

Avaliação do desempenho mecânico e absorção capilar de concretos com incorporação de aditivos cristalizante submetidos a danos nas primeiras idades

Evaluation of the mechanical performance and capillary absorption of concretes with incorporation of crystallizing admixtures and subjected to damage at early ages

Rafael Fumaco Tambara¹ , Luis Urbano Durlo Tambara Júnior^{2,3}, Simone Dornelles Venquiaruto¹, Fernanda Bianchi Pereira da Costa¹

¹Universidade Federal do Pampa, Grupo de Pesquisa em Tecnologia da Construção. Bagé, RS, Brasil.

²Universidade Estadual do Norte Fluminense, Laboratório de Materiais Avançados. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

³Bundesanstalt für Materialforschung und Prüfung, Division 7.4 Technology of Construction Materials, Berlin, 12205, Germany.

e-mail: rafaelmtambara@gmail.com, simonevenquiaruto@unipampa.edu.br, fernandacosta@unipampa.edu.br, luis-urbano.durlo-tambara@bam.de

RESUMO

Esta pesquisa avaliou o fenômeno de autocicatrização nas propriedades mecânicas e absorção capilar de concretos estruturais. Foram avaliados dois aditivos cristalizantes em pó, dosados de acordo com o teor recomendado pelos fabricantes. Aditivos cristalizantes aumentam a densidade do gel C-S-H e formam cristais insolúveis, bloqueando fissuras. Três traços de concreto foram produzidos: referência, aditivo-X com 0,8% e aditivo-Y com 2,0% em relação a massa do cimento. Aplicou-se 75% da carga de ruptura aos 3- e 14-dias para gerar microfissuras e comparar com a referência. Posteriormente, a autocicatrização foi avaliada aos 28- e 76-dias. A propriedade de resistência à compressão axial foi determinada aos 28-dias, revelando que os aditivos cristalizantes contribuíram para um aumento médio de 12% desta propriedade. A idade do carregamento dos concretos não apresentou um impacto significativo na resistência à compressão axial, mas apontou resultados significativos entre os tipos de aditivos estudados, conforme ANOVA. As propriedades de absorção de água por capilaridade foram avaliadas aos 28- e 76-dias, indicando uma redução de absorção de água média de 42% devido ao uso dos aditivos cristalizantes. Em conclusão, a incorporação dos aditivos cristalizantes contribuiu de maneira positiva para a autocicatrização dos concretos estudados, indicando uma recuperação parcial das microfissuras.

Palavras-chave: Autocicatrização; Aditivo cristalizante; Concreto; Fissuras.

ABSTRACT

This study assessed the self-healing phenomenon in the mechanical properties and capillary absorption of structural concretes. Two crystalline powder additives were evaluated, dosed according to the manufacturers' recommendations. Crystalline additives increase the density of the C-S-H gel and form insoluble crystals, effectively blocking fissures. Three concrete mixes were produced: a reference mix, additive-X with 0.8%, and additive-Y with 2.0%, relative to the mass of cement. 75% of the rupture load was applied at 3- and 14-days to induce microfissures for comparison with the reference mix. Subsequently, self-healing was assessed at 28- and 76-days. The property of axial compressive strength was determined at 28-days, revealing that crystalline additives contributed to an average increase of 12% in this property. While the age of loading did not significantly impact axial compressive strength, there were significant variations among the types of additives studied, as indicated by ANOVA. Water absorption properties through capillarity were evaluated at 28- and 76-days, showing an

average reduction of 42% in water absorption due to the use of crystalline additives. In conclusion, the inclusion of crystalline additives positively contributed to the self-healing of the studied concretes, suggesting a partial recovery of microfissures.

Keywords: Self-healing; Crystallizing additive; Concrete; Cracks.

1. INTRODUÇÃO

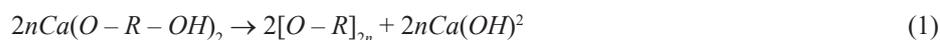
A utilização do concreto pode abranger desde estruturas básicas até obras imponentes, como edifícios, infraestruturas urbanas, pontes, viadutos e barragens [1]. No entanto, uma das limitações do concreto está relacionada a sua baixa resistência à tração (cerca de 10% da sua resistência à compressão). Esta vulnerabilidade o torna suscetível a fissuras, comprometendo significativamente sua integridade estrutural [2]. Esse problema é agravado, sobretudo nas fases iniciais, devido à retração restrita, influenciada principalmente pelo calor de hidratação e pelo procedimento de cura [3]. Estas fissuras comprometem a resistência e o desempenho das estruturas, permitindo a entrada de água com substâncias químicas e gases, causando carbonatação, corrosão do aço, deterioração química e/ou danos devido a ciclos de congelamento e descongelamento [4].

Atualmente, uma variedade de recursos e avanços tecnológicos estão disponíveis para auxiliar no reparo de fissuras. No entanto, o próprio concreto possui um potencial de cura que ajuda na selagem dessas fissuras, esse processo é conhecido como autocicatrização (self-healing) [5]. Essa capacidade de autocura refere-se ao processo pelo qual um material é capaz de restaurar suas propriedades, que foram comprometidas devido a danos sofridos, com pouca ou nenhuma assistência externa, apenas com os elementos intrínsecos do concreto [6].

A capacidade de autocicatrização, ou self-healing, é um fenômeno natural, característico às propriedades e à composição dos materiais cimentícios que ocorre em concretos que possuem microfissuras, causada principalmente pela hidratação do cimento e pela precipitação do carbonato de cálcio ($CaCO_3$), demonstrando-se extremamente benéfico no procedimento de reparação de fissuras [7]. Esse processo implica no fechamento de microfissuras em um material que tenha sofrido danos anteriormente, embora não necessariamente resulte em uma melhoria no desempenho desse material [6]. Diversos pesquisadores investigaram essa habilidade de autorreparo, podendo ela ser intensificada com o emprego de mecanismos autônomos de autocura, como bactérias [7, 8], reforço com fibra [9, 10], polímeros [11], aditivos cristalizantes (CA) [5, 9, 10, 12, 13, 14], agentes de cura encapsulados [14, 15], entre outros.

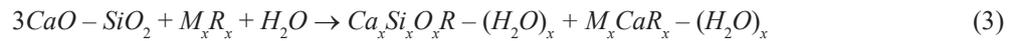
Nessa pesquisa, o foco maior está voltado para o uso de aditivos cristalizantes em pó, no qual são introduzidos na matriz do cimento durante a sua produção. Conforme mencionado por OLIVEIRA *et al.* [16], esses produtos exibem propriedades hidrofílicas, permitindo uma rápida reação ao interagirem com a água que penetra nos poros ou fissuras do concreto. A relação de dependência entre as reações de CA e o tempo é controlada pelo fornecimento de hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), que ocorre após as reações de hidratação do cimento, bem como pelo aumento do refinamento da microestrutura, o que leva à diminuição da velocidade e duração das reações. Nesse contexto, SENFF *et al.* [17] identificaram as principais fases provenientes da hidratação do cimento Portland CPVARI – RS. Os autores observaram que após 1 hora de hidratação é possível a identificação dos produtos da hidratação do cimento Portland com a água, ou seja, a portlandita ou $Ca(OH)_2$. Entretanto, após 2 horas de hidratação já foram identificados as presenças de $Ca(OH)_2$ e silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que são produtos da reação de hidratação [17]. Logo, a reação do CA só ocorre quando os poros atingem certo nível de umidade combinado com a formação do $Ca(OH)_2$ devido a hidratação do cimento. Assim, a facilidade de acesso à água dependerá do refinamento da estrutura dos poros. Portanto, pode implicar em um mecanismo adicional de hidratação do CA [16].

Após essa interação, o CA forma cristais insolúveis em água (compostos por sais inorgânicos, como o silicato de sódio e o silicato de potássio), obstruindo poros e trincas, assim aprimorando a eficácia do processo de cura do concreto. Adicionalmente, o CA intensifica a densidade do gel de C-S-H, reforçando a resistência do concreto à entrada de íons agressivos [18]. Para a formação de cristais minerais na presença de água, conforme relatado no estudo de HU *et al.* [19], esses produtos químicos ativos como $2nCa(O-R-OH)_2$ na equação (1) continham tanto o componente hidrofílico ($-OH$) quanto o componente hidrofóbico ($-R$), essas reações dos cristalizantes estão descritas pelas equações (1) e (2):



Outros autores como ROIG-FLORES *et al.* [5], LI *et al.* [20] e TSAMPALI e STEFANIDOU [21] expressam as reações do CA pela equação (3). Nessa equação, um catalisador cristalino, M_xR_x , reage com a alita

e água, gerando hidratos de silicato de cálcio modificados e um precipitado $M_x C_a R_x - (H_2O)_x$ responsável pelo bloqueio de poros.



Silicato tricálcico + promotor cristalino + água \rightarrow C-S-H modificado + bloqueador de poros precipitado

Conforme LIN *et al.* [22] durante as idades iniciais, as fissuras tendem a se formar devido a vários fatores, como a retração do concreto, assim, os aditivos cristalizantes funcionam melhor nesse período, pois aproveitam a presença de água e íons disponíveis durante o processo de hidratação. A reação química entre os componentes do aditivo e os produtos de hidratação do cimento é mais eficaz quando o concreto está passando por esse estágio ativo. À medida que o tempo passa e o concreto endurece, a disponibilidade de água e íons diminui, o que pode limitar a eficácia dos aditivos cristalizantes.

Apesar dos benefícios proporcionados pela capacidade de autocicatrização do concreto sem a necessidade de intervenção externa, a fabricação de materiais com capacidade de autorreparo ainda acarreta custos consideráveis. É importante ressaltar que, embora os custos iniciais de concreto com propriedades auto reparadoras sejam mais elevados, ao longo do tempo, a ausência de reparos em estruturas construídas com esses materiais pode resultar em despesas menores quando comparadas com estruturas de concreto convencionais [23].

Neste contexto, por meio da análise das propriedades mecânicas e de durabilidade dos traços produzidos, busca-se investigar o impacto da incorporação de dois aditivos cristalinos nacionais, em concretos estruturais submetidos a danos (microfissuração) frente ao fenômeno de autocicatrização autônoma.

2. MECANISMOS DE AUTOCICATRIZAÇÃO

Considerando que a cicatrização pode ocorrer de maneira intrínseca ao material de cimento ou através de um estímulo externo para desencadear o processo, as técnicas de auto cura podem ser classificadas em dois grupos principais, denominados, cura autógena e cura autônoma [6].

A cicatrização autógena de fissuras é um procedimento que leva ao fechamento parcial ou total das fissuras, utilizando os componentes originais da mistura, sendo ele um processo natural, intrínseco às propriedades e à composição do material [24]. De acordo com ZHANG *et al.* [25] e DE ROOIJ *et al.* [6], os processos de cicatrização autógena observados em materiais de base cimentícia podem surgir de mecanismos físicos (inchamento dos produtos de hidratação), químicos (hidratação tardia ou formação de carbonato de cálcio) ou mecânicos (partículas soltas do concreto ou partículas finas provenientes da água), sendo fundamental a presença de água. É importante ressaltar que a eficácia da cicatrização autógena se restringe a fissuras estreitas, sendo sua largura limitada para este tipo de cura, entre 100 e 150 μm . Além disso, controlar esse processo é muito difícil, dado que se trata de um fenômeno natural [20, 26].

