

# A INFLUÊNCIA DO ADITIVO CRISTALIZANTE NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO ENDURECIDO

## THE INFLUENCE OF THE CRYSTALLIZER ADMIXTURE ON THE PROPERTIES OF HARDENED CONCRETE

**Eduardo Polesello** [eduardopolesello@feevale.br](mailto:eduardopolesello@feevale.br)

Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Porto Alegre/Brasil). Professor Adjunto da Universidade Feevale (Novo Hamburgo/Brasil).

**Marcelo Maus** [marcelo.maus@hotmail.com](mailto:marcelo.maus@hotmail.com)

Engenheiro Civil pela Universidade Feevale (Novo Hamburgo/Brasil).

RT&T | a. 11 | n. 1 | p. 14-36 | jan./jun. 2020

Recebido em: 11 de agosto de 2019 | Aprovado em: 15 de dezembro de 2018

Sistema de Avaliação: Double Blind Review | DOI: <https://doi.org/10.25112/rtt.v11i1.1986>

## RESUMO

Com a alta demanda no uso de concreto para produção de estruturas na construção civil, surge também a preocupação com sua durabilidade, ou seja, vida útil das estruturas. Para se obterem estruturas com melhores desempenhos, o uso de diferentes tecnologias e materiais tem sido aplicado, em particular, por meio da redução da permeabilidade. Diante disso, a utilização de aditivos tornou-se uma opção tecnicamente viável na produção de concreto, e, em especial, o aditivo cristalizante tem se mostrado um grande aliado na impermeabilização das estruturas, pois a permeabilidade é um dos fatores que contribui para o aparecimento de manifestações patológicas nas estruturas. O objetivo deste estudo é fornecer uma melhor compreensão da influência do aditivo cristalizante sobre o concreto, avaliando sua eficiência quanto à estanqueidade das estruturas, proporcionando assim um aumento em sua durabilidade e vida útil. Este estudo contempla a análise de um tipo de cristalizante, em três diferentes percentuais de dosagem (0,5%, 0,8% e 1,0% em relação à massa de cimento), na produção de concretos caracterizados por três relações água/cimento (a/c), definidas em 0,40, 0,50 e 0,60, submetidos a dois processos de cura, úmida e submersa. A análise, quanto ao desempenho desses concretos produzidos, aos 28 dias de idade, será pela verificação da resistência à compressão e da permeabilidade determinada por meio da absorção por capilaridade. Os resultados obtidos mostram que tanto o tipo de cura, quanto a relação a/c e a dosagem do aditivo exercem influência significativa nas propriedades do concreto. Destaca-se que a cura submersa proporcionou melhor desempenho quanto à resistência à compressão do concreto e que maiores teores de aditivo utilizados resultam em maior absorção de água por capilaridade.

**Palavras-chave:** Concreto. Durabilidade. Aditivo cristalizante. Absorção por capilaridade.

## ABSTRACT

Due to the high demand for concrete for the production of structures in civil construction, it is worth mentioning the concern regarding the useful life of the structures. For the structures to perform better, the use of different technologies and materials is necessary, in particular, through the reduction of permeability. This work will focus on the use of the crystallizer admixture, which has proven to be a great ally in the waterproofing of structures. The aim of this study is to provide a better understanding of the influence of the crystallizing additive on the concrete, evaluating its efficiency as regards the tightness of the structures, thus providing an increase in their durability and useful life. This study contemplates the analysis of one type of crystallizer, in three different percentages of dosage (0.5, 0.8 and 1.0% in relation to cement mass), in the production of concrete characterized by three water/cement ratios (w/c) (0.40, 0.50 and 0.60), submitted to two healing processes, wet and submerged. At 28 days of age, after the concrete production, the compressive strength and the permeability determined by capillary absorption, were analyzed. The results obtained with this experiment proved that the curing processes, w/c ratio and the crystallizer dosage have a significant influence on the properties of the concrete. It should be noted that the submerged curing provided better performance in terms of compressive strength of the concrete and that higher amounts of additives used resulted in higher water absorption by capillarity.

**Keywords:** Concrete. Durability. Crystallizer admixture. Absorption by capillarity.

## 1 INTRODUÇÃO

O mercado da construção civil tem apresentado diversos produtos como solução para percolação de água nas estruturas, que vão desde pinturas com produtos derivados do petróleo até aplicação de películas rígidas feitas com polímeros. No entanto, a procura por soluções que aumentem o desempenho das estruturas sem alteração no processo construtivo e sem demandar serviços adicionais passa a ser um grande diferencial. Esta procura despertou o surgimento no mercado de um nicho exclusivamente voltado para o desenvolvimento de adições e aditivos de concreto que possibilitem atender essas exigências quanto à durabilidade das estruturas.

Dentre estes produtos, destacam-se os aditivos cristalizantes, pela alta tecnologia que apresentam e o custo-benefício ao agregar ao concreto melhor desempenho em propriedades, como estanqueidade e resistência à deterioração causada pelos agentes agressivos da atmosfera. Porém, trata-se de um produto ainda não muito familiarizado pelo mercado da construção civil, evidenciando, assim, a necessidade de estudos que avaliem seu desempenho sobre as propriedades finais quando incorporado na produção do concreto. Diante deste cenário, este estudo objetiva proporcionar um maior conhecimento do uso do aditivo cristalizante no concreto, analisando seu desempenho sobre as propriedades do concreto no estado endurecido.

O comportamento do concreto será analisado quanto à sua resistência à compressão e a permeabilidade à água por meio da absorção por capilaridade, aos 28 dias de idade, pela análise de concretos produzidos com e sem aditivo cristalizante, contemplando três diferentes relações água/cimento.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O concreto tem grande responsabilidade no que diz respeito à vida útil das estruturas, conceito abordado com maior eficiência através das alterações realizadas, desde a versão de 2003, na norma de projeto de estruturas de concreto armado, a NBR 6118 (ABNT, 2014). A redução das relações a/c do concreto, como forma de reduzir sua permeabilidade, e o aumento da sua espessura de cobrimento, visando a proteção da armadura, contemplam os principais tópicos revistos na norma nos últimos anos. Adicionalmente, em julho de 2013, com a entrada em vigor da NBR 15575 (ABNT, 2013) que parametriza o desempenho das edificações habitacionais, exigências quanto à percolação de água, conseqüentemente, redução na incidência de manifestações patológicas que degradam as estruturas, passou-se a ter uma preocupação ainda maior no desenvolvimento de projetos e execução de obras.

O concreto, basicamente, é composto por cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água. Ainda, com o uso de aditivos químicos pode-se melhorar seu desempenho ou conferir propriedades adicionais,

como diminuição do calor de hidratação, aumento da durabilidade, maior plasticidade quando fresco, rápido aumento da resistência quando endurecido, impermeabilidade da massa (PETRUCCI, 2005). De acordo com Isaia (2011), na maioria das vezes, a degradação no concreto das estruturas é causada pela água como principal meio de transporte de substâncias agressivas, seja na forma pura, com íons dissolvidos (sulfatos e cloretos), ou na forma de vapor.

