2020 ENTAC
XVIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
Futuro da Tecnologia do Ambiente Construído e os Desafios Globais
Porto Alegre, 4 a 6 de novembro de 2020

AVALIAÇÃO MICROESTRUTURAL E DE DESEMPENHO DE ADITIVO HIDROFUGANTE PARA CONCRETO

CASTRO, Carlos (1); SOARES, Hamilton (2); MAIA, Gabriel (3); CARDOSO, Murilo (4); Bonfim, Rodrigo (5); PAES, Isaura (6).

(1) Universidade Federal do Pará, murillosc@gmail.com
(2) Universidade Federal do Pará, hamiltonsbs10@gmail.com
(3) Universidade Federal do Pará, gabrielpotiguar@gmail.com
(4) Universidade Federal do Pará, engmurilocardoso@gmail.com
(5) Universidade Federal do Pará, rodrigocb@gmail.com
(6) Universidade Federal do Pará, isaurapaes@ufpa.br

RESUMO

O presente estudo teve como objetivo principal avaliar por meio de análise microestrutural (MEV e espectroscopia de raio-X), o comportamento de um aditivo hidrofugante cristalizante especialmente indicado para aplicação no concreto. As avaliações foram realizadas em corpos de prova confeccionados em pasta de cimento, adicionando-se 2% do aditivo, em substituição a massa de cimento e, comparou-se seus resultados a uma pasta de referência (sem aditivo hidrofugante). Além disso, a fim de avaliar o desempenho mecânico e de durabilidade deste foram realizados, respectivamente, os ensaios de resistência à compressão axial e permeabilidade à água, porém, em corpos de prova de concreto (cimento, areia e brita). Os resultados microestruturais mostraram que houve a formação de compostos cristalinos insolúveis nos poros e nos capilares do concreto dificultando a penetração de água. Este fato foi reproduzido em sua resistência à compressão, com incremento de 20% em seus valores, em relação ao concreto de referência e, consequentemente, redução em sua permeabilidade. A formação destes cristais nos vazios e nos interstícios provenientes da microfissuração interna do concreto tem como consequência tornar o material mais denso e, por conseguinte, mais impermeável, fato este ratificado na pesquisa.

Palavras-chave: *Aditivo cristalizante. Microestrutura. Desempenho. Concreto.*

ABSTRACT

The present study had as main objective to evaluate, by means of microstructural analysis (SEM and X-ray spectroscopy), the behavior of a crystallizing water-repellent additive especially indicated for application in concrete. The evaluations were carried out on specimens made of cement paste, adding 2% of the additive, replacing the cement mass, and its results were compared to a reference paste (without water-repellent additive). In addition, in order to assess its mechanical performance and durability, the tests on resistance to axial compression and water permeability were performed, respectively, on concrete specimens (cement, sand and gravel). The microstructural results showed that there was the formation of insoluble crystalline compounds in the pores and capillaries of the concrete, making it difficult for water to penetrate. This fact was reproduced in its resistance to compression, with an increase of 20% in its values, in relation to the reference concrete and, consequently, reduction in its permeability. The formation of these crystals in the voids and interstices from the internal micro-

cracking of the concrete has the consequence of making the material denser and, therefore, more impermeable, a fact that was confirmed in the research.

***Keywords**: Crystallizing admixtures. Microstructure. Performance. Concrete.*

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um material compósito que pode ter suas propriedades modificadas pela qualidade dos materiais utilizados em sua produção, pela proporção entre esses materiais e a adição de novos componentes à mistura sendo, desta forma, bastante suscetível à evolução de características especificamente desejáveis, como ganho de resistência ou redução de permeabilidade. As modificações mais comuns no concreto são obtidas por meio de aditivos químicos e adições minerais, que são capazes de alterar desde o tempo de pega e trabalhabilidade no estado plástico, até propriedades como resistência mecânica, no estado endurecido. Neste sentido, cabe destacar a importância de pesquisas que analisem a microestrutura porosa e sua relação com a permeabilidade que são fatores extremamente importantes no concreto armado à medida que tem implicações diretas sobre a durabilidade das estruturas (PAZDERKA; HÁJKOVÁ, 2016).