A cicatrização autônoma é descrita como um método de autorreparação no qual adições específicas são incorporadas para estimular a regeneração do material, introduzindo elementos não tradicionais no concreto [27]. A cicatrização autônoma é caracterizada pela capacidade de autorreparação da fissura, envolvendo materiais fabricados e introduzidos intencionalmente na matriz de cimento durante a produção, como microcápsulas contendo bactérias ou polímeros, fibras com adesivos ou aditivos que reduzem a permeabilidade, como os aditivos cristalizante [28, 29]. No caso de uso de aditivos cristalizantes, o aumento da durabilidade acontece pela redução da porosidade capilar. Parte dessas reações e fechamento dos poros ocorre simultaneamente ao processo de hidratação, onde o aditivo cristalino e o cimento absorvem o excesso de umidade presente na mistura. Por outro lado, esses aditivos também têm a capacidade de estimular reações secundárias de hidratação sempre que entram em contato com a água ou quando são expostos a um aumento na umidade, contribuindo para a potencialização do processo de autocura [14].

Além disso, estudos têm comprovado que a largura das fissuras que podem ser reparadas através do processo de cicatrização autônoma pode ser consideravelmente maior do que aquelas que podem ser tratadas pela cicatrização autógena, chegando a curar fissuras de até 500 μm [30].

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico serão apresentadas as caracterizações dos materiais utilizados para a produção dos concretos e as metodologias adotadas para o desenvolvimento da pesquisa.

3.1. Materiais utilizados

Para a produção dos diferentes traços de concreto avaliados, T1 (Traço de referência), T2 (Traço com aditivo cristalizante X) e T3 (Traço com aditivo cristalizante Y) foi utilizado o cimento Portland de Alta Resistência

Inicial e Resistente a Sulfato (CPV ARI – RS). Este tipo de cimento exibe uma resistência à compressão média aos 7 dias na qual atende a mínima estabelecida pela norma NBR 16697:2018 [31] de 34 MPa aos 7 dias, além de uma massa específica de 3,05 kg/dm³. O desenvolvimento de resistência em idades iniciais, promovido por este tipo de cimento, se torna interessante, uma vez que permite avaliar a eficácia dos aditivos cristalizantes no incremento/manutenção das propriedades dos concretos que serão submetidos a análise em maiores idades.

A granulometria a laser foi realizada com um granulômetro (S3500 Particle Size Analyzer) para a determinação da distribuição granulométrica e diâmetro médio das partículas do cimento e dos aditivos cristalizantes. A análise foi desenvolvida com material seco, com faixa de medição de 0,1 µm a 900 µm e temperatura de 25 °C. As curvas granulométricas são ilustradas na Figura 1 e detalhadas na Tabela 1. A caracterização química do cimento e dos aditivos cristalizantes estão disponíveis na Tabela 2, enquanto os ensaios químicos, físicos e mecânicos estão apresentados na Tabela 3. No contexto dos traços com aditivo cristalizante, foram empregados dois tipos de aditivo cristalizante em pó, denominados X e Y, adquiridos de empresas nacionais. As distribuições granulométricas desses aditivos são apresentadas na Figura 1, e seus respectivos diâmetros (10, 50 e 90%) são detalhados na Tabela 1.

Conforme mostrado na Figura 1 e na Tabela 1, nota-se que a granulometria do cimento Portland CPV ARI – RS é mais fina do que quando comparado com os aditivos cristalizantes X e Y utilizados. Entre os aditivos cristalinos, a granulometria do aditivo Y apresentou um diâmetro médio superior ao do aditivo X. Essa diferença pode ser explicada por diversos fatores, como a composição química dos aditivos, o processo de fabricação, a temperatura e pressão durante a produção, entre outros. O fato de o cimento apresentar uma granulometria mais fina, justifica o fato de as reações químicas ocorrerem mais rapidamente para o cimento, visto que há uma área superficial de contato maior, ou seja, há mais locais de contato para as reações químicas ocorrerem, além de resultar em uma velocidade inicial de reação mais rápida.

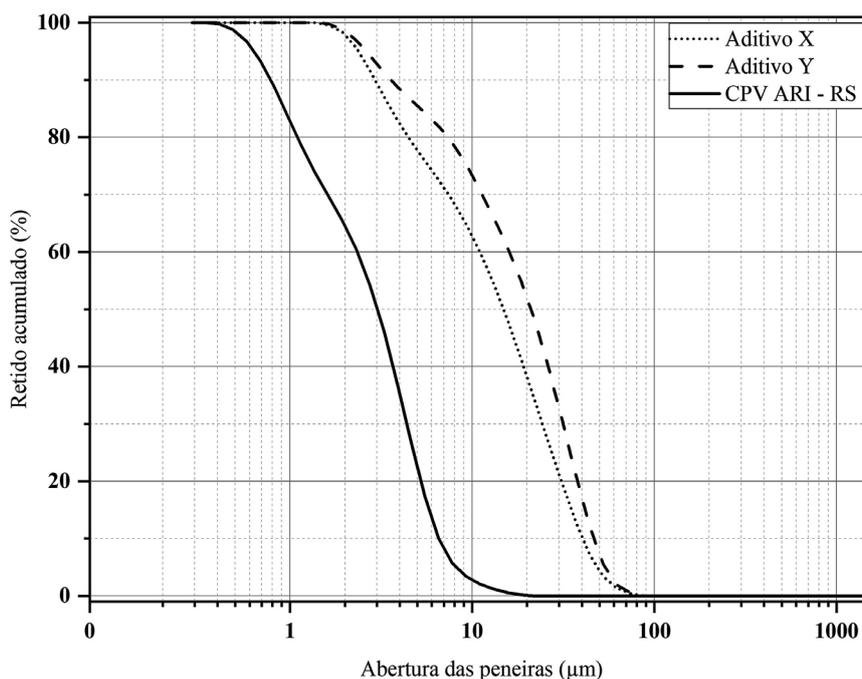


Figura 1: Curva de distribuição granulométrica do cimento e aditivos cristalizantes.

Tabela 1: Granulometria do aglomerante e aditivos cristalizantes.

GRANULOMETRIA (µm)	CIMENTO	ADITIVO X	ADITIVO Y
Diâmetro a 90%	6,55	40,63	46,75
Diâmetro a 50%	3,03	14,87	21,05
Diâmetro a 10%	0,78	2,94	3,60
Diâmetro médio	3,45	19,48	23,80

Tabela 2: Composição química dos aditivos cristalizantes e cimento Portland.

AMOSTRA	ÓXIDOS (%)											
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	Na ₂ O	P ₂ O ₅	MnO	Outros
CPV ARI – RS	60,22	21,00	4,68	4,79	3,48	3,28	0,96	0,42	0,41	0,20	0,10	0,46
Aditivo X	64,44	15,96	3,39	5,21	4,36	2,99	1,17	0,21	1,70	0,15	0,07	0,35
Aditivo Y	46,02	28,93	7,83	3,14	1,87	2,87	0,79	6,30	0,67	0,12	0,94	0,52

Tabela 3: Ensaios químicos, físicos e mecânicos do cimento Portland (CPV ARI – RS).

ENSAIOS QUÍMICOS			
<i>Ensaio</i>	<i>UN.</i>	<i>Resultados</i>	<i>Exigências (ABNT NBR 16697)</i>
Resíduo Insolúvel – RI	%	0,83	Não aplicável
Perda ao Fogo – PF	%	2,80	≤ 6,5
Óxido de Magnésio – MgO	%	4,79	Não aplicável
Trióxido de Enxofre – SO ₃	%	3,48	≤ 4,5
Anidrido Carbônico – CO ₂	%	2,95	≤ 5,5
ENSAIO MINERALÓGICO*			
C ₃ S			42,41
C ₂ S			28,20
C ₃ A			6,85
C ₄ AF			9,98
CaSO ₄			4,20
ENSAIOS FÍSICOS			
<i>Ensaio</i>	<i>UN.</i>	<i>Resultados</i>	<i>Exigências (ABNT NBR 16697)</i>
Área Específica (Blaine)	cm ² /g	4719	≥ 3000
Massa Específica	g/cm ³	3,05	Não aplicável
Índice de finura fundo – #75µm (nr. 200)	%	0,20	< 6,0
Resíduo na peneira #325	%	2,24	Não aplicável
Água de consistência normal	%	28,8	Não aplicável
Início de pega	minutos	124	> 60
Fim de pega	minutos	183	≤ 600
Expansibilidade à quente	mm	0,00	≤ 5,0
ENSAIOS MECÂNICOS			
<i>Ensaio</i>	<i>UN.</i>	<i>Resultados</i>	<i>Exigências (ABNT NBR 16697)</i>
Resistência à Compressão – 3 dias	MPa	34,6	24,0
Resistência à Compressão – 7 dias	MPa	37,2	34,0
Resistência à Compressão – 28 dias	MPa	39,7	Não aplicável

*Cálculos das fases mineralógicas estimadas a partir do método de Bogue.

Conforme os resultados dos ensaios mostrados na Tabela 3, percebe-se que todos os parâmetros atendem as exigências normativas para o tipo de cimento utilizado na pesquisa.

Como agregado miúdo, foi utilizado areia natural classificada como areia fina com massa específica de 2,55 kg/dm³, um módulo de finura de 1,23 e uma dimensão máxima característica de 0,60 mm. O agregado miúdo apresentou granulometria abaixo do limite normativo inferior indicado para esse tipo de agregado (Figura 2). Apesar dessa limitação, optou-se por utilizar o agregado na produção dos concretos, em função da dificuldade de se encontrar comercialmente um agregado miúdo com granulometria mais grossa na região. O agregado graúdo empregado foi classificado com dimensão máxima característica de 19 mm, massa específica de 2,78 kg/dm³ e um módulo de finura de 7,02. O agregado graúdo apresentou granulometria que se enquadra dentro dos limites normativos, satisfazendo todos os parâmetros exigidos para o seu uso em concretos (Figura 2).

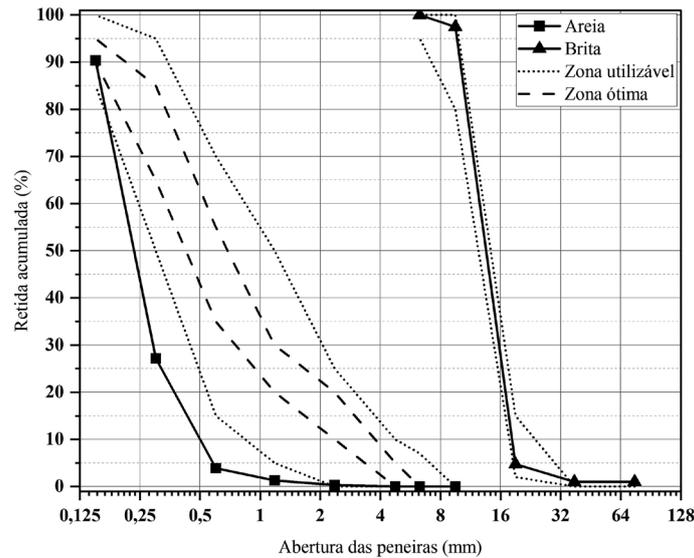


Figura 2: Curva de distribuição granulométrica dos agregados.