Para Neville (2016), a permeabilidade, ou seja, a facilidade com os que os fluidos, sejam líquidos ou gases, podem penetrar e se movimentar no interior da estrutura por determinada pressão determinam a durabilidade do concreto. Corroborando, Mehta e Monteiro (2014) mostram que uma boa medida para a qualidade e durabilidade potencial do concreto pode ser obtida pela verificação da taxa de absorção de água por capilaridade, já que para baixas taxas de absorção os agentes agressivos terão dificuldade de penetração no concreto. Desta forma, o uso de aditivos impermeabilizantes em estruturas de concreto torna-se interessante, uma vez que aditivos impermeabilizantes têm como objetivo prevenir a penetração de água no concreto, pois seu principal efeito é tornar o concreto hidrófugo, e, além dessa ação hidrofugante, possuem uma ação de bloqueio dos poros por meio de um componente coalescente (NEVILLE, 2016). Quanto à utilização de aditivos com essa propriedade, percebe-se nos últimos anos que os aditivos cristalizantes têm ganhado espaço na construção civil, pois a comunidade científica foi atraída pelo concreto com propriedades de autocura, por ser uma solução inteligente para infraestruturas sustentáveis de longa duração (REDDY; RAVITHEJA, 2019), com potencial de melhorar a durabilidade e reduzir a permeabilidade de estruturas de concreto, especialmente aquelas expostas a ambientes corrosivos (AZARSA *et al.*, 2019).

Aditivos cristalizantes são dosados juntamente com o concreto no momento de sua produção. Após adicionados no concreto, reagem com a água formando cristais dentro dos poros, que impedem a penetração da água sem que a passagem de vapor seja bloqueada, com isso a pressão de vapor não é criada dentro do concreto. Por serem parte integrante da mistura, apresentam maior resistência ao intemperismo e não são facilmente danificados, uma vez que não formam películas, diferentemente de quando aplicados sobre a superfície de concreto (MAKI *et al.*, 1991). Para Bertolini (2010), o impermeabilizante por cristalização é considerado um sistema de proteção e fechamento dos poros. O autor declara que as substâncias à base de silicatos presentes no produto, ao penetrarem no concreto, reagem com os subprodutos do mesmo, em especial com o hidróxido de cálcio, e formam os cristais que provocam o fechamento dos poros. Essa capacidade do aditivo cristalizante de recuperar a resistência com o fechamento de poros e fissuras foi verificada no estudo de Nasin *et al.* (2020), quando registrado um ganho na resistência à compressão de 36,6%, após 42 dias, do concreto com aditivo cristalizante em comparação ao concreto referência, quando fissuras foram induzidas nos concretos aos 3 dias de idade.

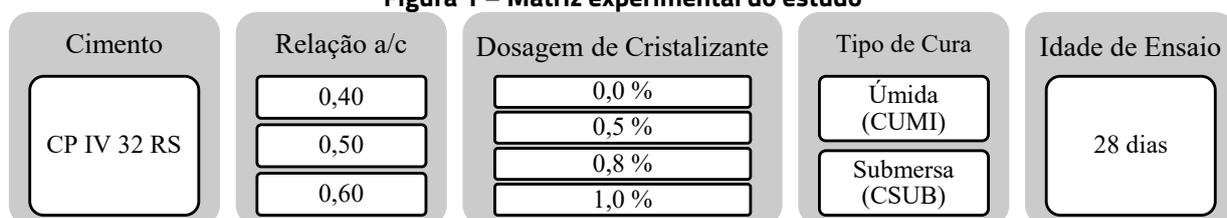
Moreira *et al.* (2016), ao analisarem o efeito do aditivo redutor de permeabilidade por cristalização, concluíram que, para um concreto com relação a/c igual a 0,45 e adição de 0,8% de aditivo cristalizante em relação à massa de cimento, não há interferência por parte do aditivo na resistência à compressão do concreto, quando comparado ao concreto sem aditivo. Os autores destacam que o cristalizante promove um melhor fechamento dos poros pelo processo de cristalização, que ocorre gradativamente ao longo do tempo, proporcionando melhor comportamento em relação à durabilidade do concreto.

Entretanto, Cappellesso (2016) observou um aumento significativo na absorção de água no concreto produzido com adição do aditivo cristalizante, para dosagem de 0,8%. A autora associa esse comportamento à mudança na microestrutura do concreto que o aditivo promove, sendo capaz de modificar a distribuição e o tamanho dos poros, o que pode ter provocado um aumento da higroscopicidade do material. Corroborando, para uma dosagem de 1,0% e avaliando ciclos de cura para o concreto, submersa e seca, a fim de induzir o processo de cristalização, Nascimento *et al.* (2017) também registraram aumento da absorção de água do concreto com o aditivo em relação ao concreto de referência.

### 3 METODOLOGIA

Para a matriz experimental (Figura 1) da pesquisa, definiu-se o estudo de concretos produzidos com um tipo de cimento, para três diferentes relações a/c e três diferentes dosagens do aditivo cristalizante para cada relação água/cimento. Aos 28 dias de idade será avaliado o comportamento do concreto quanto à sua resistência à compressão e a permeabilidade através da absorção por capilaridade, comparando com um concreto sem adição do aditivo cristalizante.

**Figura 1 – Matriz experimental do estudo**



**Fonte: Autor (2019)**

Com a matriz experimental definida, para responder ao objetivo do estudo, a metodologia proposta consiste na caracterização dos materiais utilizados para definição dos traços e produção dos concretos e, para a realização dos ensaios, os procedimentos adotados são os recomendados pelas normas técnicas pertinentes.

### 3.1 MATERIAIS

O cimento utilizado foi o cimento Portland composto (CP IV 32 RS) que, segundo dados fornecidos pelo fabricante, apresenta início de pega de 271 minutos, fim de pega em 323 minutos e resistência à compressão, aos 28 dias, de 36,1 MPa, atendendo às especificações da NBR 16697 (ABNT, 2018).

O concreto foi produzido com um agregado miúdo e um graúdo. O agregado miúdo foi uma areia de origem quartzosa oriunda do rio Jacuí, apresentando massa específica de 2,63 kg/dm<sup>3</sup> determinada segundo a NBR NM 52 (2009), dimensão máxima característica igual a 1,18 mm e módulo de finura de 1,79, determinados segundo a NBR NM 248 (2003). O agregado graúdo utilizado é de origem basáltica com dimensão máxima de 19mm e módulo de finura de 6,86, segundo procedimentos da NBR NM 248 (2003). A massa específica foi determinada segundo a NBR NM 53 (2009), obtendo-se 2,65 kg/dm<sup>3</sup>.

Utilizou-se a água disponibilizada pelo laboratório de técnicas construtivas da universidade Feevale, proveniente de poço artesiano. Os aditivos adotados para realização dessa pesquisa são caracterizados como um aditivo plastificante, sendo este um aditivo padrão utilizado na produção dos concretos, e um aditivo cristalizante. As principais características técnicas dos aditivos utilizados nessa pesquisa (segundo dados fornecidos pelos fabricantes) estão apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1 – Características técnicas dos aditivos**

	<b>Aditivo Plastificante</b>	<b>Aditivo Cristalizante</b>
Aspecto	Líquido	Sólido em pó
Cor	Marrom	Cinza
Densidade a 25°C	1,175 a 1,195 g/ml	Não disponível
pH	8 a 10	10,0 a 13,0
Função	Plastificante multidosa- gem de pega	Impermeabilização por cristaliza- ção integral
Dosagem (% sobre massa de cimento)	0,2 a 1,5	0,8

**Fonte: Elaborado pelo autor segundo dados dos fabricantes (2019)**

### 3.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Definidos e caracterizados os materiais utilizados na pesquisa, detalha-se o planejamento experimental que contempla a definição dos traços, produção dos concretos e metodologia dos ensaios estabelecidos para análise das propriedades do concreto no estado endurecido. Avaliou-se, aos 28 dias de idade, a resistência à compressão e a absorção de água por capilaridade.

### 3.2.1 Traços Utilizados

Os traços utilizados foram definidos de forma a abranger uma gama de resistências à compressão tradicionalmente utilizadas nas obras da região de Novo Hamburgo (RS). Com base nisto, adotaram-se três relações a/c, previamente definidas como 0,40, 0,50 e 0,60, padronizando a dosagem de aditivo plastificante no teor de 0,6% em relação à massa do cimento e o teor de argamassa em 54%, parâmetros usualmente especificados em dosagens de concretos comercializados na região.

