

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

**LUCAS FOGAÇA CONSTANTE
PATRICIA BENEDET DIAS**

**AUTOCICATRIZAÇÃO EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS: ANÁLISE DE ADITIVOS
CRISTALIZANTES COMERCIAIS**

CURITIBA

2022

LUCAS FOGAÇA CONSTANTE

PATRICIA BENEDET DIAS

**AUTOCICATRIZAÇÃO EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS: ANÁLISE DE ADITIVOS
CRISTALIZANTES COMERCIAIS**

**Self-healing in cemental materials: analysis of commercial crystallizing
additives**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador (a): Prof. Dr. Arthur Medeiros

CURITIBA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

LUCAS FOGAÇA CONSTANTE
PATRICIA BENEDET DIAS

**AUTOCICATRIZAÇÃO EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS: ANÁLISE DE ADITIVOS
CRISTALIZANTES COMERCIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 30 de novembro de 2022

Orientador - Arthur Medeiros
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Cezar Casagrande
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Wellington Mazer
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CURITIBA
2022

Dedicamos às nossas mães, Gisele e Deusdete.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente aos nossos familiares, que contribuíram direta e indiretamente para nossa formação como pessoa e como profissional.

Aos nossos amigos, que lado a lado batalharam o desafio da graduação junto a nós, com muito companheirismo.

Agradecemos ao nosso professor orientador, Arthur Medeiros, pela paciência, orientação e motivação desde os primeiros períodos do curso até o final.

Agradecemos também à UTFPR e todos os seus professores que, juntos, contribuíram para formar os Engenheiros que somos hoje.

Obrigado!

*Nenhuma engenharia constrói caráter,
mas com caráter se faz os melhores
engenheiros.*

Jordan Lucas

RESUMO

As construções em que se utilizam o concreto armado apresentam problemas com fissuras recorrentemente, que podem levar à deterioração do concreto existente e, conseqüentemente, a corrosão do aço dentro da estrutura. Partindo de que essas corrosões podem acarretar manifestações patológicas graves que influenciam a estabilidade de uma estrutura em geral, é necessário encontrar uma ação corretiva. A utilização do aditivo cristalizante é uma opção cada vez mais recorrente no mercado atualmente e oferece a possibilidade de cicatrizar fissuras formadas em concretos ou argamassas, mesmo que essas sejam formadas após longos períodos da concretagem. Neste trabalho foi estudada a eficiência de dois aditivos cristalizantes comerciais, no quesito de fechamento de fissuras, utilizando corpos de prova feitos de argamassa e vergalhão de aço, para que seja possível induzir fissuras por flexão sem seu rompimento. O resultado do presente estudo é de ineficiência dos aditivos, na grande maioria das amostras analisadas, quando utilizada a quantidade recomendada pelo fabricante, além dos mesmos necessitarem de condições ideais de cura para apresentar o fechamento das fissuras, dificultando a aplicação em campo.

Palavras-chave: Cristalizante, concreto, autocicatrizante, cicatrização, cristalização.

ABSTRACT

Constructions in which reinforced concrete is used recurrently suffer problems with cracks, which can lead to the deterioration of the existing concrete and, consequently, the corrosion of the steel within the structure. This phenomenon can lead to serious pathological manifestations that affect the stability of a structure in general. The use of crystallizing additive is an increasingly recurrent option nowadays and offers the possibility of healing cracks formed in concrete or mortar, even if these are formed after long periods of concreting. This paper compares the efficiency of two commercial crystallizing additives, in terms of crack closure, using specimens made of mortar and steel rebar, so that it is possible to induce cracks by flexion without their collapse. The result of the present study is the inefficiency of the additives, in most of the specimens analyzed, when the manufacturer's recommended amount is used, in addition to the fact that they require ideal curing conditions to effectively regenerate the cracks, which complicate field application.

Keywords: Crystallizing, concrete, self-healing, healing, crystallization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de autocicatrização.....	21
Figura 2 – Classificação dos mecanismos de cicatrização.	22
Figura 3 – Representação do fechamento de fissuras por processos naturais.	23
Figura 4 – Representação do fechamento de fissuras por meio de microcápsulas repletas de compostos químicos cicatrizantes.	25
Figura 5 – Representação de Autocicatrização de fissura por meio de filamentos de fibra de vidro repletos de compostos químicos cicatrizantes.	25
Figura 6 – Processo de modelagem.....	35
Figura 7 – Prensa realizando o ensaio à flexão.	37
Figura 9 – Fissurômetro.	38
Figura 8 - Fluxograma.	39
Figura 10 – CP do tipo convencional.....	42
Figura 11 – Desenvolvimento CP com posterior pintura de aditivo 1.....	43
Figura 12 – Desenvolvimento CP com aditivo 2.....	44
Figura 13 – Desenvolvimento CP com argamassa convencional.....	45
Figura 14 – Desenvolvimento CP com aditivo de pintura.....	46
Figura 15 – Desenvolvimento CP com aditivo 2.....	48
Figura 16 – Desenvolvimento CP de argamassa convencional.	50
Figura 17 – Desenvolvimento CP com o aditivo de pintura.....	51
Figura 18 – Desenvolvimento CP com aditivo 2.....	52
Figura 19 – Visibilidade das fissuras após aplicação do aditivo 1.....	54

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Quantidade de aditivos.....	34
Quadro 2 – Divisão inicial dos CP's.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quantidades utilizadas.	33
Tabela 2 – Temperatura e umidade utilizadas na câmara.	37

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Objetivo Geral.....	14
1.2	Objetivos Específicos	14
1.3	Justificativa	14
1.4	Limitações	15
1.5	Delimitações	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Fissuras no concreto armado	16
2.1.1	Classificação das fissuras no concreto armado.....	16
2.1.2	Categorias de fissuração do concreto fresco e endurecido	17
2.1.3	Retração plástica e retração hidráulica.....	18
2.1.4	Fissuração por retração térmica	18
2.1.5	Fissuração por carregamento.....	18
2.1.6	Formas de prevenção e reparo de fissuras	19
2.2	Autocicatrização em materiais cimentícios	20
2.2.1	Conceito de autocicatrização.....	20
2.2.2	Tipos de autocicatrização	21
2.2.3	Outras classificações dos mecanismos de autocicatrização	22
2.2.4	Fatores interferentes no processo de autocicatrização	26
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	31
3.1	Materiais	31
3.1.1	Cimento Portland	31
3.1.2	Agregado miúdo	31
3.1.3	Água	32
3.1.4	Aditivos cristalizantes	32
3.1.5	Barra de aço	32

3.2	Definição dos traços	32
3.3	Preparação dos corpos de prova	34
3.4	Moldagem dos corpos de prova	34
3.5	Curas dos corpos de prova	35
3.5.1	Cura ambiente	36
3.5.2	Cura submersa	36
3.5.3	Cura de ciclagem	36
3.6	Indução à fissura	37
3.7	Divisão dos CP's	38
3.8	Medições das fissuras	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1	Visualização e determinação da capacidade de autocicatrização	41
4.1.1	Corpos de prova com cura ambiente	41
4.1.2	Corpos de prova com cura na câmara climática	45
4.1.3	Corpos de prova com cura submersa	49
4.2	Análise de resultados	53
5	CONCLUSÃO	55
5.1	Considerações finais	55
5.1.1	Ensaio e método de avaliação de fissuras	55
5.1.2	Variáveis analisadas	55
5.1.3	Análise dos objetivos propostos	56
5.2	Aprendizados	56
5.3	Sugestões para trabalhos futuros	57
	REFERÊNCIAS	59
	ANEXO A – DADOS COLETADOS	62

1 INTRODUÇÃO

O concreto consiste na mistura de, principalmente, cimento, areia, brita e água, resultando em um material inicialmente pastoso, que posteriormente endurece e possui alta resistência à compressão, dependendo da proporção dos materiais adicionados na mistura, assim como aditivos e adições. Este material extremamente utilizado na construção civil por sua resistência à compressão, entretanto, possui baixa resistência à tração, sendo necessário sua combinação com o aço, que supre as solicitações de plasticidade, chamado “concreto armado”. Além disso, o concreto também tem a função de cobrimento da armadura da estrutura, conforme normatiza a NBR 6118 (ABNT, 2014), onde estabelece uma espessura mínima de 30 mm para que seja eficaz a proteção das ferragens contra a corrosão.

Considerando que os principais agentes agressores da maioria das estruturas de concreto armado são a água e o ar, o surgimento de microfissuras se torna um ponto crítico, pois permite que esses agentes infiltrem o cobrimento de concreto, alcançando e corroendo a armadura.

Existem diversas maneiras de reduzir a ocorrência de microfissuras na confecção do concreto, como a utilização de aditivos poliméricos, que evitam as microfissuras por retração plástica. Também existe a cura úmida, que consiste em molhar a superfície do concreto após endurecimento, por pelo menos 7 dias, evitando com que a água do amassamento do concreto seja perdida por evaporação, fazendo com que o cimento seja hidratado corretamente, evitando o surgimento de fissuras por retração plástica e térmica.

Outra forma de lidar com as microfissuras no concreto, é a utilização de aditivos cristalizantes, que ao serem adicionados a massa do concreto, acarretam diversas reações químicas com os compostos do cimento e água de hidratação, formando cristais. Sendo assim, estes cristais preenchem grande parte das microfissuras do concreto, diminuindo sua permeabilidade e sensibilidade aos agentes agressores.

Na literatura, a ação chamada de cicatrização do concreto, pode ser encontrada facilmente relacionada tanto a aditivos cristalizantes, quanto a concretos autocicatrizantes, sendo que nos dois casos ocorrem reações químicas semelhantes,

com o intuito de fechar fissuras. Alguns dos fornecedores nacionais apresentam que aditivos cristalizantes são adicionados ao concreto autocicatrizante para potencializar a cicatrização, mas que não é o aditivo especificamente que faz com que o concreto cicatrise. Outros, apontam que o aditivo cristalizante é o principal responsável pela cicatrização. Sendo assim, fica evidente que a nomenclatura dada a auto cicatrização do concreto varia de acordo com a estratégia de marketing de cada empresa, mas que o conceito técnico é o mesmo, de cicatrizar fissuras.

1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar o desempenho de cicatrização de dois aditivos comerciais com diferentes métodos de aplicação em corpos de prova de argamassa armada com fissuras induzidas pela flexão.

1.2 Objetivos Específicos

- Verificar a capacidade de cicatrização de cada produto no que se trata de fissuras, 35 dias após a indução destas;
- Comparar o desempenho dos aditivos comerciais para o mesmo traço no quesito fechamento de fissuras;
- Definir qual procedimento de cura possuiu o melhor desempenho no que se trata da cicatrização;
- Avaliar se os produtos cumprem a largura de fechamento de fissuras especificadas pelo fabricante com a fração recomendada no manual.

1.3 Justificativa

Os concretos autocicatrizantes são caracterizados pela adição de aditivo autocicatrizante em sua composição e possuem em sua descrição comercial a capacidade de cicatrizar fissuras causadas no concreto após sua execução. Estudar os desempenhos e características das respectivas marcas comerciais é de suma importância para entender a funcionalidade e aplicabilidade desse aditivo, assim como seus reais benefícios e cuidados necessários.

Entretanto, ainda há muito o que avaliar em relação à aditivos autocicatrizantes e seu desenvolvimento com as características físicas do concreto.

Para isso, este trabalho busca avaliar dois tipos de aditivos comerciais diferentes e analisar o desempenho de cada um para o mesmo traço de argamassa. Este estudo, realizado na região de Curitiba/PR, busca ainda validar o desenvolvimento dos aditivos para o fechamento de fissuras induzidas por flexão.

1.4 Limitações

Consideram-se como limitações deste trabalho:

- a) Ambiente de preparo das argamassas fora de ambiente climatizado;
- b) Câmara utilizada para ciclos de secagem/molhagem com umidade relativa e temperatura conforme condições ambientais da cidade de Curitiba-PR;
- c) Variação de saturação interna dos corpos de prova conforme o andamento dos ciclos de secagem/molhagem presentes na câmara de ciclagem;
- d) Variação geométrica nas aberturas de fissuras dos concretos analisados resultantes dos diferentes traços empregados;
- e) Inserção dos corpos de prova por erro laboratorial por uma semana em estufa em temperatura de 50°C.

1.5 Delimitações

O presente trabalho apresenta as seguintes delimitações:

- a) Avaliação de três tipos diferentes de cura;
- b) Avaliação de cinco idades de abertura de fissuras, de 35 dias;
- c) Condição de cura ambiente até a idade de abertura de fissuras, de 14 dias.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fissuras no concreto armado

As estruturas de concreto empregadas na construção civil podem fissurar por diversas razões. Essas podem ocorrer no estado fresco, no estado endurecido e também ao longo da vida do concreto. As fissuras se tornam meios de penetração de agentes agressivos no interior do concreto, podendo causar danos ao concreto, a armadura e à durabilidade da estrutura como um todo (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Entretanto, a fissuração nem sempre gera risco a estrutura, mas pode causar um constrangimento psicológico aos moradores ou usuários da edificação, fazendo-se necessário o fechamento e acabamento das fissuras (THOMAZ, 2020).