Em todas as concretagens foi utilizada água proveniente da rede pública de abastecimento local, utilizada tanto na mistura do concreto quanto no processo de cura por submersão. Para se alcançar a consistência desejada foi empregado um aditivo superplastificante à base de policarboxilatos, com massa específica de $1,08 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$.

3.2. Produção dos concretos

Através de estudos prévios de dosagens foi produzido um traço unitário em massa 1: 1,64: 2,36 (cimento; areia; brita) com consumo de cimento Portland CPV ARI – RS em 417 kg/m^3 e teor de argamassa de 48%. A relação água/cimento (a/c) foi fixada em 0,42. Para a padronização da consistência dos concretos foi utilizado um aditivo superplastificante em um teor de 0,2% em relação ao peso de cimento. O controle da consistência do concreto foi realizado através do teste de Abatimento do Tronco de Cone, conforme especificado na NBR 16889:2020 [32], estabelecendo como parâmetro a medida de $8 \pm 2 \text{ cm}$. Foram desenvolvidos três traços com os mesmos procedimentos e equipamentos: T1 – Traço de referência (sem aditivo cristalizante); T2 – Traço com aditivo cristalizante X e T3 – Traço com aditivo cristalizante Y). O consumo de materiais para os traços de concreto é apresentado na Tabela 4.

Se tratando do procedimento de mistura dos concretos, sua produção foi feita com a utilização de uma betoneira de eixo inclinado com capacidade de 180 litros. Para os traços T2 e T3 o aditivo cristalizante em pó foi adicionado durante a mistura dos materiais na betoneira, sendo utilizado a dosagem recomendada pelos respectivos fabricantes X e Y, sendo 0,8% e 2,0%, respectivamente.

Após moldagem das amostras, as mesmas foram cobertas com lona e mantidas em temperatura ambiente durante as primeiras 24 horas. Em seguida, foram removidos dos moldes e colocados em um ambiente de cura submersa em água, onde permaneceram até as datas programadas para os ensaios de controle.

Tabela 4: Consumo de materiais para os traços de concreto utilizados na pesquisa.

MATERIAL	TRAÇO (kg/m^3)		
	T1 – REFERÊNCIA	T2 – ADITIVO X	T3 – ADITIVO Y
Cimento Portland CPV ARI – RS	417	417	417
Água	175	175	175
Água/cimento	0,42	0,42	0,42
Brita	1194	1194	1194
Areia	685	685	685
Aditivo Cristalizante (CA)	0	3,3	8,3
Aditivo Superplastificante	0,8	0,8	0,8

3.3. Pré-carregamento dos concretos

Para uma melhor análise dos efeitos do fenômeno da autocicatrização, parte dos concretos produzidos foram pré-carregados por esforços de compressão em uma prensa modelo EMIC de 1500 kN (mesma condição utilizada para os ensaios de resistência à compressão axial aos 28 dias), com velocidade de aplicação de carga de 0,45 MPa/s. Parte das amostras de cada traço permaneceram intactas, para servirem como referência. A imposição do dano (microfissuras) em distintas idades permitirá uma análise indireta da contribuição dos aditivos cristalizantes no fenômeno da autocicatrização, através da análise das propriedades avaliadas (resistência à compressão axial e absorção de água por capilaridade). A indução dos danos (microfissuras internas) ocorreu em duas idades distintas, aos 3 e 14 dias. Nestas idades, três corpos de prova (CPs) de cada traço eram ensaiados à compressão axial, e a partir do valor médio obtido (f_{cm}) determinava-se o percentual de 75% de carregamento (75% do $f_{cm}_{3 \text{ dias}}$ e $f_{cm}_{14 \text{ dias}}$) que seria aplicado em parte das amostras. A escolha do percentual de carregamento justifica-se pelo fato de permitir a imposição de danos ao concreto (microfissuras) sem que a amostra entre em colapso (ruptura). Esse percentual é crucial, pois indica o limiar da tensão no qual a propagação de fissuras instáveis se inicia, representando a tensão crítica. Alguns autores [33, 34, 35] utilizaram este processo de indução de danos em corpos de prova para estudos da autocicatrização de concretos. Os autores apontam como limitação deste procedimento o fato deste tipo de indução de dano não permitir uma visualização de como ocorre a distribuição das microfissuras no interior dos corpos de prova e nem das suas espessuras. No entanto, concordam que o dano é imposto, apesar de não poder ser quantificado. Na Figura 3 pode ser observado o fluxograma do programa experimental para um traço, sendo detalhado as etapas de pré-carregamento e cura dos concretos analisados.

Conforme ilustrado na Figura 3, vinte e sete corpos de prova foram moldados para cada composição. Após a remoção dos moldes, as bases dos CPs foram retificadas em uma serra circular, identificados e acondicionados em um ambiente climatizado com cura submersa, favorecendo para uma contribuição mais efetiva no processo de autocicatrização. SISOMPHON *et al.* [13], FERRARA *et al.* [14], VAN TITTELBOOM *et al.* [24] e REINHARDT e JOOSS [36] concordam que a presença de água é fator essencial para que a autocicatrização dos concretos aconteça de forma efetiva. Três dias após a moldagem, nove CPs foram retirados da cura, sendo três ensaiados para determinação da resistência à compressão média. Com base nesse valor médio ($f_{cm}_{3 \text{ dias}}$), foi calculado um percentual de carga ($75\% * f_{cm}_{3 \text{ dias}}$), na qual foram aplicadas nos outros seis CPs. A indução de microfissuras no concreto permitirá avaliar os efeitos dos aditivos cristalinos, observando a recuperação e/ou manutenção das propriedades avaliadas, como a resistência à compressão axial e absorção de água por capilaridade. Posteriormente, os CPs foram identificados novamente e retornaram ao ambiente de cura submersa. Aos 7 dias, mais três amostras íntegras foram retiradas da cura e submetidas a testes de resistência, fornecendo dados para monitorar a resistência dos concretos. Aos 14 dias, seis CPs íntegros foram submetidos a um processo de indução de fissuras, semelhante ao procedimento de carregamento dos concretos aos três dias. Após essa etapa, os CPs foram novamente identificados e acondicionados em cura submersa até os 28 dias. Nessa

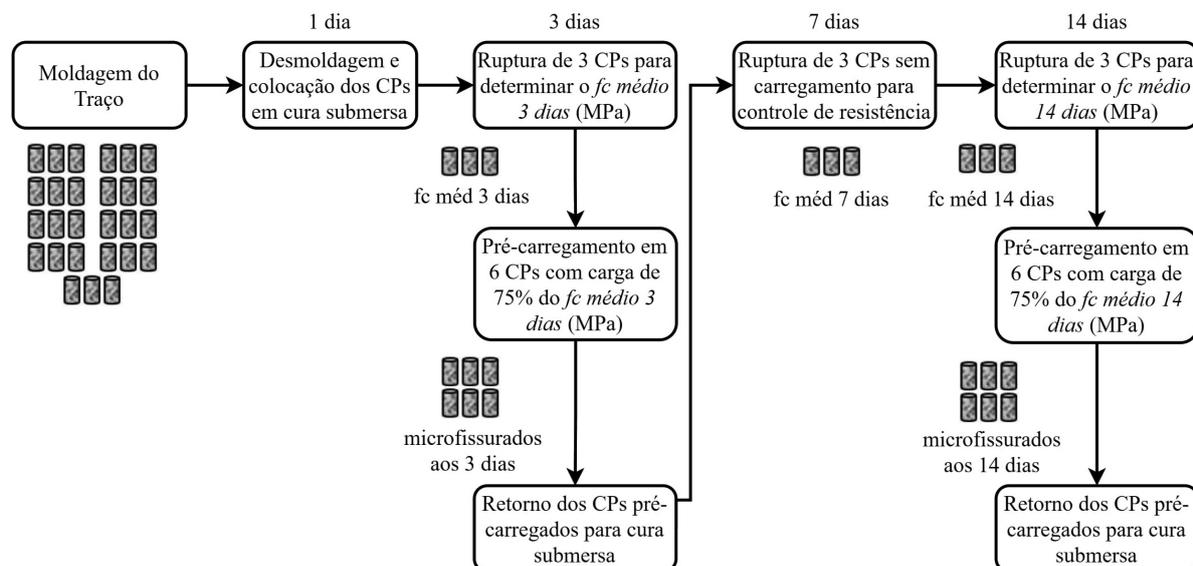


Figura 3: Fluxograma do programa experimental – pré-carregamento dos concretos.

idade, as propriedades mecânicas e os dados dos ensaios de absorção de água por capilaridade foram avaliados, conforme indicado na Figura 3. Após os ensaios mecânicos, os CPs foram descartados. As amostras destinadas ao ensaio de absorção de água por capilaridade retornaram à cura submersa após o ensaio, permanecendo nessa condição até a idade de 76 dias, quando a capacidade de absorção de água foi novamente avaliada. O retorno das amostras para a cura submersa pode contribuir-para uma maior eficácia da autocicatrização por grãos anidros, intensificando a possibilidade de hidratação ou cristalização contínua dos aditivos cristalinos no processo de autorreparação [5, 37]. Os aditivos cristalinos precisam ter acesso a água para o desencadeamento do seu processo químico, promovendo a lixiviação do hidróxido de cálcio do interior da fissura para a superfície, intensificando a formação de carbonato de cálcio [24, 38].

3.4. Ensaios de controle

Os ensaios de controle possibilitaram uma comparação do desempenho dos concretos em relação à autorreparação, comparando os resultados das propriedades avaliadas entre os corpos de prova íntegros (referência) e os corpos de prova submetidos a danos (microfissurados). Também foi possível analisar através dos ensaios de controle as alterações promovidas na matriz cimentícia pela incorporação dos aditivos cristalinos X e Y. O fluxograma da Figura 4 apresenta os ensaios de controle executados aos 28 dias e 76 dias, e o número de amostras ensaiadas.

Para avaliar a resistência mecânica do concreto foram conduzidos ensaios de resistência à compressão axial em corpos de prova íntegros (sem carregamento) nas idades de 7 e 28 dias. Para os concretos submetidos a danos (microfissuras) nas primeiras idades (3 e 14 dias) o controle foi realizado na idade de 28 dias. Os ensaios seguiram as diretrizes estabelecidas pela norma da NBR 5739:2018 [39], utilizando os mesmos parâmetros de carregamento mencionados na seção 3.3.

