

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE ADITIVOS CRISTALIZANTES NO FECHAMENTO DE FISSURAS DO CONCRETO

SMARCZEWSKI NETO, Francisco¹
PERES, Maria Vânia Nogueira do Nascimento²

RESUMO: Materiais cimentícios são amplamente utilizados na construção civil em todo o mundo. Dentre eles, o concreto é o mais utilizado, por sua capacidade como material estrutural, possuindo como atrativo sua alta durabilidade e capacidade de estabelecer diversas formas. O surgimento de fissuras na superfície do concreto está entre as principais causas para redução de sua vida útil. Assim, esta pesquisa tem como objetivo analisar a capacidade de regeneração das fissuras do concreto utilizando aditivos cristalizantes de diferentes fabricantes, com 1% da massa total de cimento, em comparação ao traço de referência. A pesquisa foi desenvolvida com ensaios em laboratório, primeiramente produzindo o concreto para os três traços estabelecidos, utilizando dois aditivos cristalizantes de marcas diferentes. Posteriormente aos 7 dias, aplicou-se a pré-carga nos corpos de prova para indução de fissuras. Aos 28 dias, foi feita a comparação da evolução das fissuras e a ruptura dos corpos de prova para a análise dos resultados. Com os resultados obtidos, identificou-se que a adição do aditivo cristalizante obteve benefícios às propriedades do concreto, com um aumento em torno de 30% da resistência a compressão aos 28 dias. Em relação à autocicatrização, observou-se que todos os traços obtiveram resultados positivos, verificado pela recuperação das propriedades mecânicas e selamento superficial das fissuras.

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

1. INTRODUÇÃO

Materiais cimentícios são amplamente utilizados na construção civil em todo o mundo. No Brasil, em 2022, consumiu-se aproximadamente 62,8 milhões de toneladas de cimento conforme dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento SNIC (2022). Dentre os materiais cimentícios, o concreto é o principal, por sua capacidade como material estrutural, tendo como seus principais atrativos a alta durabilidade e capacidade de estabelecer diversas formas. Como a sua degradação precoce pode gerar riscos à vida de diversas pessoas, é de extrema importância que o concreto exerça sua função por toda sua vida útil.

Dentre as principais causas para a redução da vida útil está o surgimento de fissuras em estruturas de concreto. Por ser um material com baixa resistência à tração, a abertura de fissuras nas regiões tracionadas é inevitável. Segundo Carmona Filho e Carmona (2013), mesmo que normas e códigos apresentem limitações de aberturas de fissuras, não há dúvidas de que as fissuras são um caminho para a penetração de agentes agressivos, que levam à deterioração das

¹ Discente, Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Assis Gurgacz, Cascavel - PR. E-mail: fsneto26@gmail.com.

² Docente, Mestre, Engenharia Civil, Centro Universitário Assis Gurgacz, Cascavel - PR.

estruturas.

Embora o reparo feito pelo homem possa prolongar a vida útil do concreto armado, ele ainda apresenta custos elevados. Além disso, algumas estruturas como pontes e túneis, são interditados durante a manutenção gerando custos indiretos superiores aos diretos (HUANG *et al.*, 2016). Deste modo, como alternativa para este problema há a propriedade da autocicatrização de materiais cimentícios. Esta pode ser classificada principalmente em dois grupos: a autocicatrização autógena e a autônoma (VAN TITTELBOOM, SNOECK *et al.*, 2013).

Segundo os mesmos autores anteriormente citados, a autocicatrização autógena é principalmente atribuída ao processo de cicatrização onde é causada por componentes que podem estar presentes no concreto mesmo quando não é dosado com este fim. E a autônoma ocorre por componentes adicionados que não estariam presentes no concreto de outra maneira.

O aditivo cristalizante tem como função reduzir a permeabilidade do concreto por meio da sua capacidade de induzir o selamento de fissuras deste material. Portanto, o aditivo cristalizante surge como uma das perspectivas mais interessantes para induzir a autocicatrização autônoma no concreto (TAKAGI, 2013).

A utilização de aditivos, em geral, resulta em um aumento significativo na produção do concreto. No entanto, se considerada ao longo de toda vida útil do material, esse aumento pode ser relativamente pequeno, especialmente quando se leva em conta que o aumento da recuperação de fissuras pode reduzir os custos futuros de reparos e consequentemente o prolongamento de sua vida útil.

Assim, a adição de aditivos cristalizantes, com o objetivo de possibilitar a recuperação das propriedades mecânicas do concreto, poderia representar uma ação preventiva contra o desgaste da estrutura. Um estudo comparativo sobre a recuperação das propriedades do concreto com a adição de cristalizantes e o concreto comum justifica essa pesquisa.

Desta forma, busca-se responder com esta pesquisa à seguinte pergunta: a adição de aditivos cristalizantes no concreto aumenta a capacidade de recuperação do desempenho por meio do fechamento de fissuras?

O presente estudo está limitado a avaliar a influência de aditivos cristalizantes no concreto, com foco na análise da recuperação de fissuras e a capacidade de reestabelecer as propriedades mecânicas do concreto após ser fissurado. O levantamento de dados utilizados para análise será obtido por meio de ensaios, seguindo as especificações das Normas Brasileiras (NBR), no laboratório do Centro Universitário Assis Gurgacz. A pesquisa consistirá na execução dos ensaios e na análise dos resultados obtidos.

Conforme as informações apresentadas, esta pesquisa tem como objetivo geral analisar a capacidade de regeneração das fissuras do concreto utilizando diferentes aditivos cristalizantes em comparação ao traço de referência.

Para o sucesso deste trabalho científico, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- a) Determinar a resistência à compressão axial para os concretos estudados;
- b) Definir a resistência à tração por compressão diametral;
- c) Avaliar a influência da utilização dos aditivos nas propriedades mecânicas dos concretos;
- d) Avaliar a regeneração superficial das fissuras nas amostras de concreto.
- e) Determinar o abatimento dos concretos estudados

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Concreto

De acordo com Neville (2013), o concreto pode ser produzido com uma variedade de tipos de cimento e pode conter pozolanas, escória de alto-forno, sílica ativa, agregados de concreto reciclado, aditivos, polímeros e fibras. No entanto, sua principal definição é a mistura de cimento, água, agregados (miúdo e graúdo). O autor afirma que para definir um bom concreto, é necessário analisar dois critérios: se está satisfatório no seu estado endurecido e em seu estado fresco.

