

## EFEITO DA CARBONATAÇÃO E ATAQUE POR SULFATOS NA DURABILIDADE DE CONCRETOS COM DIFERENTES RELAÇÕES ÁGUA/CIMENTO\*

Beatryz Cardoso Mendes<sup>1</sup>  
Leonardo Gonçalves Pedroti<sup>2</sup>  
Bruno José Quintão Silva<sup>3</sup>  
Jaime Carlos da Costa Soares<sup>4</sup>  
Tomás Braga de Brito<sup>5</sup>  
Gustavo Emílio Lima<sup>6</sup>

### Resumo

As edificações em concreto armado são projetadas de modo a atender um tempo mínimo de vida útil. No entanto, a durabilidade do concreto pode ser comprometida, colocando em risco segurança da construção. Isso torna necessário a investigação dos fatores de degradação, relacionados ao meio e ao material. Este trabalho objetiva o estudo das propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto sujeito a dois agentes externos: dióxido de carbono e solução de íons sulfato. Foram produzidos corpos de prova cúbicos de concreto a partir de três traços distintos, com relações água/cimento iguais a 0,51, 0,56 e 0,61, utilizando cimento Portland resistente à sulfatos (RS). Realizou-se, em parte dos exemplares, o ensaio de carbonatação acelerada. Os demais foram submetidos ao ataque por solução de sulfato de magnésio, durante um período total de 90 dias. Os corpos de prova foram caracterizados quanto à resistência à compressão. Os resultados mostram que a relação água/cimento influi fortemente tanto no avanço da carbonatação quanto na perda de resistência, após a imersão em meio agressivo. Observou-se, ainda, que a aplicação do cimento Portland RS não foi suficiente para evitar a degradação do concreto.

**Palavras-chave:** Concreto; Carbonatação; Sulfato.

### EFFECT OF CARBONATION AND SULFATE ATTACK ON DURABILITY OF CONCRETE WITH DIFFERENT WATER/CEMENT RATIOS

#### Abstract

Reinforced concrete buildings are designed to meet a minimum service life. However, the durability of the concrete can be compromised, putting at risk construction security. Therefore, it is necessary to investigate the degradation factors related to the environmental and the material. This work aims to study the mechanical properties and durability of concrete subjected to two external agents: carbon dioxide and sulfate ions solution. Concrete specimens were produced from three different mix proportions, with water/cement ratios of 0.51, 0.56 and 0.61, using sulfate resistant Brazilian Portland cement (RS). The accelerated carbonation test was performed in part of specimens. The remaining specimens were exposed to magnesium sulphate solution for 90 days. The specimens were characterized for compressive strength. The results showed that the water/cement ratio influenced both the advance of carbonation and the loss of strength, after immersion in aggressive environment. It was also observed that the application of the Brazilian Portland cement (RS) was not enough to avoid the concrete degradation.

**Keywords:** Concrete; Carbonation; Sulfate.

<sup>1</sup> Engenheira Civil, bacharel, mestranda, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Civil, doutor, professor, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro Civil, bacharel, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, Brasil.

<sup>4</sup> Eng. civil, bacharel, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil.

<sup>5</sup> Eng. civil, bacharel, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil.

<sup>6</sup> Eng. civil, mestre, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Todas as estruturas em concreto armado são dimensionadas de modo a atender um certo período de vida útil. No entanto, a durabilidade do concreto pode ser comprometida, ao longo do tempo, por muitos fatores humanos ou naturais [1]. As causas da deterioração podem ser físicas, químicas ou mecânicas [2]. Por exemplo, o transporte de líquidos agressivos, ou gases, no interior do concreto pode produzir alteração dos produtos de hidratação e pode levar à degradação da matriz cimentícia. Além disso, as armaduras podem ficar expostas a um meio corrosivo, sendo esta a maior causa de deterioração das estruturas em concreto armado. Muitos agentes podem causar danos, como o ingresso de íons cloreto, dióxido de carbono, ataques por sulfatos, dentre outros [1,3].

