

Variação na durabilidade da estrutura com a utilização do concreto autocicatrizante

Crédito

Eng. Mariana Silva Ferreira, auxiliar de coordenação, Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, mestranda da Universidade Federal do ABC.

Eng. Gustavo Lombardo, Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia.

Eng. Marcos Lui Geh, Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia.

Eng. Cláudio Neves Ourives, sócio e diretor executivo, Penetron Brasil.

Eng. Me. Emilio Minoru Takagi, diretor técnico, Penetron Internacional, doutorando do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA).

Prof. Dra. Cassia Silveira de Assis, coordenadora da engenharia civil, Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia.

Resumo

O concreto autocicatrizante é obtido pela utilização do aditivo redutor de permeabilidade por cristalização capilar e é um material viável para a obtenção de estruturas que possuem maior durabilidade. Um traço usual de concreto foi realizado utilizando o aditivo mencionado, foram realizados dois processos de cura longa, com e sem aplicação de carga para fissuração do corpo de prova. Analisou-se a resistência à compressão, carbonatação acelerada, o aumento de durabilidade na estrutura autocicatrizante e o seu cobrimento equivalente. Foi possível afirmar que a utilização do aditivo não gera diferença significativa na resistência à compressão, independente do tipo de cura realizada. Para a carbonatação acelerada houve uma redução na penetração de 2 mm em relação ao concreto referência, resultando em um aumento de 47 % da durabilidade. Para o cobrimento equivalente obteve-se uma diminuição significativa quando utilizado o concreto autocicatrizante, variando entre 0,7 e 1,4 cm dependendo da agressividade do ambiente.

Palavras-chave: Aditivo redutor de permeabilidade por cristalização capilar. Autocicatrizante. Carbonatação. Cobrimento. Durabilidade.

1 Introdução

O crescimento da população mundial faz com que o número de edificações e obras de arte com estruturas predominantemente de concreto cresça, simultaneamente, a preocupação com sua manutenção ao longo do tempo também passa a ter destaque. Isso faz com que a durabilidade do material utilizado se torne cada vez mais um fator determinante para a aprovação do projeto final.

No entanto, o conceito de durabilidade ainda é muito subjetivo, pois essa propriedade está relacionada a muitos fatores que não são constantes para nenhuma estrutura como, por

exemplo, o material utilizado, o ambiente em que a estrutura se encontra e as condições de uso e manutenção.

Mesmo não sendo amplamente abordada nas normativas brasileiras existentes, a principal forma adotada para quantificação da durabilidade da estrutura é o cálculo do período necessário para os agentes agressivos penetrarem na estrutura, chegando nas barras de aço internas. Quando isso ocorre o material passa pelo processo de despassivação, iniciando o processo de corrosão do aço que, quando avançado, reduz consideravelmente a seção transversal resistente da armadura e gerando perda de aderência, podendo chegar ao deslocamento do revestimento e a completa exposição do aço [1].

Sendo a corrosão das armaduras um dos principais fatores que comprometem a utilização e segurança das estruturas, se torna necessário o estudo das principais causas dessa degradação. Uma dessas causas é a carbonatação, que ocorre quando o gás carbônico entra em contato com o concreto, que é capaz de reabsorver entre 3 e 5% do CO₂ emitido durante a produção do cimento [2]. A carbonatação poderia ser desejável se não gerasse a redução da alcalinidade do concreto e a conseqüente despassivação do revestimento da armadura, gerando a corrosão do material.

Desse modo, a durabilidade pode ser comparada ao período necessário para que o processo de carbonatação atinja a armadura, ou seja, o dióxido de carbono penetre toda a espessura do revestimento da estrutura, encontrando o material metálico. Sendo assim, uma das maneiras de aumentar a vida útil do concreto é limitar a entrada dos agentes agressivos. No entanto, deve-se considerar que esse desempenho depende diretamente da facilidade em que líquidos ou gases penetram no concreto e que a fissuração do material acelera esse processo [3].

Uma das soluções viáveis está na utilização do aditivo redutor de permeabilidade por cristalização capilar no traço do concreto, transformando-o em concreto autocicatrizante. Esse material vem sendo estudado há alguns anos e já foi empregado em construções de notoriedade como a cobertura fluida do Museu de Arte do Rio (M.A.R.) e a laje de subpressão do Museu da Imagem e do Som (M.I.S.), ambas no Rio de Janeiro [4]. Teve sua eficiência comprovada, incluindo a confirmação de que sua utilização aumenta a taxa de concreção, reduzindo tanto o tamanho dos poros como a porosidade total do material [5].