Geralmente, as exigências para o concreto no estado fresco são que a consistência da mistura permita o adensamento com os meios disponíveis no canteiro de obras e que seja coesa o suficiente para que não ocorra segregação durante o transporte e lançamento com os meios disponíveis. No que diz respeito ao concreto em seu estado endurecido, uma resistência à compressão satisfatória é considerada um requisito padrão, pois a resistência é a maneira mais simples de verificar se o material atende às especificações e aos requisitos contratuais.

Entre as propriedades do concreto estão: massa específica, impermeabilidade, durabilidade, resistência à abrasão, resistência ao impacto, resistência à tração, resistência a sulfatos, entre outras, além da mencionada resistência a compressão (NEVILLE, 2013). Como

o concreto é um material não homogêneo, se não forem tomados cuidados adequados durante as etapas de projeto, execução e manutenção, ele se torna suscetível a apresentar desempenhos indesejáveis frente ao clima e esforços aos quais está sujeito. A patologia mais comum decorrente dessa falta de cuidados é a fissuração excessiva (CARMONA FILHO E CARMONA, 2013).

2.2 Fissuras no concreto

Conforme observado por Metha e Monteiro (2014), a água desempenha um papel fundamental na deterioração do concreto, sendo a infiltração através de fissuras o principal agente responsável pela corrosão do aço embutido no concreto, o que representa um grande risco à vida útil da estrutura. Nas primeiras idades do concreto, é essencial controlar o processo de fissuração, especialmente em estruturas com restrições de deformação, grandes superfícies livres e variações significativas de espessura (OLIVER E VICHOT, 2014).

Para Carmona Filho e Carmona (2013), diversos fatores podem desencadear fissuras no concreto, tais como: fissuras decorrentes de cargas diretas, assentamento plástico e movimentação de formas, retração, variação de temperatura e deslocamentos impostos.

2.2.1 Fissuras decorrentes de cargas diretas

Conforme destacado por Carmona Filho e Carmona (2013), os esforços de tração aplicados a uma estrutura de concreto provocam fissuras, podendo ser tensões geradas por carregamentos diretos ou não. A aplicação de esforços externos que provocam tensões de tração, como flexão, punção, torção, cisalhamento e outros, também pode ocasionar fissuração do concreto. Além disso, erros de projeto, como dimensionamento inadequado ou detalhamento incorreto dos elementos de concreto, podem contribuir para a formação de fissuras.

2.2.2 Fissuras decorrentes de retração

A evaporação de água, tanto no estado fresco quanto no endurecido, representa o principal mecanismo de retração do concreto. Geralmente, se adiciona água em excesso para

conferir maior trabalhabilidade ao concreto, porém, essa água não é consumida durante o processo hidratação do concreto e, ao evaporar, provoca um efeito de contração na massa. A rigidez da estrutura, ao restringir o encurtamento, gera tensões de tração que resultam na formação de fissuras (CARMONA FILHO E CARMONA, 2013).

2.2.3 Fissuras decorrentes da temperatura

No estado fresco do concreto, as reações exotérmicas decorrentes da hidratação do cimento, seguidas pela contração diferencial pelo resfriamento, geram retrações volumétricas. Quando o concreto alcança seu estado endurecido, ocorrem deslocamentos na estrutura devido à estrutura estar sujeita às variações de temperatura do ambiente. Do mesmo modo que na retração, a estrutura está sujeita a esforços de tração devido a sua restrição de movimentos (CARMONA FILHO E CAARMONA, 2013).

Conforme a NBR 6118 (ABNT, 2023), caso a abertura máxima da fissura não exceda os valores de 0,2 a 0,4mm em estruturas de concreto armado, dependendo da classe de agressividade considerada, não representará riscos significativos de corrosão passivas das armaduras. Os limites são estabelecidos para garantir uma maior durabilidade da estrutura de concreto.

2.3 Aditivos cristalizantes

O aditivo cristalizante é um aditivo para impermeabilização do concreto por meio da cristalização integral, geralmente adicionado ao concreto no momento de sua produção. A composição do aditivo consiste em material cimentício, compostos químicos ativos e rastreador químico. Os compostos químicos reagem com a umidade presente no concreto em seu estado fresco e com produtos da hidratação do cimento, ocasionando a formação de estruturas cristalinas insolúveis nos poros capilares do concreto, efetivamente selando-o contra a penetração de água ou outros líquidos (PENETRON, 2023).

De acordo com o fabricante (PENETRON, 2023), as propriedades do aditivo cristalizante incluem:

- Resistência a pressões hidrostáticas do lado negativo e positivo da estrutura;

- Resistência a substâncias químicas agressivas;
- Capacidade de selar fissuras até 0,5mm.

Para que o aditivo cristalizante possa desempenhar sua função de maneira efetiva, é necessário que haja umidade suficiente na estrutura, sendo a água presente no processo de cura do concreto a principal fonte, mas também se utiliza a água que infiltra através de fissuras. Desta maneira, com o fornecimento de água, o aditivo forma os depósitos cristalinos no concreto (ZIGLER, 2020).

Segundo Huang *et al.* (2016), as reações dos aditivos cristalizantes com materiais cimentícios podem ser consideradas como um dos responsáveis pela autocicatrização do concreto. Com a abertura de fissuras no concreto, algumas misturas minerais que ainda não reagiram ficam expostas. Com a penetração de água pelas fissuras, as misturas reagem com a água, preenchendo as fissuras com produtos da reação.

2.4 Autocicatrização

2.4.1 Definição geral

De acordo com de Rooij *et al.* (2013), é comum que somente seja considerado uma melhoria nos materiais quando há uma maior capacidade de aguentar grandes cargas. Porém, aplicar cargas próximas ao limite do material pode resultar em deformações permanentes devido ao deslocamento de átomos. Essas deformações como podem causar defeitos internos e aberturas de grandes fissuras, ocasionando a degradação do produto e, conseqüentemente, o material falhou em exercer sua função. Deste modo, a autocicatrização poderia representar uma possível solução. Para isso, três etapas são necessárias.

Primeiramente, é preciso que haja a aceitação de uma faixa de danos aceitáveis em uma estrutura. Após a introdução de cargas, uma reação de recuperação deve ser ativada para que comece o processo de autocura. Assim que o processo de cura tiver iniciado, é necessário algum meio de transporte. Na etapa de transporte, o agente é movido até o local onde ocorreu o dano para performar sua função de cura. Essas são etapas generalizadas presentes em todos os materiais autocicatrizantes.