A carbonatação natural do concreto consiste na reação química entre os produtos de hidratação do cimento e o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) presente na atmosfera, formando carbonato de cálcio e água [4]. O fenômeno provoca a redução do pH da solução presente nos poros do concreto, de 12,6 para menos que 9, aproximadamente, em decorrência do consumo de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e precipitação do  $\text{CaCO}_3$  [5,6]. Quando a frente de carbonatação alcança as armaduras, a diminuição do pH do concreto circundante provoca a destruição da camada de óxido que as protege, provocando a despassivação destas. Assim, as barras de aço ficam propensas à corrosão. Entre todas as fontes de danos, a carbonatação do concreto é mais frequente, porque resulta da exposição natural das superfícies de concreto à atmosfera [7–9].

O ataque por sulfatos, por sua vez, consiste em um conjunto complexo de reações entre íons sulfatos e compostos hidratados presentes na pasta de cimento, como aluminato de cálcio e hidróxido de cálcio. O mecanismo de ataque resulta na produção de produtos secundários, tais como a etringita e o gesso. Esses produtos são formados a partir dos aluminatos de cálcio e são mais volumosos em relação aos compostos hidratados do cimento, o que pode levar à expansão, fissuração do concreto e aumento da permeabilidade. Atualmente, existem normas regulamentadoras de cimentos específicos que oferecem maior resistência a sulfatos, nos quais os teores de  $\text{C}_3\text{A}$  são limitados, dentre outras especificações [10]. No entanto, em muitas situações isso não é avaliado e não se sabe ao certo se o aglomerante realmente é eficaz na amenização dos danos.

Neste trabalho será avaliada a profundidade de carbonatação em concretos, produzidos com diferentes relações água/cimento, a partir de um ensaio acelerado. Pretende-se, ainda, verificar a influência do ataque por sulfatos na resistência à compressão de concretos produzidos com cimento Portland resistente à sulfatos.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram produzidos três traços distintos de concreto, com relações água/cimento ( $a/c$ ) de 0,51, 0,56 e 0,61, nomeados como AC051, AC056 e AC061, respectivamente. Utilizou-se cimento Portland CP III 40 RS e a dosagem dos componentes foi feita de acordo com o método da ACI/ABCP. Na Tabela 1 são apresentadas as quantidades consumidas de cimento, agregados graúdo e miúdo e água, para a produção de cada mistura, bem como os valores de abatimento (*slump*) obtidos. Os traços foram produzidos segundo as prescrições da ABNT NBR 12655 [11].

**Tabela 1.**Características dos traços de concreto produzidos

Traço	Consumo de areia (L/m <sup>3</sup> )	Consumo de cimento (L/m <sup>3</sup> )	Consumo de brita (L/m <sup>3</sup> )	Consumo de água (L/m <sup>3</sup> )	Relação a/c	Abatimento (mm)
AC051	759	372	1130	194	0,51	40
AC056	766	348	1130	198	0,56	42
AC061	816	309	1130	193	0,61	40

Foram moldados corpos de prova cúbicos, com aresta de 10 cm, tanto para o ensaio de carbonatação como para o de ataque por sulfato (Figura 1). Os corpos de prova foram desmoldados após 24h de permanência sob uma lona, para evitar a perda brusca de umidade. Em seguida, foram levados para cura em um reservatório com água e cal, onde foram mantidos por um período de 28 dias.

**Figura1.**Corpos de prova moldados em forma.

Para avaliar o fenômeno da carbonatação, foram utilizados trinta corpos de prova. Estes foram cortados ao meio e transformados em trinta pares de corpos de prova, no intuito de realizar uma melhor avaliação da frente de carbonatação no concreto. Em seguida, cada grupo de exemplares foi levado à câmara de carbonatação (Figura 2) para confinamento por trinta dias, expostos a uma atmosfera contendo 100% vol.CO<sub>2</sub>e 65 – 80% UR.

**Figura2.**Câmara de carbonatação utilizada na pesquisa.

Procedeu-se à retirada de um par de amostras dos corpos de prova confinados a cada 72 horas. Essas amostras foram cortadas no sentido axial da face em contato com o ambiente da câmara. Em seguida, foi aspergida solução fenolftaleína para a identificação da região carbonatada (pH ácido) e não carbonatada (pH básico). Com o auxílio de um paquímetro, foi registrado, em milímetros, o avanço da região atacada.

