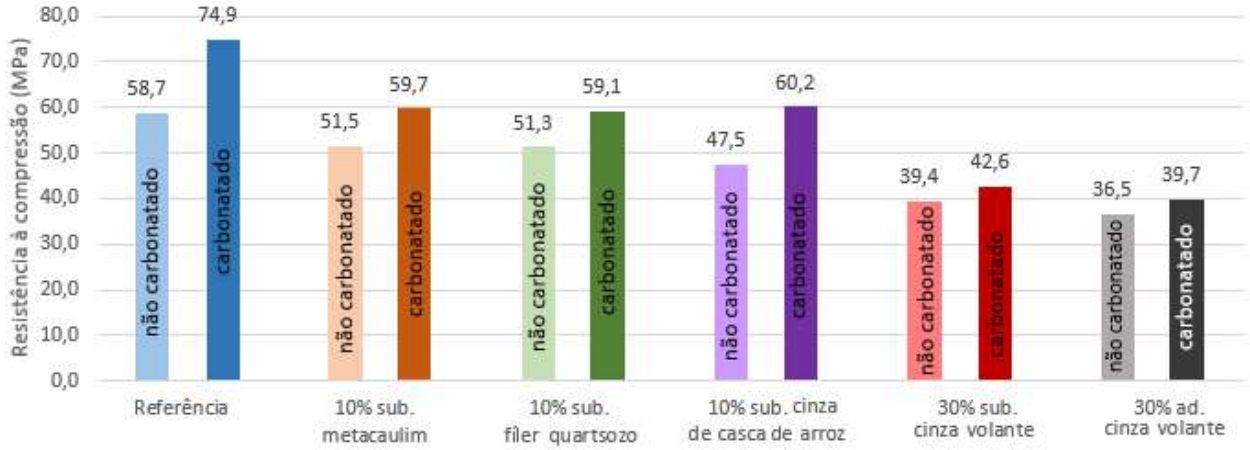


Figura 8 – Resistência à compressão estimada pelo ensaio de esclerometria.

É evidente que, independentemente da substituição ou adição mineral, as amostras carbonatadas tiveram resultados de esclerometria maiores que as amostras não carbonatadas.

É possível observar que a amostra com maior variação entre os resultados de esclerometria com e sem carbonatação é a amostra de referência, com 27,69% de acréscimo da resistência do corpo de prova carbonatado em relação ao não carbonatado. Já o traço com menor variação foi o traço com 30% de adição de cinzas volantes, com 7,98% de acréscimo de resistência, seguido pelo concreto com 30% de substituição do cimento por cinza volante, que apresentou 8,83% de acréscimo de resistência do corpo de prova sem carbonatação em relação à amostra submetida à carbonatação acelerada.

Era de se esperar que a amostra com menor profundidade de carbonatação apresentasse menor variação de índice esclerométrico, e que as amostras mais carbonatadas apresentassem as maiores variações deste índice. Os resultados apresentados neste trabalho foram o inverso. As maiores variações ocorreram para a amostra de referência, que foi a amostra com menor profundidade de carbonatação. Em contrapartida, as amostras com 30% de substituição por cinzas volantes e 30% de adição de cinzas volantes apresentaram as menores variações de índice esclerométrico provocadas pela carbonatação, apesar de terem apresentado as maiores profundidades de carbonatação dentre as amostras estudadas.

Isso pode ter ocorrido devido ao fato de as amostras com substituição e adição de cinza volante possuirem menor quantidade de cimento . Portanto estes corpos de prova apresentaram um avanço da frente de carbonatação maior que as demais amostras, se medido por solução de fenolftaleína. O que indica que este método, além da carbonatação, mede também a perda de alcalinidade devido à reação pozolânica. Entretanto, a amostra de referência, que provavelmente possuia maior reserva alcalina, apresentou maior colmatação dos poros causada pela precipitação do $CaCO_3$. A colmatação dos poros nestas amostras levou a uma maior dureza superficial do concreto, levando a grande diferença entre o concreto de referência sem carbonatação e carbonatado.

Os resultados do ensaio de determinação da resistência à compressão a partir da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas são apresentados na Figura 9.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