2.4.2 Autocicatrização em materiais cimentícios

A formação de fissuras é considerada uma característica inerente ao concreto armado e, na maioria das vezes, não indicam problemas na segurança da estrutura. Porém, fissuras que ultrapassam o limite de abertura especificado podem reduzir a capacidade do concreto de proteger a armadura de aço contra corrosão, sendo essa a principal causa de falha prematura das estruturas.

Além das fissuras, também existem as microfissuras, que são praticamente inevitáveis. Caso as microfissuras se propaguem formando uma rede de fissuras, podem reduzir a resistência do concreto contra agentes agressivos. Quando há uma perda da vida útil do concreto devido às fissuras, é necessário que haja a primeira manutenção na estrutura. Em muitos casos, após 10 a 15 anos da primeira manutenção, é preciso fazer a segunda intervenção. Graças a esse processo houve uma maior demanda por estruturas que sejam capazes de se autocurar (De Rooij *et al.*, 2013).

A autocicatrização do concreto pode ser classificada como autocicatrização autônoma e autógena. Quando a autocicatrização é causada por componentes naturais ao concreto, é denominada autocicatrização autógena. Já quando são utilizados materiais externos com propriedades cicatrizantes que não são naturalmente encontrados no concreto, chama-se autocicatrização autônoma (Van Tittelboom, Snoeck, *et al.*, 2013).

2.4.3 Autocicatrização autógena

Conforme Van Tittelboom *et al.* (2013), a autocicatrização autógena pode ser atribuída principalmente à hidratação de partículas cimentícias não hidratadas e, subsequentemente, à carbonatação do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2). Esse processo pode ser mais eficiente quando a quantidade de agentes aglutinantes reativos é aumentada, quando a largura das fissuras é restringida ou quando uma fonte adicional de água é fornecida a região fissurada.

Quando ocorre a hidratação do cimento não hidratado após o contato com a água na região da fissura, as partículas crescem ocupando o espaço livre da fissura. O cimento hidratado ocupa aproximadamente o dobro do espaço em comparação com sua forma original. Esse processo pode ser responsável por um processo de autocicatrização completo apenas em pequenas fissuras. O processo químico responsável pela formação do carbonato de cálcio e a

cristalização nas faces das fissuras são os principais contribuintes para o processo de autocura autógeno (De Rooij *et al.*, 2013).

2.4.3 Autocicatrização autônoma

A autocicatrização autônoma refere-se à autocura involuntária de fissuras por meio da incorporação deliberada de componentes na matriz do concreto para preencher a fissuras ou acelerar o fenômeno, em um ambiente que envolve umidade. Esses componentes podem incluir polímeros expansivos ou bactérias carcinogênicas. Esses são adicionados ao concreto por meio de microcápsulas e sobrevivem ao processo de mistura. Quando uma fissura se forma na superfície, essas cápsulas são abertas, liberando o produto para que inicie o processo de autocicatrização. O agente cicatrizante reage com um segundo componente disperso na matriz cimentícia ou com fontes externas, como água (VAN TITTELBOOM, SNOECK, *et al.*, 2013).

3. METODOLOGIA

3.1 Tipo de estudo e local da pesquisa

Trata-se de uma pesquisa experimental, de caráter analítico, com levantamento das características físicas e mecânicas do concreto com aditivo cicatrizante em relação ao concreto de referência por meio de ensaios realizados no laboratório do Centro Universitário Assis Gurgacz.

3.2 Materiais

3.2.1 Cimento

Foi utilizado o cimento Votoran CP III devido à ampla utilização no Brasil. Este cimento comporta adição de escórias, com teor entre 35 e 70%. As características físicas e químicas do cimento são especificadas na norma NBR 16697 (ABNT, 2018).

3.2.2 Agregado miúdo

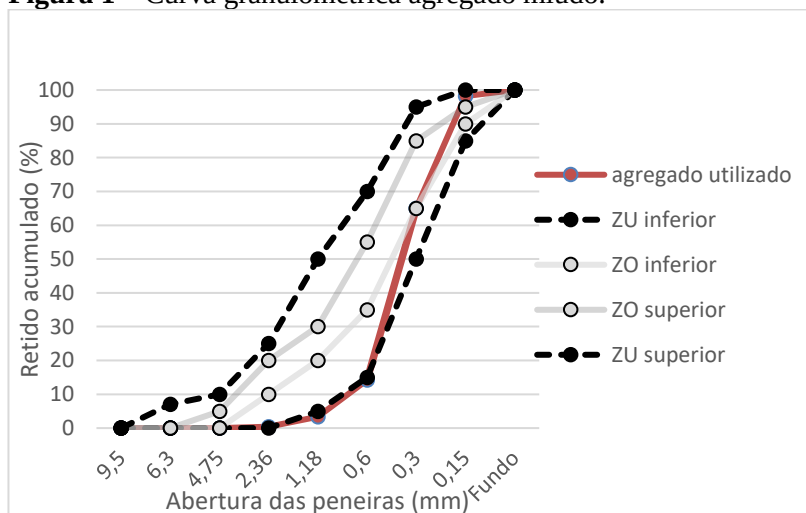
Foi utilizada a areia natural da região como agregado miúdo. O ensaio de determinação da distribuição granulométrica foi realizado de acordo com as especificações da NBR 248 (ABNT, 2003), com o objetivo de determinar seu módulo de finura e dimensão máxima. Os dados obtidos foram utilizados para preencher o Quadro 1 de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009). A partir dos dados, pode-se comparar a curva granulométrica do agregado com os limites superiores e inferiores (Figura 1). Analisando o módulo de finura pode-se concluir que o agregado utilizado se classifica como areia fina, pois está dentro do limite de 1,55 e 2,20.

Quadro 1 – Características agregado miúdo.

Peneiras	Retido	Retido (%)	Retido acumulado (%)
9,5	0	0	0
6,3	0	0	0
4,75	0	0	0
2,36	2,9	0,39	0,39
1,18	22,3	2,96	3,35
0,6	82,1	10,92	14,27
0,3	381,5	50,70	64,97
0,15	249,8	33,20	98,17
0,075	0	0	98,17
Fundo	13,8	1,83	100
Total	752,4	100	100
Modulo de finura			1,81
Dimensão máxima			1,18 mm

Fonte: Autor (2024).

Figura 1 – Curva granulométrica agregado miúdo.



Fonte: Autor (2024).