O abatimento dos concretos foi padronizado em  $120 \pm 20$ mm, por ser um padrão adotado pelo mercado para concretos bombeáveis, para os três traços de concreto produzidos, sendo assim foi necessário controlar a quantidade de água utilizada na produção, a fim de atender esse abatimento estabelecido. Com base neste parâmetro e no comportamento dos materiais utilizados nesta pesquisa, na Tabela 2, apresenta-se o detalhamento dos traços e a quantidade de materiais utilizada, em massa, para a produção de 40 litros de concreto.

**Tabela 2 – Detalhamento dos traços e quantidade de materiais para produção de 40 litros de concreto**

Traço unitário, em massa	Quantidade de materiais (kg)					Relação a/c
	Cimento	Areia	Brita	Água do traço	Água utilizada	
1 : 2,70 : 3,15	13,1	35,3	41,3	7,8	8,3	0,63
1 : 2,05 : 2,60	15,9	32,6	41,3	7,9	8,8	0,55
1 : 1,35 : 2,00	20,6	27,8	41,2	8,2	9,3	0,45

**Fonte: Elaborado pelo autor (2019)**

Em relação à dosagem do aditivo cristalizante a ser utilizada nos concretos, considerou-se a dosagem indicada pelo fabricante como sendo a dosagem adequada. No entanto, buscando conhecer melhor o comportamento deste aditivo, além desta dosagem foram definidas uma dosagem superior e uma inferior a esta especificação, sendo assim, além do 0,8% (recomendado pelo fabricante) produziram-se concretos com dosagem de 0,5% e 1,0% de aditivo cristalizante.

### 3.2.2 Produção dos Concretos e Moldagem dos Corpos de Prova (CPs)

A produção dos concretos, em laboratório, foi realizada em betoneira de eixo inclinado, usual de obra, com capacidade máxima de 250 litros. A ordem de colocação dos materiais, mantida igual em todos os traços, foi: agregado graúdo + parte da água + cimento + aditivo plastificante + aditivo cristalizante + agregado miúdo + água final. Adotou-se a adição do aditivo plastificante antes do agregado miúdo para que seu efeito fosse mais eficaz, já que sua ação é sobre os grãos de cimento, no entanto, a opção por adicionar o aditivo cristalizante antes do agregado miúdo foi para que tivesse um tempo maior de mistura, homogeneizando-se melhor à mistura.

Após a mistura e homogeneização dos materiais na betoneira, realizou-se a verificação do abatimento pelo tronco de cone, conforme prescreve a NBR NM 67 (ABNT, 1998), predefinido em  $120 \pm 20$  mm para todos os concretos. Com o abatimento verificado, moldaram-se os corpos de prova conforme procedimentos especificados na NBR 5738 (ABNT, 2015). Para cada traço produzido, moldaram-se 12 CPs que, após a moldagem, foram identificados e permaneceram em local protegido e sob temperatura ambiente de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  por 24 horas (Figura 2), quando então foram desmoldados.

**Figura 2 – Produção do concreto: (a) Verificação do abatimento, por meio do *slump test*, (b) moldagem e (c) identificação**



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autor (2019)

Após as primeiras 24 horas, os CPs foram desmoldados e submetidos ao processo de cura, sendo que 6 de cada traço foram submetidos à cura submersa (CSUB) e os outros 6 foram curados na câmara úmida (CUMI), com temperatura e umidade controladas, do laboratório de técnicas construtivas da Feevale. Os corpos de prova permaneceram em processo de cura até a idade de realização dos ensaios.

### 3.2.3 Ensaio de Resistência à Compressão Axial

O ensaio de resistência à compressão axial seguiu as prescrições da NBR 5739 (ABNT, 2018). No dia anterior à realização do ensaio de resistência à compressão, procedeu-se com o preparo das bases dos corpos de prova, buscando garantir a planicidade e perpendicularidade entre elas, através de processo de retificação. O ensaio de resistência à compressão foi realizado em uma prensa da marca Emic de 2000 kN a uma velocidade de aplicação de tensão de  $0,45 \text{ MPa/s}$  mantida constante durante todo o ensaio. Para cada ponto da matriz analisado foram ensaiados 3 corpos de prova submetidos a CSUB e 3 corpos de prova da CUMI.

Pelos resultados médios calculados no ensaio foi possível avaliar o comportamento da influência das variáveis no concreto. Entretanto, com o auxílio da análise de variância (ANOVA), com os resultados

individuais registrados, constatou-se se essas variáveis exercem ou não influência significativa sobre a resistência à compressão do concreto aos 28 dias de idade.

### 3.2.4 Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade

Segundo prescreve a NBR 9779 (ABNT, 2012), após o período de 27 dias de cura, para realização do ensaio de absorção de água por capilaridade, os corpos de prova foram colocados em uma estufa à temperatura de  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  até atingir constância de massa, obtida, segundo a norma, quando a diferença entre duas pesagens consecutivas do mesmo corpo de prova, entre períodos de 2 h de permanência na estufa, não exceder 0,5 % do menor valor obtido, com posterior resfriamento em um ambiente com temperatura constante de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ .

Com a massa inicial dos corpos de prova determinada, os mesmos foram posicionados sob suportes tipo grelha e submetidos a um nível de água constante de  $5 \pm 1$  mm acima da sua face inferior (Figura 3).

**Figura 3 – Ensaio de absorção de água por capilaridade em andamento em corpos de prova de concreto**



Fonte: Autor (2019)

Durante o ensaio, foram realizadas leituras da absorção de água por capilaridade nos tempos de 3, 6, 24, 48 e 72 horas, contados a partir do contato do corpo de prova com a água, conforme prescreve a norma. Antes de cada leitura, com o auxílio de um pano, o excesso de água acumulada na superfície foi removido. O ensaio permite analisar a evolução da absorção por capilaridade, expressa em  $\text{g}/\text{cm}^2$ , e, ao final das 72 horas de ensaio, obter a absorção total, expressa em %, em relação à massa inicial. Esses resultados são obtidos pela média entre os três corpos de provas ensaiados para cada ponto da matriz de estudo. Assim como no ensaio de resistência à compressão, os resultados individuais obtidos foram submetidos a uma análise estatística.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

Conforme detalhado na metodologia, após a idade de 28 dias os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão e absorção de água por capilaridade, a fim de analisar a influência da presença de aditivo cristalizante no concreto.

### 4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão axial estão apresentados nas Tabelas 3 e 4, respectivamente, para os concretos submetidos a CSUB e a CUMI. Nas tabelas, além dos resultados individuais, apresentam-se também a média, desvio padrão e respectivos coeficientes de variação obtidos para cada ponto da matriz em estudo.