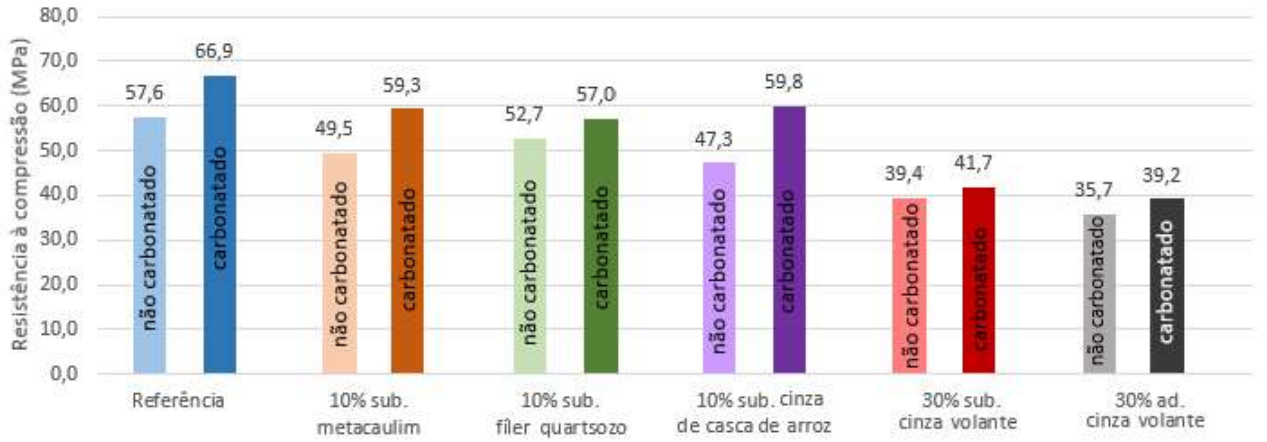


Figura 9 - Resistência à compressão a partir da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas.

As maiores variações de resistência devido à carbonatação para o resultado deste ensaio entre as amostras não carbonatadas e carbonatadas foram obtidos para o concreto com 10% de substituição do cimento por cinza de casca de arroz, com 26,46% de acréscimo de resistência, enquanto que a menor variação (5,75%) foi obtida pelo concreto com 30% de substituição de cimento Portland por cinzas volantes. A propagação de ondas, seja longitudinal ou transversal, é diretamente influenciada pela densidade do material. Logo, a colmatação dos poros, pela formação de calcita, tende a incidir nos resultados favorecendo a propagação de ondas, apresentando, assim, resultados maiores, como de fato ocorreu em todas as amostras.

Neste mesmo norte, pressupõe-se a existência de uma correlação entre a variação da dureza superficial das amostras e a variação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, haja vista que, conforme explanações anteriores, o ensaio de esclerometria também é influenciado pela carbonatação do concreto. Sendo assim, a Figura 10 apresenta a comparação entre resultados dos ensaios supracitados.

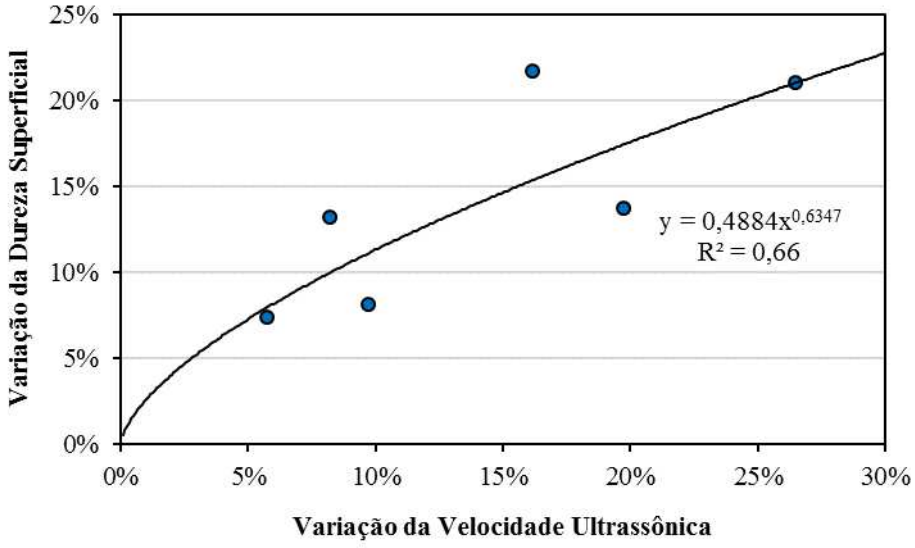


Figura 10: Correlação entre a variação da dureza superficial e a variação na propagação de ondas ultrassônicas devido à carbonatação.

É possível verificar na Figura 10 que há uma boa correlação (R^2 de 0,66) entre ambas as variações de resultados obtidos nos ensaios, indicando que ambos são influenciados pela carbonatação no mesmo sentido. Além disso, os dados indicam que, quando o foco da utilização da esclerometria e do ultrassom for a busca pela precisão na estimativa da resistência de compressão de uma peça, deve-se ater-se à possibilidade de que a frente de carbonatação possa superestimar os resultados obtidos.

5. CONCLUSÕES

Em todas as amostras analisadas neste estudo constatou-se que o fenômeno da carbonatação eleva os resultados de resistência à compressão estimada por meio da medição da dureza superficial e pela propagação de ondas ultrassônicas. Isto deve ser levado em consideração quando se utilizam estes métodos não destrutivos para a estimativa da resistência à compressão do concreto, pois pode superestimar este parâmetro e causar riscos à segurança e estabilidade da estrutura devido a uma estimativa errônea.