Os ensaios de absorção de água por capilaridade foram executados para servirem como um indicativo indireto de durabilidade dos concretos e foram realizados em duas idades distintas, conforme apresentado na Figura 4. Os ensaios seguiram os procedimentos estabelecidos na norma NBR 9779:2012 [40]. Para a determinação da altura de ascensão da água em cada amostra, foi realizada a média de três pontos, os quais foram obtidos com o auxílio de um paquímetro digital. Posteriormente, as imagens foram digitalizadas e a ascensão média da água nos corpos de prova foi validada utilizando o software JRule.

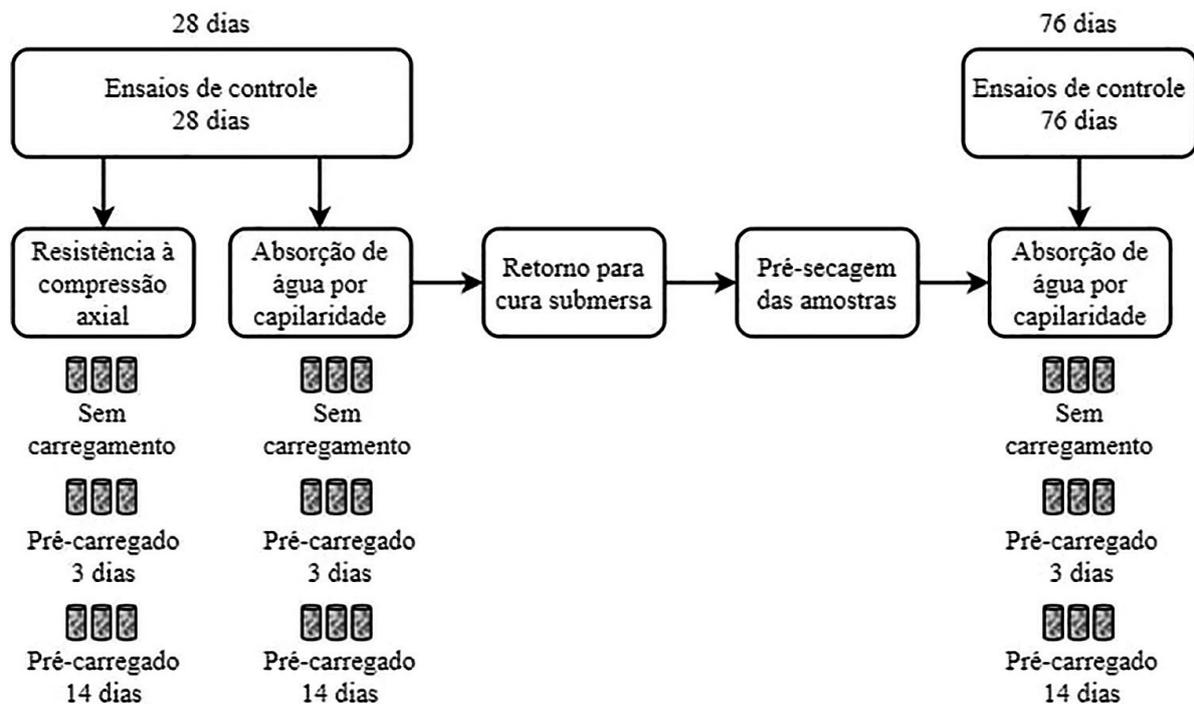


Figura 4: Fluxograma do programa experimental – ensaios de controle.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Resistência à compressão axial

O valor da resistência à compressão axial média na idade de controle de 28 dias (f_{cm28}), referente aos concretos investigados, é apresentada na Figura 5. Os valores correspondem a média de três corpos de prova individuais.

Observa-se que aos 28 dias, os traços que continham os aditivos cristalizantes (CA – X e CA – Y), sem pré-carregamento, apresentaram um aumento médio na resistência mecânica em comparação com o concreto de referência (REF) de 9% e 14%, respectivamente. No caso dos traços microfissurados aos 3 dias, constatou-se um aumento médio na resistência mecânica de 15% e 18%, respectivamente, enquanto os microfissurados aos 14 dias apresentaram um aumento médio de 11% e 4%, respectivamente. Entretanto, vale destacar que o decréscimo na resistência do traço CA – Y pré-carregado aos 14 dias, em relação ao pré-carregado aos 3 dias, não se revelou estatisticamente significativo, conforme evidenciado pelo teste de análise de variância (ANOVA) mostrado na Tabela 5. Sendo assim, em média observa-se um acréscimo de 12% na resistência à compressão nos concretos com aditivos cristalinos (CA – X e CA – Y) em comparação com o concreto de referência (REF), independentemente da aplicação de cargas nas idades iniciais. Esses resultados indicam que os aditivos cristalinos exerceram um impacto positivo no fortalecimento da resistência mecânica dos concretos estudados, provavelmente devido à ação do cristalizante. O aumento na resistência mecânica nos concretos analisados pode estar associado ao fechamento dos poros e espaços vazios da matriz, resultantes da atuação dos aditivos cristalinos e também pela hidratação de grãos anidros remanescentes, como o observado no traço de referência (sem aditivo cristalizante). Além disso, é importante destacar que os valores de resistência dos traços foram superiores a 35 MPa, que é a resistência de dosagem estipulada.

Uma possível explicação para o incremento na resistência mecânica com o aditivo cristalino aos 28 dias, pode estar relacionada a sua capacidade de preencher vazios, além de atuar como um ativador da hidratação do cimento, melhorando assim a microestrutura do material [41]. Similarmente, em sua pesquisa ROIG FLORES *et al.* [5] registraram um aumento de aproximadamente 15% na resistência à compressão de concretos com aditivos cristalizantes em comparação com o concreto de referência. De acordo com os pesquisadores, esse aumento pode estar vinculado ao efeito de preenchimento oferecido pelo material, facilitando o preenchimento dos poros na matriz. Além disso, o referido material pode ter funcionado como um ativador da hidratação do cimento, contribuindo para o aumento na quantidade de produtos de hidratação, conforme descrito na equação (1), reduzindo a porosidade e o diâmetro dos poros nos concretos com aditivo cristalizante [18].

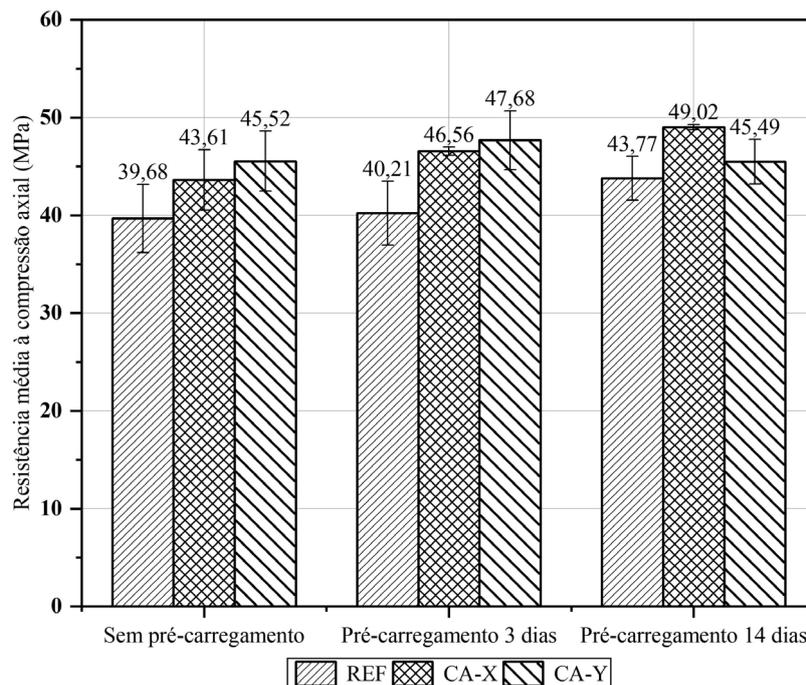


Figura 5: Resultado do ensaio de resistência à compressão axial aos 28 dias.

Tabela 5: Análise da variância (ANOVA) para a resistência à compressão axial.

EFEITOS	SQ	GL	MQ	TESTE – F	P	SIGNIFICÂNCIA
Intercessão	53738,54	1	53738,54	7857,70	0,00000	–
Idade do carregamento	45,21	2	22,60	3,305	0,05558	Não
Tipo de aditivo	155,83	2	77,92	11,393	0,00040	Sim
Erro	150,46	22	6,84	–	–	–

SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade; MQ: média quadrática; Teste F: valor calculado de F; p: nível de significância; Se $p < 5\%$ = efeito significativo.

ZIEGLER [42] verificou que utilizando 0,22% de aditivo cristalizante houve um aumento entre 15 a 55% da resistência à compressão aos 28 dias para os diferentes tipos de aditivos cristalinos incorporados em suas misturas. CAPPELLESSO *et al.* [41], FERRARA e KRELANI [43] e REDDY e RAVITHEJA [44] verificaram a utilização de 0,6 – 1,1% de aditivo cristalizante, buscando comparar seu desempenho mecânico sobre outros concretos (referência). No entanto, os autores obtiveram resultados distintos em relação ao ganho de resistência aos 28 dias, quando o CA foi utilizado. Enquanto CAPPELLESSO *et al.* [41] e REDDY e RAVITHEJA [44] obtiveram um ganho de 16 e 11% na resistência, respectivamente, FERRARA e KRELANI [43] constataram que não houve aumento na resistência à compressão de suas amostras quando comparadas com a referência. REDDY e RAVITHEJA [44] atribuem esse aumento ao preenchimento de vazios por *C-S-H* e calcita. VIEIRA [33] avaliou a cura em diferentes ambientes como medida de recuperação de microfissuras, sem a utilização de CA. No entanto, não foi observado alterações significativas na propriedade de resistência à compressão axial para os concretos, submetidos a carregamentos precoces nas primeiras idades. Segundo a autora, isso se deve ao fato de que os cimentos de alta resistência inicial já apresentam cerca de 82% da resistência exercida aos 28 dias, já nas fases iniciais. AZARSA *et al.* [18], GERALDO *et al.* [37] e PAZDERKA e HÁJKOVÁ [45] examinaram o impacto do uso de 2% de teor de aditivo cristalino no processo de autocura. Com exceção de PAZDERKA e HÁJKOVÁ [45] no qual não observaram um aumento significativo na resistência à compressão dos concretos analisados aos 28 dias, AZARSA *et al.* [18] e GERALDO *et al.* [37] mostraram que a resistência à compressão axial aos 28 dias das amostras que continham CA, após o período de cura, apresentaram um impacto significativo na recuperação da resistência mecânica. ZHANG *et al.* [46] e GUIGNONE *et al.* [47], investigaram os efeitos da adição do aditivo cristalizante (com teor de 4,5 – 8,0% do peso de cimento) no fenômeno da autocura, em relação as propriedades mecânicas, por meio de ensaios de compressão aos 28 dias. Os autores revelaram um aumento de 16% e 20%, respectivamente, na resistência à compressão, em comparação com as amostras que não continham o aditivo cristalino, indicando que sua adição foi vantajosa para o aumento da resistência à compressão.