2.1.1 Classificação das fissuras no concreto armado

Fissura é o primeiro estágio de uma manifestação patológica que consiste no surgimento de aberturas finas e alongadas. Essas são estendidas por forças que induzem tensões de tração acima da capacidade que o material que compõe a estrutura consegue suportar (HELENE; ANDRADE, 2010 apud DUARTE; BARBOSA; FARIAS, 2021).

As fissuras podem ocorrer tanto no estado fresco, quanto no endurecido, podendo ser classificada como ativa (viva) ou passiva (morta). Nota-se que na bibliografia, no estado endurecido, podem-se encontrar praticamente todos os tipos de fissura, já no estado fresco, apenas alguns tipos. Fissuras ativas são aquelas que têm a abertura oscilante de um valor médio, podendo abrir ou fechar sazonalmente. Isso ocorre devido a diversas variáveis como a temperatura e umidade, por exemplo, que ao oscilar, fazem com que as fissuras também oscilem. No entanto, esse tipo de fissura não implica a existência de problemas estruturais e após devidamente tratadas, podem continuar tendo movimentações, sem apresentar riscos a estrutura. Fissuras passivas são estabilizadas e não apresentam variação da abertura ao longo do tempo. Essas podem ser originadas de problemas estruturais que já foram resolvidos, deformações da estrutura que já se estabilizaram ou de fissuras que eram previamente ativas, que foram resolvidas naturalmente, como as originárias da retração plástica. Essas, que são possuem caráter ativo temporariamente, são

classificadas como ativas, pois é nesse momento que é possível realizar a correção (FIGUEREDO, 1989).

2.1.2 Categorias de fissuração do concreto fresco e endurecido

A fissuração do concreto é praticamente um acontecimento inerente a construção com utilização de cimento Portland e pode ocorrer em praticamente qualquer etapa do processo construtivo, sendo anos após a finalização da construção, ou até mesmo horas após o lançamento do concreto. Isso ocorre em grande parte devido à utilização do concreto no extremo de sua capacidade, com o intuito da redução de gastos, além de também ocorrer devido imperícia da mão de obra (DAL MOLIN, 1988).

As categorias de fissuras que podem ocorrer no concreto armado possuem diversas origens, podendo ser com o concreto endurecido ou não. Quando originadas na massa de concreto fresca, podem ser devido ao assentamento plástico, dessecação superficial, ou movimentação das formas. A fissuração por assentamento plástico ocorre quando as partículas da massa do cimento sedimentam para o fundo da forma, fazendo com que o ar aprisionado e água se desloquem para superfície. Durante esse processo, os obstáculos, como armaduras horizontais e agregados graúdos, podem atrapalhar esse assentamento e causar fissuras. As fissuras por dessecação superficial ocorrem principalmente devido a perda de água de amassamento pelo calor de hidratação do aglomerante ou absorção pelos agregados e formas, isso somado a cura inadequada ou ausente, pode gerar fissuras. Por fim, a fissuração por movimentação das formas pode ocorrer devido ao lançamento incorreto do concreto nas formas, sendo de uma altura acima do permitido por norma, cargas acima do dimensionado, escoramento incorreto, entre outros, sendo que, qualquer movimento que ocorra até o fim de pega do concreto pode ocasionar fissuras (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Relativo ao concreto já endurecido são diversas razões que podem ocasionar o surgimento de fissuras, surgindo nas primeiras semanas após a concretagem, ou após grandes períodos. Algumas das principais causas são: retração hidráulica; variação térmica; corrosão da armadura; expansão devido a ação de sulfatos, carbonatação e reação álcali-agregado; detalhes construtivos; e recalque nas fundações (DAL MOLIN, 1988).

2.1.3 Retração plástica e retração hidráulica

No estado plástico, o concreto retrai devido a secagem rápida, ocorrendo uma maior perda de água superficial por evaporação que excede a taxa disponível de água por exsudação e, como nessa fase, o concreto possui baixa resistência à tração, podem ocorrer fissuras. Já no estado enrijecido o concreto pode fissurar devido à retração hidráulica, que consiste na constante perda de água, seguida da secagem, do concreto para o ambiente, causando retração, que por sua vez, gera fissuras e o empenamento das bordas. Em ambos os casos, as fissuras ocorrem, pois, ao retrair, o concreto se depara com restrições volumétricas causadas pelos próprios agregados e pela armadura, com isso surgem tensões de tração. Como nessa fase o concreto ainda não tem a resistência para absorver as tensões geradas, ocorrem às fissuras (ANAPRE, 2009).

2.1.4 Fissuração por retração térmica

A ação da variação térmica gera uma mudança volumétrica, ou dimensional, nas estruturas, causando também uma variação do teor de umidade. Esses dois fatores em conjunto geram deformações nos elementos de concreto e caso exista impedimento dos deslocamentos gerados, podem surgir tensões, acarretando fissuras. Esses efeitos são maximizados em estruturas longas e esbeltas, por exemplo, em vigas contínuas com vários apoios, ainda mais quando essas possuem movimentação restringida de alguma maneira (MARCELLI, 2007).

2.1.5 Fissuração por carregamento

O aparecimento de fissuras ocasionadas pela flexão (ou carregamento) é totalmente relacionado aos materiais empregados na estrutura. Os aços de alta resistência utilizados em concreto armado (CA), como CA-50 e CA-60, normalmente excedem a deformação específica máxima do próprio concreto e, portanto, possuem importante papel quando se trata da absorção de deformações à tração e flexão das estruturas de concreto armado. Quando superada a capacidade de absorção dessas tensões, surgem fissuras, portanto para que essas não ocorram, é necessário que a deformação máxima do aço não supere a deformação máxima do concreto, resultando

em um grande desperdício da capacidade de resistiva das armaduras que poderia ser utilizada na estrutura. Portanto, normalmente, a fissuração não é evitada, exceto em obras que envolvem a contenção ou transporte de líquidos com presença de sulfatos (ou outras substâncias agressivas) (HELENE, 1992).

2.1.6 Formas de prevenção e reparo de fissuras

As fissuras podem ser originadas também devido ao projeto arquitetônico por não considerar adequadamente a dilatação dos materiais, priorizando a estética. Além disso, fatores como a falta de compatibilização entre os projetos de arquitetura, fundação e estruturais, podem acarretar picos de tensão superior à dos materiais empregados, em pontos especificamente ruins, acarretando fissuras. Além dessa incompatibilização, essas, também são ocasionadas por projetos com pobreza de detalhes, imperícia da mão de obra, falta de supervisionamento e prazos não condizentes com a realidade. Sendo assim, fica claro que existem diversas razões que, mesmo não estando diretamente relacionadas às propriedades dos materiais, são de grande importância, e devem ser levadas em consideração para evitar o surgimento dessa classe de patologias nas edificações (THOMAZ, 2020).

Para realizar a recuperação de uma trinca ou fissura, é necessário que primeiramente, tenha-se total conhecimento dos efeitos que o causador da fissura teve no edifício como um todo e apenas depois de concluído que a trinca não ocasiona risco a estrutura, pode-se analisar métodos para recuperação da manifestação patológica. A ideia principal é resolver o fator que originou a fissuração, com intuito de resolvê-la completamente ou minimizá-la, isso implica primeiramente nos fatores preventivos, e, caso necessário, os corretivos. O elemento fissurado em si, normalmente, é o menos problemático a ser corrigido, ao contrário da origem desses. Um exemplo disso é o caso de fissuração devido a recalques na fundação da estrutura, onde a abertura aumenta progressivamente, e apenas o tratamento do elemento fissurado não soluciona o problema. Portanto, mesmo que se consiga esconder a fissura por meio de selantes, ou outros materiais elásticos, o problema não será corrigido até que a origem da manifestação patológica seja tratada (THOMAZ, 2020).

2.2 Autocicatrização em materiais cimentícios

2.2.1 Conceito de autocicatrização

Um dos principais riscos ao concreto é a vulnerabilidade gerada pelas fissuras, que podem ser causadas por diversos fatores, sendo que a prevenção de 100% das fissuras é praticamente impossível. Fissuras e microfissuras já existentes na estrutura podem se propagar ao sofrer o efeito de cargas externas e essas afetam diretamente a durabilidade da estrutura, pois permitem a entrada de agentes danosos. Sendo assim, para preservar a durabilidade da estrutura, faz-se necessário a manutenção e fechamento das fissuras, que dependendo da localização, não são acessíveis para reparo. Dessa forma, a autocicatrização, considerada um conceito de controle de danos, se torna uma forma eficiente para reparo de fissuras (GUPTA; KUA, 2016).

A autocicatrização consiste no fechamento de fissuras (de até determinada abertura) e microfissuras autonomamente, diminuindo a permeabilidade e conseqüentemente aumentando a durabilidade e segurança da estrutura. A autocicatrização deve ocorrer de forma autônoma sem interferência externa, caso contrário, para ocorrer de forma não autônoma, precisa de interferência humana (GHOSH, 2009). Esse efeito pode ocorrer naturalmente, por indução química ou processos biológicos (TALAIEKHOZAN *et al.*, 2014).

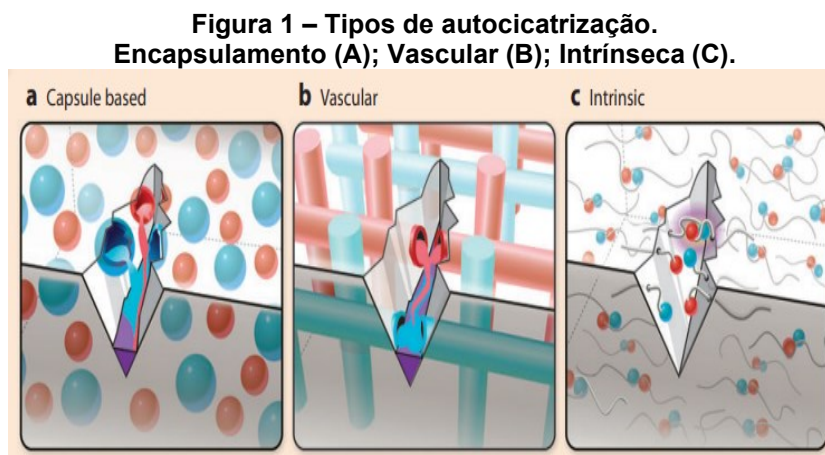
A capacidade de cicatrização do concreto não é uma ideia necessariamente nova, isso pode ser observado em antigas construções que existem até os dias atuais. Um dos principais fatores responsáveis por essa durabilidade é a capacidade natural dos aglomerantes em se regenerarem ao longo do tempo. Para que haja a cicatrização, é necessário que exista um defeito no material, nesse caso são as fissuras e microfissuras. Como, normalmente, os defeitos costumam ter origem em pequena escala, fica claro que a cicatrização induzida de microfissuras, pode ser solução de diversos tipos de problemas de maior escala do concreto (REINHARDT *et al.*, 2013).

Até meados de 1990, o efeito autocicatrizante do concreto ou de outras misturas a base de aglomerante cimentício, era considerado como uma espécie de bônus do material, sendo considerada uma cicatrização passiva, pois não era uma característica obtida propositalmente. A cicatrização natural de microfissuras é uma

das razões sugeridas para a diminuição do coeficiente de permeabilidade de estruturas de concreto submersas por água, por exemplo, podendo ocorrer pela contínua hidratação dos compostos do cimento, ou expansão da matriz cimentícia hidratada no interior das fissuras. Sendo assim, surge o conceito da cicatrização ativa de misturas à base de aglomerantes cimentícios, podendo ser aplicada em argamassas e concretos (REINHARDT *et al.*, 2013).

2.2.2 Tipos de autocicatrização

Para realizar a classificação da autocicatrização em materiais cimentícios, é possível realizar a divisão entre três grupos gerais, representados na Figura 1. Esses se diferenciam entre si pela maneira utilizada para armazenar a capacidade regenerativa dentro da estrutura, até que seja acionada por algum dano mecânico. Essa diferenciação influencia diretamente na abertura máxima capaz de ser regenerada, na quantidade de fissuras que poderão ser regeneradas e no grau de regeneração. Portanto, podem ser classificadas em (BLAISZIK *et al.*, 2010):



Fonte: BLAISZIK *et al.* (2010).

- Autocicatrização intrínseca ou autógena: essa se dá principalmente pela composição da matriz cimentícia. Pode ser causada por meio da hidratação de frações do cimento que não haviam sido hidratadas anteriormente, pela dissolução seguida da carbonatação do hidróxido de cálcio presente no cimento, sendo que ambas podem realizar o fechamento de fissuras (BLAISZIK *et al.*, 2010; YANG *et al.*, 2009).