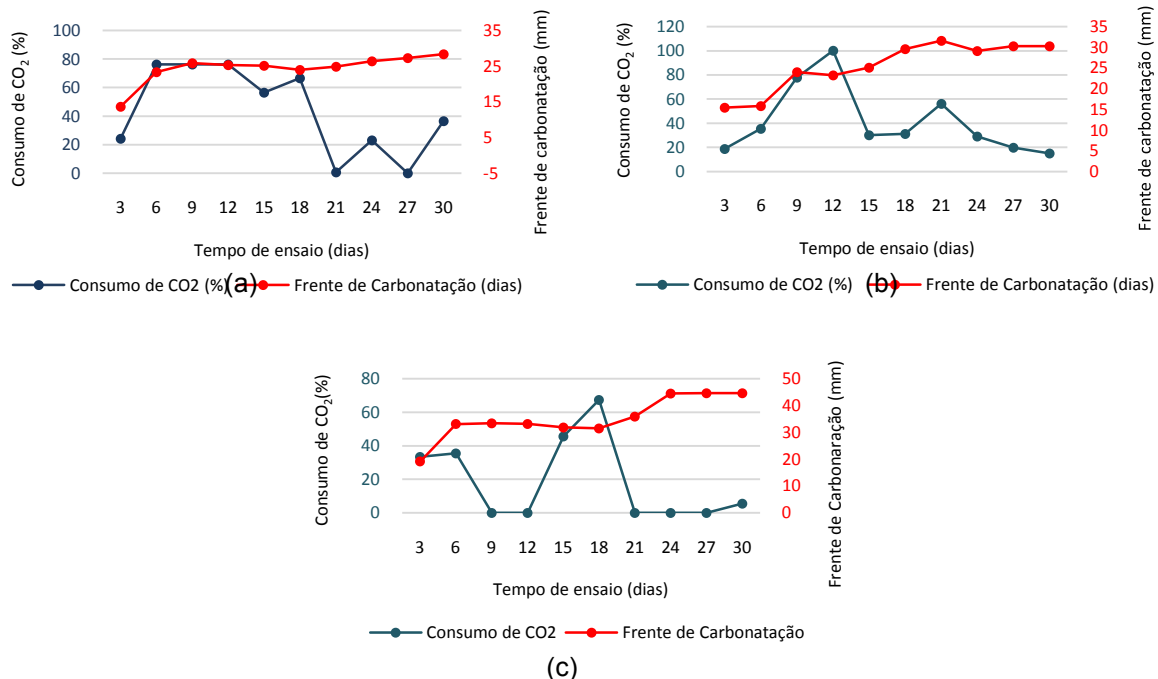
Para o ensaio de ataque por sulfatos foram destinados 60 corpos de prova. Após os 28 dias de cura, realizou-se o ensaio de resistência à compressão em quatro exemplares de cada traço. Optou-se por uma solução de sulfato de magnésio heptahidratado como fonte de íons sulfato, numa concentração de 50g/L. Tal concentração corresponde à condição de exposição moderada, segundo a ABNT NBR 12655 [11]. Desenvolveu-se uma câmara de sulfatação para a realização do ensaio (Figura 3), na qual 36 exemplares ficaram confinados. Os corpos de prova foram submetidos a ciclos de molhagem e secagem na solução de sulfato de magnésio. O processo decorreu com a imersão em solução por 24 horas, e ao ar por 72 horas. As avaliações de resistência à compressão dos corpos de prova ocorreram nos períodos de 30, 60 e 90 dias após o início do ensaio, seguindo os critérios da ABNT NBR 5739 [12].



Figura3. Câmara de sulfatação utilizada na pesquisa.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

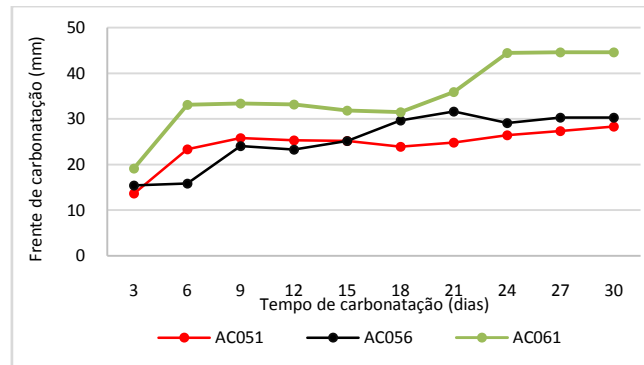
O consumo de CO<sub>2</sub> e a evolução da frente de ataque média, em função do tempo, para os concretos com relação água/cimento de 0,51, 0,56 e 0,61 são apresentados na Figura 4 (a, b e c).