Sabe-se que na transição do concreto do estado fresco para o endurecido ocorre um processo exotérmico conhecido como calor de hidratação do cimento. Parte deste calor liberado é absorvido pelo próprio concreto, elevando a temperatura da mistura e fazendo com que uma parcela da água presente no material evapore, deixando-o poroso. Esses poros, quando conectadas entre si, formam "caminhos preferenciais" à penetração, ação e desgastes relacionados a umidade.

Neste contexto, uma das alternativas que o meio técnico tem adotado a fim de obstruir esses poros e melhorar a eficiência do material por meio de uma microestrutura mais densa é adicionar à sua composição um aditivo hidrofugante cristalizante. Segundo a literatura, o mesmo reage com a umidade do concreto fresco e com subprodutos do cimento, formando compostos cristalinos insolúveis nos espaços existentes (poros e capilares) tornando o material menos permeável à penetração de água e substâncias agressivas e, desta forma, garantindo maior proteção e durabilidade às estruturas (TAKAGI, 2019).

Este aditivo é combinado ao concreto fresco e reage com partículas de cimento não hidratadas para formar milhões de cristais semelhantes a etringita, produto formado na hidratação do cimento. Ao longo de um período, esses cristais se expandem, preenchendo os poros e microfissuras naturais no concreto, bloqueando os "caminhos" para a água e outros contaminantes. Além disto, se as fissuras se formarem devido à sedimentação ou a retração, a água restante desencadeia o processo de cristalização e forma cristais adicionais, preenchendo estas fissuras e garantindo que a barreira hidrofugante da estrutura seja mantida (ROPERT; ROBERTSON, 2012).

Pelo exposto, vê-se que o apelo tecnológico e operacional dos aditivos cristalizantes referentes à facilidade de aquisição, implementação e aplicação nas misturas cimentícias os tornam uma opção prática e atraente, porém, há necessidade de se investigar sua ação físico-química. Por ser um produto comercial, a compreensão dos seus mecanismos e a previsão do seu comportamento demanda o aprofundamento técnico e científico para o seu emprego de forma mais previsível e segura. O desconhecimento de sua composição química, aliado ao fato da maioria das publicações terem ênfase em seu efeito, tornam essencial pesquisas que visem uma

investigação profunda a fim de obter informações que possam correlacionar os fenômenos envolvidos na cristalização com o que ocorre nas propriedades, desempenho e durabilidade dos materiais (OLIVEIRA, 2019).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O objetivo principal deste estudo é avaliar à ação de um aditivo hidrofugante cristalizante na forma de pó que, segundo o fabricando, deve ser adicionado a composição do concreto plastico. Para isso, foi realizada uma avaliação microestrutural a partir da execução de corpos de prova de pasta de cimento, de modo a facilitar o uso das técnicas empregadas, a saber: microscopia eletrônica de varredura e difração de raio X. Além desta, já na vertente de avaliação de desempenho do concreto foram realizados os ensaios de resistência à compressão axial e permeabilidade à água, em amostras compostas de cimento, areia, brita, aditivo cristalizante e água. A seguir são apresentadas, de forma resumida, as caracterizações dos materiais e a metodologia adotada na pesquisa.

Como aglomerante foi utilizado o Cimento Portland Comum: CP-I-32, com massa unitária de 0,99 kg/dm³ e massa específica de 3,15 kg/dm³, segundo a NBR 16605 (ABNT,2017) e resistência à compressão de 7,2 MPa, 19,9 MPa, 25,6 MPa e 38,6 MPa, para as idades de 3, 7, 14 e 28 dias, respectivamente (NBR 7215, ABNT, 2019). A areia empregada possuía massa unitária de 1,60 kg/dm³, massa específica de 2,62 kg/dm³, índice de vazios de 39% e teor de umidade de 2,38%. Já a brita apresentou as seguintes características: massa unitária de 1,66 kg/dm³, massa específica de 2,64 kg/dm³, índice de vazios de 46% e teor de umidade de 2,51%, segundo as normas (NBR NM 45/06), (NBR NM 53/09) e (NBR 9775/11)

Já com relação ao aditivo este tinha a aparência de um pó de coloração cinza claro, massa específica de 1,40 g/cm³ e diâmetro médio de 130 µm. Além destes foi utilizado água tratada para consumo humano.