**Tabela 3 – Resultados da resistência à compressão para os corpos de prova de concreto com cura submersa (CSUB)**

		Teor de Aditivo Cristalizante			
		0,0%	0,5%	0,8%	1,0%
a/c=0,63	Resistência à Compressão (MPa)	21,20	23,50	27,70	29,50
		25,60	22,10	24,90	28,20
		25,90	23,10	28,60	23,70
	Resistência Média (MPa)	24,23	22,90	27,07	27,13
	Desvio Padrão (MPa)	2,63	0,72	1,93	3,04
Coeficiente de Variação (%)		10,86	3,15	7,13	11,22
a/c=0,55	Resistência à Compressão (MPa)	36,60	35,80	27,90	37,50
		35,40	37,60	34,30	36,70
		35,20	33,30	34,40	37,30
	Resistência Média (MPa)	35,73	35,57	32,20	37,17
	Desvio Padrão (MPa)	0,76	2,16	3,72	0,42
Coeficiente de Variação (%)		2,12	6,07	11,57	1,12
a/c=0,45	Resistência à Compressão (MPa)	53,00	52,80	49,60	48,80
		52,10	50,60	47,10	47,60
		52,10	52,00	48,40	49,50
	Resistência Média (MPa)	52,40	51,80	48,37	48,63
	Desvio Padrão (MPa)	0,52	1,11	1,25	0,96
Coeficiente de Variação (%)		0,99	2,15	2,59	1,98

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

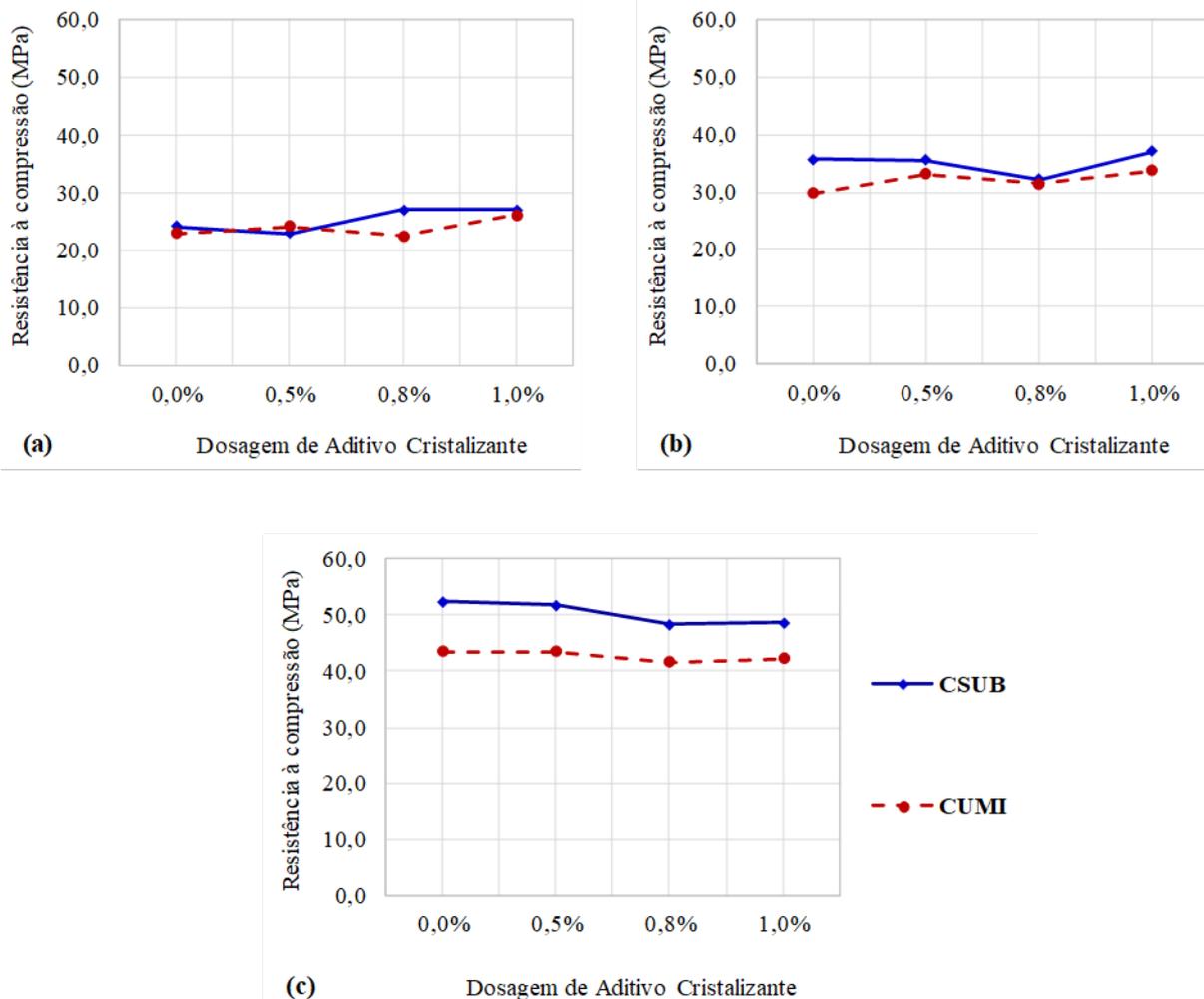
**Tabela 4 – Resultados da resistência à compressão para os corpos de prova de concreto com cura em câmara úmida (CUMI)**

		Teor de Aditivo Cristalizante			
		0,0%	0,5%	0,8%	1,0%
<b>a/c=0,63</b>	Resistência à Compressão (MPa)	22,20	24,40	23,10	29,00
		24,00	21,60	21,30	26,30
		22,50	26,60	23,20	23,20
	Resistência Média (MPa)	22,90	24,20	22,53	26,17
	Desvio Padrão (MPa)	0,96	2,51	1,07	2,90
	Coefficiente de Variação (%)	4,21	10,36	4,75	11,09
<b>a/c=0,55</b>	Resistência à Compressão (MPa)	31,80	33,40	30,70	34,90
		31,80	33,30	33,50	33,30
		25,80	32,70	30,40	33,30
	Resistência Média (MPa)	29,80	33,13	31,53	33,83
	Desvio Padrão (MPa)	3,46	0,38	1,71	0,92
	Coefficiente de Variação (%)	11,62	1,14	5,42	2,73
<b>a/c=0,45</b>	Resistência à Compressão (MPa)	45,50	44,10	40,80	42,70
		46,60	44,40	41,50	41,60
		38,40	42,00	42,60	42,60
	Resistência Média (MPa)	43,50	43,50	41,63	42,30
	Desvio Padrão (MPa)	4,45	1,31	0,91	0,61
	Coefficiente de Variação (%)	10,23	3,01	2,18	1,44

**Fonte: Elaborado pelo autor (2019)**

Com base nos resultados médios de resistência à compressão obtidos, pela Figura 4 é possível melhor visualizar o comportamento registrado para cada relação a/c analisada.

**Figura 4 – Comportamento da resistência à compressão média obtida aos 28 dias: (a) relação a/c = 0,63; (b) relação a/c = 0,55 e (c) relação a/c = 0,45**



**Fonte: Autor (2019)**

A Figura 4 mostra que, em geral, o concreto, quando submetido à cura dos corpos de prova submersos em água (CSUB), aos 28 dias, atinge uma resistência à compressão média superior em relação ao concreto submetido à cura em câmara úmida (CUMI). Entretanto, para melhor analisar essa influência, assim como, das demais variáveis sobre os resultados de resistência à compressão, realizou-se a análise estatística das variáveis por meio do método de análise de variância (ANOVA), com 95% de nível de confiabilidade, utilizando o Software Statistica 8.0. A Tabela 5 apresenta os resultados desta análise.