**Figura4.**Consumo de CO<sub>2</sub> x tempo: (a) AC051; (b) AC056; (c) AC061.

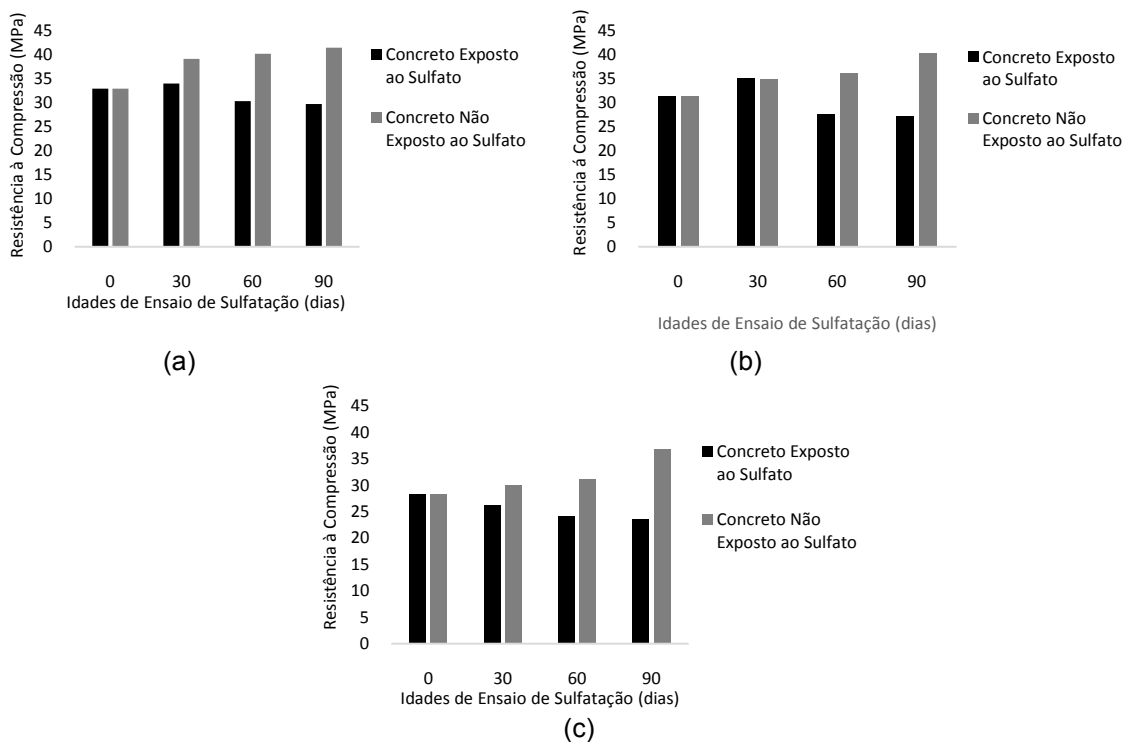
Através da análise dos gráficos é possível observar que ocorreram variações no consumo de dióxido de carbono ao longo do período de ensaio. Essas oscilações são pertinentes e se justificam principalmente pelo fato do concreto ser um material não homogêneo. As quedas nas curvas que representam o avanço da frente de carbonatação se justificam pela presença do agregado graúdo, que se configura como um obstáculo no avanço da carbonatação para o interior do corpo de prova. Com bases nos gráficos é possível observar que, em todos os traços ensaiados, a curva da frente de carbonatação teve comportamento predominantemente crescente ao longo do tempo. Este crescimento foi mais expressivo no período entre o início do experimento (tempo zero) e a primeira retirada dos exemplares para medição (3º dia), alcançando 13,60 mm, 15,41 e 19,11 mm nos traços AC051, AC056 e AC061, respectivamente. Posteriormente, houve uma queda na variação dos valores tendendo à constância de crescimento a partir de certo período. Tais oscilações são explicadas pelo consumo não homogêneo de dióxido de carbono ao longo do tempo, e influenciadas por fatores como as condições atmosféricas da câmara e porosidade do concreto. Isso reflete na velocidade na qual ocorrem as reações químicas entre o CO<sub>2</sub> e os compostos presentes no mesmo.