2.1 Métodos

Em resumo, as seguintes etapas foram realizadas para a avaliação microestrutural: confecção de quatro amostras cúbicas de pasta de cimento, com relação água/cimento de 0,5. Duas dessas amostras foram de referência (sem aditivo) e, as demais com 2% de aditivo hidrofugante cristalizante, em substituição a massa de cimento (conforme recomendação do fabricante). Todas permaneceram em câmara úmida por 61 dias para que ocorresse a máxima formação de cristais possíveis.

O equipamento utilizado para realizar esta pesquisa foi o modelo de microscópio eletrônico de varredura (MEV): Hitachi S-4800 com espectroscopia de raios X e detector de retro difusão. Após obtenção das fotografias com o uso do microscópio eletrônico de varredura, foi iniciada a próxima etapa, ou seja, a análise de raios X, onde dois mapeamentos e quatro espectros foram realizados. A primeira amostra avaliada foi a pasta de cimento de referência e, em seguida, a pasta contendo o aditivo.

Para a avaliação da permeabilidade, foi utilizado o método BS EM 12390-8, que avalia o concreto endurecido quanto à profundidade de penetração de água sob pressão e se assemelha ao método exposto na NBR 10786 (ABNT, 1989). Com isso, foram confeccionados seis corpos de prova cúbicos de concreto com 150 mm de arestas e executados com o traço 1:2,62:3,38:0,5 (cimento:areia:brita:a/c, massa).

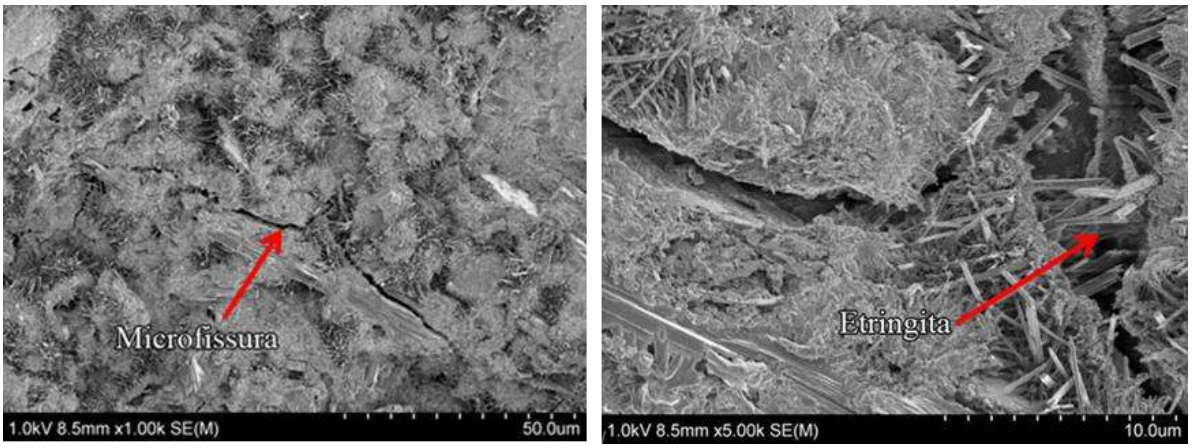
Destes, três foram utilizados como referência e os outros exemplares foram confeccionados com os mesmos 2% de aditivo hidrofugante, em substituição a massa de cimento. Os corpos de prova foram mantidos em cura por 28 dias.