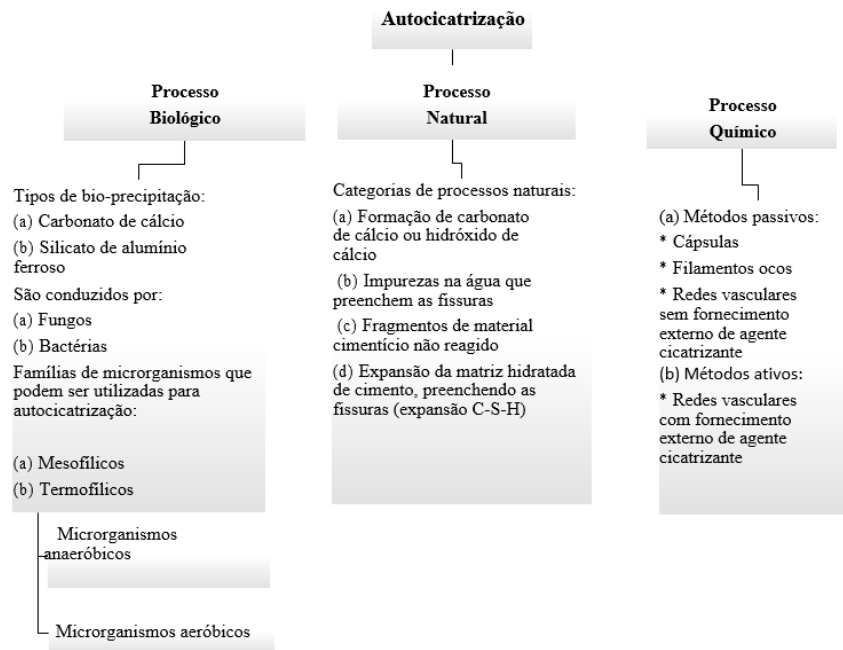
- Autocicatrização por encapsulamento: essa se dá pelo armazenamento de capsulas, preenchidas por agentes cicatrizantes, distribuídas no interior do elemento estrutural. Quando as capsulas são rompidas por alguma forma de dano, por exemplo, pelo encontro com a formação de uma fissura, liberam o agente cicatrizante, que preenche e regenera a fissura. As capsulas podem ser arredondadas ou cilíndricas e podem ter diferentes meios de ativação, como rompimento por calor, contato com umidade, contato com o ar ou até mesmo o contato com um segundo agente presente na massa de cimento ou em outras capsulas (BLAISZIK *et al.*, 2010; VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013).
- Autocicatrização por redes vasculares: esse tipo de autocicatrização possui grande semelhança com o sistema de vascularização humano e consiste na instalação de uma cadeia de tubos no interior do elemento estrutural, alimentadas por um fornecedor externo, que faz a distribuição do agente cicatrizante quando surgem fissuras. Esse método pode abastecer a estrutura com uma ou mais redes, dependendo da quantidade de agentes a serem utilizados (BLAISZIK *et al.*, 2010; GUPTA; KUA, 2016).

Segundo Gupta e Kua, (2016), apesar da efetividade do método de autocicatrização por redes vasculares, é praticamente inviável realizar a instalação de redes de abastecimento no canteiro de obras, portanto, a viabilidade do método é em grande parte apenas para o laboratório. Também, segundo os autores, como o método depende de uma rede de abastecimento externa, na realidade, não deveria ser considerado autocicatrizante.

2.2.3 Outras classificações dos mecanismos de autocicatrização

Também existem outras formas de classificação dos métodos de autocicatrização, que apesar de possuírem conceitos semelhantes, podem apresentar uma classificação mais detalhada de alguns conceitos, como por exemplo, a classificação da autocicatrização vascular como método ativo, considerando a intervenção humana para funcionamento.

Figura 2 – Classificação dos mecanismos de cicatrização.



Fonte: TALAIEKHOZAN et al. (2014).

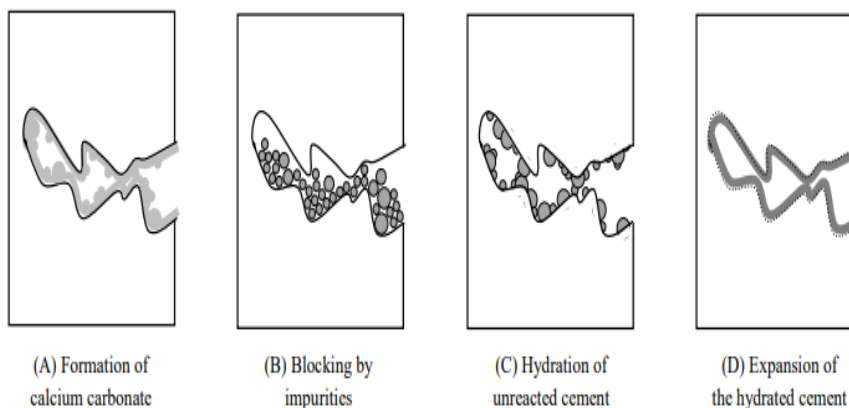
Como mostrado na Figura 2, são três as principais classificações para a autocicatrização dos materiais cimentícios (KHATTAB; SHEKHA; ABUKAR ABDI, 2019).

2.2.3.1 Autocicatrização por processos naturais

O fechamento das fissuras por autocicatrização natural pode ocorrer das seguintes formas: formação de hidróxido de cálcio ou carbonato de cálcio, bloqueio da fissura devido a impurezas presentes na água, progressiva hidratação dos compostos do cimento ao longo do tempo e expansão da matriz cimentícia hidratada (WU; JOHANNESSON; GEIKER, 2012).

Figura 3 – Representação do fechamento de fissuras por processos naturais.

Formação de carbonato de cálcio (A); Bloqueio por impurezas (B); Hidratação contínua dos compostos do cimento (C); Expansão da matriz cimentícia hidratada (D).



Fonte: TALAIEKHOZAN *et al.* (2014).

A Figura 3 representa os quatro possíveis processos de autocicatrização natural. Além disso, também deixa evidente que nem sempre o processo de cicatrização natural preenche a fissura por completo. Na maioria das vezes, a recuperação das fissuras por processos naturais é apenas parcial, variando com a extensão da abertura (KHATTAB; SHEKHA; ABUKAR ABDI, 2019).

2.2.3.2 Autocicatrização por processos biológicos

A cicatrização de fissuras ou microfissuras pelo meio biológico consiste basicamente na deposição de compostos presentes na solução da matriz cimentícia, como os carbonatos de cálcio, por exemplo, até que ocorra o fechamento da abertura. Essa precipitação pode ser induzida por diferentes tipos de fungos e bactérias, aeróbicos e anaeróbicos (WU; JOHANNESSON; GEIKER, 2012).

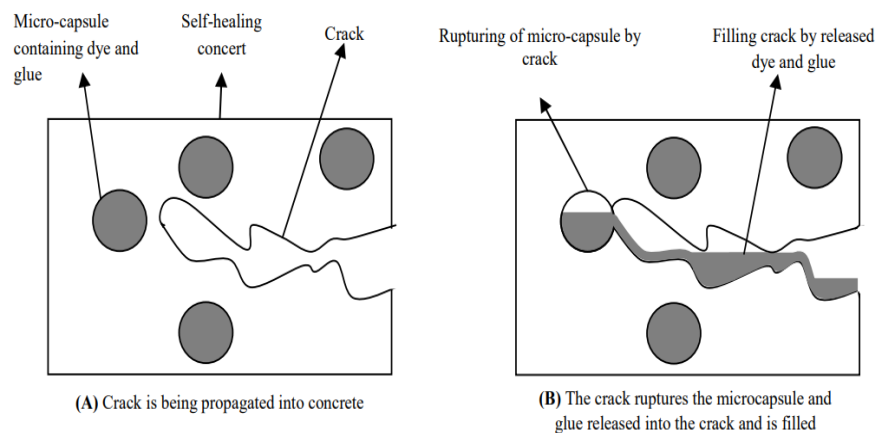
O concreto confeccionado com microrganismos é chamado de bioconcreto ou concreto vivo, e é realizado da mesma forma que o concreto convencional, mas com a adição do agente cicatrizante. O agente é inerte durante a mistura do concreto, e só se torna ativo quando surge uma fissura e o agente entra em contato com água, além de poder durar por volta de 200 anos em estado dormente. Ao entrar em contato com a água, os microrganismos começam a se reproduzir e ocasionam reações que precipitam compostos da pasta de cimento e tampam as fissuras, além de consumir o oxigênio que propicia a corrosão das armaduras (BASHIR *et al.*, 2016).

2.2.3.3 Autocicatrização por processos químicos

Outra forma de autocicatrização é a introdução de reagentes químicos que irão preencher os vãos das fissuras e microfissuras. Esse método pode ser classificado como passivo ou ativo, sendo que o método passivo ocorre naturalmente com a ocorrência de fissuras e o ativo depende de um fenômeno induzido. O método passivo pode ser realizado, pela adição de microcápsulas (Figura 4) ou filamentos (Figura 5), de fibra de vidro, por exemplo, repletos de agentes químicos cicatrizantes, que atuam como pequenos depósitos de material cicatrizante, que ao encontrarem com a formação de uma fissura, despejam o material, preenchendo a abertura. O método é denominado ativo quando necessita de intervenção humana para ter efeito cicatrizante, como por exemplo, a rede vascular com abastecimento externo do cicatrizante (WU; JOHANNESSON; GEIKER, 2012).

Figura 4 – Representação do fechamento de fissuras por meio de microcápsulas repletas de compostos químicos cicatrizantes.

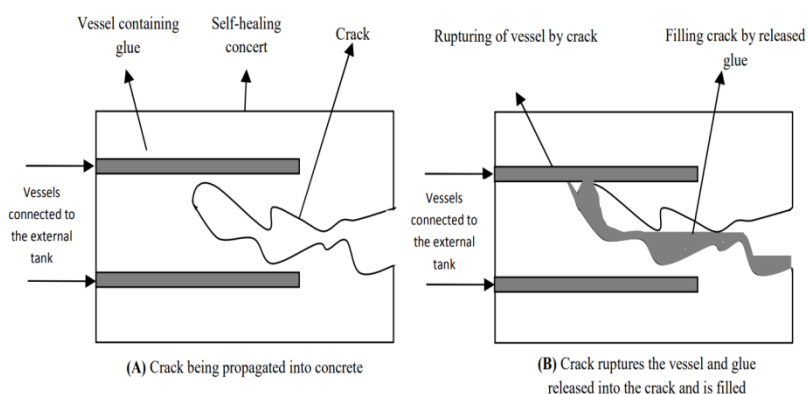
Fissura se propagando no concreto (A); Fissura rompe microcápsula e libera o agente autocicatrizante, enchendo a fissura (B).



Fonte: TALAIEKHOZAN *et al.* (2014).

Figura 5 – Representação de Autocicatrização de fissura por meio de filamentos de fibra de vidro repletos de compostos químicos cicatrizantes.

Fissura sendo propagada no concreto (A); Fissura rompendo o filamento repleto de cicatrizante, preenchendo o vazio (B).



Fonte: TALAIEKHOZAN *et al.* (2014)

As cápsulas apresentadas na Figura 4 e na Figura 5 podem ser de vidro, cerâmica ou poliméricas e precisam possuir certas propriedades para não perderem o efeito autocicatrizante no concreto. Precisam resistir ao processo de mistura da argamassa ou concreto, resistir à temperatura de hidratação e cura do cimento, suportar a deformação do concreto sem romper, entre outros (GUO; CHIDIAC, 2019).

2.2.4 Fatores interferentes no processo de autocicatrização

Além do método de autocicatrização aplicado, existem diversos fatores que interferem diretamente na autocicatrização em compostos cimentícios. Um destes é a idade em que a fissura surge, influenciando na quantidade de compostos não hidratados do cimento, podendo favorecer a autocicatrização em concretos jovens.

Outro fator é a largura da fissura, que influencia na quantidade de material autocicatrizante e o tempo para preenchimento da mesma. A presença de água também exerce influência, auxiliando na dissolução de hidróxido de cálcio e deposição de carbonato de cálcio. Por fim, os componentes da autocicatrização podem ser danificados caso a fissura não esteja estável, podendo interromper o processo de autocicatrização (FERRARA *et al.*, 2018).

2.2.4.1 Tamanho da fissura

A autocicatrização autônoma ou natural, normalmente, tem maior efetividade em pequenas fissuras de entre 0,1 mm e 0,2 mm, mas tem a capacidade de cicatrizar fissuras entre 0,05 mm e 0,3 mm (VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013).