3.2.3 Agregado graúdo

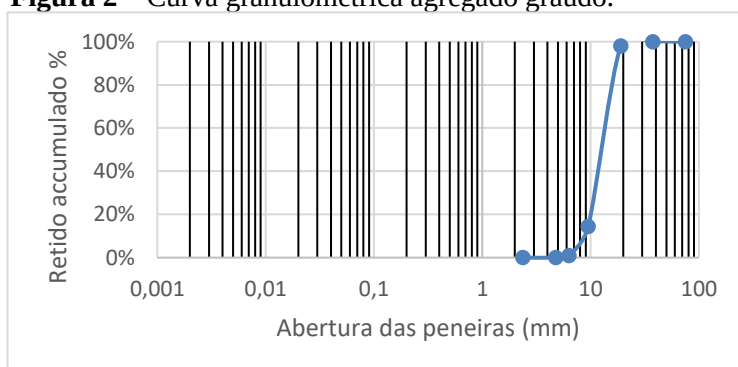
Foi utilizada brita proveniente da região como agregado graúdo. O ensaio de determinação da distribuição granulométrica foi realizado de acordo com as recomendações da NBR 248 (ABNT, 2003), para determinar seu módulo de finura e dimensão máxima. Os dados obtidos foram utilizados para preencher o Quadro 2, de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009). Após o preenchimento do Quadro 2, verificou-se que o agregado graúdo utilizado pode ser classificado como brita 1.

Quadro 2 – Características agregado graúdo.

Peneiras	Retido	Retido (%)	Retido acumulado (%)
75	0	0	0
37,5	0	0	0
19	53,5	1,99	1,99
9,5	2244,0	83,57	85,56
6,3	362,4	13,50	99,06
4,75	25,4	0,94	100
2,36	0	0	100
Fundo	0	0	100
Total	2685,3	100	100
Módulo de finura			1,87
Dimensão máxima			19 mm

Fonte: Autor (2024).

Figura 2 – Curva granulométrica agregado graúdo.



Fonte: Autor (2024).

3.2.4 Água

Nesta pesquisa foi utilizada a água fornecida pela concessionária da região.

3.2.5 Aditivo cristalizante

Foram utilizados aditivos cristalizantes (X e Y) de dois fabricantes diferentes. Esses

aditivos tinham como função contribuir para o selamento de fissuras. Segundo os fabricantes, eles contribuem para o selamento de microfissuras menores que 0,4mm.

3.3 Métodos

Sabendo das propriedades de autocicatrização em materiais cimentícios e da contribuição dos aditivos cristalizantes para o fechamento de fissuras, o ensaio experimental consistiu na aplicação de cargas nos corpos de prova para induzir a formação de fissuras nos mesmos, para que pudesse avaliar a autocicatrização nessas condições. A análise foi realizada por meio da comparação da resistência à compressão e à tração em corpos de prova pré-fissurados e não fissurados e por meio de registros fotográficos para avaliar as mudanças ao longo do tempo.

3.3.1 Produção do concreto

Para a realização dos ensaios, foram produzidos 3 traços de concreto (Quadro 3). O traço de referência foi baseado no traço cedido por uma construtora da cidade de Cascavel-PR, que o utiliza para todas as obras. O traço unitário de referência é 1:1,66:2,83:0,53 (cimento:areia:brita:água) com o abatimento esperado de 120 ± 20 mm e resistência à compressão de 20MPa. Para os demais traços, foi adicionado o aditivo cristalizante de fabricantes de difetentes com teor de 1% em relação à massa do cimento, conforme determinado nas instrução de ambos os fabricantes. No Quadro 4, foi apresentado o proporcionamento dos materiais utilizados na produção do concreto.

Quadro 3 – Descrição dos traços utilizados.

Traço	Descrição
REF	Cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água
TC1	Cimento, agregado miúdo, agregado graúdo, água e aditivo cristalizante X
TC2	Cimento, agregado miúdo, agregado graúdo, água e aditivo cristalizante Y

Fonte: Autor (2024).

Quadro 4 – Quantidade de material a ser utilizado por traço.

Traço	Cimento	Areia	Brita	a/c	Aditivo cristalizante
	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)
REF	52,91	87,75	149,76	28,08	*
TC1	52,91	87,75	149,76	28,08	0,53
TC2	52,91	87,75	149,76	28,08	0,53

Fonte: Autor (2024).

* Não foi utilizado neste traço

Para todos os traços, foram realizados ensaios para verificação das características físicas do concreto no estado fresco e endurecido.

3.3.2 Teste de abatimento de cone (*Slump Test*)

Após a produção do concreto com o auxílio de uma betoneira, foi realizado o teste de abatimento, conforme a NBR NM 67 (ABNT, 1998), para determinar sua trabalhabilidade (Figura 3).

Figura 3 – Teste de abatimento.



Fonte: Autor (2024).

3.3.3 Moldagem dos corpos de prova

Após a determinação do abatimento, foram moldados 54 corpos de prova, em moldes com dimensões 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, sendo 18 corpos de prova para cada traço. O processo da moldagem foi executado seguindo as instruções da NBR 5738 (ABNT, 2016).

Ao fim da moldagem, todos os corpos de prova ficaram expostos à temperatura ambiente por 24 horas (Figura 4). No término das 24 horas, eles foram desmoldados e levados até a câmara úmida para realização da cura durante 7 a 28 dias.

Figura 4 – Moldagem corpos de prova



Fonte: Autor (2024).

3.3.4 Ensaio de resistência à compressão

Para execução do ensaio de resistência à compressão axial do concreto, os corpos de prova foram separados em dois grupos: corpos sem pré-fissuras e corpos pré-fissurados (Quadro 5). Primeiramente, aos 7 dias, algumas amostras foram submetidas ao ensaio para obtenção da média de resistência a compressão.

Com a média obtida, foi aplicada uma carga manual abaixo desse valor em outro grupo de amostras para induzir o surgimento de fissuras, conforme o experimento de Takagi (2013). Após a pré-fissuração, os corpos de prova foram retornados à câmara úmida para continuar o processo de cura.

Aos 28 dias, foi realizado o ensaio dos dois grupos de amostras para possibilitar uma análise comparativa entre as resistências. Todos os ensaios seguirão as especificações da norma NBR 5739 (ABNT, 2007).

Quadro 5 – Amostras submetidas ao ensaio de resistência a compressão axial.

Ensaio realizado	Sem pré-fissuras	Com pré-fissuras
7 dias	6	*
28 dias	6	6

Fonte: Autor (2024).