Na Figura 5 é apresentado um gráfico comparando o avanço da frente de carbonatação com cada traço de concreto produzido. É notável que, quanto maior a relação água/cimento, maior a largura carbonatada. A relação água/cimento é ainda um fator chave que influencia a cinética da carbonatação e isto é atribuído diretamente ao papel desempenhado pela porosidade. Quanto maior a relação a/c, maior é a quantidade de água livre que pode ser evaporada, deixando assim os vazios e incrementando a porosidade do concreto. Isso promove a penetração e difusão do dióxido de carbono. Observa-se que, em um tempo decorrido de 30 dias, e aumentando a relação água/cimento de 0,51 para 0,56 e 0,61, houve um incremento de 6,92% e 57,4% da profundidade carbonatada, respectivamente.



**Figura5.** Avanço da frente de carbonatação em função do tempo de exposição.

Na Figura 6 estão apresentados os gráficos de resistência à compressão dos concretos avaliados após exposição ao sulfato de magnésio. Pode-se, através destes, observar a evolução da frente de ataque média ao longo do tempo de ensaio, caracterizada pela queda da resistência.



**Figura6.** Resistência à compressão versus tempo para os concretos: (a) AC051; (b) AC056; (c) AC061.

Ao analisar a evolução das resistências com o tempo de exposição em solução de sulfatos, percebe-se que, para todos os traços, houve decréscimo nos valores de resistência à compressão. Este fato está relacionado à formação de etringita tardia, também conhecida como “sal de Candlot”; tal produto é muito expansivo e tem seu processo de expansão acelerado sob efeito de ciclos de molhagem e secagem [13]. O aumento de volume decorrente da sua formação leva ao surgimento de microfissuras em toda superfície do concreto, gerando planos de fraqueza durante a ruptura, e, conseqüentemente, queda significativa nas resistências à compressão. Para o traço AC051, mais rico, observou-se que o ataque do agente externo inibiu o ganho de resistência nos primeiros trinta dias, e provocou queda na resistência à compressão aos 60 e 90 dias. Aos 90 dias, a resistência medida foi 29,80MPa,

apontando uma perda de 28%, aproximadamente, em relação ao concreto não atacado pela solução de sulfato. Ressalta-se que o cimento adotado é classificado como resistente a sulfatos; portanto, não deveria haver queda significativa na resistência. Em relação ao traço AC056, nos primeiros trinta dias houve um ganho de, aproximadamente, 10% na resistência do concreto submetido ao ataque. Por apresentar uma maior relação água/cimento, este concreto é mais poroso que o apresentado anteriormente. Assim, os poros são preenchidos pela etringita sem que haja fissuração, o que aumenta a capacidade de carga dos corpos de prova. No período de 30 a 60 dias, e 60 a 90 dias, houve decréscimos de 18,6% e 5,9% na resistência à compressão, respectivamente. Comparando os valores, aos 90 dias, referentes ao exposto ao ataque e ao concreto de referência, observa-se uma queda de 32,5%. No traço AC061, por sua vez, houve efeito imediato da exposição em um ambiente agressivo nas resistências à compressão, em decorrência à qualidade inferior e maior permeabilidade. Isso propicia uma maior difusão da solução de sulfato de magnésio e intensifica o ataque no material, causando sua deterioração. A perda de resistência progrediu com valores de 1,6% no período de 30 a 60 dias, e 8,1% entre 60 e 90 dias, com valor de 22,79 MPa ao fim deste período. Isso significa uma queda de 38,1% em relação à resistência do concreto de mesma relação água/cimento não atacado pela solução.

A ABNT NBR 12655 [11], para condição moderada de ataque, propõe relação água/cimento de no máximo 0,50 e estabelece um limite mínimo de resistência à compressão igual a 35MPa. Para os concretos ensaiados foram obtidos resultados também aquém desse limite, em todas as relações a/c. O traço AC051, apesar de possuir relação a/c ligeiramente superior ao máximo sugerido pela norma, apresentou valor de resistência à compressão 14,8% abaixo do limite proposto pela mesma.