Quanto à autocicatrização utilizando bactérias, ao investigar potencial de autocicatrização em fissuras de 0,1 mm a 1,0 mm, o resultado demonstrou que esse tipo de autocicatrização possuiu excelente efetividade em cicatrizar pequenas aberturas, sendo que fissuras de até 0,4 mm foram fechadas quase completamente (QIAN *et al.*, 2015).

Fissuras com menor largura necessitam de menos substâncias autocicatrizantes para preencher a abertura, além da frente de cicatrização em cada lado da fissura precisar crescer menos até os dois lados se conectarem. Pode-se concluir que quanto menor a abertura da fissura, maior a probabilidade de essa ser cicatrizada (PANNEM; CHINTALAPUDI, 2019).

Em análise de argamassas com aditivo cicatrizante, Sisomphon e Copuroglu (2011) fizeram comparações entre a capacidade de regeneração em argamassas com aditivo cristalizante e aditivo a base de Sulfoaluminato de Cálcio. Os corpos de prova foram submetidos à cura submersa por 28 dias, sendo dividida em argamassa convencional, argamassa com aditivo cristalizante, argamassa com aditivo cristalizante a base de Sulfoaluminato de Cálcio e argamassa com ambos os aditivos. As fissuras iniciais em cada corpo de prova variaram entre 0,05 mm e 0,4 mm e ao analisar os resultados, os autores concluíram que todos os corpos de prova com aditivo conseguiram cicatrizar fissuras de até 0,2 mm em 14 dias, mas apenas os corpos de prova com os dois aditivos conseguiram fechar fissuras entre 0,2 mm e 0,4 mm em 28 dias. Além disso, os autores também concluíram que a permeabilidade de todas as amostras diminuiu para menos de 10% dos valores iniciais.

2.2.4.2 Idade do concreto e de fissuração

A hidratação de compostos cimentícios ainda não hidratados ocasiona a autocicatrização apenas em concretos de baixas idades e é considerada uma das formas de autocicatrização natural das argamassas e concretos. Já para idades mais avançadas, normalmente é a formação do carbonato de cálcio que faz a autocicatrização de fissuras (VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013).

Os estudos de Neville (2002) corroboram com essa ideia, indicando que concretos jovens possuem maior quantidade de grãos anidros cimentícios, favorecendo a reidratação quando na presença de água, acarretando a autocicatrização da abertura.

Como fissuras podem ocorrer a qualquer momento da vida do concreto, Chunxiang *et al.* (2015) investigaram a influência da idade de fissuração na capacidade de autocicatrização em materiais cimentícios utilizando a incorporação de bactérias. Foram preparados corpos de prova os quais foram fissurados com idades de 7, 14, 28 e 60 dias, a fim de analisar a capacidade de autocicatrização variando com a idade do concreto ao ocorrer o surgimento da fissura. Pode-se observar que as bactérias regeneram completamente as pequenas fissuras formadas na idade de 7 dias e perderam o efeito autocicatrizante na idade de 60 dias, tornando-se possível concluir que a capacidade regenerativa diminuiu com a idade da amostra.

Para Qureshi *et al.* (2019), apesar do concreto em idades jovens possuir maior capacidade de autocicatrização devido ao alto teor de compostos cimentícios não hidratados, cerca de 25% do cimento continua anidro no concreto mesmo após 28 meses, e essa proporção pode causar a autocicatrização mesmo em concretos com maiores idades.

Em ensaios de laboratório, Cappellesso (2018) identificou ao comparar fissuras induzidas em corpos de prova de concreto, utilizando diferentes tipos de cimento, com 3 e 28 dias, que após 80 dias da moldagem, todos perderam diminuição da capacidade de autocicatrização.

2.2.4.3 Presença de água e ar

Segundo Bhaskar (2016) existem cinco principais critérios para que a autocicatrização possa ocorrer de forma eficiente em materiais cimentícios:

- Presença dos compostos químicos adequados para induzir a autocicatrização;
- Largura da fissura preferencialmente inferior a 0,15 mm;
- Para que a fissura não seja aberta novamente, é necessário que esta seja estável, evitando a interrupção do processo de autocicatrização;
- Presença de água: é essencial para auxiliar a cicatrização das fissuras;

- Pressão da água: a autocicatrização não consegue ocorrer caso a água flua com muita velocidade, portanto a pressão de água não pode ser muito alta. Essa condição está diretamente relacionada com a coluna d'água e espessura da estrutura de concreto.

O efeito da autocicatrização só é efetivo quando existe a presença de água, podendo dificultar a capacidade de controlar a reação. A presença de água auxilia a hidratar os compostos do cimento anidros além de promover a dissolução do hidróxido de cálcio da matriz cimentícia na região da fissura, gerando o carbonato de cálcio, um dos agentes da autocicatrização (WANG *et al.*, 2014).

Segundo Ferrara *et al.* (2018), no estudo da autocicatrização em compostos cimentícios, após ser realizada a fissuração do corpo de prova, deve-se pensar a respeito da condição de exposição, seja essa a fim de gerar compatibilidade com o método de autocicatrização utilizado, a fim de melhorar o processo, ou de simular o campo de aplicação do composto cimentício a ser confeccionado. Diversas condições de exposição são possíveis como: exposição ao clima local, ao ar-condicionado, submersão em água, ciclo de molhagem e secagem, entre outros. A influência de cada tipo de exposição depende diretamente da forma de autocicatrização empregada. Mesmo que a maioria dos processos de autocicatrização sejam catalisados pela presença de água, alguns, como a autocicatrização por meio de polímeros líquidos encapsulados, precisam apenas de ar para autocicatrizarem.

2.2.4.4 Influência da dosagem

Em estudo, Cappellesso (2018) analisou a influência da dosagem na capacidade intrínseca ou autógena da autocicatrização de fissuras no concreto. Foram confeccionados corpos de prova com três diferentes tipos de cimento Portland (CP): CP II-F (filler), CP IV (pozolânico) e CP V-ARI (alta resistência inicial). Também foram utilizadas três relações a/c: 0,3; 0,4 e 0,5. As fissuras foram induzidas com 3 e 28 dias e o processo de cura utilizado foi o de molhagem e secagem. Em análise microscópica a autora constatou que o CP V-ARI obteve os melhores resultados na cicatrização, seguido do CP II-F e CP IV. Referente à relação água/cimento, os concretos com baixa relação obtiveram a menor capacidade de cicatrização, mesmo possuindo maior teor de grãos de cimento anidros. Isso ocorreu porque durante a indução de fissuras, os corpos de prova com menor relação a/c (água/cimento), por

serem mais frágeis, apresentaram maiores fissuras, sendo que a largura da fissura está fortemente atrelada a capacidade de cicatrização.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste trabalho tem-se como objetivo compreender os resultados obtidos em relação ao desempenho de autocicatrização de fissuras induzidas por flexão em corpos de prova (CP) de argamassa armada prismáticos, com vergalhão de aço em sua composição (para evitar seu rompimento) e com a utilização de dois aditivos cristalizantes distintos. Sendo assim, os corpos de prova foram moldados e armazenados durante 14 dias, em seguida induzidos às fissuras por flexão. Após o ensaio à flexão, foram aguardados mais 35 dias e observado seu desenvolvimento em relação à cicatrização dessas fissuras, possibilitadas através do uso dos aditivos autocicatrizantes e diferentes tipos de curas em que foram submetidos.

Para fins comparativos, foram moldados também CP's feitos de argamassa convencional, possibilitando observar seu comportamento natural a partir da fissuração.

3.1 Materiais

3.1.1 Cimento Portland

O cimento CP V-ARI foi escolhido para esta pesquisa devido à sua disponibilidade na Universidade. Esse cimento não contém adições, mas é produzido com um clínquer de dosagem diferenciada de calcário e argila além da moagem mais fina do cimento, atingindo altas resistências iniciais. Para realizar o cálculo do traço utilizado, a massa específica dada pelo fabricante foi de 3,11 g/cm³.

3.1.2 Agregado miúdo

Para a escolha do agregado miúdo, foi utilizada uma areia de origem mineralógica de arenito, provinda da região de São Luíz do Purunã – PR. Sua massa específica foi de 2,60 g/cm³. Além disso, a correção da quantidade de água do traço devido ao teor de umidade da areia foi realizada, tendo seu valor 0,3% da massa total.

3.1.3 Água

A água utilizada na mistura provém da companhia de saneamento presente na região do Paraná consistindo em água doce, limpa e potável.

3.1.4 Aditivos cristalizantes

Dois aditivos cristalizantes diferentes foram utilizados, denominados, respectivamente, de aditivos 1 e 2.

- Aditivo 1: método de aplicação por pintura na argamassa convencional feito uma semana após o ensaio à flexão no CP feito de argamassa convencional. O funcionamento deste aditivo acontece a partir de aplicação no concreto, fazendo-o penetrar na fissura, gerando uma reação catalítica das suas substâncias químicas ativas com os subprodutos gerados pela hidratação do cimento, formando cristais insolúveis nos poros do concreto, possibilitando sua impermeabilização à água e outras substâncias agressivas ambientais;
- Aditivo 2: misturado no traço convencional como adição. Funciona de forma semelhante ao aditivo 1, entretanto, sua utilização inicia-se na mistura da argamassa.

3.1.5 Barra de aço

Para evitar a ruptura do CP durante o ensaio de flexão, optou-se por utilizar uma barra de aço em meio aos corpos de prova moldados, promovendo uma fissuração controlada. O diâmetro utilizado foi de 5 mm, e foram utilizados espaçadores para que houvesse a centralização do aço no corpo de prova.

3.2 Definição dos traços

O traço utilizado foi calculado de forma empírica, visando obter o volume de 1,2 L por argamassada, uma vez que esta era a capacidade máxima de funcionamento da argamassadeira utilizada. Para isso, escolheu-se uma argamassa rica, com relação de 1:3 de cimento para areia e a quantidade de água foi ajustada conforme

trabalhabilidade da mistura, testando várias medidas até encontrar a ideal para a moldagem dos corpos de prova, baseando-se no índice “H” (relação água/mistura seca) que resultou em 16,25%.

Para encontrar o valor do consumo de cimento e dos outros materiais, feito para possibilitar os cálculos do traço, foram utilizadas as seguintes Equações:

Equação 1 – Consumo de cimento.

$$C_c = \frac{1000}{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{a}{\gamma a} + \frac{x}{1}}$$

Fonte: IBRACON (1977).

Equação 2 – Consumo de areia.

$$C_a = a * C_c$$

Fonte: IBRACON (1977).

Equação 3 – Consumo de água.

$$C_{H_2O} = x * C_c$$

Fonte: IBRACON (1977).

Onde:

γ – massa específica do material;

α – teor de areia;

a/c – relação água/cimento

O consumo de cimento foi, portanto, de 471 kg/m³ e, considerando o teor de brita como 0, uma vez que foi utilizada argamassa e não concreto, e as massas específicas do cimento, areia e água como 3,11 g/cm³, 2,6 g/cm³ e 1 g/cm³, respectivamente, foi concluído o traço na proporção de 1:3:0,65. Ajustando as quantidades conforme o necessário para o volume inicial considerado, foram utilizadas as seguintes quantidades para a elaboração das argamassas, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Quantidades utilizadas.

CONSUMO	1 m³	1,2 L
Cimento (kg)	471,00	0,565
Areia (kg)	1413,00	1,696
Água (kg)	306,15	0,367

Fonte: os autores (2022).

Para as argamassadas em que os aditivos foram utilizados, considerou-se as seguintes recomendações dos fabricantes, conforme o Quadro 1.

Quadro 1 – Quantidade de aditivos.

ADITIVO	QUANTIDADE	FINALIDADE
1	0,8 kg/m ²	Pintura na superfície fissurada do CP
2	0,8% da massa de cimento	Inserir na mistura antes da moldagem do CP

Fonte: os autores (2022).

3.3 Preparação dos corpos de prova

Inicialmente, na cuba da argamassadeira, foi depositada toda a massa de agregado miúdo e aglomerante, seguido pela metade da água. Em velocidade baixa, os materiais foram misturados por aproximadamente dois minutos, sendo o restante da água adicionado gradativamente.