* Ensaio não realizado nesta data

3.3.5 Ensaio de resistência a tração

Para a execução do ensaio de resistência a tração do concreto, os corpos de prova foram separados em dois grupos: corpos sem pré-fissuras e corpos pré-fissurados (Quadro 6). Primeiramente, aos 7 dias, algumas amostras foram submetidas ao ensaio para obtenção da média de resistência a tração.

Devido à baixa resistência à tração do concreto, foi utilizado o ensaio de resistência à compressão para induzir fissuras. Após a pré-fissuração, os corpos de prova foram retornados a câmara úmida para continuar o processo de cura.

Aos 28 dias, foi realizado o ensaio dos dois grupos de amostras para possibilitar um comparativo entre as resistências. Todos os ensaios seguiram as especificações da norma NBR 7222 (ABNT, 2011).

Quadro 6– Amostras submetidas ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

Ensaio realizado	Sem pré-fissuras	Com pré-fissuras
7 dias	6	*
28 dias	6	6

Fonte: Autor (2024).

* Ensaio não realizado nesta data

3.3.6 Análise visual da autocicatrização

Foi realizado um acompanhamento da evolução da espessura das fissuras dos corpos de prova pré-fissurados por meio de registros fotográficos das fissuras e utilização de um fissurômetro para marcar suas medidas.

3.3.7 Análise dos resultados

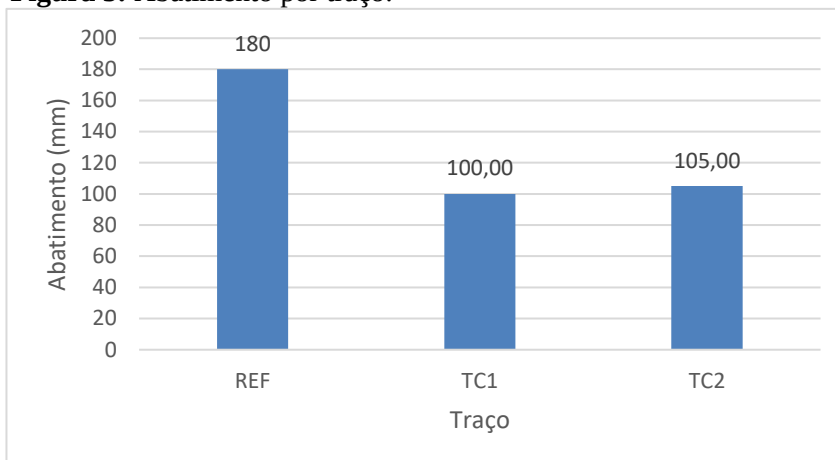
Após obtenção dos dados dos ensaios com a utilização da prensa hidráulica, foi realizado o comparativo das resistências médias de cada traço, por meio de gráficos. Assim, foi possível realizar uma análise comparativa sobre a influência do aditivo cristalizante nas propriedades mecânicas do concreto.

4. RESULTADOS e DISCUSSÕES

4.1 Trabalhabilidade

O abatimento definido para o traço de referência utilizado foi de 120 ± 20 mm. A partir dos ensaios de abatimento de tronco cone realizados foi possível definir a trabalhabilidade de cada traço. A Figura 5 demonstra o valor obtido para cada traço.

Figura 5: Abatimento por traço.



Fonte: Autor (2024).

Analisando a Figura 5, observar-se que o traço de referência não atingiu um abatimento dentro do limite esperado de $120\text{mm} \pm 20$. Podemos analisar que o traço de referência obteve uma trabalhabilidade aproximadamente 80% superior em relação aos traços com aditivos cristalizante. Os dois aditivos obtiveram um resultado próximos, TC2 tendo uma variação de 5% em relação ao TC1. Em relação ao traço de referência, houve uma queda de 44,44% de abatimento nos traços com aditivo cristalizante.

Com os resultados do ensaio, verifica-se que a adição do aditivo cristalizante ao concreto reduz seu abatimento, porém, mesmo com a redução de seu abatimento, os traços com aditivo estão dentro do limite esperado de $120\text{mm} \pm 20$.

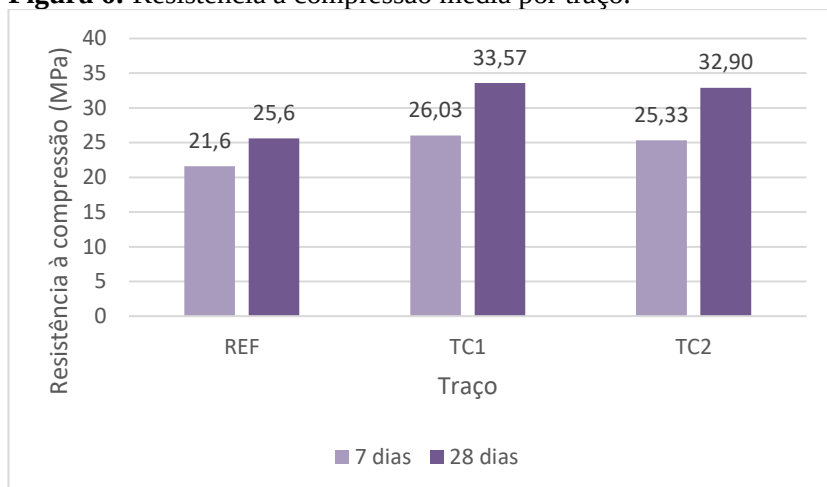
4.1.2 Propriedades mecânicas

4.2.1 Corpos de prova sem pré carga

4.2.1.1 Resistência a compressão

A partir dos ensaios de resistência à compressão, foi obtido a tensão de ruptura para cada traço analisado. A Figura 6 apresenta as médias de tensão obtidas para cada traço aos 7 e 28 dias.

Figura 6: Resistência a compressão média por traço.



Fonte: Autor (2024).

Ao analisar a Figura 6, observou-se que todos os traços obtiveram a resistência esperada de 20MPa aos 7 dias. O traço TC1 obteve os melhores resultados tanto aos 7 quanto aos 28 dias. O traço de referência, por sua vez, obteve os menores resultados em ambos os dias. Quando comparado ao traço de referência, o TC1 apresentou 20,5% a mais de resistência aos 7 dias e 31% aos 28 dias. O TC2 apresentou valores similares, com 17,25% maior aos 7 e 28,5% aos 28 dias.