A norma brasileira que regulamenta o ensaio de esclerometria para avaliação da dureza superficial do concreto cita que um dos fatores que pode influenciar os resultados do ensaio é a carbonatação e que, em casos extremos, os valores estimados de resistência do concreto, quando existe carbonatação, podem superar os valores reais em mais de 50%. A mesma recomenda a utilização de um coeficiente corretivo para estes casos, entretanto não define parâmetros de como o coeficiente pode ser quantificado.

As variações nos resultados de esclerometria e de ultrassom não são proporcionais à profundidade de carbonatação do concreto. Neste caso, a reserva alcalina influencia na colmatação dos poros. Portanto, concretos com maior reserva alcalina tendem a apresentar maior colmatação dos poros superficiais mesmo sem grandes profundidades de carbonatação, influenciando diretamente o resultado de resistência à compressão do concreto obtido por meio dos ensaios.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação Araucária pelo financiamento dos equipamentos que deram suporte a esta pesquisa. Além disso, agradecemos ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) pela concessão de bolsas de estudo para a equipe da pesquisa. E, por fim, um agradecimento especial ao Engenheiro Janderson Raisdorfer por ter cedido os corpos de prova usados no experimento.

7. REFERÊNCIAS

[1] NEVILLE, A.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**, 2ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

[2] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. v. 1 3ª ed., São Paulo: IBRACON, 2014.

[3] AMINI, K.; JALAPOUR, M.; DELATTE, N. Advancing concrete strength prediction using non-destructive testing: Development and verification of a generalizable model, **Construction and Building Materials**, v. 102, p. 762–768, jan. 2016

[4] ROJAS-HENAO, L.; FERNÁNDEZ-GÓMEZ, J.; LÓPEZ-AGÜÍ, J. C. Rebound hammer, pulse velocity, and core tests in self-consolidating concrete. **ACI Matererials**, v. 109, n. 2, p. 235–243, 2012.

[5] MESBAH, H.A.; LACHEMI, M.; AÏTCIN, P.-C. Determination of elastic properties of high-performance concrete at early ages. **ACI Materials**, v. 99, n. 1, 37–41, 2002.

[6] SOUZA, D. J. et al. **Viadutos localizados na região de Curitiba por métodos de ensaios não destrutíveis: esclerometria e ultrassom**. Foz do Iguaçu, 2015.

[7] NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. Tradução: Salvador E. Giammusso. 2ª Ed., São Paulo: Pini, 1997

[8] CARVALHO, J. R. **Avaliação da durabilidade de material cimentício com proteção superficial na mitigação do avanço da frente de carbonatação**. Dissertação. Universidade de Pernambuco, 2015.

[9] RAISDORFER, J. W. **Influência da adição ou substituição de adições minerais ao cimento Portland: efeitos da carbonatação, absorção capilar e resistividade do concreto. Dissertação. Universidade Federal do Paraná, 2015.**

[10] HELENE, P.R.L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. 231p. Tese (Livre-Docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.

[11] CASCUDO, O. O **controle da corrosão de armaduras em concreto. Inspeção e técnicas eletroquímicas**. 1ª ed, São Paulo: UFG, 1997.

[12] SPERB, J. E. K. **Carbonatação e absorção capilar de concretos com adições minerais e ativadores químicos** (Dissertação de Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, 2003.

[13] CASCUDO, O; CARASEK, H. Ação da carbonatação no concreto – **Concreto: Ciência e Tecnologia**. – São Paulo: IBRACON, 2011. V1. pp. 849-883.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

[14] ISAIA, G. C. **Concreto: ciência e tecnologia**. v. 1, 2ª ed. São Paulo: IBRACON, 2011.

[15] SILVA, V. M. **Ação da carbonatação em vigas de concreto armado em serviço, construídas em escala natural e reduzida**. Tese. Escola de engenharia da Universidade de São Paulo, 2007.

[16] HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. Tese. Universidade de São Paulo, 2008.

[17] RIBEIRO, D. V. **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado**. 1ª ed. Rio de Janeiro: ELSEVIER, 2014.

[18] KÖLIÖ, A. et al. **Corrosion products of carbonation induced corrosion in existing reinforced concrete facades**. Cement and Concrete Research, v. 78, p. 200–207, 2015.

[19] SHIO, C. et al. **Effects of superplasticizers on carbonation resistance of concrete**. Construction and Building Materials, v. 108, p. 48–55, 2016.

[20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739 - Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro. Junho, 2007.

[21] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7584 - Concreto endurecido — Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão — Método de ensaio.** Rio de Janeiro. Dezembro, 2012.

[22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802 - Concreto endurecido — Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica**. Rio de Janeiro. Fevereiro, 2013.