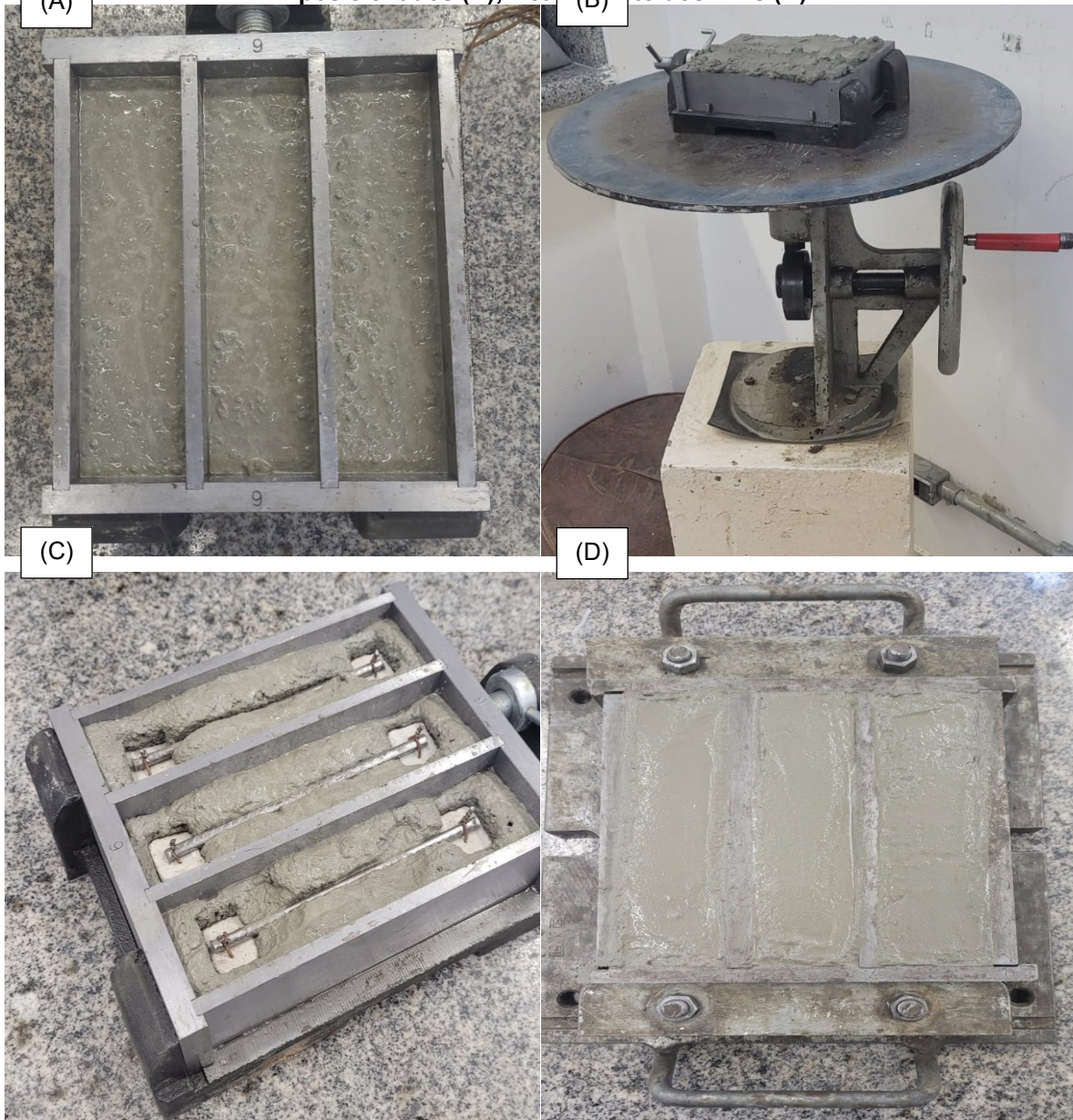
Em seguida, a argamassadeira foi programada para velocidade máxima por mais três minutos. Após, houve a verificação manual do conteúdo da cuba, realizando a raspagem das laterais e do fundo. Por fim, a argamassa foi misturada por mais dois minutos.

3.4 Moldagem dos corpos de prova

Inicialmente, os moldes prismáticos (4 x 4 x 16 cm) foram lubrificados com óleo mineral não reagente com o cimento para facilitar a retirada após o tempo de pega.

Em seguida, foi despejada metade da argamassa necessária cuidadosamente em cada um dos moldes. Para promover o adensamento correto da argamassa, os moldes foram submetidos à mesa de fluidez refratária (*flow table*) como mostra a Figura 6, em A, onde foram realizadas quinze quedas com intervalos médios de um segundo. Na Figura 6, em B, é possível identificar a argamassa devidamente adensada. Então, foi posicionado um vergalhão com espaçadores, conforme mostra a Figura 6, em C, a fim de centralizar o vergalhão em cada um dos moldes. Após, o volume restante dos moldes foi preenchido com argamassa e repetiu-se o processo na *flow table*. Por fim, o acabamento dos CP's foi feito por meio de régua metálica, promovendo a uniformidade da superfície, mostrado na Figura 6, em D.

Figura 6 – Processo de modelagem.
Metade da argamassa no molde (A); Argamassa na *flow table* (B); Vergalhões e espaçadores posicionados (C); Acabamento dos CP's (D).



Fonte: os autores (2022).

Neste processo foram confeccionados 24 CP's de argamassa convencional, 21 CP's para argamassa com o Aditivo 1 e 24 CP's para a argamassa com o Aditivo 2. Esta divisão ocorreu por disponibilidade de materiais para a confecção dos corpos de prova na Universidade.

3.5 Curas dos corpos de prova

Em busca de analisar se o desempenho de cicatrização dos aditivos na cicatrização depende do tipo de cura do material cimentício, optou-se por dividir os CP's em três tipos de cura diferentes, sendo estas: cura ambiente, cura submersa e cura na câmara de ciclo secagem/molhagem.

3.5.1 Cura ambiente

A cura ambiente deu-se por colocar os CP's selecionados em temperatura e umidade relativa ambientes, dentro de laboratório. Em média, na cidade de Curitiba-PR, segundo o INMET, a temperatura durante o período da cura deu-se por 15,21 °C. Ainda, no site do INMET não foram disponibilizados dados de umidade relativa relacionados ao período do estudo.

3.5.2 Cura submersa

Para dar execução ao processo de cura submersa, os CP's selecionados foram colocados em ambiente submerso à água, sendo removidos apenas para suas medições.

3.5.3 Cura de ciclagem

Para realizar a cura na câmara climática, foram utilizadas as seguintes considerações técnicas:

- Modelo: *Climate Chamber Feutron*, modelo KPK 200 Typ 3423/16;
- Capacidade: Volume de 200 litros (700 x 500 x 700 mm);
- Variação de temperatura: de -40 °C até +100 °C;
- Variação de umidade relativa: de 10% até 95%.

Os dados utilizados para realizar a programação da câmara são às médias mínimas e máximas de temperatura registradas na cidade de Curitiba – PR, por estação do ano, abrangendo um período de 10 anos (entre 2011 e 2021). Para a determinação da umidade relativa, por estação do ano do mesmo período, os dados foram retirados do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Na Tabela 2 é mostrado o resumo das temperaturas e umidade relativas utilizadas na câmara:

Tabela 2 – Temperatura e umidade utilizadas na câmara.

ESTAÇÃO	MÍNIMA (°C)	MÁXIMA (°C)	MÉDIA (°C)	UMIDADE RELATIVA (%)
Inverno	1,2	33,5	16,0	68,2
Outono	4,1	32,0	17,0	72,0
Primavera	5,5	35,5	19,0	71,5
Verão	11,2	34,5	21,0	71,9
Total Geral	1,2	35,5	19,0	70,9

Fonte: INMET (2021).

O ciclo foi definido com 4 etapas, sendo 1 etapa para cada valor de temperatura e umidade relativa de cada estação, com duração de 1 h. A repetição mínima foi de 99 vezes cada ciclo, ou até chegar a 495 h de operação (aproximadamente 20 dias), sendo necessário reiniciar os ciclos.

3.6 Indução à fissura

Os corpos de prova foram induzidos, na idade de 14 dias, ao ensaio de flexão, como mostrado na Figura 7 para que fosse possível a formação de maiores fissuras (além das fissuras naturais) sem o risco do rompimento dos mesmos.

Figura 7 – Prensa realizando o ensaio à flexão.



Fonte: os autores (2022).

A carga utilizada foi definida de forma empírica, sendo considerado apenas a aparência da fissura formada possuir entre 0,2 e 0,4 mm de largura, aproximadamente.

3.7 Divisão dos CP's

Inicialmente, a divisão inicial dos corpos de prova foi feita através de cada tipo e cura, conforme mostrado no Quadro 2:

Quadro 2 – Divisão inicial dos CP's.

TIPO	CURA
Convencional	Câmara Climática
Aditivo 1	
Aditivo 2	
Convencional	Submersa
Aditivo 1	
Aditivo 2	
Convencional	Ambiente
Aditivo 1	
Aditivo 2	

Fonte: os autores (2022).

Devido a erros de execução em laboratórios, os CP's que inicialmente seriam conduzidos à câmara de ciclagem, foram erroneamente levados à estufa, onde foram deixados por sete dias a temperatura de 50°C, o que influenciou os resultados da pesquisa, portanto, optou-se por descartar as amostras que foram comprometidas.

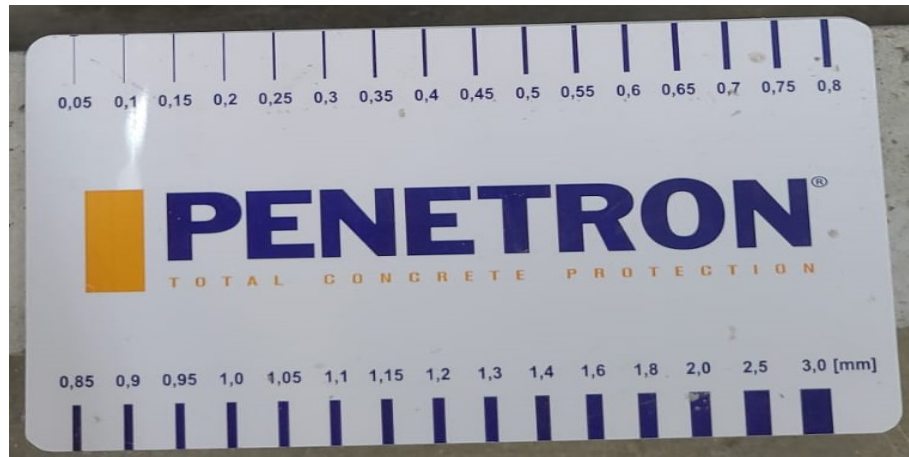
Além disso, também há em consideração o fator de erro humano, uma vez que as medições dos fechamentos das fissuras foram feitas de forma manual, com o fissurômetro, havendo assim uma porcentagem considerável de desvio de dados.

3.8 Medições das fissuras

Para acompanhar o desenvolvimento dos CP's durante seu processo de cura, estes foram medidos semanalmente até cumprir-se 5 medições, com intervalos de 7 dias, totalizando um período de 35 dias.

As medições foram realizadas através de um aparelho denominado fissurômetro, no qual a escala do tamanho da fissura é obtida em intervalos de 0,05 mm, como mostrado na Figura 8.

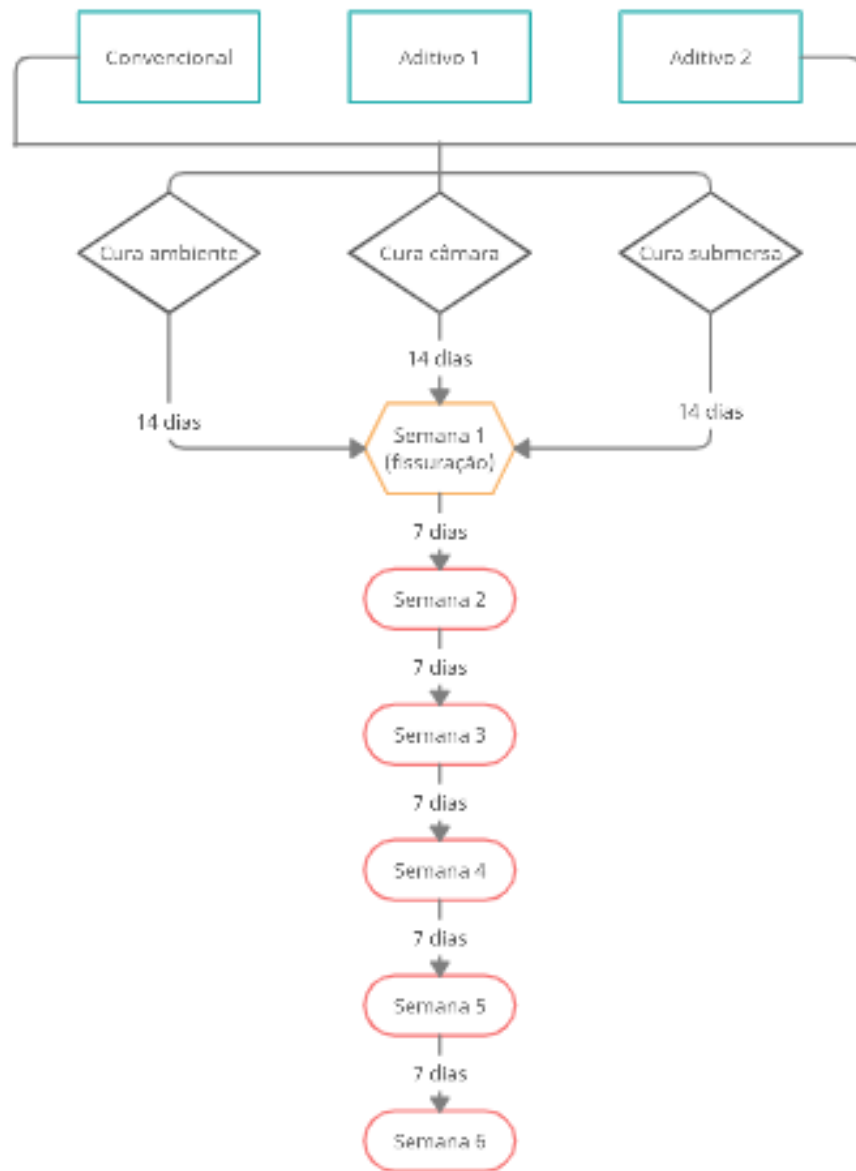
Figura 8 – Fissurômetro.