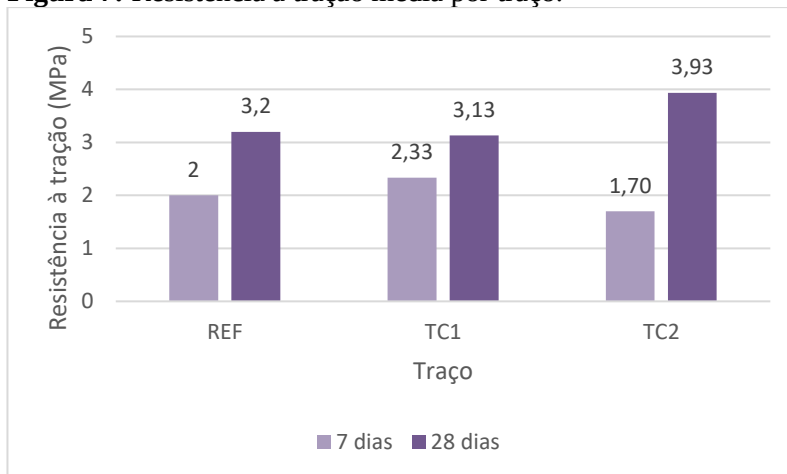
Analisando a resistência ao longo do tempo, o traço de referência apresentou um aumento de 18,5% da resistência aos 28 dias em comparação aos 7. Os traços TC1 e TC2 apresentaram comportamentos similares, com aumento de 29% e 30% respectivamente, demonstrando um acréscimo da resistência em relação a referência.

Com base nos resultados apresentados, observou-se que a adição de aditivos cristalizantes ao concreto eleva seus valores de resistência a compressão.

4.2.1.2 Resistência à tração

Por meio dos ensaios de resistência à tração foi obtida a tensão de ruptura para cada traço. A Figura 7 apresenta as médias obtidas para cada traço estudado.

Figura 7: Resistência a tração média por traço.



Fonte: Autor (2024).

Analisando a Figura 7, pode-se observar que os traços com a adição dos aditivos cristalizantes obtiveram resultados distintos aos 7 e 28 dias. O traço TC1 apresentou os melhores resultados aos 7 dias (2,33MPa), porém, os menores aos 28 (3,13MPa). Já o traço TC2 teve um desempenho oposto com os piores resultados aos 7 (1,7MPa), mas os melhores aos 28 dias (3,93MPa). A resistência à tração do concreto geralmente corresponde a 10% da resistência à compressão. Ao analisar a resistência obtida aos 28 dias, todos os traços superaram a média esperada de 2,0 MPa. No entanto, ao comparar a média de tração obtida por traço, o traço TC1 obteve médias inferiores a 10%.

O traço TC1 apresentou um aumento de 16,5% aos 7 dias, porém um decréscimo de 2,2% aos 28 dias, comparando ao traço de referência. Diferentemente, o traço TC2 apresentou um decréscimo de 15% aos 7 dias e um aumento de 23% aos 28 dias.

Em relação aos resultados de resistência quando analisados ao longo do tempo, observou-se que o traço de referência apresentou um aumento de 60% da resistência aos 28 dias em relação a apresentada aos 7 dias. Já o TC1 apresentou o menor aumento de resistência aos 28 dias, sendo este de 34%. O TC2 demonstrou a maior evolução, apresentando um aumento de 131% aos 28 dias.

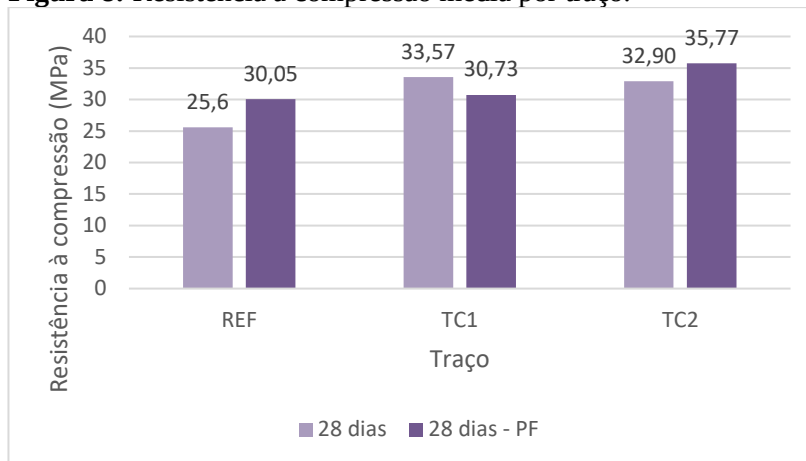
A partir dos resultados verificou-se que não houve aumento significativo da resistência a tração pela adição de aditivos cristalizantes.

4.2.2 Corpos de prova com pré carga

4.2.2.1 Resistência à compressão

Para análise da tensão de ruptura dos corpos de prova submetidos à pré-carga em cada traço, foi realizado um comparativo com as resistências obtidas nos corpos de prova que não recebera, pré-carga. A Figura 8 mostra os resultados obtidos de resistência a compressão de todos os traços aos 28 dias.

Figura 8: Resistência a compressão média por traço.



Fonte: Autor (2024).

Analisando a Figura 8, o traço de referência e o TC2 tiveram um aumento na resistência aos 28 dias nos corpos previamente fissurados em relação aos corpos de prova sem fissuras, indicando a recuperação de suas propriedades mecânicas. O traço TC1, por sua vez, teve o maior desempenho nos corpos de prova sem pré-carga (33,57MPa), porém os corpos submetidos ao pré carregamento não atingiram a mesma resistência.

O traço de referência apresentou o maior aumento, tendo um desempenho 17,4% maior após a pré-carga, já o TC2 obteve um acréscimo de 8,7%. O traço TC1 apresentou uma redução de 8,5% em relação aos corpos de prova sem pré-carregamento.

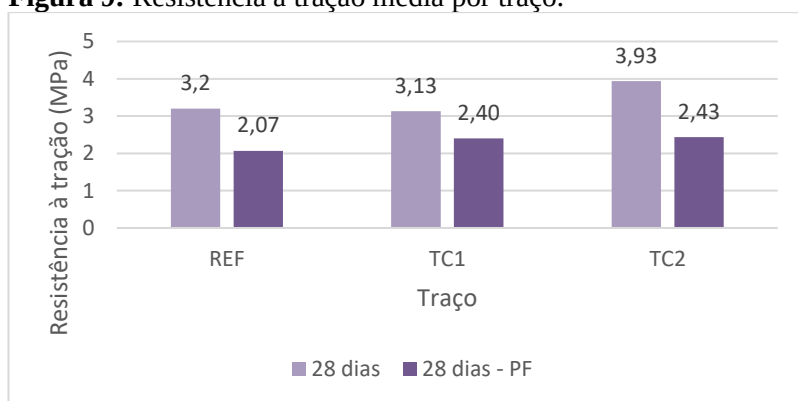
Com os resultados, observa-se que a autocicatrização ocorreu em todos os traços, através da recuperação de suas propriedades mecânicas. Apesar do TC1 não ter ultrapassado o seu desempenho sem a pré-carga, todos os traços apresentaram tensões de rupturas superiores aos 20MPa esperados em ambos os casos.