O mesmo traço foi utilizado para confecção de oito corpos de provas cilíndricos para análise de resistência à compressão (NBR NM 5739/18), sendo quatro de amostras de referências e as quatro restantes com os mesmos 2% de aditivo, estes corpos de provas foram rompidos aos 7, 28, 90 e 365 dias de cura.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

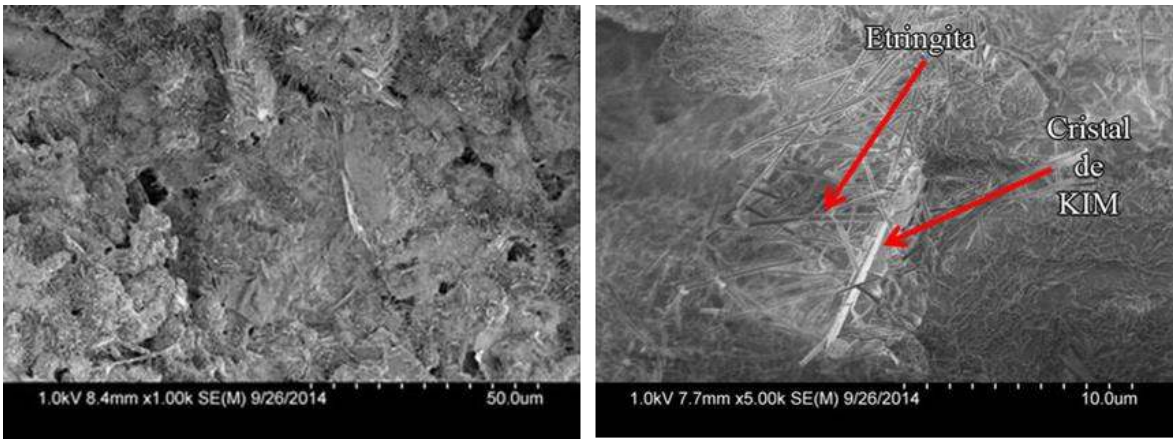
A Análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada para verificar o surgimento de cristais formados nos vazios (porosidade) do concreto em virtude da presença do aditivo hidrofugante cristalizante. Analisando as Figuras 2 e 3, verificaram-se alguns grãos e estruturas similares a agulhas de etringita.

Figura 2 – a) Amostra RF1 – 1000 K e b) Amostra RF2 – 5000 K



Fonte: Autores (2019)

Figura 3 – a) Amostra WK 1 – 1000 K e b) Amostra WK 2 – 5000 K



Fonte: Autores (2019)

É possível ver nas imagens cristais de etringita (estruturas longas que se parecem com agulhas), hidróxido de cálcio (cristais longos que parece muito suave), silicato de

cálcio hidratado e, por fim, os cristais formados a partir da inserção do aditivo. Os cristais provenientes do aditivo e os de etringita se assemelham geometricamente, mas é possível diferenciá-los. Os formados em virtude do aditivo cristalizante são mais finos, brilhantes e transparentes, enquanto os de etringita são mais espessos e escuros.

A formação destes cristais nos vazios e nos interstícios provenientes da microfissuração interna do concreto tem como consequência tornar o material mais denso e, por conseguinte, mais impermeável. Além de preencher os poros e capilares da matriz de concreto com a formação dos cristais, o aditivo hidrofugante cristalizante melhora o processo natural de hidratação, intensificando e prolongando a hidratação dos materiais cimentícios. Isso reduz o tamanho e o número de fissuras e poros capilares dentro da matriz do concreto, tornando-o energicamente menos poroso e melhorando as características de resistência e durabilidade (KRYTON, 2019).

Para avaliar as amostras, foi utilizado a base de dados do ICDD (International Center for Diffraction Data) e o software PANalytical X Pert High Score Plus, para uma análise quantitativa dos elementos químicos presentes nas pastas confeccionadas. Esse estudo é feito pela intensidade dos picos correspondentes a cada elemento.