Para avaliar a influência das variáveis controladas no desempenho do experimento, especialmente em relação à idade de carregamento e ao uso de aditivo cristalino, realizou-se uma Análise de Variância (ANOVA) com um nível de confiança de 95%, como demonstrado na Tabela 5. Valores de probabilidade (p) inferiores a 0,05 em cada comparação entre médias indicam de forma significativa a presença de diferenças estatísticas entre os parâmetros testados. Este procedimento estatístico proporciona uma compreensão mais sólida e confiável sobre como as variáveis controladas influenciam os resultados do experimento, permitindo conclusões mais precisas acerca das relações entre idade de carregamento, adição de aditivo cristalino e a resistência à compressão axial do concreto.

Entre as variáveis independentes analisadas na Tabela 5, a ANOVA aponta que a resistência à compressão axial é significativamente influenciada pela ação do aditivo cristalizante, indicando interferência na variável de resposta (propriedade mecânica dos concretos). No entanto, a idade do carregamento não mostra uma significância estatística. Esses resultados sugerem que o uso de aditivo cristalizante é um fator relevante na determinação da resistência à compressão axial do concreto. A Figura 6 mostra o efeito isolado da resistência à compressão axial dos concretos em função dos tipos de aditivos cristalinos utilizados.

A Figura 6 revela um notável aumento na resistência mecânica dos concretos com adição dos aditivos cristalinos em relação aos concretos sem o produto (REF). Em suma, a inclusão desses aditivos nas misturas foi vantajosa para o desempenho mecânico dos concretos, independentemente de terem ou não passado pelo processo de pré-carregamento. No entanto, ao analisar os dados associados aos traços contendo aditivos cristalinos, conforme evidenciado na Figura 6 (CA – X e CA – Y), parece não se observar diferenças estatisticamente significativas nos resultados. Em virtude disso, uma nova ANOVA foi conduzida com um nível de confiança

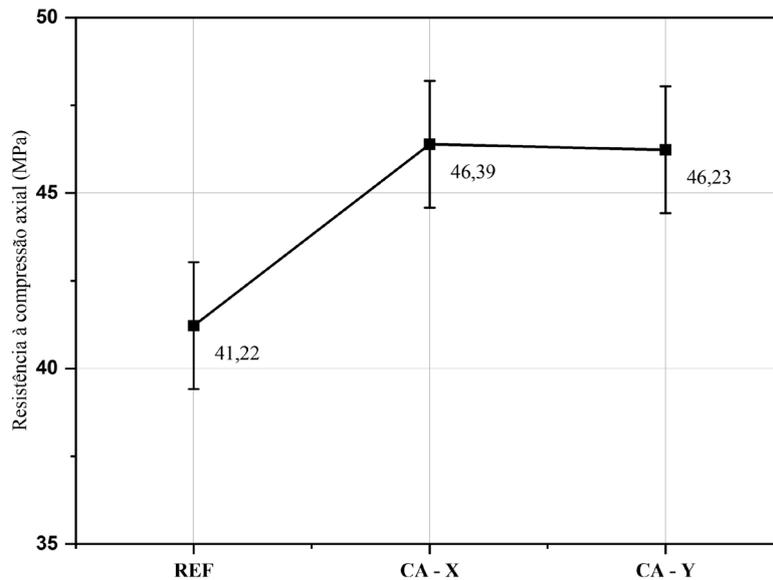


Figura 6: Efeito isolado da resistência à compressão axial dos concretos em função dos aditivos utilizados.

Tabela 6: Análise da variância (ANOVA) para a resistência à compressão axial entre os aditivos cristalizantes X e Y aos 28 dias.

EFEITOS	SQ	GL	MQ	TESTE – F	P	SIGNIFICÂNCIA
Intercessão	38604,94	1	38604,94	6513,21	0,00000	–
Idade do carregamento	27,43591	2	13,71795	2,3144	0,13539	Não
Tipo de aditivo	0,112022	1	0,112022	0,0188	0,89261	Não
Erro	82,98044	14	5,927174	–	–	–

SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade; MQ: média quadrática; Teste F: valor calculado de F; p: nível de significância; Se $p < 5\%$ = efeito significativo.

de 95%, focalizando exclusivamente nos dados de resistência à compressão axial referentes apenas aos traços com aditivos cristalinos X e Y aos 28 dias. Os resultados desta análise específica são apresentados na Tabela 6.

Observa-se que os resultados da ANOVA (Tabela 6) para resistência à compressão axial aos 28 dias entre aditivos cristalizantes revela que a escolha do tipo de aditivo e dos seus respectivos teores não é estatisticamente significativa nesse período específico. A idade do carregamento também não demonstra influência estatisticamente significativa. Esses resultados sugerem que, aos 28 dias, outros fatores além do tipo de aditivo podem estar contribuindo para as variações observadas na resistência à compressão axial. VIEIRA [33] em seu estudo, avaliou diferentes tipos de cimentos para diferentes idades de pré-carregamento, sendo elas 3, 7, 14, 28 e 90 dias. O autor constatou que o cimento Portland CPV ARI – RS manteve os resultados de resistência à compressão praticamente iguais para todas idades de pré-carregamento avaliadas. Nesse contexto, cimentos de alta resistência inicial (ARI) apresentam um índice de finura maior, fato que pode explicar o motivo da variável “idade de carregamento” não ser estatisticamente significativa, visto que o mesmo consegue atingir sua resistência máxima logo nas primeiras idades. No estudo de MOREIRA [38] resultados semelhantes foram alcançados ao comparar traços íntegros e fissurados em diferentes idades, utilizando amostras com aditivo cristalizante. O autor observou que, aos 28 dias, não houve uma variação significativa na resistência à compressão. E explica que isso ocorre, devido ao pouco tempo para a cicatrização das amostras.

De acordo com TAKAGI [48] o pré-carregamento do concreto gera o aumento da porosidade e consequentemente a diminuição da sua resistência a compressão. Desta forma, o fissuramento interno inicialmente reduz a resistência a compressão, porém nos concretos com aditivo cristalizante, essa resistência é recuperada com o tempo, quando ocorre o preenchimento progressivo das fissuras por géis de *C-S-H* formadas devido aos efeitos da autocicatrização, o que pode explicar o fato do aumento de resistência não ser significativo para a variável “idade de carregamento”.

4.2. Absorção de água por capilaridade

O mecanismo de absorção de água por capilaridade é influenciado por diversos fatores como: a densidade, tensão superficial e viscosidade do líquido, bem como a tortuosidade, raio e interconexão entre os poros capilares do sólido. Quanto menores forem os diâmetros dos poros, maior será a absorção de água [49]. Os valores dos resultados médios obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade nas idades de ensaio de 28 e 76 dias assim como sua variação entre as idades, estão apresentados na Tabela 7.

Os resultados apresentados na Tabela 7 indicam que aos 28 dias, os traços produzidos com os aditivos cristalinos (T2 – CAx e T3 – CAy) demonstraram uma absorção média maior em comparação com o traço de referência, levando em consideração os tipos de carregamento. Os dados revelam que os aditivos cristalinos podem ter modificado a conectividade dos poros capilares nos concretos, afetando os resultados de absorção. Entre os concretos com aditivos cristalinos, é perceptível que os concretos com o aditivo X exibiram as maiores taxas de absorção, em comparação com os concretos fabricados com o aditivo Y. Aos 76 dias, observa-se uma considerável redução na absorção média desses concretos, aproximando-se dos resultados obtidos para o traço de referência, o que é uma indicação de eficiência de cura. Além disso, o concreto de referência não demonstrou uma redução significativa na absorção dos 28 para os 76 dias (Tabela 7), indicando que a diminuição da absorção observada nos outros traços pode ser principalmente atribuída ao efeito dos aditivos cristalinos utilizados. Observa-se também que a alteração da idade (28 para 76 dias) resultou em uma redução nos valores de absorção para os concretos analisados, sendo essa redução mais relevante para os traços com aditivos cristalinos. Os resultados sugerem que os concretos contendo aditivos cristalinos resultaram em uma variação mais acentuada da absorção de água por capilaridade, quando comparados com o concreto de referência (sem aditivo cristalizante), evidenciando a eficácia desses aditivos na autocatização dos concretos. Conforme explicado por ROIG FLORES *et al.* [12] e REDDY e RAVITHEJA [44], um aditivo cristalino apresenta características hidrofílicas, promovendo o aumento da densidade do C-S-H e a redução da permeabilidade do concreto. Além disso, os produtos de hidratação gerados pela mistura cristalina promovem a densificação da microestrutura e reduzem a sucção capilar [50]. Logo, os arranjos internos dos poros dos concretos são influenciados pelas fissuras, afetando a absorção capilar de água [51]. A maior diminuição na ascensão da água, mesmo com a indução de fissuras, em concretos que contêm aditivo cristalino, destaca uma eficaz desconexão da rede capilar [52], o que justifica a elevada variação da absorção dos 28 para os 76 dias.

Em geral, observa-se uma tendência de aumento da absorção com a variação da idade de carregamento dos concretos. Segundo VIEIRA [33], esse fenômeno ocorre porque o cimento CPV ARI já possui uma estrutura interna mais desenvolvida nas fases iniciais, o que significa que as microfissuras geradas no concreto após esse período podem não ser tão facilmente recuperadas pela hidratação dos produtos remanescentes do cimento. Dado que a molécula de água é pequena, ela consegue penetrar com facilidade nas microfissuras presentes na matriz cimentícia. Alguns autores, como OBERHOLSTER, VAN AARDT e BRANDT [53] e RAMACHANDRAN [54] associam uma maior porosidade da matriz com cimento CPV ARI à ausência de adição pozolânica nesse tipo de cimento. Segundo RAMACHANDRAN [54], uma quantidade maior de poros pode se formar em matrizes cimentícias com CPV ARI, resultando em um aumento da porosidade e permeabilidade, o que pode levar a uma maior absorção capilar. CAPPELLESSO *et al.* [41] analisaram o comportamento de um aditivo impermeabilizante cristalino frente a absorção de água, aplicado como revestimento (tinta) e como aditivo. Em ambos os casos foi observado um aumento da absorção de água em relação ao concreto de referência. Segundo

Tabela 7: Variação e absorção média aos 28 dias e 76 dias.