Esse aditivo reage com a umidade e com os produtos da hidratação do cimento formando uma estrutura cristalina insolúvel nos poros e capilares do concreto capaz de selar as fissuras e inibir a penetração de agentes agressivos. É constituído por cimento Portland, compostos químicos ativos e rastreador químico. Sabe-se que é necessário a exposição do concreto autocicatrizante à água para que esse processo ocorra com maior eficiência, sendo comprovado que a exposição do material à ciclos úmidos e secos é a mais recomendada para a autocicatrização [4].

Foram analisadas as alterações que ocorrem pela utilização do aditivo redutor de permeabilidade por cristalização capilar na carbonatação do material pelo ensaio laboratorial de carbonatação acelerada e na resistência à compressão. O ensaio de carbonatação acelerada permitiu a obtenção da profundidade de penetração do gás carbônico e seu coeficiente de carbonatação. A partir desses dados foi possível determinar a vida útil de projeto ou sua durabilidade, seguido pelo cálculo do revestimento equivalente do concreto autocicatrizante, ou seja, o revestimento capaz de gerar a mesma proteção na estrutura ao ser comparado com o concreto usual, ou de referência.

2 Materiais e programa experimental

Todos os corpos de prova foram moldados utilizando os seguintes materiais: areia média lavada, brita 0 e brita 1 como agregados; cimento Portland composto CP II–E–32 RS; aditivo redutor de água tipo 2 (RA2) na dosagem de 0,35 % e aditivo redutor de permeabilidade por cristalização capilar na dosagem de 0,8 %, ambos em relação a massa de cimento.

A determinação do traço foi realizada pelo método do IBRACON e o traço utilizado foi de 1 : 1,8 : 2,7 : 0,52 sendo, respectivamente, cimento, areia, brita 0, brita 1 e a relação água/cimento. Foram produzidas amostras de concreto referência e autocicatrizante. A moldagem dos corpos de prova foi realizada de acordo com a norma NBR 5738 (2015).

Foram realizados dois processos de cura distintos, denominados cura 1 e cura 2, descritos na Figura 1. O primeiro foi uma cura longa, sem aplicação de carga, a fim de identificar as alterações desse aditivo no concreto realizando os procedimentos de cura padrão em laboratórios. O segundo analisou as variações das propriedades para o concreto fissurado, buscando uma correlação com os períodos e condições usuais em obras.