De acordo com os estudos de Takagi (2013), a utilização de cimentos com maiores teores de escórias de alto forno, como CP II e CP III, apresenta maior recuperação das propriedades mecânicas. Esta afirmação justifica o bom desempenho do traço de referência deste trabalho. Conforme verificado pelo mesmo autor, o concreto com a utilização de aditivos crisatalizantes apresenta melhores resultados no longo prazo, acima de 56 dias.

4.2.2.2 Resistência a tração

Por meio dos ensaios, foram obtidas as médias de resistência a tração para cada traço aos 28 dias. A Figura 9 apresenta os resultados obtidos.

Figura 9: Resistência a tração média por traço.



Fonte: Autor (2024).

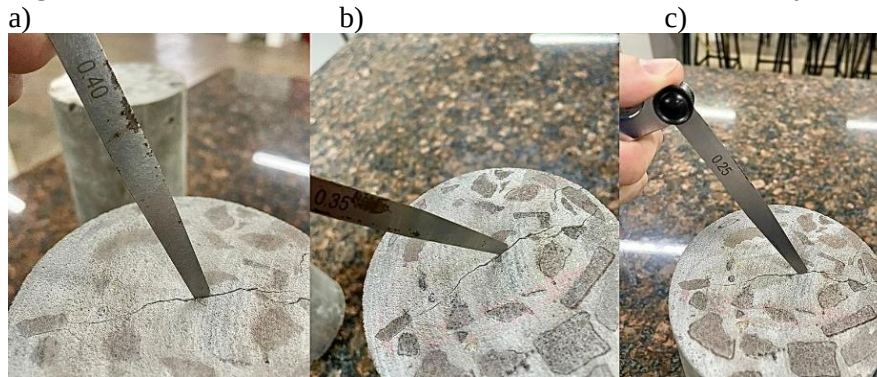
Ao analisar a Figura 9, pode-se observar que houve uma redução de resistência nos corpos pré fissurados. Mesmo com a redução de desempenho, todas as médias foram superiores aos 2,0MPa de resistência esperada (10% da resistência à compressão). Entretanto, ao analisar a resistência à tração obtida, todos os traços ficaram abaixo dos 10%. O traço de REF obteve a menor média e o TC2 a maior.

Para o traço TC2 observa-se a maior perda de desempenho, sendo essa redução de 38,17%. Já o TC1 obteve menor perda, com 23,32%.

4.3 Análise superficial das fissuras

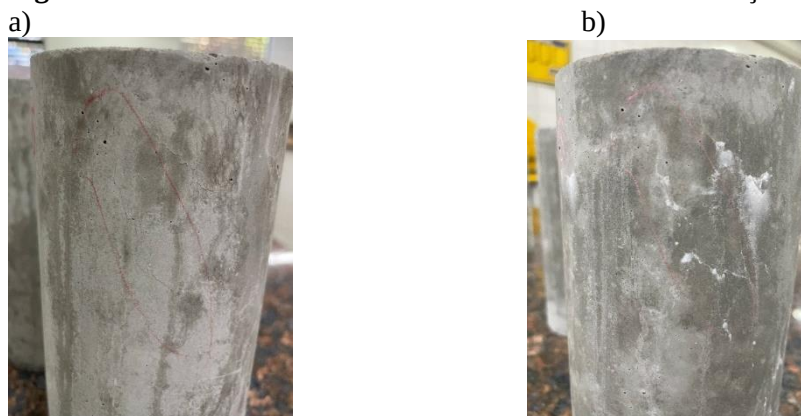
Utilizou-se a avaliação visual e a utilização de fissurômetro para comparar a evolução das fissuras nos corpos de prova de cada traço, conforme apresentado nas Figuras 10 a 15.

Figura 10: Concreto fissurado visualizado aos 7, 28 e 56 dias. Traço REF



Fonte: Autor (2024).

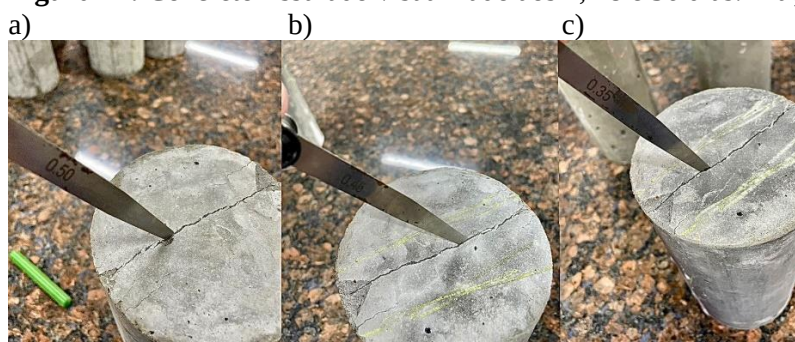
Figura 11: Concreto fissurado visualizado aos 7 e 28 dias. Traço REF.



Fonte: Autor (2024).

Avaliando a abertura da fissura no traço de referência pode-se observar que aos 7 dias a abertura era de 0,40 mm (Figura 10-a), e diminuiu para 0,35 mm aos 28 (Figura 10-b), terminando com 0,25 mm aos 56 dias (Figura 10-c). Analisando as Figuras 11-a e 11-b, pode-se observar que nas fissuras menores que 0,05 mm houve selamento superficial da fissura. Esse selamento pode ser justificado pelo uso de cimento com alto teor de escórias conforme descrito por Takagi (2013).

Figura 12: Concreto fissurado visualizado aos 7, 28 e 56 dias. Traço TC1.



Fonte: Autor (2024).