TRAÇO	TIPO DE CARREGAMENTO	ABSORÇÃO MÉDIA 72 HORAS (g/cm ³)		VARIACÃO DA ABSORÇÃO DE 28 PARA 76 DIAS (%)
		28 DIAS	76 DIAS	
T1 – REF	Sem carregamento	0,227	0,203	-10
	Pré-carregamento aos 3 dias	0,269	0,177	-34
	Pré-carregamento aos 14 dias	0,282	0,258	-9
T2 – CAx	Sem carregamento	0,707	0,203	-71
	Pré-carregamento aos 3 dias	0,759	0,254	-67
	Pré-carregamento aos 14 dias	0,767	0,233	-70
T3 – CAy	Sem carregamento	0,512	0,304	-41
	Pré-carregamento aos 3 dias	0,398	0,232	-42
	Pré-carregamento aos 14 dias	0,669	0,451	-33

os autores, isto pode estar ligado a uma mudança no tamanho dos poros capilares do concreto. No estudo conduzido por JOA *et al.* [55], foi observado que a incorporação de 3% de aditivo cristalizante em argamassas resultou em uma diminuição da porosidade e da capacidade de absorção de água. CHANDRAIAH e REDDY [56] também notaram que os aditivos cristalizantes demonstraram eficácia na diminuição da profundidade de penetração e do coeficiente de permeabilidade. GERALDO, GUADAGNINI e CAMARINI [37] investigaram a influência de diferentes teores de cimento nas propriedades de durabilidade (absorção capilar de água, absorção de água e índice de vazios) concretos com mistura cristalina. Suas análises revelaram que tanto a absorção de água quanto o índice de vazios diminuíram com o aumento do teor de cimento, assim como houve uma redução significativa da absorção capilar de água em idades mais avançadas (90 dias). Em contraste, HASSANI *et al.* [57] concluíram que não houve diferença significativa nos níveis de absorção de água em concretos que continham 1% de aditivo cristalizante após 28 dias. PAZDERKA e HÁJKOVÁ [45] também avaliaram concretos com incorporação de 2% de aditivo cristalino frente a permeabilidade por vapor de água. Nesse caso, os autores encontraram uma redução da permeabilidade nos dois CAs utilizados (16 e 20%), no entanto, estes são valores relativamente desprezíveis, logo os pesquisadores concluíram que os efeitos dos CAs na permeabilidade por vapor de água não são relevantes.

Para avaliar a importância das variáveis independentes no experimento (idade de carregamento, uso de aditivo cristalino e idade de ensaio) foi conduzida uma ANOVA (com nível de confiança de 95%), conforme observado na Tabela 8. Nessa análise, foram considerados apenas os dados de absorção dos concretos contendo aditivos cristalinos, com o objetivo de verificar se as diferentes composições químicas dos aditivos teriam uma influência significativa nos resultados de absorção dos concretos nas diversas idades analisadas.

A ANOVA (Tabela 8) indicou que, entre as variáveis independentes analisadas, apenas a variável “idade do ensaio” apresentou significância estatística. O efeito isolado desta variável mostrou que a variação da idade de controle dos ensaios promoveu uma redução significativa da absorção de água nos concretos. Além disso, observou-se que não há diferença estatística nos resultados de absorção dos concretos produzidos com os aditivos cristalinos “X e Y”.

A variação na idade em que o ensaio é conduzido resultou em uma redução significativa na absorção de água por capilaridade dos concretos. De acordo com SISOMPHON *et al.* [58], esses resultados podem estar relacionados com a formação de carbonato de cálcio ($CaCO_3$) nas bordas das fissuras, responsáveis pela redução da permeabilidade da água. Os autores também apontam a formação de *C-S-H* e etringita nas partes internas das fissuras, dificultando a passagem de água pela matriz cimentícia.

Após a conclusão dos testes de absorção de água por capilaridade, uma parte dos corpos de prova foi rompida diametralmente para permitir a observação da altura de ascensão da água. Sendo que os resultados obtidos por ambos os métodos apresentaram consistência.

Nota-se que o traço de referência que recebeu pré-carregamento aos 14 dias registrou a maior altura de ascensão de água aos 76 dias com 2,73 cm, enquanto o traço com o aditivo cristalizante Y e pré-carregamento aos 3 dias mostrou a menor altura de ascensão de água, chegando a uma altura de 1,20 cm. Para os concretos de referência (T1 – REF) observou-se uma tendência crescente de ascensão de água com o aumento da idade em que os danos foram impostos aos concretos, com uma leve oscilação na taxa de absorção de água. Diferente do observado para os traços com aditivos cristalizantes. No qual deve ser levado em conta que a formação de partículas de *C-S-H* (produto intensificado pelo uso de CA) pode aprimorar a microestrutura de materiais à base de cimento Portland, diminuindo a porosidade total e também causando a redução do diâmetro dos poros (refinamento poroso) [59]. Já os concretos com aditivo cristalizante X que receberam pré-carregamentos, apresentaram uma redução na variação da ascensão de água em comparação a sua amostra de referência assim como

Tabela 8: Análise da variância (ANOVA) para a absorção de água por capilaridade entre os aditivos cristalizantes.

EFEITOS	SQ	GL	MQ	TESTE – F	P	SIGNIFICÂNCIA
Intercessão	7,5322	1	7,5322	489,0033	0,000000	–
Idade do carregamento	0,0974	2	0,0487	3,1634	0,056204	Não
Tipo de aditivo	0,0318	1	0,0318	2,0685	0,160386	Não
Idade de ensaio	1,1402	1	1,1402	72,0274	0,000000	Sim
Erro	0,4775	31	0,0154	–	–	–

SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade; MQ: média quadrática; Teste F: valor calculado de F; p: nível de significância; Se $p < 5\%$ = efeito significativo.

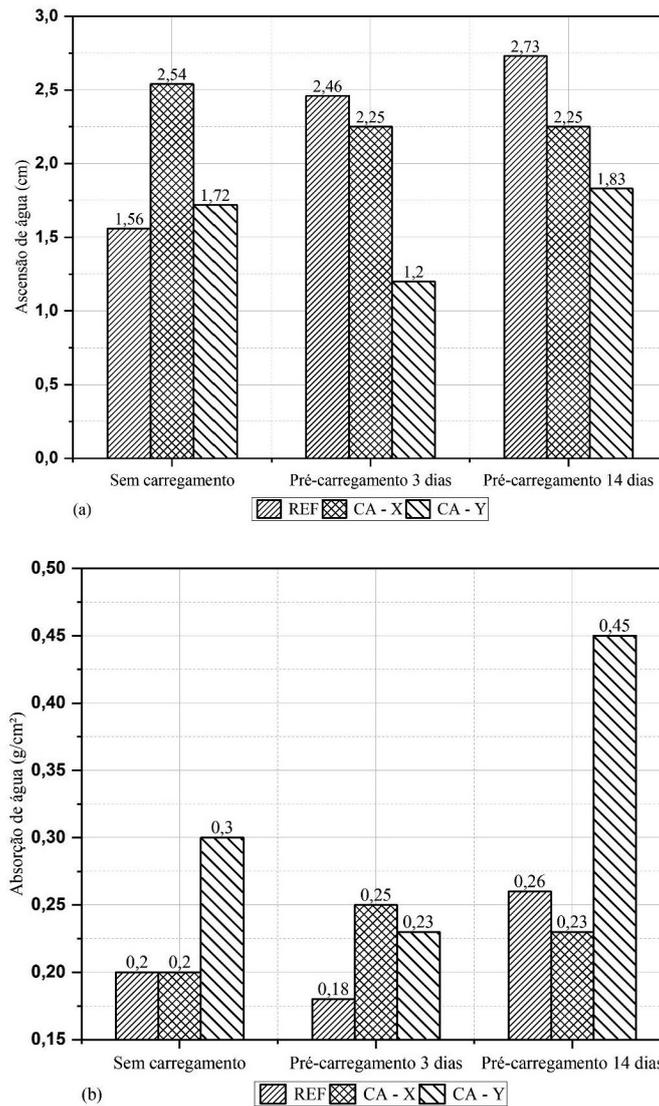


Figura 7: (a) Ascensão e (b) absorção da água após ensaio aos 76 dias.

um pequeno aumento na taxa de absorção de água. Para os concretos com aditivo cristalizante Y a tendência de comportamento não ficou clara.

Conforme relatado por PEREIRA DA COSTA [60], em concretos convencionais as forças capilares se intensificam à medida que o diâmetro dos poros diminui. Portanto, poros de maiores dimensões resultam em uma menor altura de ascensão e em volumes absorvidos mais elevados. Em contrapartida, materiais que possuem uma abundância de poros mais finos podem apresentar alturas de penetração consideráveis, acompanhadas de uma grande quantidade de água absorvida. O que pode justificar a maior absorção de água para o concreto com CA-Y (0,45g/cm²) e em menor altura de ascensão (1,83cm) aos pré-carregados em 14 dias (Figura 7). Logo, para uma melhor avaliação da absorção de água sob efeito da idade de pré-carregamento foi conduzida uma ANOVA (com nível de confiança de 95%), conforme observado na Tabela 9. Nessa análise, foram considerados os dados de absorção dos concretos contendo aditivos cristalinos e o concreto de referência (sem aditivo), com o objetivo de verificar se diferentes idades de pré-carregamento dos concretos e os diferentes aditivos utilizados, teriam uma influência significativa nos resultados de absorção dos concretos na idade de 76 dias.

A ANOVA (Tabela 9) sugere que tanto a idade do carregamento quanto o tipo de aditivo não têm um impacto estatisticamente significativo na absorção de água por capilaridade aos 76 dias. Conforme relatado por WANG [61], embora haja um consenso geral de que o carregamento pode alterar as propriedades de transporte de fluidos no concreto, essa modificação é complexa e influenciada por fatores como a localização dos danos internos decorrentes do carregamento mecânico, bem como pelas características heterogêneas dos materiais de concreto e sua distribuição.

Na pesquisa conduzida por WANG [61], o autor constatou que a capacidade de absorção de água de concretos com cimento Portland Comum, submetidos a pré-carregamento por compressão ou tração (70–90% da carga de ruptura) para formação de microfissuras no concreto, era aproximadamente o dobro quando comparados com o concreto não danificado (referência). Resultado semelhante foi obtido por PEDROSO [62], que também empregou o cimento CPV ARI, constatando que, dentre as amostras analisadas com e sem pré-carregamento, a amostra que apresentou a menor taxa de absorção foi aquela que não passou pelo processo de pré-carregamento e que continha aditivo cristalizante em sua mistura. Os autores explicam a notável diminuição na absorção de água, atribuindo-a ao processo de cura da fissura. Quando a fissura está completamente cicatrizada, os cristais formados preenchem os poros, resultando no bloqueio efetivo do acesso à fissura, impedindo a passagem de água.

Nas Figuras 8, 9 e 10 pode-se observar alguns corpos de prova após o rompimento diametral e posterior ascensão de água.

Tabela 9: Análise da variância (ANOVA) para a absorção de água por capilaridade aos 76 dias.

EFEITOS	SQ	GL	MQ	TESTE – F	P	SIGNIFICÂNCIA
Idade do carregamento	0,0451	2	0,02254	2,80	0,087	Não
Tipo de aditivo	0,0559	2	0,02795	3,47	0,053	Não
Erro	0,1450	18	0,00805	–	–	–

SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade; MQ: média quadrática; Teste F: valor calculado de F; p: nível de significância; Se $p < 5\%$ = efeito significativo.