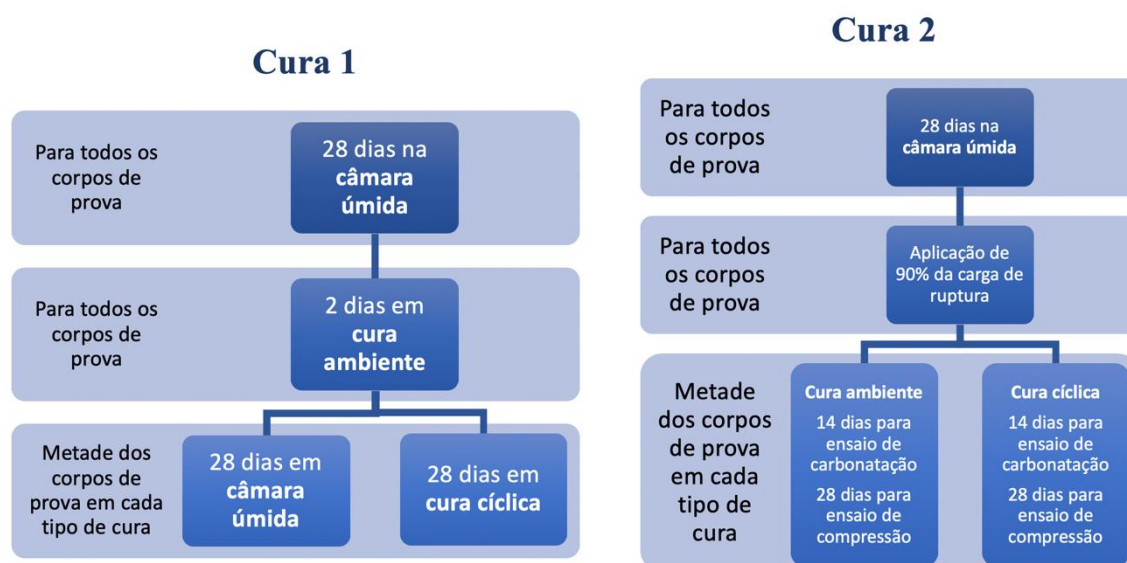


Figura 1 - Descrição dos métodos de cura utilizados

Para ambos os processos a cura cíclica foi aplicada, consistindo na cura dos corpos de prova imersos em água até sua metade durante 4 dias, sendo invertidos após esse período, alternando seu topo com a base. Esse procedimento é realizado durante um período total de 28 dias e tem como função permitir a interação da água com o dióxido de carbono e com os materiais não hidratados.

Para a cura 1 os corpos de prova desmoldados foram mantidos na câmara úmida, com $80 \pm 10\%$ de umidade relativa, durante 28 dias. Após esse período permaneceram por 2 dias no ambiente do laboratório e, em seguida, retornaram para a câmara úmida, onde apenas metade dos corpos de prova foram submetidos a cura cíclica. A cura 1 foi utilizada para as análises de resistência à compressão, a fim de observar o material pelos parâmetros usuais de laboratório.

A cura 2 passou pelos primeiros 28 dias na câmara úmida, em condições idênticas as descritas na cura 1. Após essa etapa aplicou-se 90 % da carga de ruptura, variando de 42 a 43 MPa. Essa carga foi aplicada com a finalidade de gerar microfissuras nos corpos de prova, tais fissuras simulam os efeitos de temperatura, dilatação do concreto e esforços de carregamento. Os corpos de prova fissurados foram levados para a segunda parte da cura, onde

metade deles permaneceu em local com temperatura e umidade ambiente e a outra metade passou pela cura cíclica. O tempo que os corpos de prova permaneceram na segunda parte da cura diferiu para cada ensaio, sendo 14 dias para o ensaio de carbonatação acelerada e 28 dias para o ensaio de resistência à compressão.

A análise da resistência à compressão dos corpos de prova seguiu a norma NBR 5739 (2018). O ensaio foi realizado após a primeira e a última etapa de ambos os processos de cura, ou seja, após os 28 dias usuais e aos 58 dias para a cura 1 e 56 dias para a cura 2.

O ensaio de carbonatação acelerada foi realizado ao final do período de cura 2. Por não ser um ensaio normatizado, sua metodologia foi desenvolvida pelo laboratório que realizou o experimento. Os corpos de prova foram mantidos na câmara de carbonatação durante 4 semanas consecutivas, com temperatura de 23 ± 2 °C, umidade de 65 ± 5 % e teor de CO₂ de 5 ± 1 %. Foram realizadas medidas de profundidade de carbonatação a cada 7 dias.

Para a realização das medidas o corpo de prova foi cortado a cada semana, obtendo-se um pedaço de 4 cm, onde foi pulverizado uma solução indicadora de fenolftaleína na concentração de 1 % sobre a face que não estava em contato direto com a câmara. Esse procedimento permite a visualização da profundidade de penetração do dióxido de carbono de acordo com a medida da borda que não tem sua cor alterada pela aplicação da fenolftaleína. Apenas a parte alcalina do material fica com uma cor rosada após a aplicação. A medida da profundidade de carbonatação é realizada em diferentes pontos do corpo de prova obtendo-se a profundidade média de carbonatação, em milímetros.

Utilizou-se o modelo de Tuutti, um dos modelos mais aceitos para o cálculo da penetração de agentes agressivos no concreto [1]. No entanto, não foi possível utilizá-lo diretamente, pois o ensaio realizado é acelerado, por esse motivo a equação para obtenção do tempo de ensaio foi adaptada pelo laboratório e está descrita na equação 1.

$$e_c = k \cdot \sqrt{t \cdot 0,4566} \quad (1)$$

Sendo: e_c a profundidade média de carbonatação em mm; k o coeficiente de carbonatação [$\text{mm/ano}^{0,5}$] e t o tempo de ensaio/durabilidade em ano.

Com as profundidades de carbonatação e seus respectivos tempos de ensaio, foi possível determinar o coeficiente de carbonatação. Com esse coeficiente, é possível encontrar o tempo de vida útil ou a durabilidade da estrutura admitindo-se o valor de cobrimento como a profundidade máxima para esse período. Foi utilizado o valor de 2,5 cm para calcular o tempo necessário para a despassivação por carbonatação.