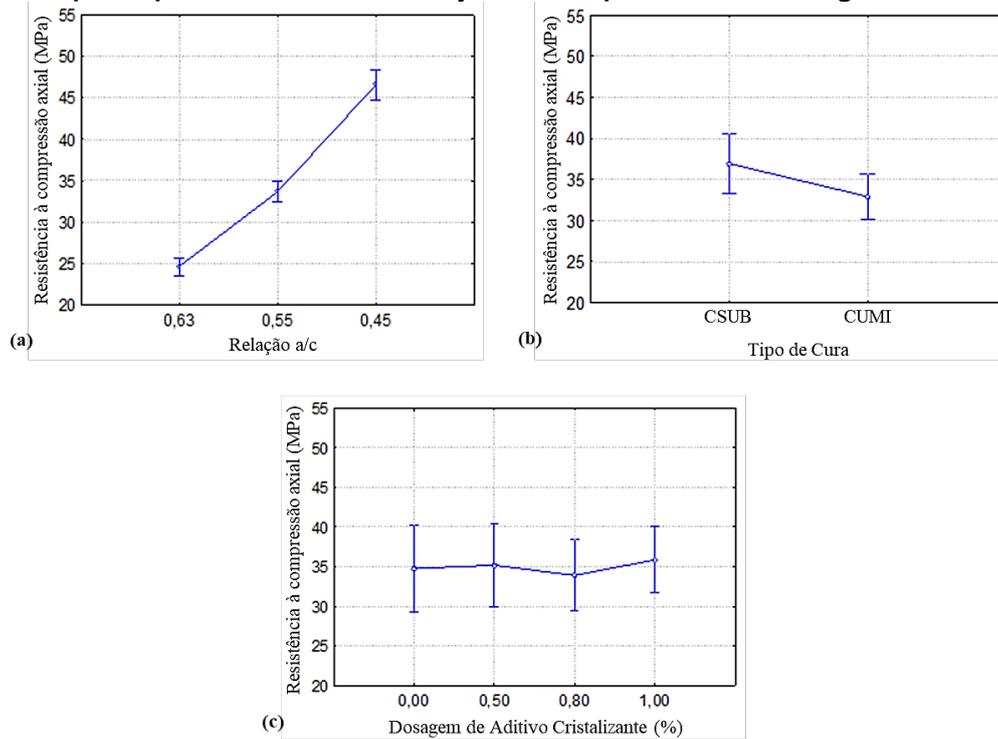
**Tabela 5 – ANOVA da influência do aditivo cristalizante, relação a/c e tipo de cura em relação à resistência à compressão em corpos de prova de concreto aos 28 dias de idade**

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	Valor p	Significativo
Relação a/c	5803,55	2	2901,77	702,63	0,00000	S
Teor de aditivo (%)	37,16	3	12,39	3	0,03965	S
Tipo de cura	290,00	1	290,00	70,22	0,00000	S
Relação a/c * Teor de aditivo (%)	88,94	6	14,82	3,59	0,00510	S
Relação a/c * Tipo de cura	122,36	2	61,18	14,81	0,00001	S
Teor de aditivo (%) * Tipo de cura	12,91	3	4,30	1,04	0,38264	NS
Relação a/c * Teor de aditivo (%) * Tipo de cura	41,51	6	6,92	1,68	0,14760	NS

**Fonte: Elaborado pelo autor (2019)**

Pelos resultados da ANOVA, observa-se que a relação a/c, teor de aditivo, tipo de cura, assim como, as interações entre a relação a/c com o teor de aditivo, e a relação a/c com o tipo de cura, exercem influência significativa sobre a resistência à compressão do concreto aos 28 dias de idade. A Figura 5 ilustra o comportamento registrado pela ANOVA para as variáveis principais sobre a resistência à compressão.

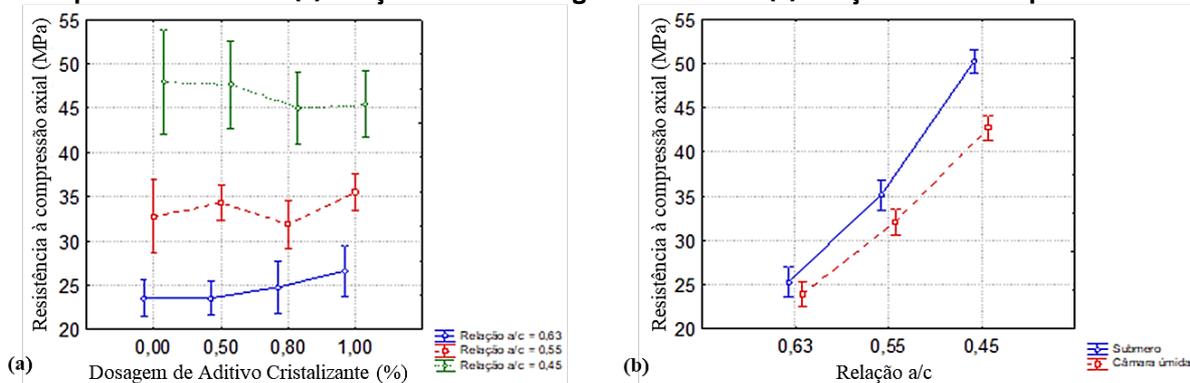
**Figura 5 – ANOVA das variáveis principais sobre o comportamento da resistência à compressão, aos 28 dias, de corpos de prova de concreto: (a) relação a/c; (b) tipo de cura e (c) dosagem de aditivo**



Fonte: Autor (2019)

Como para as variáveis principais, pela Figura 6, é possível observar o comportamento das interações entre essas variáveis.

**Figura 6 – ANOVA das interações sobre o comportamento da resistência à compressão, aos 28 dias, de corpos de prova de concreto: (a) relação a/c com dosagem de aditivo e (b) relação a/c com o tipo de cura**



Fonte: Autor (2019)

A relação a/c exerce influência sobre a resistência à compressão, com a redução da relação a/c há um aumento na resistência à compressão (Figura 5a), comportamento já esperado e consolidado pela literatura (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2016). Os concretos, quando são submetidos à cura submersa, apresentam maior resistência à compressão quando comparados com a cura em câmara úmida (Figura 5b), registrando- diferenças de 5,78%, 9,64% e 17,71%, respectivamente, para as relações a/c igual a 0,63, 0,55 e 0,45 (Figura 6b). Ainda, pela Figura 6b, percebe-se que, com a redução da relação a/c, há um aumento na diferença entre a resistência à compressão do concreto quanto ao tipo de cura utilizado.

A análise ainda mostra que o teor de aditivo exerce influência significativa sobre o resultado de resistência à compressão (Figura 5c). Esse comportamento pode melhor ser visualizado pela Figura 6a, na qual observa-se que para menor relação a/c, igual a 0,45, houve uma perda de resistência com o aumento da adição de cristalizante ao concreto, permanecendo praticamente estável entre 0,8% e 1,0%. No entanto, nas relações a/c maiores, o comportamento mostrou-se contrário. Para a relação a/c igual a 0,55, para os teores 0,50% e 1,0% de aditivo, registrou-se um aumento na resistência quando comparado ao concreto referência, enquanto que para o teor de 0,8% houve uma leve redução. Para relação a/c igual a 0,63, o aumento no percentual de adição de cristalizante resultou em ganho progressivo da resistência à compressão. Para Reddy e Ravitheja (2019), o que torna o aditivo cristalizante adequado para melhorar as propriedades mecânicas do concreto é sua capacidade de produzir mais produtos hidratados, o que proporciona um melhor fechamento dos poros e das pré-rachaduras no concreto, durante e após a hidratação.

Analisando o uso do aditivo cristalizante nos concretos produzidos, considerando o percentual estabelecido pelo fabricante como adequado, de 0,80% de adição de aditivo cristalizante em relação à massa de cimento, registrou-se, por exemplo, para o concreto com cura em câmara úmida e relação a/c de 0,45, que a resistência à compressão do concreto com aditivo foi em média de 41,63MPa, enquanto que o concreto referência, sem a incorporação de aditivo, apresentou resistência à compressão média de 43,50MPa, o que representa uma redução na resistência à compressão de 4,49%, quando produzido concreto com aditivo cristalizante. Comportamento semelhante ao resultado apresentado por Petrucci e Hastenpflug (2017) que, avaliando a influência do aditivo cristalizante na porosidade do concreto de cimento Portland, também com tipo CP IV-32-RS e dosagem de 0,80% de aditivo em relação à massa de cimento, porém para uma relação a/c de 0,39, registraram em média uma resistência de 9,50% maior para o concreto referência quando comparado com o concreto produzido com 0,80% de aditivo cristalizante. O que contraria os resultados de Cappellessio (2016) que, para essa mesma dosagem de aditivo cristalizante

e relação a/c igual a 0,41, registrou aumento de 13% na resistência à compressão nos concretos com o aditivo em relação ao traço sem aditivo, também para idade de 28 dias e com cura úmida.