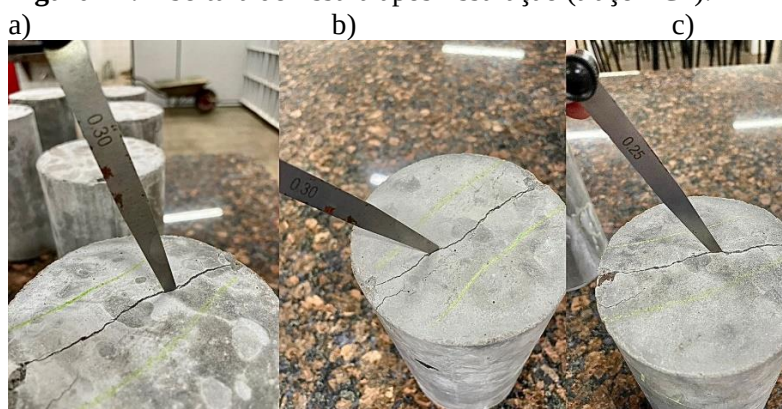
Figura 13: Abertura de fissura após fissuração (traço TC1).



Fonte: Autor (2024).

Nas amostras do traço TC1, pode-se observar um selamento superficial parcial em aberturas menores aos 28 dias (Figura 13-a e 13-b). Já analisando a Figura 12, pode-se observar que a havia uma abertura de 0,5mm aos 7 dias e, por conta do processo de cicatrização, diminuiu para 0,45mm aos 28 dias e posteriormente para 0,35mm aos 56 dias. Ocorrendo, assim, um fechamento de 0,15mm.

Figura 14: Abertura de fissura após fissuração (traço TC2).



Fonte: Autor (2024).

Figura 15: Abertura de fissura após processo de cura (traço TC2)



Fonte: Autor (2024).

Analisando as amostras do traço TC2, pode-se observar os piores resultados em relação ao fechamento das aberturas maiores (Figura 14-a, 14-b e 14-c). Durante todo processo, diminuiu somente 0,05 mm. Nas microfissuras, ocorreu o selamento superficial.

O fechamento das fissuras pode ser justificado pelo preenchimento da abertura pelos géis de CSH recém-formados por conta da hidratação tardia das partículas cimentícias durante processo de autocicatrização autógena, conforme descrito por Van Tittelboom *et al.* (2013).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo possibilitou a análise da influência do aditivo cristalizante nas propriedades do concreto, por meio da recuperação das suas propriedades mecânicas e da relação dessas alterações com o processo de autocicatrização. Por meio dos dados obtidos, pode-se observar que a adição do aditivo influencia tanto as propriedades no estado fresco quanto no endurecido. No estado fresco, a adição do aditivo diminui a trabalhabilidade do concreto; no entanto, ao utilizar as quantidades recomendadas pelos fabricantes, ainda se mantém dentro do limite esperado. Já no estado endurecido, conclui-se que a adição do aditivo cristalizante melhora as propriedades do concreto, apresentando um aumento significativo da resistência à compressão e à tração.

Quanto à autocicatrização, verificou-se que ela ocorreu em todos os traços, devido à hidratação tardia das partículas cimentícias, conforme descrito por Van Tittelboom *et al.* (2013). Também foi possível observar a recuperação da resistência à compressão nas amostras fissuradas. Porém, as amostras não recuperaram a resistência à tração, levando a conclusão que o processo de autocicatrização somente auxilia na recuperação da resistência à compressão.

Com base nos dados obtidos, não foi possível concluir se a adição do aditivo cristalizante torna o processo de autocicatrização mais eficaz, pois não ocorreu um aumento significativo da recuperação de resistência em comparação ao traço de referência. Além disso, quando se analisa o fechamento superficial das fissuras, pode-se observar que o selamento ocorreu em todos os traços, não dependendo da utilização do aditivo.

Conclui-se que a utilização do aditivo cristalizante melhora o desempenho das propriedades do concreto. Contudo, nas idades avaliadas, não houve uma alteração significativa no processo de autocicatrização em comparação ao traço de referência. Em síntese, o uso do aditivo cristalizante traz benefícios às propriedades mecânicas do concreto e se demonstrou eficiente no processo de autocicatrização, recuperando suas propriedades após o fechamento

das fissuras. Dessa maneira, pode ser uma alternativa eficaz para diminuir os riscos decorrentes da fissuração no concreto, trazendo uma maior durabilidade para a estrutura.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 67. **Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1998.
- _____. NBR NM 248. **Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. NBR 5738. **Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2016.
- _____. NBR 5739. **Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.
- _____. NBR 6118. **Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**. Rio de Janeiro, 2023.
- _____. NBR 7211. **Agregado para concreto – Especificação**. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. NBR 7222. **Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2011.
- _____. NBR 16697. **Cimento, Concreto e Agregados**. Rio de Janeiro, 2018.
- CARMONA FILHO, A.; CARMONA, T. **Fissuração nas estruturas de concreto**, Boletim técnico 3 Alconpat, 2013.
- DE ROOIJ, M.; VAN TITTELBOOM, K.; DE BELIE, N.; SCHLANGEN, E. **State-of-the-Art Report of RILEM**. Technical Committee 221-SHC: Self-Healing Phenomena in Cement-Based Material, 2013.
- HUANG, H.; YE, G.; QIAN, C.; SCHLANGEN, E. Self-healing in cementitious materials: material, methods and service conditions. **Materials & Designs**, n. 92, p. 499-511, 2016.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto Microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Editora IBRACON, 2014.
- NEVILLE, A. M.; BROOKS J. J. **Tecnologia do Concreto**. Porto Alegre: Editora Bookman, 2013.
- OLLIVER, J. P; VICHOT, A. **Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. Durabilidade do Concreto**. São Paulo: Editora IBRACON, 2014.
- SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CONCRETO – SNIC-2022. Disponível em: < <http://snic.org.br/numeros-do-setor.php> Acesso em 03/03/2024 > Acesso em: 17 de mar. 2024.



PENETRON, Brasil LTDA. Ficha Técnica de Produto – **Penetron Admix**, São Paulo, 2023a (Fabricante).

TAKAGI, E. M. **Concreto autocicatrizante com cimentos brasileiros de escória de alto forno ativados por catalisador cristalino**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Infraestrutura Aeroportuária – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2013.

VAN TITTELBOOM, K., SNOECK, D.; WANG, J.; DE BELLIE, N. **Most recente advances in the field of self-healing cementitious materials**. 4th International conference on Self-Healing Materials (ICSHM 2013). Belgium: Ghent University, 2013.

ZIEGLER, F. **Avaliação da autocicatrização de fissuras em concretos com aditivos cristalizantes**. 2020. 187f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.