3 Resultados e discussões

Todos os resultados de resistência à compressão se encontram na Tabela 1. Para a cura 1 fica evidente que, aos 28 dias, não houve diferença de resistência entre o concreto referência e o concreto autocicatrizante. O aumento na resistência dos corpos de prova aos 58 dias ocorre devido ao maior tempo de cura, possibilitando a obtenção de uma maior resistência quando comparada com os 28 dias. No entanto, para o concreto referência em cura na câmara úmida, houve uma diminuição em 0,67 % em comparação com a cura cíclica, e, para o concreto autocicatrizante, ocorreu um aumento de 1,42 % na resistência do corpo de prova submetido a cura cíclica. Essas pequenas variações podem ser decorrentes da variabilidade do material e do processo de confecção do concreto, não sendo significativas.

Tabela 1 - Resultados de resistência à compressão

Cura	Tempo	Referência	Autocicatrizante
1	28 dias	43,6	43,6
	Cura na câmara úmida 58 dias	51,1	52,1
	Cura Cíclica 58 dias	50,8	52,9
2	28 dias	48,7	48,8
	Cura ambiente 56 dias	54,8	52,6
	Cura Cíclica 56 dias	49,6	51,2

A cura 2 também não obteve diferenças significativas na resistência à compressão aos 28 dias, o que era esperado, já que o processo de cura dessa primeira parte é idêntico em ambos os casos. Aos 58 dias é possível observar uma diminuição da resistência à compressão em 4,08 % para o concreto autocicatrizante na cura ambiente e um aumento de 3,03 %, para o concreto autocicatrizante, na cura cíclica. Com isso, foi possível concluir que não houve alterações significativas de resistência para o concreto com a fissuração, independente da cura. Esse resultado é relevante para comprovar que a utilização do aditivo redutor de permeabilidade por cristalização capilar não causa nenhuma alteração indesejada na resistência do concreto.

Os ensaios de profundidade de carbonatação foram realizados apenas para a cura 2, visando a utilização do processo de cura que mais se aproxima das condições reais de uma obra civil. Os resultados obtidos durante as 4 semanas de ensaio são apresentados na Figura 2.

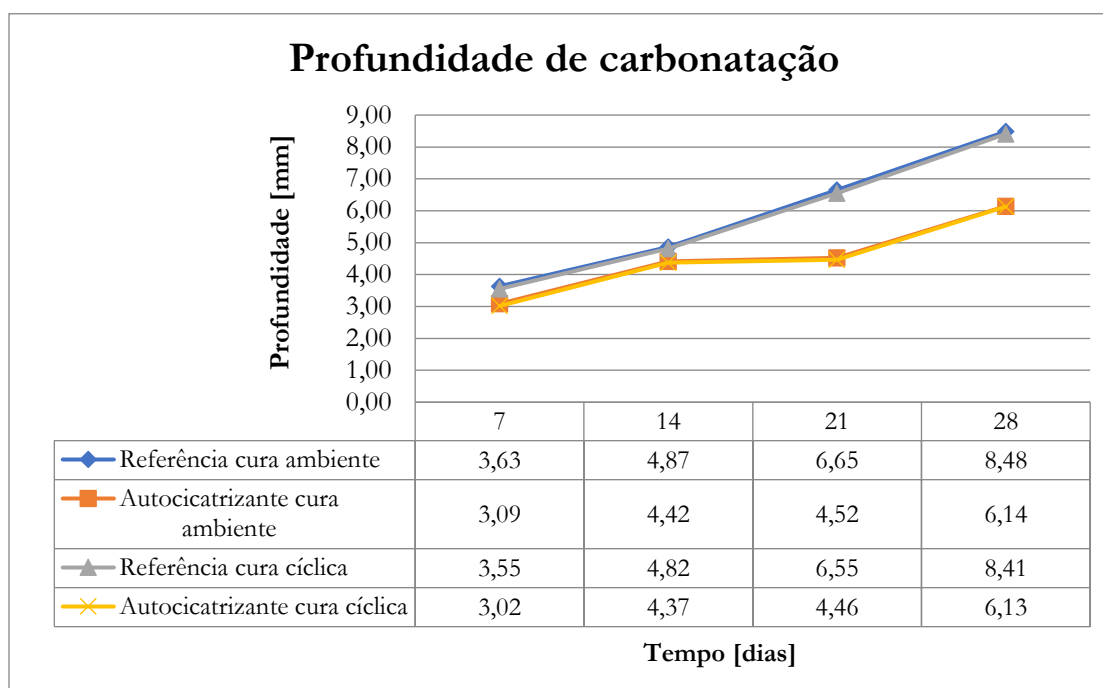


Figura 2— Profundidade de carbonatação para os corpos de prova submetidos ao método de cura 2