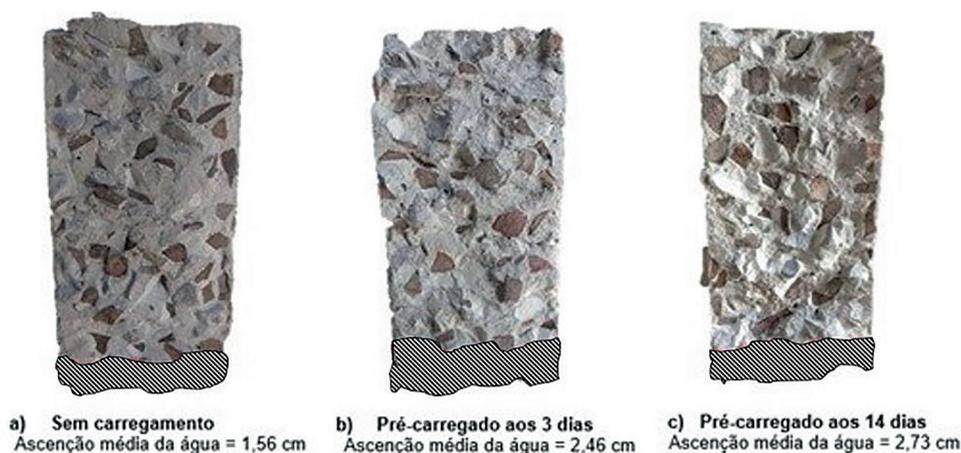


Figura 8: Ascensão da água após ensaio de absorção aos 76 dias – referência.



Figura 9: Ascensão da água após ensaio de absorção aos 76 dias – aditivo cristalizante X.

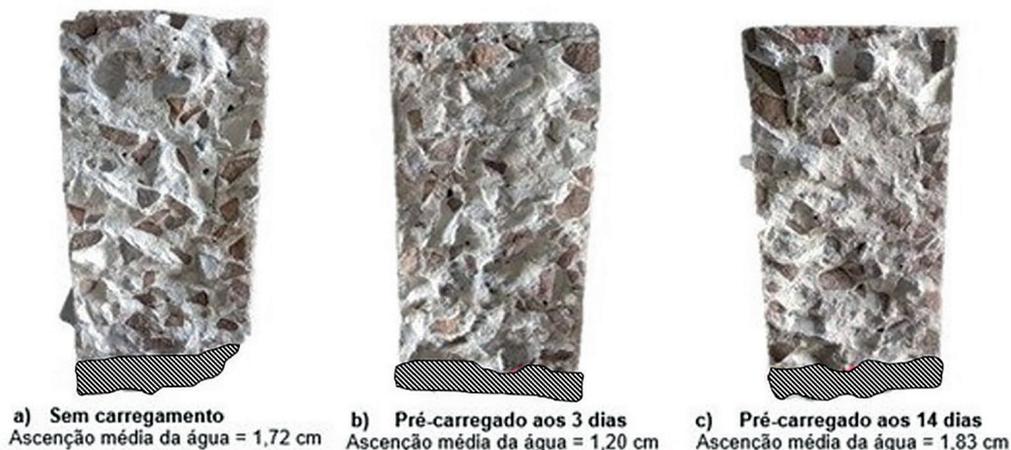


Figura 10: Ascensão da água após ensaio de absorção aos 76 dias – aditivo cristalizante Y.

Nota-se que o concreto de referência apresenta uma resposta crescente de ascensão de água em relação ao carregamento, diferente do comportamento observado para os concretos com aditivo cristalizantes X, que exibem estabilidade em sua altura de ascensão média, independentemente do período de carregamento. Por outro lado, o concreto com aditivo cristalizante Y, mostra um padrão de aumento na altura de ascensão média após o carregamento, semelhante ao concreto referência. Conforme discutido por WANG [61], essa observação pode estar relacionada ao tamanho dos poros formados durante a fase de pré-carregamento. Quanto maior o raio e a porosidade dos poros, mais fácil será a entrada de água.

5. CONCLUSÕES

O programa experimental em questão teve como objetivo realizar uma análise das propriedades mecânicas e absorção capilar de amostras de concreto pré-carregadas em diferentes idades, buscando testar dois aditivos cristalinos disponíveis no mercado nacional, seguindo o teor recomendado pelos fabricantes. Com base nos resultados obtidos experimentalmente foram analisadas as variáveis independentes, como o tipo de aditivo cristalizante, idade de carregamento e idade de ensaio, na qual apresentaram um efeito significativo nas propriedades avaliadas, como a resistência à compressão axial e a absorção de água por capilaridade.

O pré-carregamento aplicado nas fases iniciais não teve efeitos negativos nas propriedades mecânicas dos concretos estudados. É possível que parte dos danos causados aos concretos nas fases iniciais tenha sido reduzida devido ao retorno dos concretos ao processo de cura, juntamente com a hidratação remanescente dos grãos de cimento anidro. Além disso, a continuidade da cura contribuiu para o fornecimento de água, o que desencadeou a ação química dos aditivos cristalizantes no fechamento das microfissuras.

Os resultados de resistência à compressão axial aos 28 dias revelaram que os concretos com a adição de aditivos cristalizantes (submetidos ou não a pré-carregamento) apresentaram um aumento significativo na resistência mecânica em comparação com os concretos sem aditivo (concretos de referência), chegando a um ganho médio de 12% na resistência à compressão. O bom desempenho dos concretos sugere uma indicação de recuperação das microfissuras geradas nas fases iniciais pela ação dos aditivos cristalizantes, indicando que os dois produtos promoveram um efeito positivo na minimização dos danos (microfissuras) causados aos concretos nas fases iniciais.

Em relação ao ensaio de absorção de água por capilaridade, para a idade de ensaio de 28 dias houve um desempenho inferior dos concretos com aditivos cristalizantes em comparação com o concreto referência. Acredita-se que os aditivos cristalizantes possam ter alterado a conectividade dos poros capilares dos concretos, influenciando nos resultados de absorção para essa idade de controle. No entanto, para a idade de 76 dias, os traços com aditivos cristalizantes mostraram um comportamento semelhante ao do traço de referência. Ao comparar a variação de absorção média de 28 para 76 dias, nota-se que o aditivo X revela-se particularmente eficaz, proporcionando uma redução notável de até 71% na absorção média aos 76 dias, após o pré-carregamento. Já o aditivo Y, embora apresente uma redução menos acentuada, ainda demonstra uma influência positiva, com uma diminuição de até 42% na absorção média aos 76 dias pós pré-carregamento. Comparativamente, o concreto de referência (T1 – REF) exibe variações de absorção menos expressivas, mas ainda assim, o pré-carregamento demonstra ser uma estratégia eficaz para reduzir a absorção.

Diante do exposto, conclui-se que o uso de aditivos cristalizantes em matrizes cimentícias condicionadas a danos nas idades iniciais apresentou resultados promissores, dado que foram notados benefícios para as propriedades consideradas. No entanto, não foi identificada variação significativa entre os tipos de aditivos cristalizantes utilizados. Sendo assim, a escolha do aditivo cristalizante seria uma decisão ponderada, levando em consideração o custo x eficiência. A análise revela que o aditivo X, com apenas 0,8% de sua composição, demonstrou proporcionar um desempenho semelhante ao do aditivo Y, que requer 2,0%. Esse resultado sugere uma vantagem econômica considerável em termos de custo de insumos, favorecendo o aditivo X, que apresenta um menor consumo para o traço avaliado, o que o torna uma opção ainda mais atrativa em termos de eficiência e economia. Em relação aos concretos de referência, pode-se concluir que a incorporação dos aditivos cristalizantes contribui de maneira favorável para o aprimoramento das propriedades do concreto avaliadas.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores desejam expressar sua gratidão à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida para o mestrado, e às empresas que se dispuseram a realizar a doação dos materiais empregados na pesquisa.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] SILVA, M.T.A., ROCHA, J.H.A., MONTEIRO, E.C.B., “Estimação da profundidade de fissuras em concreto através da velocidade de ondas ultrassônicas”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 24, n. 4, pp. e12522, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620190004.0847>.
- [2] LOPES, J.P., FERRARI, V.J., CAMÕES, A., *et al.*, “Influência de nanotubos de carbono sobre o desempenho de concreto e de concreto reforçado com fibras (CRF)”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 27, n. 2, pp. e13197, 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620220002.1397>.
- [3] KHEIR, J., KLAUSEN, A., HAMMER, T.A., *et al.*, “Early age autogenous shrinkage cracking risk of an ultra-high performance concrete (UHPC) wall: Modelling and experimental results”, *Engineering Fracture Mechanics*, v. 257, n. 108024, pp. 108024, Nov. 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2021.108024>.
- [4] DE SCHUTTER, G., “Applicability of degree of hydration concept and maturity method for thermo-visco-elastic behaviour of early age concrete”, *Cement and Concrete Composites*, v. 26, n. 5, pp. 437–443, Jul. 2004. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00067-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00067-2).
- [5] ROIG-FLORES, M., MOSCATO, S., SERNA, P., *et al.*, “Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments”, *Construction & Building Materials*, v. 86, pp. 1–11, Jul. 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.091>.
- [6] DE ROOIJ, M., TITTELBOOM, K.V., DE BELIE, N., *et al.*, *Self-healing phenomena in cement-based materials: State-of-the-art report of RILEM technical committee 221-SHC*, Netherlands, Springer, 2013. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-6624-2>.
- [7] ZHANG, J., LIU, Y., FENG, T., *et al.*, “Immobilizing bacteria in expanded perlite for the crack self-healing in concrete”, *Construction & Building Materials*, v. 148, pp. 610–617, Sep. 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.021>.
- [8] XU, J., WANG, X., “Self-healing of concrete cracks by use of bacteria-containing low alkali cementitious material”, *Construction & Building Materials*, v. 167, pp. 1–14, Apr. 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.020>.
- [9] FERRARA, L., KRELANI, V., MORETTI, F., “On the use of crystalline admixtures in cement based construction materials: from porosity reducers to promoters of self-healing”, *Smart Materials and Structures*, v. 25, n. 8, pp. 084002, Jul. 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/25/8/084002>.
- [10] ESCOFFRES, P., DESMETTRE, C., CHARRON, J.-P., “Effect of a crystalline admixture on the self-healing capability of high-performance fiber reinforced concretes in service conditions”, *Construction & Building Materials*, v. 173, pp. 763–774, Jun. 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.003>.
- [11] SNOECK, D., VAN DEN HEEDE, P., VAN MULLEM, T., *et al.*, “Water penetration through cracks in self-healing cementitious materials with superabsorbent polymers studied by neutron radiography”, *Cement and Concrete Research*, v. 113, pp. 86–98, Nov. 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.07.002>.
- [12] ROIG-FLORES, M., PIRRITANO, F., SERNA, P., *et al.*, “Effect of crystalline admixtures on the self-healing capability of early-age concrete studied by means of permeability and crack closing tests”,