Fonte: os autores (2022).

Para tanto, a divisão final dos tipos de argamassa, suas curas e medições deu-se pelo seguinte fluxograma, apresentado na Figura 9.

Figura 9 - Fluxograma.



Fonte: os autores (2022).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse item serão apresentados os resultados encontrados na pesquisa para as verificações da potencialidade da autocicatrização de fissuras de argamassas convencionais, com o uso de dois aditivos autocicatrizantes diferentes e três tipos de curas distintas.

4.1 Visualização e determinação da capacidade de autocicatrização

Neste capítulo foram analisados os CP's que apresentaram a maior diminuição na largura das fissuras. As figuras de desenvolvimento de fissura apresentam as 5 medições de cada um dos CP's analisados, de forma a facilitar a observação da evolução da fissura ao longo das semanas. A medição da largura das fissuras foi feita no ponto mais à direita de cada fotografia.

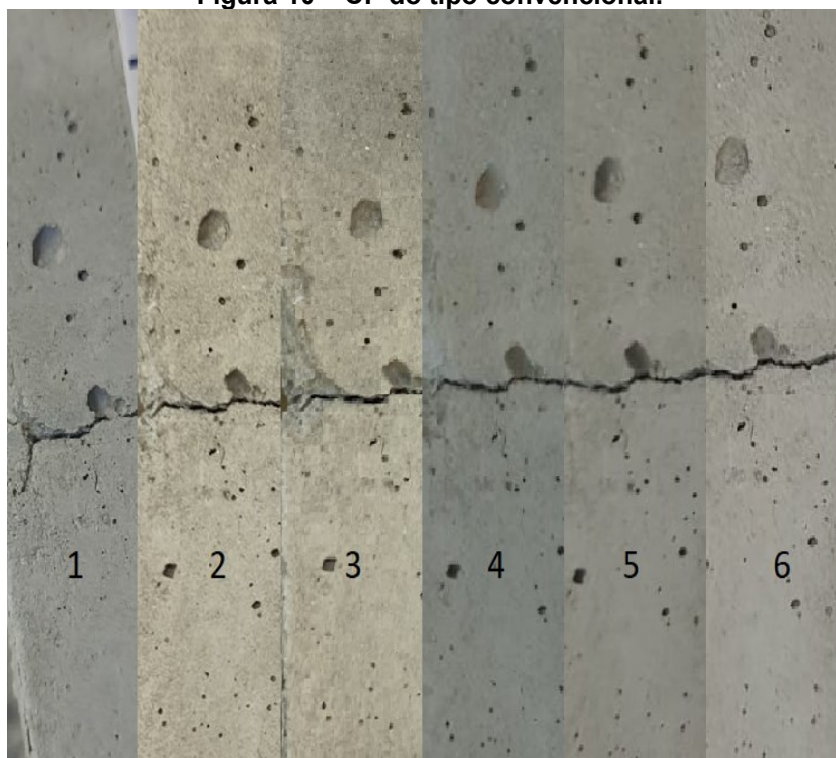
Na tabela, a "Semana 1" representa a semana em que os corpos de prova foram submetidos à sua fissura inicial.

A totalidade dos dados coletados está apresentada no ANEXO A.

4.1.1 Corpos de prova com cura ambiente

Todas as amostras apresentaram pequenas reduções na largura das fissuras por diferentes razões.

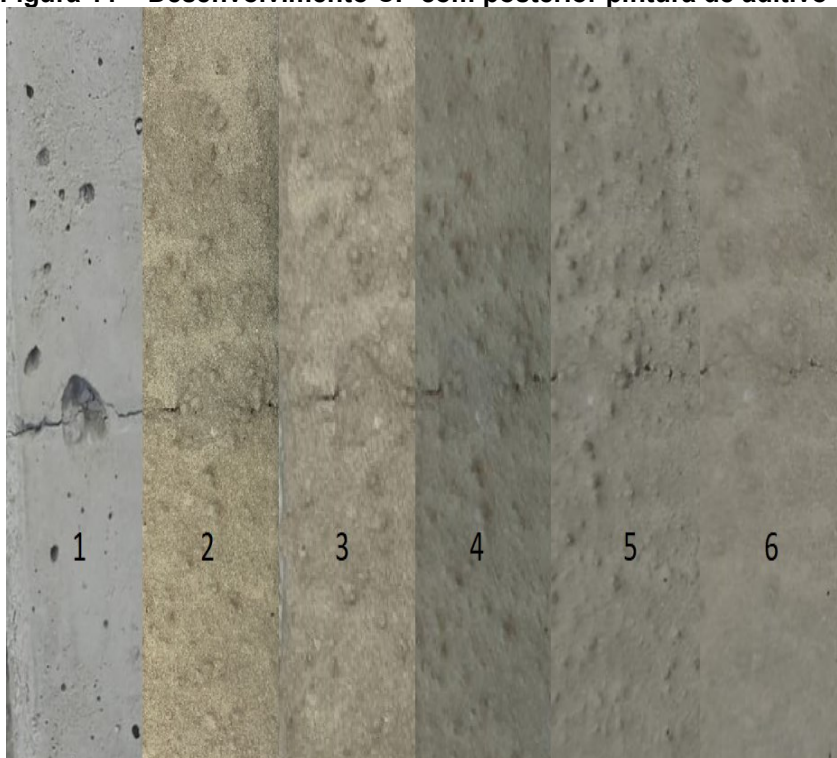
Analisando a Figura 10, que mostra a evolução da fissura do CP feito de argamassa convencional, quase não é possível notar a redução na largura da fissura que ocorreu na segunda medição. Era esperado que não ocorresse o fechamento da fissura, no entanto foi observado que durante a indução das fissuras, alguns corpos de prova com fissuras maiores, tiveram a propagação da fissura ao redor de todo o CP, separando-o em duas metades. Isso gerou uma grande instabilidade nas fissuras desses CP's, sendo possível alterar a largura da fissura simplesmente flexionando-os com as mãos.

Figura 10 – CP do tipo convencional.

Fonte: os autores (2022).

Analisando a Figura 11, que representa o desenvolvimento da fissura no CP que foi posteriormente pintado, é possível notar claramente a influência do aditivo 1 aplicado na face da amostra. Nessa análise é possível encontrar um problema na metodologia de medição pontual com o fissurômetro. O Gráfico 1 indica que houve apenas um fechamento de 0,05 mm na segunda medição, no entanto, analisando a Figura 11, é possível perceber que houve uma cicatrização incompleta em alguns pontos. Apesar do aditivo de pintura ter cicatrizado uma quantidade acima do apresentado nas medições, as diversas falhas na cicatrização ao longo da fissura não caracterizam uma cicatrização integral, pois ainda permite a entrada de agentes agressivos.

Figura 11 – Desenvolvimento CP com posterior pintura de aditivo 1.

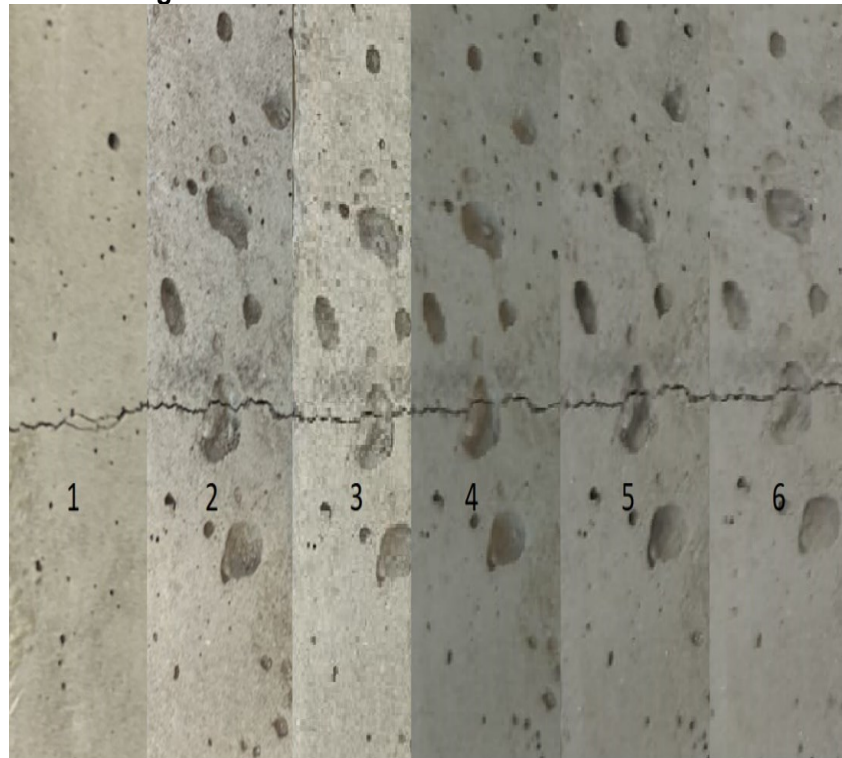


Fonte: os autores (2022).

Analisando o desenvolvimento da fissura presente no CP 69, representada na Figura 12, é possível notar que a superfície do CP na primeira imagem é diferente das demais. Isso se deu devido a um erro no posicionamento do fissurômetro no momento da fotografia, que sobrepôs a parte da fissura que estávamos analisando. No entanto, como a medida no canto direito da imagem permaneceu a mesma, a imagem foi utilizada da mesma forma.

Foi possível notar que não houve alteração na largura da fissura ao decorrer das seis medições. Isso indica que o produto não teve efetividade quanto exposto a temperatura e umidade ambiente. Além disso, não foi possível visualizar nenhum indício de cristalização superficial. Esse resultado era esperado, pois de acordo com o manual do fabricante, é necessário a cura úmida para que o produto funcione corretamente.

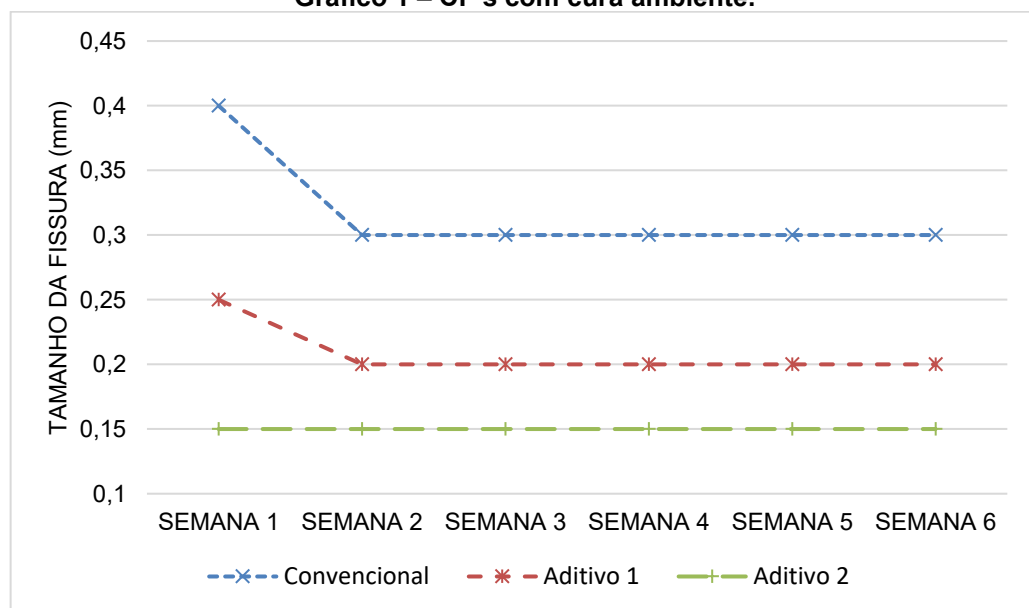
Figura 12 – Desenvolvimento CP com aditivo 2.



Fonte: os autores (2022).