Ao analisar os valores de profundidade de carbonatação é possível verificar que as variações que ocorreram entre o concreto referência e o autocicatrizante tiveram uma constância de, aproximadamente, 0,5 mm para as duas primeiras semanas e 2 mm a partir de 21 dias. A

cura cíclica e ambiente não sofreram variações significativas entre si, confirmando que, para a carbonatação, não houve uma interferência relevante do tipo de cura escolhido. No entanto, a presença do aditivo redutor de permeabilidade por cristalização capilar reduziu significativamente a profundidade de carbonatação a partir da terceira semana.

A baixa redução da profundidade de carbonatação entre o concreto referência e o autocicatrizante nas primeiras semanas pode ser explicada pela alta resistência do traço de concreto utilizado, o que gera, naturalmente, uma redução da penetração de gás carbônico.

A partir da terceira semana o concreto referência continua mantendo um crescimento constante em sua profundidade carbonatada, enquanto o concreto autocicatrizante cresce em menor proporção, ficando praticamente estável entre a segunda e a terceira semana. Esse comportamento pode estar relacionado à ação do aditivo.

A durabilidade do material foi calculada de acordo com as profundidades de carbonatação da quarta semana, 28 dias. Foram utilizados esses valores devido ao aumento da precisão dos resultados com o aumento do tempo de ensaio, por terem um maior tempo de exposição e permanência na câmara de carbonatação. Os resultados para os coeficientes de carbonatação e a durabilidade da estrutura se encontram na Tabela 2.

Tabela 2 - Coeficiente de carbonatação e durabilidade da estrutura cura 2

Tipo do concreto	Profundidade média de carbonatação [mm]	Coeficiente de carbonatação - k [mm²/ano]	Durabilidade da estrutura [anos]
Referência cura ambiente	8,48	2,37	111,1
Autocicatrizante cura ambiente	6,14	1,72	211,7
Referência cura cíclica	8,41	2,35	113,0
Autocicatrizante cura cíclica	6,13	1,72	212,5

A alteração da durabilidade para a estrutura com concreto autocicatrizante foi calculada fixando-se o cobrimento de 2,5 cm e resultou em um aumento de 47,54 % para a cura ambiente e de 46,80 % para a cura cíclica, ou seja, o tipo de cura não foi significativo para essa propriedade e a durabilidade da estrutura teve um aumento muito significativo.

A fim de estimar o cobrimento necessário do concreto autocicatrizante para manter a mesma durabilidade do concreto referência, recalculou-se o tempo de vida útil fixando-se os valores de cobrimento descritos na norma ABNT NBR 6118 (2014) e divididos em quatro classes, sendo a classe 1 a menos agressiva ao concreto e a classe 4 a mais agressiva como, por exemplo, construções com contato contínuo e direto com o mar.

Com os valores de cobrimento fixos, encontrou-se a durabilidade para o concreto referência. Utilizando o valor de durabilidade encontrado e alterando o valor do coeficiente de carbonatação para o do concreto autocicatrizante, foi possível encontrar o cobrimento necessário para esse material. Os dados de tempo e cobrimento utilizados para cada classe estão descritos na Tabela 3. Os cobrimentos equivalentes estão descritos na Figura 3.