Também para essa relação a/c de 0,45 e cura submersa, quando adotada a dosagem de 1,0% percebe-se que essa redução na resistência à compressão média acentua-se um pouco, registrando um valor de 7,75% do concreto com aditivo em relação ao concreto referência. Esse resultado é muito semelhante ao apresentado por Bianchin (2018) que, analisando concreto de cura submersa com relação a/c igual a 0,43 e dosagem de 1,00% de aditivo cristalizante, registrou para o concreto referência uma resistência média à compressão de 35,98 MPa, enquanto que para o concreto com aditivo foi de 33,06 MPa, representando uma diminuição de 8,83%.

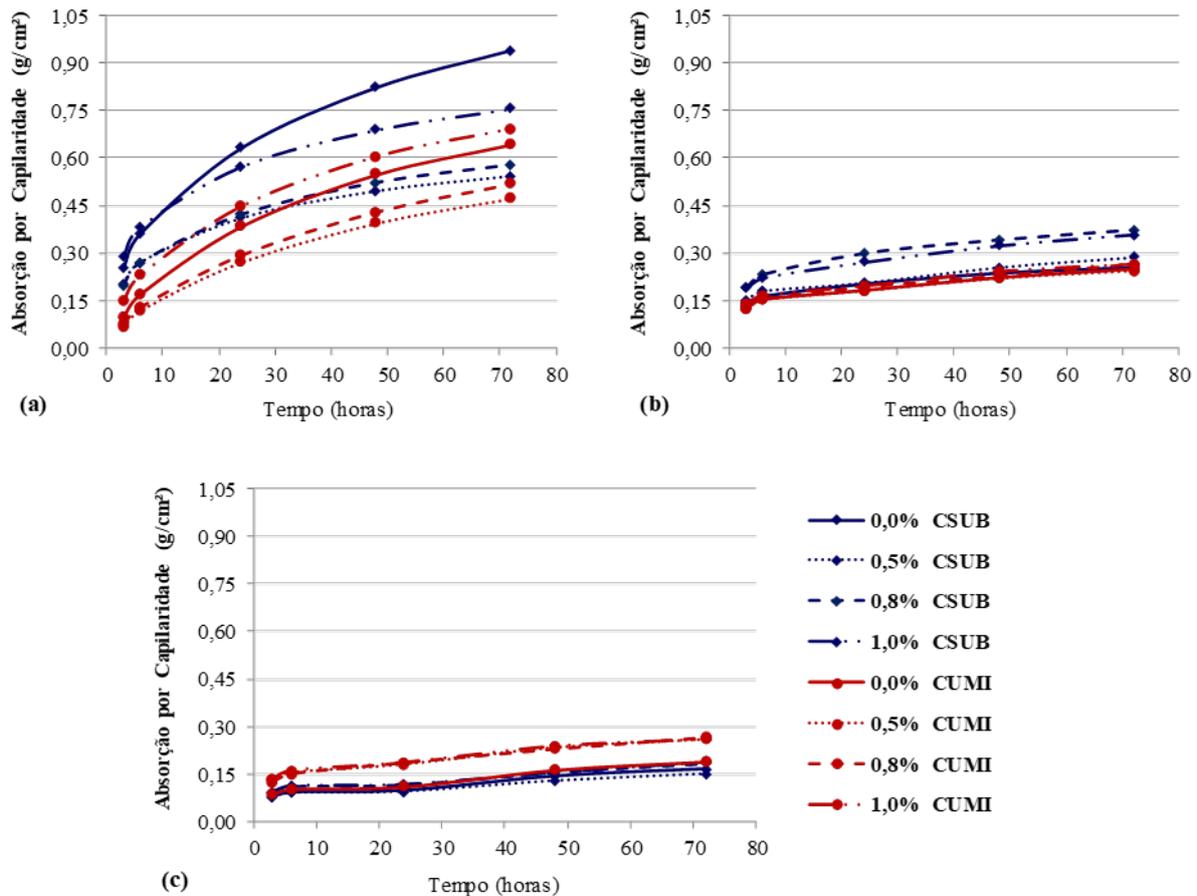
Nascimento *et al.* (2017), avaliando diferentes aditivos cristalizantes também para dosagem de 1,0%, porém para uma relação a/c igual a 0,60, adotando processo de cura submersa, demonstraram que o emprego do aditivo cristalizante não diminuiu a resistência à compressão, pelo contrário, registrou ganhos de resistência variando de 1,1% até 25,1%, quando comparado com o concreto referência, para a idade de 28 dias. Comportamento coerente com o atual estudo, já que para relações a/c maiores, quando adotada a dosagem de 1,0%, há um aumento na resistência à compressão quando comparada ao concreto referência (Figura 6a).

Destaca-se, ainda, que quando utilizada uma dosagem de cristalizante inferior à especificação do fornecedor, nesta pesquisa especificada em 0,5%, para os corpos de prova curados em câmara úmida, registrou-se uma manutenção na resistência média para concretos com relação a/c de 0,45, enquanto que as relações a/c de 0,55 e 0,63 apresentaram aumento da resistência média, respectivamente, de 11,19% e 5,68%. Analisando o processo de cura submersa, registraram-se reduções das resistências para as três relações a/c, de 5,50%, 0,47% e 1,15%, respectivamente, para as a/c iguais a 0,63, 0,55 e 0,45.

#### 4.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

A absorção de água por capilaridade corresponde à quantidade de água absorvida por área superficial do corpo de prova em um intervalo compreendido entre duas pesagens consecutivas. Neste estudo, para cada ponto da matriz estudada ensaiaram-se 3 corpos de prova que foram submetidos à CSUB e 3 corpos de prova com CUMI, para a idade de 28 dias. Os resultados apresentados na Figura 7 correspondem à média dos valores individuais obtidos ao longo das 72 horas de ensaios, conforme metodologia, para cada teor de aditivo utilizado.

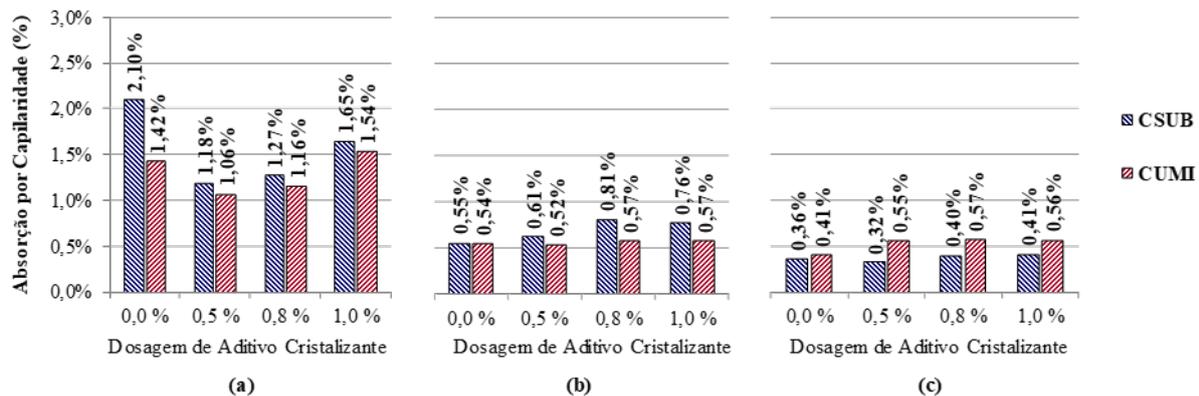
**Figura 7 – Absorção de água média por capilaridade ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ), aos 28 dias, para corpos de prova de concreto para: (a) relação  $a/c = 0,63$ ; (b) relação  $a/c = 0,55$ ; e (c) relação  $a/c = 0,45$**



Fonte: Autor (2019)

Analisando esse comportamento ao longo das 72 horas de ensaio, além da redução da absorção com a redução da relação  $a/c$ , observa-se que, para maior relação  $a/c$ , a absorção por capilaridade foi maior no concreto submetido a CSUB, enquanto que para a menor relação  $a/c$  esse comportamento muda. Ao final do ensaio, após as 72 horas de leitura, mediu-se o percentual final de absorção registrado (Figura 8).