- Construction & Building Materials*, v. 114, pp. 447–457, Jul. 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.196>.
- [13] SISOMPHON, K., COPUROGLU, O., KOENDERS, E.A.B., “Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive”, *Cement and Concrete Composites*, v. 34, n. 4, pp. 566–574, Apr. 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.01.005>.
- [14] FERRARA, L., KRELANI, V., CARSANA, M., “A “fracture testing” based approach to assess crack healing of concrete with and without crystalline admixtures”, *Construction & Building Materials*, v. 68, pp. 535–551, Oct. 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.008>.
- [15] VAN BELLEGHEM, B., KESSLER, S., VAN DEN HEEDE, P., *et al.*, “Chloride induced reinforcement corrosion behavior in self-healing concrete with encapsulated polyurethane”, *Cement and Concrete Research*, v. 113, pp. 130–139, Nov. 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.07.009>.
- [16] OLIVEIRA, A.S., DWECK, J., FAIRBAIRN, E.M.R., *et al.*, “Crystalline admixture effects on crystal formation phenomena during cement pastes hydration”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 139, n. 6, pp. 3361–3375, Sep. 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s10973-019-08745-0>.
- [17] SENFF, L., FOLGUERAS, M.V., HOTZA, D., “Hydration of cement CP V ARI – RS: influence of water on hydration reactions”, In: *49th Brazilian Ceramics Congress*, São Pedro, SP, Brazil, 6–9 June 2005.
- [18] AZARSA, P., GUPTA, R., BIPARVA, A., “Crystalline waterproofing admixtures effects on self-healing and permeability of concrete”, In: *1st International Conference on New Horizons in Green Civil Engineering*, Victoria, BC, Canada, 25–27 April 2018.
- [19] HU, X., XIAO, J., ZHANG, Z., *et al.*, “Effects of CCCW on properties of cement-based materials: a review”, *Journal of Building Engineering*, v. 50, n. 104184, pp. 104184, Jun. 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104184>.
- [20] LI, W., DONG, B., YANG, Z., *et al.*, “Recent advances in intrinsic self-healing cementitious materials”, *Advanced Materials*, v. 30, n. 17, pp. e1705679, Mar. 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/adma.201705679>. PubMed PMID: 29577476.
- [21] TSAMPALI, E., STEFANIDOU, M., “The role of crystalline admixtures in the long-term healing process of fiber-reinforced cementitious composites (FRCC)”, *Journal of Building Engineering*, v. 60, n. 105164, pp. 105164, Nov. 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105164>.
- [22] LIN, X., LI, W., CASTEL, A., *et al.*, “A comprehensive review on self-healing cementitious composites with crystalline admixtures: design, performance and application”, *Construction & Building Materials*, v. 409, n. 134108, pp. 134108, Dec. 2023. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134108>.
- [23] VAN BREUGEL, K. “Self-healing material concepts as solution for aging infrastructure”, In: *37th conference on our world in concrete and structures*, Singapore, Aug. 2012.
- [24] VAN TITTELBOOM, K., SNOECK, D., WANG, J., *et al.*, “Most recent advances in the field of self-healing cementitious materials”, In: *Proceedings of the 4th International Conference on Self-Healing Materials*, Jun. 2013.
- [25] ZHANG, W., ZHENG, Q., ASHOUR, A., *et al.*, “Self-healing cement concrete composites for resilient infrastructures: A review”, *Composites. Part B, Engineering*, v. 189, pp. 107892, May. 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107892>.
- [26] DE BELIE, N., GRUYAERT, E., AL-TABBAA, A., *et al.*, “A review of self-healing concrete for damage management of structures”, *Advanced Materials Interfaces*, v. 5, n. 17, pp. 1800074, May. 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/admi.201800074>.
- [27] REINHARDT, H.W., JONKERS, H., VAN TITTELBOOM, K., *et al.*, “Recovery against environmental action”, In: de Rooij, M., Van Tittelboom, K., De Belie, N., Schlangen, E. (eds), *Self-healing phenomena in cement-based materials*, Netherlands, Springer, pp. 65–117, 2013. doi: http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-6624-2_3.
- [28] VAN BELLEGHEM, B., VAN TITTELBOOM, K., DE BELIE, N., “Efficiency of self-healing cementitious materials with encapsulated polyurethane to reduce water ingress through cracks”, *Materiales de Construcción*, v. 68, n. 330, pp. e159, Jun. 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2018.05917>.
- [29] GUZLENA, S., SAKALE, G., “Self-healing concrete with crystalline admixture – a review”, *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*, v. 660, n. 1, pp. 012057, Sep. 2019. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/660/1/012057>.

- [30] WANG, J.Y., SNOECK, D., VAN VLIERBERGHE, S., *et al.*, “Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete”, *Construction & Building Materials*, v. 68, pp. 110–119, Oct. 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.018>.
- [31] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS, *NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos*, Rio de Janeiro, ABNT, 2018.
- [32] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS, *NBR 16889: Concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*, Rio de Janeiro, ABNT, 2020.
- [33] VIEIRA, G.L., “*Influência da microfissuração causada por carregamento precoce nas propriedades mecânicas de concretos produzidos com diferentes tipos de cimento*”, Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2008.
- [34] BERNARDINO DA SILVA, L.M., “*Influência do carregamento precoce na retração por secagem do concreto*”, Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2016.
- [35] CAPPELLESSO, V.G., “*Avaliação da autocicatrização de fissuras em concretos com diferentes cimentos*”, Dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2018.
- [36] REINHARDT, H., JOOSS, M., “Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width”, *Cement and Concrete Research*, v. 33, n. 7, pp. 981–985, Jul. 2003. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01099-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01099-2).
- [37] GERALDO, R.H., GUADAGNINI, A.M., CAMARINI, G., “Self-healing concrete with crystalline admixture made with different cement content”, *Cerâmica*, v. 67, n. 383, pp. 370–377, Sep. 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132021673833118>.
- [38] MOREIRA, M.M., “*Efeito do aditivo redutor de permeabilidade em concretos com diferentes tipos de cimento Portland – Contribuição aos processos de autocicatrização*”, Dissertação de M.Sc., Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, Brasil, 2013.
- [39] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS, *NBR 5739: Concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*, Rio de Janeiro, ABNT, 2018.
- [40] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS, *NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade*, Rio de Janeiro, ABNT, 2012.
- [41] CAPPELLESSO, V.G., DOS SANTOS PETRY, N., DAL MOLIN, D.C.C., *et al.*, “Use of crystalline waterproofing to reduce capillary porosity in concrete”, *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, v. 1, n. 1, pp. 1–12, Oct. 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s41024-016-0012-7>.
- [42] ZIEGLER, F., “*Avaliação da autocicatrização de fissuras em concretos com aditivos cristalizantes*”, Tese de D.Sc., Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2020.
- [43] FERRARA, L., KRELANI, V., “A fracture testing based approach to assess the self-healing capacity of cementitious composites”, In: *VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, Toledo, Spain, Mar. 2013.
- [44] REDDY, C.S.T., RAVITHEJA, A., “Macro mechanical properties of self-healing concrete with crystalline admixture under different environments”, *Ain Shams Engineering Journal*, v. 10, n. 1, pp. 23–32, Mar. 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.asej.2018.01.005>.
- [45] PAZDERKA, J., HÁJKOVÁ, E., “Crystalline admixtures and their effect on selected properties of concrete”, *Acta Polytechnica*, v. 56, n. 4, pp. 306–311, Aug. 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.14311/AP.2016.56.0306>.
- [46] ZHANG, C., LU, R., LI, Y., *et al.*, “Effect of crystalline admixtures on mechanical, self-healing and transport properties of engineered cementitious composite”, *Cement and Concrete Composites*, v. 124, n. 104256, pp. 104256, Nov. 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104256>.
- [47] GUIGNONE, G.C., VIEIRA, G., MORONI, F., *et al.*, “Avaliação da penetração acelerada de cloretos em concretos com aditivo impermeabilizante por cristalização e diferentes relações água/cimento”, In: *Congresso Latino-Americano de Patologia da Construção*, Lisboa, Portugal, set. 2015.
- [48] TAKAGI, E.M., “*Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória de alto forno ativados por catalisador cristalino*”, Dissertação de M.Sc., Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, Brasil, 2013.
- [49] NEVILLE, A.M., *Propriedades do concreto*, 5. ed., Porto Alegre, Bookman, 2016.

- [50] SULEIMAN, A.R., NEHDI, M.L., “Effect of autogenous crack self-healing on mechanical strength recovery of cement mortar under various environmental exposure”, *Scientific Reports*, v. 11, n. 1, pp. 7245, Mar. 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-021-86596-2>. PubMed PMID: 33790331.
- [51] VAN BELLEGHEM, B., MONTOYA, R., DEWANCKELE, J., *et al.*, “Capillary water absorption in cracked and uncracked mortar – A comparison between experimental study and finite element analysis”, *Construction & Building Materials*, v. 110, pp. 154–162, Apr. 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.027>.
- [52] HANZIC, L., ILIC, R., “Relationship between liquid sorptivity and capillarity in concrete”, *Cement and Concrete Research*, v. 33, n. 9, pp. 1385–1388, Sep. 2003. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00070-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00070-X).
- [53] OBERHOLSTER, R.E., VAN AARDT, J.H.P., BRANDT, M.P., “Durability of cementitious systems”, In: Barnes, P. (eds), *Structure and performance of cements*, New York, USA, Applied Science Publishers LTD, pp. 365–413, 1983.
- [54] RAMACHANDRAN, V.S., *Handbook of thermal analysis of construction materials*, Noyes Publications, New York, USA, 2002.
- [55] JOA, B.W., ALI SIKANDAR, M., BALOCH, Z., *et al.*, “Effect of incorporation of self healing admixture (SHA) on physical and mechanical properties of mortars”, *Journal of Ceramic Processing Research*, v. 16, pp. s138–s143, Nov. 2015.
- [56] CHANDRAIAH, M., REDDY, C.S.T., “Study on strength characteristics of self-healing concrete with crystalline admixture”, *International Journal of Innovative Research in Technology, Science & Engineering*, v. 6, pp. 1312–1319, 2017.
- [57] HASSANI, E.M., VESSALAS, K., SIRIVIVATNANON, V., *et al.*, “Influence of permeability-reducing admixtures on water penetration in concrete”, *ACI Materials Journal*, v. 114, n. 6, pp. 911–922, Dec. 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.14359/51701002>.
- [58] SISOMPHON, K., COPUROGLU, O., KOENDERS, E.A.B., “Effect of exposure conditions on self healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating various cementitious materials”, *Construction & Building Materials*, v. 42, pp. 217–224, May. 2013. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.012>.
- [59] DUART, M.A., “Interpolation and extrapolation of flexural strength of rubber crumbsand coal ash with graphene oxide concrete”, *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 26, pp. e12928, 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620210001.1228>.
- [60] PEREIRA DA COSTA, F.B., “Análise da durabilidade de compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação reforçados com fibras”, Dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2015.
- [61] WANG, L., “Experimental study on water absorption by concrete damaged by uniaxial loading”, In: *Proceedings of the 4th International Conference on the Durability of Concrete Structures*, Jul. 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.5703/1288284315402>.
- [62] PEDROSO, M.G., “Autocicatrização do concreto com diferentes tipos de cimentos em interação com catalisador cristalino”, Dissertação de M.Sc., Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil, 2019.