Tabela 3 - Dados utilizados para cada classe de agressividade

Classe	Cobrimento [cm]	Tempo de vida útil [anos]
1	2,5	112
2	3,0	160
3	4,0	286
4	5,0	448

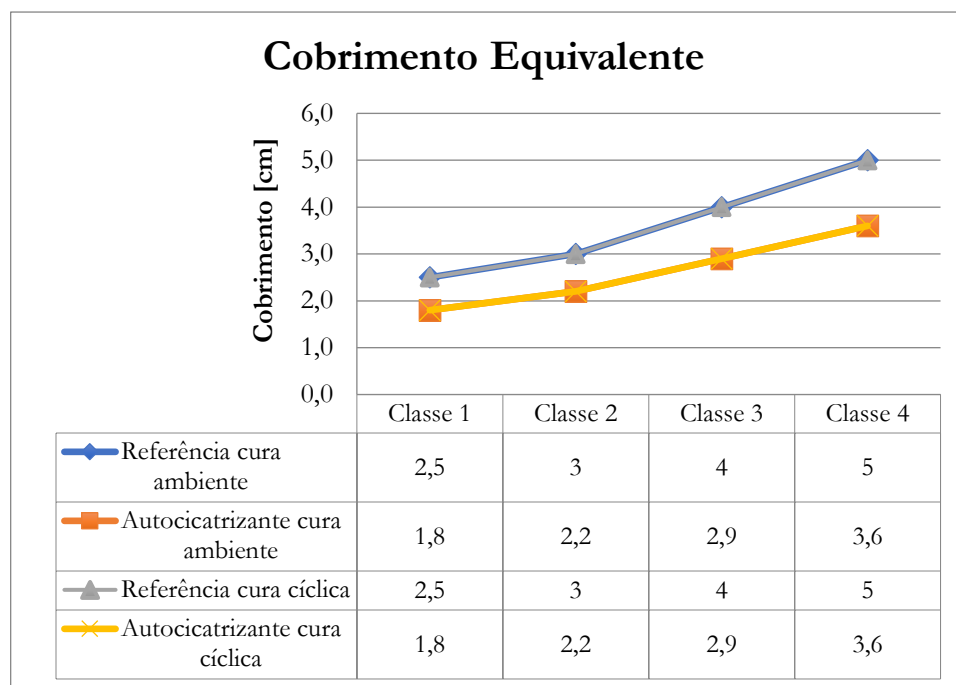


Figura 3 - Gráfico do cobrimento equivalente

É possível observar que o cobrimento equivalente para o concreto autocicatrizante teve uma diminuição para cada classe de 0,7 cm, 0,8 cm, 1,1 cm e 1,4 cm, respectivamente. A diminuição do cobrimento aumenta de acordo com o aumento da classe, o que é muito significativo economicamente, devido a necessidade de uma maior espessura para essas classes de maior agressividade. Como nos outros casos analisados, não houve diferenças significativas entre os tipos de cura.

4 Conclusões

Com os resultados obtidos foi possível concluir que:

- Os diferentes métodos de cura não geraram alterações relevantes em nenhum dos ensaios realizados.
- A utilização do aditivo redutor de permeabilidade por cristalização capilar não causa alteração significativa na resistência à compressão do material.
- Houve uma redução considerável no coeficiente de carbonatação para o concreto autocicatrizante.

- A utilização do aditivo redutor de permeabilidade por cristalização capilar gerou um aumento da durabilidade da estrutura estimado em 47% quando comparada ao material referência.
- Seria possível reduzir o cobrimento necessário para a obtenção do mesmo tempo de vida útil da estrutura ao utilizar o concreto autocicatrizante, gerando uma economia considerável para grandes estruturas de concreto armado.

5 Agradecimentos

Agradecemos a empresa Penetron Brasil Ltda. por compartilhar seus conhecimentos e seu produto, além dos laboratórios da Associação Brasileira do Cimento Portland (ABCP) e Testin Tecnologia de Materiais Ltda., por concederem os ensaios realizados na pesquisa.

6 Referências

- [1] Medeiros MHF de, Andrade JJ de O, Helene P. Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto. In: Isaia GC (ed) *Concreto: Ciência e Tecnologia*. IBRACON, 2011, p. 37.
- [2] Claisse PA. Introduction to cement and concrete. In: *Civil Engineering Materials*. Oxford: Elsevier, pp. 155–162.
- [3] Byoungsun P, Young CC. Investigating a new method to assess the self-healing performance of hardened cement pastes containing supplementary cementitious materials and crystalline admixtures. *J Mater Res Technol* 2019; 8: 6058–6073.
- [4] Takagi EM, Lima MG, Helene P. Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória de alto forno ativados por catalisador cristalino. *Concreto & Construções*, 2014, pp. 75–79.
- [5] Zheng K, Yang X, Chen R, et al. Application of a capillary crystalline material to enhance cement grout for sealing tunnel leakage. *Constr Build Mater* 2019; 214: 497–505.