**Figura 8 – Absorção de água por capilaridade média (%), na idade de 28 dias, para corpos de prova de concreto ao final do ensaio em 72h para: (a) relação a/c = 0,63; (b) relação a/c = 0,55; e (c) relação a/c = 0,45**



Fonte: Autor (2019)

Para melhor analisar a influência das variáveis sobre a absorção por capilaridade, assim como realizado na análise da resistência à compressão, os valores individuais registrados ao final do ensaio, após 72 horas de leitura, foram submetidos a análise estatística. A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos pela ANOVA.

**Tabela 6 – ANOVA da influência do aditivo cristalizante, relação a/c e tipo de cura sobre a absorção de água por capilaridade aos 28 dias de idade**

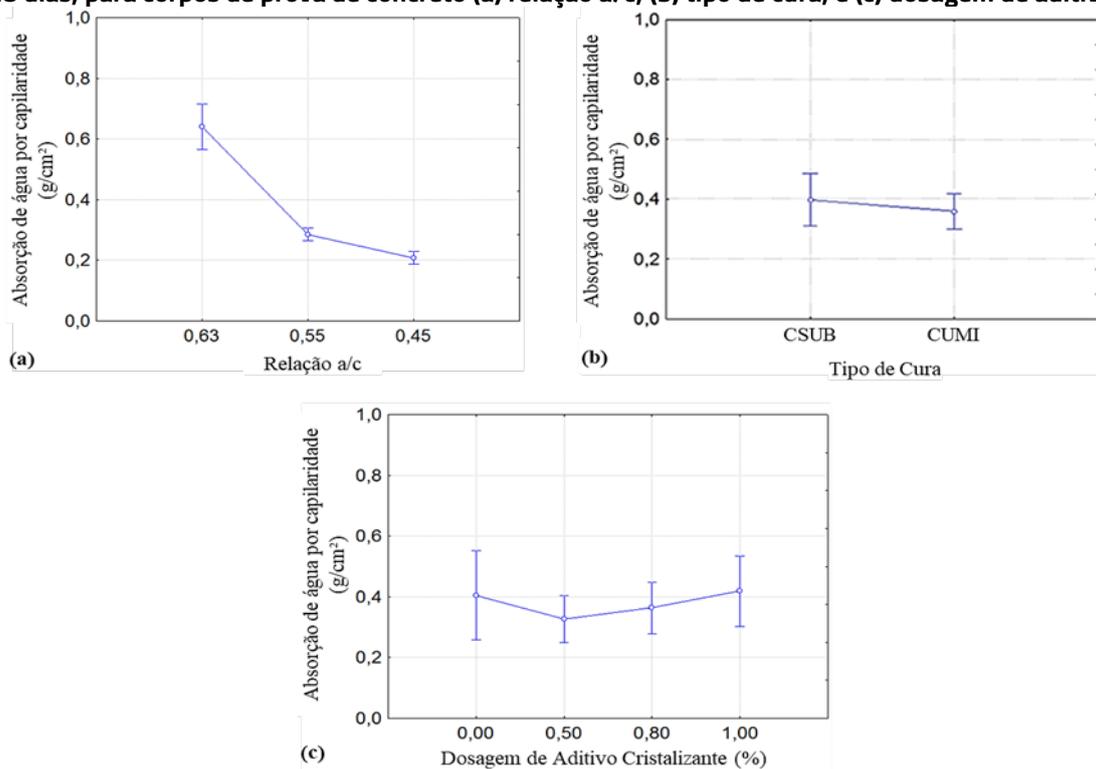
Fonte	SQ	GDL	MQ	F	Valor p	Significativo
Relação a/c	2,5764	2	1,29	203,266	0,00000	S
Teor de aditivo (%)	0,0980	3	0,03	5,153	0,00361	S
Tipo de cura	0,0257	1	0,03	4,06	0,04953	S
Relação a/c * Teor de aditivo (%)	0,2660	6	0,04	6,994	0,00002	S
Relação a/c * Tipo de cura	0,1191	2	0,06	9,397	0,00036	S
Teor de aditivo (%) * Tipo de cura	0,0205	3	0,01	1,076	0,36837	NS
Relação a/c * Teor de aditivo (%) * Tipo de cura	0,0563	6	0,01	1,481	0,20485	NS

Legenda: SQ - Soma quadrática; GDL - Graus de liberdade; MQ - Média quadrática; F - Valor calculado de F; S - Significativo; NS - Não significativo

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

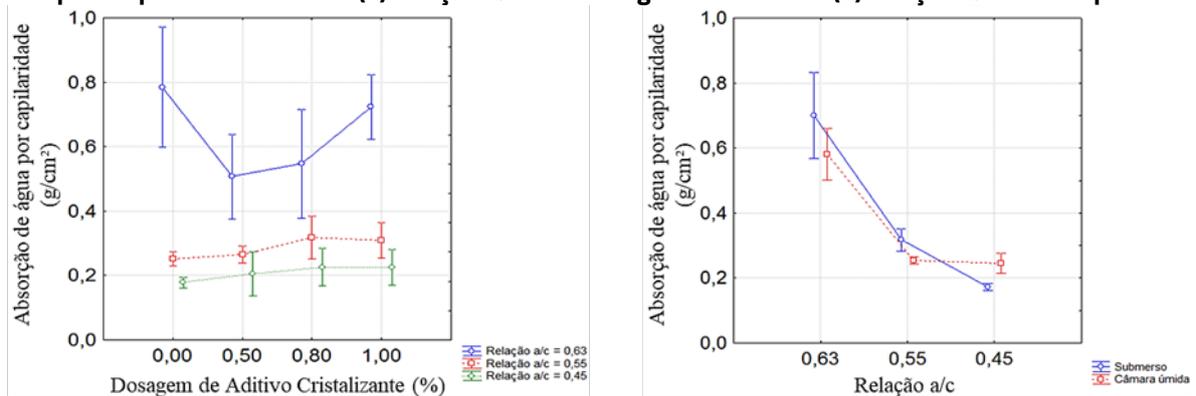
Pela tabela ANOVA constata-se que, assim como para resistência à compressão, as variáveis principais (relação a/c, teor de aditivo, tipo de cura) e as interações relação a/c com teor de aditivo e a interação relação a/c com tipo de cura exercem influência significativa sobre o resultados de absorção de água por capilaridade para idade de 28 dias. As Figuras 9 e 10 ilustram, respectivamente, o comportamento registrado pela ANOVA para as variáveis principais e para as interações entre essas variáveis que exerceram influência significativa sobre os resultados de absorção de água por capilaridade.

**Figura 9 – ANOVA das variáveis principais sobre o comportamento da absorção de água por capilaridade, aos 28 dias, para corpos de prova de concreto (a) relação a/c; (b) tipo de cura; e (c) dosagem de aditivo**



Fonte: Autor (2019)

**Figura 10 – ANOVA das interações sobre o comportamento da absorção de água por capilaridade, aos 28 dias, em corpos de prova de concreto: (a) relação a/c com dosagem de aditivo e (b) relação a/c com o tipo de cura**



Fonte: Autor (2019)

Conforme esperado, os resultados da ANOVA comprovam que a relação a/c exerce influência significativa na absorção de água por capilaridade (Figura 9a), quanto maior relação a/c tanto maior será a absorção de água. Helene e Andrade (2010) destacam que a relação a/c é um dos principais parâmetros que regem as propriedades de absorção capilar da água.