Analisando a comparação dos resultados do desenvolvimento das fissuras apresentado no Gráfico 1, é possível concluir que nenhum dos CP's alcançou o selamento integral das fissuras com cura ambiente.

Gráfico 1 – CP's com cura ambiente.



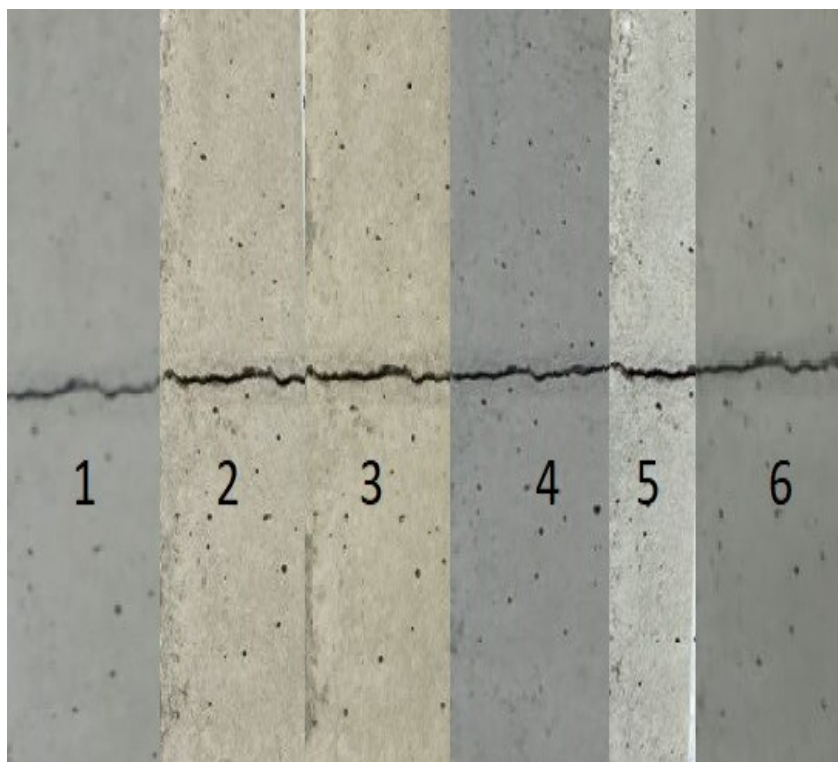
Fonte: os autores (2022).

Foi possível concluir também que apenas o aditivo 1 atingiu selamento parcial da fissura exposto apenas a umidade e temperatura ambiente. Isso se deve pelo fato de que para aplicar o produto na superfície, é necessário que essa seja umedecida, além da água utilizada na mistura do produto. Portanto, essa água residual foi suficiente para induzir uma cicatrização parcial da fissura, ao contrário do CP com aditivo 2, que não teve contato nenhum com água, e, portanto, não sofreu cicatrização.

4.1.2 Corpos de prova com cura na câmara climática

Os dados analisados a seguir correspondem aos CP's que obtiveram maior fechamento de fissuras ao serem curados na câmara climática. Foi possível notar que o fechamento máximo foi de 0,1 mm, o que a princípio indica que não houve cicatrização adequada.

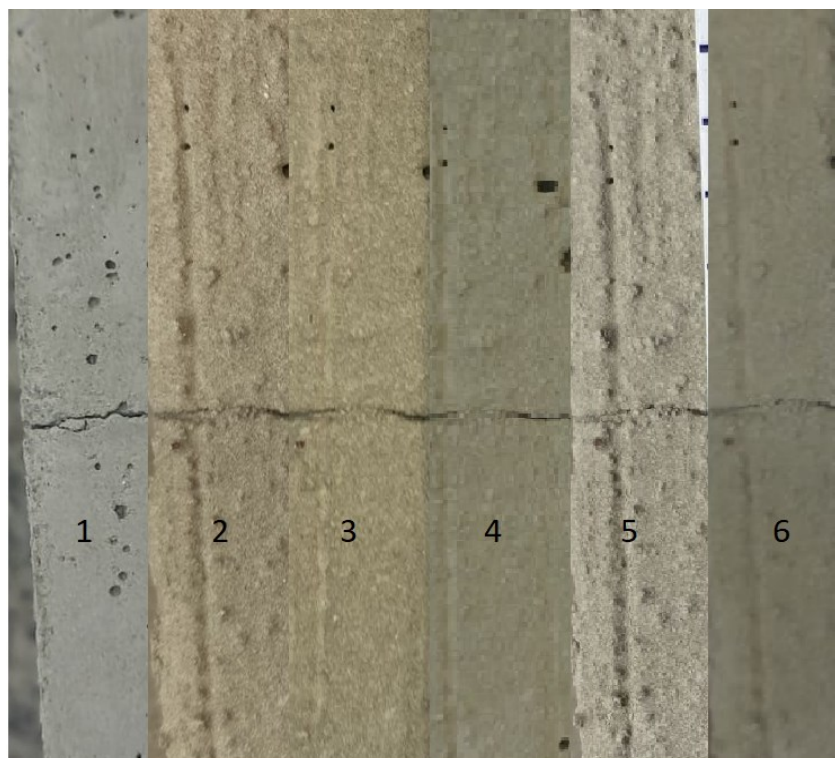
Analisando a Figura 13, que expõe o desenvolvimento da fissura presente no CP 22, sem aditivos, não é possível identificar alterações significativas na fissura ao decorrer das medições. O resultado era esperado pois não há utilização de aditivos e apesar da fissura ser de largura elevada comparada ao restante das amostras, essa não apresentou instabilidade.



Fonte: os autores (2022).

A Figura 14 representa a evolução da fissura presente no CP com aditivo 1, de pintura. É possível notar a cicatrização parcial da fissura ao longo das medições, porém sem atingir o selamento integral. Portanto, é possível concluir que a efetividade do produto é parcialmente comprometida quando esse não permanece saturado.

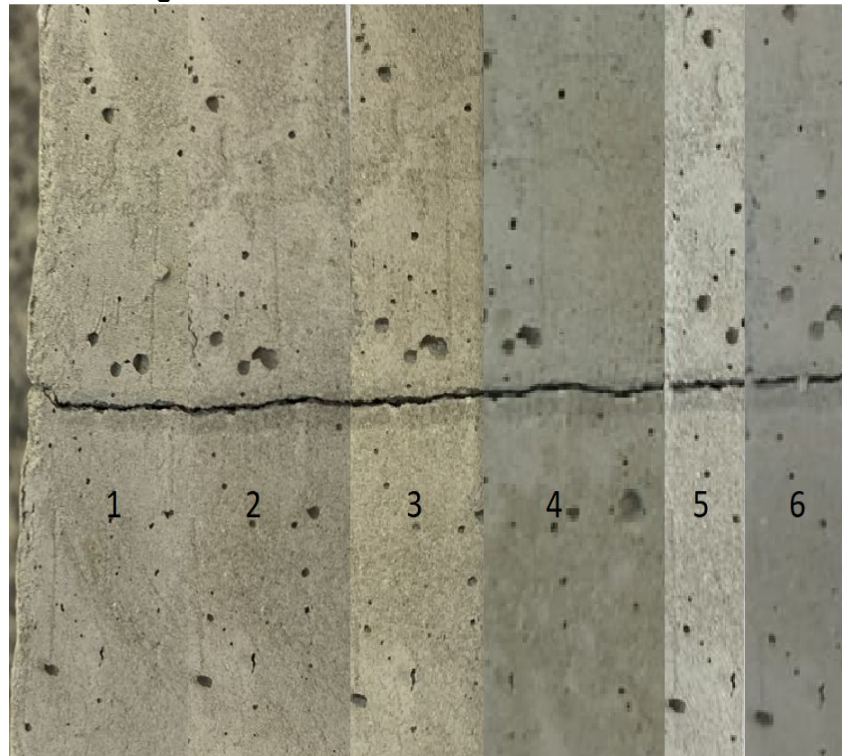
Figura 14 – Desenvolvimento CP com aditivo de pintura.



Fonte: os autores (2022).

A fissura presente no CP mostrado na Figura 15, apresentou instabilidade devido a sua largura, assim como no CP 24, representado na Figura 10. No entanto, foi possível identificar qualquer sinal de cristalização, portanto o produto não teve nem mesmo efetividade parcial nessas circunstâncias.

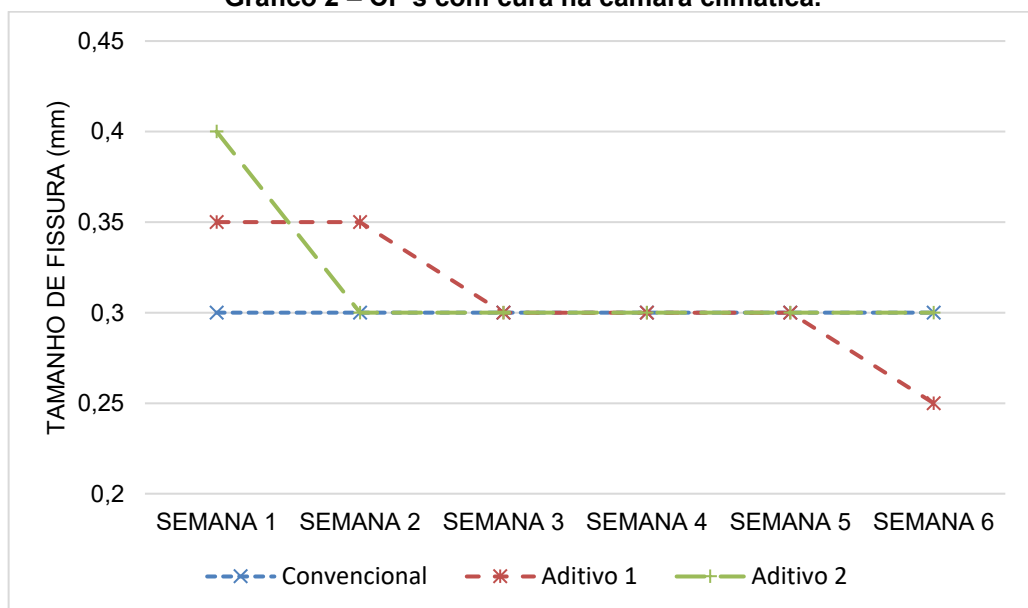
Figura 15 – Desenvolvimento CP com aditivo 2.



Fonte: os autores (2022).

No Gráfico 2 é possível comparar o desenvolvimento da cicatrização das fissuras. O aditivo 1 foi o que mais apresentou eficiência no fechamento parcial das fissuras analisadas.

Gráfico 2 – CP's com cura na câmara climática.



Fonte: os autores (2022).

Analisando o Gráfico 2, é possível concluir que nenhum corpo de prova apresentou fechamento integral das fissuras submetidos a cura na câmara climática. Apenas o CP com aditivo 1 apresentou cicatrização parcial.

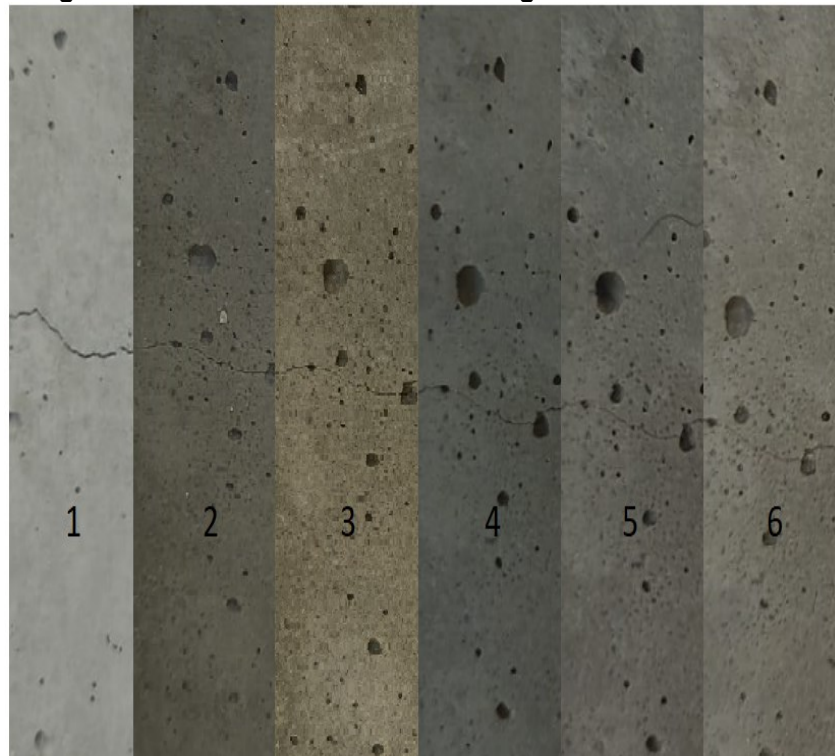
4.1.3 Corpos de prova com cura submersa

Os dados analisados correspondem aos CP's com maior cicatrização que foram submetidos a cura submersa. É possível notar que houve uma redução na largura da fissura nos três corpos de prova, mas apenas o CP com aditivo 1 atingiu o fechamento integral da fissura de 0,4 mm.