### 3 CONCLUSÃO

Esse estudo foi realizado para explorar a influência da relação água cimento na durabilidade de concretos, submetidos à carbonatação acelerada e ataques por sulfatos. Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- Em todos os traços ensaiados, a curva da frente de carbonatação teve comportamento predominantemente crescente ao longo do tempo. As oscilações são explicadas pelo consumo não homogêneo de CO<sub>2</sub>, e influenciadas por características inerentes à câmara e ao concreto;
- O aumento da relação água/cimento influi diretamente sobre o desenvolvimento da carbonatação, provocando um aumento na frente carbonatada. Isso ocorre devido a matriz do concreto se tornar mais porosa e, conseqüentemente, mais permeável;
- Para todas as relações água/cimento estudadas, os valores de resistência à compressão apresentaram progressivo decréscimo ao longo de cada período de 30 dias;
- O concreto com menor relação de água/cimento (rico em finos) tem menor decréscimo absoluto ao longo das idades, devido à menor permeabilidade. Como consequência, tem-se uma maior dificuldade da difusão da solução para o interior do concreto. Aumentando a relação água/cimento, foi notada perda de resistência de forma mais acentuada nas primeiras idades;

- Os concretos expostos à solução de sulfato de magnésio não apresentaram resultados satisfatórios de resistência à compressão, estando aquém do mínimo normatizado pela NBR 12655: 2015;
- Este fato mostra que, dependendo da obra e da sua localização, faz-se necessário a realização de testes que comprovem a eficácia do cimento em relação à resistência ao ataque por sulfatos, de modo a garantir segurança e qualidade à edificação. Para tal, outros fatores como condições de cura, qualidade e composição da água de amassamento e o processo de produção do concreto devem ser melhor avaliados.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal de Viçosa pelo suporte técnico dado ao desenvolvimento da pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- 1 Achal V, Mukerjee A, Sudhakara RM. Biogenic treatment improves the durability and remediates the cracks of concrete structures. *Construction and Building Materials*. 2013;48:1–5.
- 2 Tang SW, Yao Y, Andrade C, Li ZJ. Recent durability studies on concrete structure. *Cement and Concrete Research*. 2015;78:143–54.
- 3 Chen Y, Davalos JF, Ray I, Kim H-Y. Accelerated aging tests for evaluations of durability performance of FRP reinforcing bars for concrete structures. *Composite Structures*. 2007;78:101–11.
- 4 Lo TY, Liao W, K. Wong C, Tang W. Evaluation of carbonation resistance of paint coated concrete for buildings. *Construction and Building Materials*. 2016; 107: 299–306.
- 5 Villain G, Thiery M, Platret G. Measurement methods of carbonation profiles in concrete: Thermogravimetry, chemical analysis and gammadensimetry. *Cement and Concrete Research*. 2007; 37: 1182–92.
- 6 Chi JM, Huang R, Yang CC. Effects of carbonation on mechanical properties and durability of concrete using accelerated testing method. *J Mar Sci Technol*. 2002; 10: 14–20.
- 7 Talakokula V, Bhalla S, Ball RJ, Bowen CR, Pesce GL, Kurchania R, et al. Diagnosis of carbonation induced corrosion initiation and progression in reinforced concrete structures using piezo-impedance transducers. *Sensors Actuators A Phys*. 2016; 242: 79–91.
- 8 Duprat F, Vu NT, Sellier A. Accelerated carbonation tests for the probabilistic prediction of the durability of concrete structures. *Construction and Building Materials*. 2014; 66: 597–605.
- 9 Castro P, Sanjuán M., Genescá J. Carbonation of concretes in the Mexican Gulf. *Build Environ*. 2000; 35: 145–9.
- 10 Neville A. The confused world of sulfate attack on concrete. *Cement and Concrete Research*. 2004; 34: 1275–96.
- 11 Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT; 2015.
- 12 Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto. Rio de Janeiro: ABNT; 2007.
- 13 Min D, Mingshu T. Formation and expansion of ettringite crystals. *Cement and Concrete Research*. 1994; 24 (1): 119-126.