A absorção de água por capilaridade mostrou-se influenciada significativamente em relação ao tipo de cura, apresentando melhor desempenho para concretos submetidos ao processo de CUMI, já que apresentou menores valores de absorção (Figura 9b). Quanto ao teor de aditivo, há diferença significativa na absorção quando analisados de forma isolada, principalmente devido à redução registrada para os concretos produzidos com os teores de 0,5% e 0,8% de aditivo. Para o teor de 1,0% observa-se um comportamento muito similar ao concreto referência (Figura 9c). Devido a essas diferenças significativas que as variáveis principais exercem, registrou-se, assim como no comportamento quanto à compressão, a influência significativa que as interações entre relação a/c e o teor de aditivo (Figura 10a) e relação a/c e o tipo de cura (Figura 10b) exercem na absorção final.

Nascimento *et al.* (2017), ao ensaiarem um concreto também produzido com cimento CP IV e com 1,0% de aditivo cristalizante, para uma relação a/c de 0,60, aos 19 dias, depois de ciclos de cura submersa (úmida) e ao tempo (seca), a fim de induzir o processo de cristalização, verificaram aumento da absorção em relação ao concreto de referência, registrando uma diferença de 85,71% de absorção maior no concreto com aditivo. No atual estudo, para dosagem de 1,0% de aditivo e relação a/c de 0,63, registrou-se também o aumento da absorção quando comparado ao concreto sem aditivo, registrando, após as 72 horas de ensaio, percentuais de 5,48% e 40,49%, respectivamente, para o processo de CUMI e CSUB. Aumento na absorção de água para o concreto com aditivo cristalizante também foi registrado por Cappellesso (2016), que observou um aumento significativo na absorção para o concreto produzido com dosagem de 0,8% de cristalizante e curado em câmara úmida. Segundo a autora, esse comportamento pode estar associado à mudança na microestrutura do concreto que o aditivo pode promover, sendo capaz de modificar a distribuição e o tamanho dos poros, o que pode ter provocado um aumento da higroscopicidade do material.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos por meio da metodologia e com os materiais utilizados neste estudo mostraram que o aditivo cristalizante exerce influência significativa nas propriedades do concreto endurecido, ao analisarem-se diferentes teores de aditivo, diferentes relações a/c e dois processos de cura.

Destaca-se que o processo de cura submersa (CSUB) mostrou-se mais eficiente quando comparado à cura úmida (CUMI) para os resultados de resistência à compressão, tanto para o concreto referência como para o concreto com a adição do cristalizante, apresentando diferenças mais expressivas para menores relações a/c. Por exemplo, para o concreto com relação a/c igual a 0,45, essas diferenças foram de 20,46% para o concreto referência e de 14,96% para o concreto com 1,0% de cristalizante. Quanto à absorção de água por capilaridade, o uso do aditivo cristalizante resultou em aumento dessa propriedade no concreto quando comparado com o concreto referência. Quanto maior o teor de aditivo, maior foi a absorção, o que não era esperado, no entanto, já registrado por outros autores. Para a relação a/c igual a 0,63 e dosagem de 1,0% de aditivo cristalizante, o concreto com CSUB apresentou 40,49% mais absorção quando comparado ao concreto sem aditivo.

Este trabalho permitiu uma análise do efeito do aditivo cristalizante nas propriedades do concreto endurecido, contudo, ainda há muitas perguntas a serem respondidas e o aditivo cristalizante ainda precisa ser melhor conhecido e difundido no mercado da construção civil. Estudos que contemplem a mudança no comportamento microestrutural proporcionada pela presença do aditivo se fazem necessários para melhor análise de alguns resultados obtidos.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016. 9p.
- \_\_\_\_. **NBR 5739**: Concreto – Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018. 9p.
- \_\_\_\_. **NBR 6118**: Projetos de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 238p.
- \_\_\_\_. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção da água por capilaridade - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012. 3p.
- \_\_\_\_. **NBR 15575**: Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013. 71p.
- \_\_\_\_. **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018. 12p.
- \_\_\_\_. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009. 6p.

\_\_\_\_. **NBR NM 53:** Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009. 8p.

\_\_\_\_. **NBR NM 67:** Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998. 8p.

\_\_\_\_. **NBR NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6p.

AZARSA, P.; GUPTA, R.; BIPARVA, A. Assessment of self-healing and durability parameters of concretes incorporating crystalline admixtures and Portland Limestone Cement. **Cement and Concrete Composites**, v. 99, 17–31, 2019.

BERTOLINI, L. **Materiais de construção:** Patologia, Reabilitação e Prevenção. Apresentação de HELENE, P. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

BIANCHIN, F. H. **Avaliação da autocicatrização em concretos produzidos com aditivo cristalizante e fissurados nas primeiras idades.** Monografia (Trabalho de conclusão do curso de engenharia civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2018. 102p.

CAPPELLESSO, V. G. **Uso de impermeabilizante por cristalização para redução da permeabilidade do concreto.** Monografia (Trabalho de conclusão do curso de engenharia civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2016. 141p.

HELENE, P.; ANDRADE, T. **Concreto de Cimento Portland.** In: ISAIA, G. C. (Ed). *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.* São Paulo: Ibracon, 2010.

ISAIA, G. C. **O Concreto:** da Era Clássica à Contemporânea. In: Geraldo Isaia (Org.) *Concreto Ensino, Pesquisas e Realizações – Volume 2.* – IBRACON, São Paulo, 2005.

MAKI, Y.; KURAMOTO, Y.; NAKAMURA, Y. Melhoramento das propriedades do concreto por meio de material reabilitador do concreto do tipo cristalizante de cimento. In: 46a Conferência Científica Anual da Sociedade de Engenharia Civil do Japão, **Anais...**, 1991.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J.M. **Concreto:** microestrutura, propriedades e materiais. 2. Ed. São Paulo: Ibracon, 2014. 782 p.

MOREIRA, H. P.; FIGUEIREDO, E. P.; HELENE, P. R. L. **Avaliação da influência de alguns agentes agressivos na resistência à compressão de concretos amassados com diferentes tipos de cimentos brasileiros.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2001. 16p.

NASCIMENTO, P. R. S.; PEREIRA, B. C. G.; JOFFILY, I. A. L. Os efeitos de diferentes aditivos cristalizantes nas propriedades do concreto no estado endurecido: absorção de água por capilaridade e resistência à compressão. *In*: 58º Congresso Brasileiro do Concreto, 2017, Bento Gonçalves. **Anais do 58º Congresso Brasileiro do Concreto.** São Paulo: Ibracon, 2017.

NASIM, M.; DEWANGAN, U. K.; DEO, S. V. Effect of crystalline admixture, fly ash, and PVA fiber on self-healing capacity of concrete. **Materials Today: Proceedings**, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.062>>.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** Tradução: Ruy Alberto Cremonini. 5.ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 888 p.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de Cimento Portland.** 14. ed. São Paulo: Globo, 2005. 308p.

PETRUCCI, R. S.; HASTENPFLUG, D. Influência do aditivo cristalizante na porosidade do concreto de Cimento Portland. *In*: 58º Congresso Brasileiro do Concreto, 2017, Bento Gonçalves. **Anais do 58º Congresso Brasileiro do Concreto.** São Paulo: Ibracon, 2017.

REDDY, T. C. S.; RAVITHEJA, A. Macro mechanical properties of self healing concrete with crystalline admixture under different environments. **Ain Shams Engineering Journal**, 10, 23–32, 2019.