Para a análise da influência do aditivo foi necessária uma apreciação quantitativa para avaliar se existia diferença significativa entre as quantidades dos elementos químicos que compõem as pastas, conforme apresentado nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Média dos espectros para amostras das pastas sem KIM (análise quantitativa)

Elemento	**Espectro 1 (%)**	**Espectro 2 (%)**	**Média (%)**
Oxigênio	41.89	35.43	38.66
Cálcio	40.72	40.37	40.545
Sílica	8.15	11.62	9.885
Alumínio	1.52	1.16	1.34
Ferro	1.4	1.09	1.245
Magnésio	0.24	0.08	0.16
Outros	6.08	10.25	8.165

Fonte: Autores (2019)

Tabela 2 - Média dos espectros para amostras das pastas com adição de 2% de aditivo hidrofugante cristalizante (análise quantitativa)

Elemento	**Espectro 1 (%)**	**Espectro 2 (%)**	**Média (%)**
Oxigênio	48.12	58.54	53.33
Cálcio	36.22	40.81	38.515
Sílica	0	0.38	0.19
Alumínio	0	0.05	0.025
Ferro	0.12	0	0.06
Magnésio	0	0.38	0.19
Outros	15.53	0.01	7.77

Fonte: Autores (2019)

Para as pastas de cimento com o uso de aditivo, dentre os elementos analisados, todos se mantiveram com valores muito próximos, porém, cabe destacar o elemento

oxigênio. A quantidade deste aumentou significativamente. Segundo Ropert e Robertson (2012), o oxigênio contido nos poros do concreto, na fase aquosa, é importante para a proteção química, devido ao aumento de alcalinidade, favorecendo a formação de uma camada aderente e protetora de óxidos de ferro estáveis sobre a superfície do aço, que o protegeria contra um possível processo de corrosão de armadura.

Os resultados de profundidade de penetração de água mensurados no ensaio de permeabilidade mostraram que os corpos de prova com aditivo cristalizante obtiveram valores inferiores aos das amostras de referência. Esta redução chega ao o valor de 50%, o que demonstra eficácia deste aditivo no sentido de dificultar a percolação de água, conforme apresentado nas Tabelas 3 e 4, sem e com aditivo cristalizante.

Tabela 3 - Permeabilidade total à água, sem uso de aditivo

Amostra	**Teste de permeabilidade à água**	**Profundidade de penetração (mm)**
Cubo 1	Cubo de concreto tratado	15
Cubo 2		14,12
Cubo 3		13,67

Tabela 4 - Permeabilidade total à água, com adição de 2% de aditivo cristalizante

Amostra	**Teste de permeabilidade à água**	**Profundidade de penetração (mm)**
Cubo 1	Cubo de concreto tratado com KIM	8,11
Cubo 2		6,12
Cubo 3		7,85

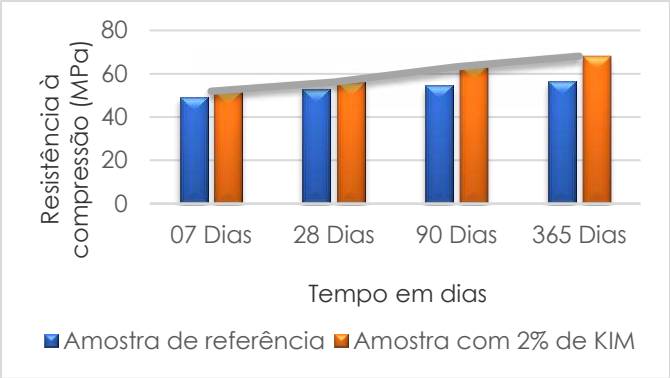
Fonte: Autores (2019)

A formação dos cristais provenientes do aditivo nos vazios e nos interstícios do concreto acarreta como consequência benéfica a formação de uma microestrutura mais densa, mais impermeável e resistente. Com relação a permeabilidade, os resultados médios das três amostras testadas apresentaram uma redução na absorção de água próxima a 50%.

Gava (2016), em seu estudo de avaliação de aditivos hidrofugantes e impermeabilizantes em argamassas observou uma redução ainda mais significativa (83%), porém, esse resultado foi mensurado no ensaio de absorção de água por capilaridade, em relação a uma argamassa de referência. Resultado semelhante também foi encontrado por Cappellesso et al. (2016) que avaliou o uso de impermeabilizante cristalizante como aditivos, comparando seu desempenho com outros concretos com ou sem sílica ativa na mistura. Neste, os resultados mostraram que a adição de sílica ativa foi mais eficiente que a impermeabilização cristalizante analisada.

Além da diminuição da permeabilidade, houve um efeito secundário relacionado a densificação da microestrutura do concreto. Esta densificação ocasionou um incremento da resistência à compressão do material (ao longo do tempo), em relação as amostras de referência, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Análise da resistência à compressão axial dos concretos, sem e com a adição de aditivo hidrofugante cristalizante



Fonte: Autores (2019)

Houve um aumento de 20% na resistência à compressão axial do concreto, ao final do período de 1 ano. Cabe destacar que, que como mencionado anteriormente, este é um efeito secundário, provavelmente, em função da formação dos cristais, em especial, no preenchimento dos poros do material.

4 CONCLUSÃO

Com base nos resultados e análises realizadas, as conclusões do trabalho, são válidas em princípio, para os materiais e condições do estudo em questão.

a) O objetivo principal desta pesquisa foi plenamente atingido uma vez que, foi possível avaliar o aditivo hidrofugante quanto aos parâmetros requeridos, ou seja, sua microestrutura e desempenho, em especial, à permeabilidade;

b) A análise de MEV permitiu observar os compostos cristalinos formados na hidratação da pasta de cimento, bem como, a identificação de cristais de outra natureza oriundos do uso do aditivo hidrofugante;

c) A análise por agrupamento na difração de raio X foi capaz de identificar as diferenças mineralógicas e com isso a influência em estruturas em concreto armado, com maior proteção do aço, devido ao aumento da alcalinidade do concreto;

d) Com a formação de cristais nos vazios e nos interstícios foi possível assegurar a redução a taxa de penetração de água, e ainda, o seu efeito secundário de aumento da resistência à compressão, devido a densificação da microestrutura do concreto.

5 REFERÊNCIAS

CAPPELLESSO, V. G. *et al*. Use of crystalline waterproofing to reduce capillary porosity in concrete. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 1, n. 1, p. 9, 2016.

GAVA, G.P.; GASQUES, E. G. F.; RIGO, E. Avaliação da influência de aditivos hidrofugantes/impermeabilizantes nas propriedades das argamassas. **Anais**. 73º Congresso Técnico Científico Da Engenharia E Da Agronomia. Foz do Iguaçu, 2016.

KRYTON. **KRYSTOL INTERNAL MEMBRANE (KIM).** Disponível em: <https://www.kryton.com/products/krystol-internal-membrane-kim/>. Acesso em: 12 Nov. 2019.

OLIVEIRA, ALINE DE SOUZA. **Estudo do Potencial de Aditivo Cristalizante como Estimulador de Autocicatrização de Fissuras de Matrizes Cimentícias**. Tese (Doutorado) – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE,

2019. 294 p.

PAZDERKA, Jirí; HÁJKOVÁ, Eva. **Crystalline admixtures and their effect on selected properties of concrete**. Czech Technical University in Prague, 2016. https://doi.org/10.14311/AP.2016.56.0306

ROPERT, Joshua; ROBERTSON, Ian N. **Performance of corrosion inhibiting admixtures in hawaiian concrete in a marine environment.** 2012. 179 f. Tese (Doutorado) - Curso de Department of Civil and Environmental Engineering, University of Hawaii at Manoa, Manoa - Hawaii, 2012.

TAKAGI, Emilio Minoru. **Aditivo cristalino para a impermeabilização integral por cristalização de estruturas de concreto de pontes** . [*S. l.*], abr/jun 2019.