A Figura 16 apresenta o desenvolvimento da fissura do CP confeccionado com argamassa convencional sem aditivos. É possível notar que a superfície do CP na primeira medição é diferente das demais, isso se deu devido ao fissurômetro estar tampando essa região na primeira fotografia tirada, no entanto, na primeira medição a fissura possuía 0,2 mm de largura em todo seu comprimento. Por esse motivo, a primeira fotografia da montagem representa uma região logo abaixo da fissura comparado as demais medições.

É possível notar que houve uma diminuição na largura da fissura na segunda medição e como esse corpo de prova não possui agentes autocicatrizantes, o fechamento da fissura pode ser associado a autocicatrização autógena, que ocorre pela hidratação dos grãos de cimento anidros ou precipitação do carbonato de cálcio, ambos na presença de água, corroborando com as afirmações de Blaiszik *et al.* (2010).

Figura 16 – Desenvolvimento CP de argamassa convencional.



Fonte: os autores (2022).

A Figura 17 apresenta o desenvolvimento da fissura do CP composto de argamassa convencional tendo a superfície da fissura submetida a aplicação do aditivo 1 com uso de pincel. É possível notar claramente o fechamento integral da fissura na segunda medição. Pode-se afirmar que o fechamento da fissura se deu pela efetividade do produto, pois nos outros corpos de prova sem aditivos o fechamento das fissuras não alcançou o selamento integral no mesmo período, eliminando a possibilidade da cicatrização autógena. Esse comportamento também foi observado em outros CP's, que sob as mesmas condições de cura e aditivo, tiveram cicatrização completa da fissura.

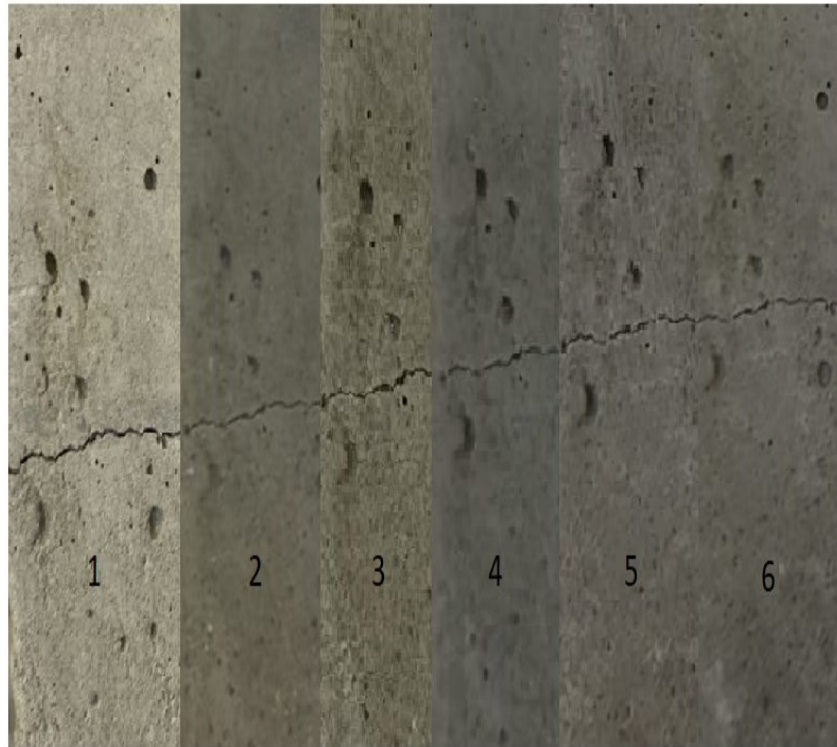
Figura 17 – Desenvolvimento CP com o aditivo de pintura.



Fonte: os autores (2022).

A Figura 18 apresenta o desenvolvimento da fissura presente no CP que contou com a utilização do aditivo 2 misturado na argamassadeira. Analisando as imagens é quase imperceptível a alteração da largura da fissura, que ao longo das 6 medições fechou apenas 0,1 mm. Isso demonstra que o aditivo 2 não atingiu a efetividade apresentada no manual, devendo cicatrizar fissuras de até 0,4 mm. Pequenos fechamentos como esse também foram característicos dos corpos de prova sem aditivo com cura submersa. Isso indica que o fechamento da fissura se deu principalmente por autocicatrização autônoma e não pelo funcionamento adequado do produto aplicado.

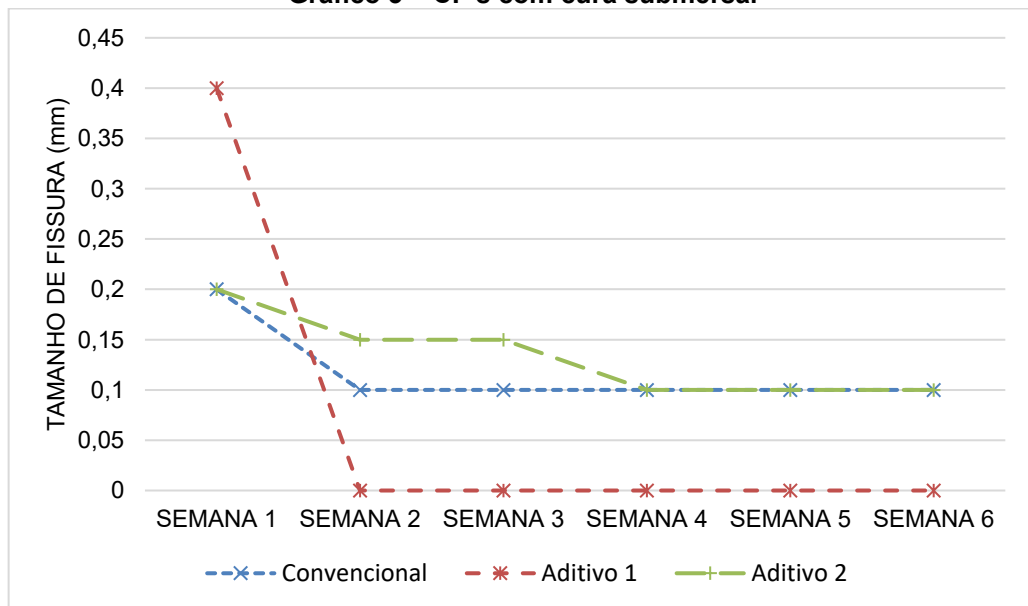
Figura 18 – Desenvolvimento CP com aditivo 2.



Fonte: os autores (2022).

O Gráfico 3 demonstra a comparação entre o desenvolvimento das fissuras dos três corpos de prova discutidos nesse tópico.

Gráfico 3 – CP's com cura submersa.



Fonte: os autores (2022).

Analisando o Gráfico 3, fica evidente que o CP com aditivo 1 foi o único que obteve fechamento integral da fissura. Os outros dois corpos de prova tiveram comportamento similar, com pequenos fechamentos que podem ser associados a autocicatrização autônoma do material.

4.2 Análise de resultados

Em geral, comparado ao método de cura por submersão, a cura realizada na câmara climática proporcionou resultados inferiores no quesito de autocicatrização de fissuras, ocasionando redução máxima de fissura de 0,1 mm em relação a largura de fissura original, com ambos os aditivos. É válido ressaltar que houve interrupções do andamento da programação da câmara climática no período de testes devido aos seguintes fatores: o equipamento acusava erro no painel ocasionalmente (possivelmente devido a variações nas tensões da rede da Universidade), interrompendo o funcionamento e sendo necessário reiniciá-lo; houve dias de queda de energia na Universidade, impedindo o funcionamento adequado por determinados períodos.

A cura por submersão gerou os melhores resultados no quesito fechamento de fissuras, reduzindo fissuras em até 0,4 mm em relação a largura da fissura inicial com o aditivo de pintura, e até 0,15 mm de fechamento em relação a largura da fissura inicial com o aditivo misturado na argamassadeira.

O aditivo 1 atingiu o selamento de fissuras de até 0,4 mm em 3 dos 8 corpos de prova avaliados aos 35 dias utilizando a fração e aplicação recomendada pelo fabricante, com o método de cura submersa, sendo que apenas um dos corpos de prova possuía fissura de 0,4 mm. Os 4 corpos de prova restantes obtiveram selamento parcial das fissuras, sendo de no máximo 0,2 mm em relação a largura original da fissura. Dos 6 corpos de prova com aditivo de pintura submetidos a câmara climática, nenhum obteve fechamento integral das fissuras. Também é válido notar que nos corpos de prova submetidos à cura submersa, a maior porcentagem do fechamento das fissuras ocorreu na primeira semana de cura, indicando a rápida efetividade no funcionamento do produto.

É válido ressaltar que durante a aplicação do aditivo 1 com pincel, nenhum CP teve a fissura tampada no ato, pois houve absorção do produto e a fissura

permaneceu visível. Apenas após uma semana de cura submersa que ocorreu o fechamento integral da fissura em alguns dos CP's, como mostrado na Figura 19,.

Figura 19 – Visibilidade das fissuras após aplicação do aditivo 1.



Fonte: os autores (2022).

O aditivo 2 misturado à argamassa na argamassadeira não atingiu o selamento de fissuras de até 0,4 mm em nenhum dos corpos de prova avaliados aos 35 dias utilizando a fração e aplicação recomendada pelo fabricante independentemente do método de cura. Dentre os corpos de prova submetidos a cura por submersão, o maior fechamento foi de 0,1 mm em relação a largura da fissura original. Dentre os corpos de prova curados na câmara climática, o maior fechamento também foi de 0,1 mm em relação a largura da fissura original.

5 CONCLUSÃO

5.1 Considerações finais

5.1.1 Ensaios e método de avaliação de fissuras

A utilização de fissurômetro foi funcional no sentido de medir a largura das fissuras em cada medição, no entanto, não é tão útil no sentido de medir a evolução da cicatrização. Isso se dá porque a cicatrização das fissuras nem sempre inicia superficialmente e o fissurômetro só possibilita a medição superficial. Além disso, o método de avaliar a evolução das fissuras por medições semanais teve efetividade razoável, pois ao deslocar os corpos de prova até a bancada, dependendo da profundidade da fissura, pode ter ocorrido a danificação dos corpos de prova, atrapalhando ou interrompendo o processo de autocicatrização;

A indução de fissuras por meio da prensa hidráulica cumpriu seu propósito de induzir fissuras majoritariamente entre 0,2 mm e 0,4 mm, no entanto, houve corpos de prova que fissuraram em todas as faces enquanto outros apenas em algumas. Isso fez com que a estabilidade de algumas fissuras fosse baixa, podendo causar novas fissurações durante transporte e manuseio, atrapalhando no processo de autocicatrização.

5.1.2 Variáveis analisadas

Dentre todos os CP's analisados, apenas três atingiram o selamento superficial total das fissuras, sendo que esses passaram por cura submersa e tiveram a aplicação do aditivo 1 na superfície da fissura.

Comparado a cura submersa, a cura na câmara climática se provou inferior no quesito autocicatrização de fissuras, sendo incapaz de realizar o selamento superficial total das fissuras analisadas em condições de temperatura e umidade relativa semelhantes às utilizadas. Com isso, é possível concluir que para a utilização do aditivo 1, é recomendável fazer uma cura úmida ao invés de deixar o concreto ou argamassa exposto apenas ao ambiente. No entanto, não é possível realizar as mesmas conclusões para o aditivo 2, pois o mesmo não atingiu selamento superficial total independentemente da cura.

Por fim, é possível afirmar que a cura úmida, seja essa por submersão ou pela câmara climática se provou essencial para o processo de autocicatrização, sendo que os corpos de prova deixados a temperatura e umidade ambiente, em local fechado, tiveram autocicatrização mínima. Esse requisito é informado pelo fabricante dos dois produtos no manual.

5.1.3 Análise dos objetivos propostos

É possível concluir que nenhum dos produtos cumpre o selamento superficial de fissuras nas condições analisadas após 35 dias da indução das fissuras.

Os produtos não cumprem o fechamento de fissuras especificado pelo fabricante em 11,1% dos 27 CP's com aditivo.

O aditivo 1, aplicado na superfície fissurada com pincel, foi superior ao aditivo 2, pois obteve os melhores resultados no quesito cicatrização de fissuras junto a cura submersa, atingindo a cicatrização superficial completa em apenas 42,9% dos 7 CP's analisados sob as mesmas circunstâncias. Portanto em 57,1% dos casos o aditivo não funcionou como deveria.

O aditivo 2 se provou inferior ao aditivo 1 no quesito cicatrização de fissuras, por ter atingido a cicatrização superficial em 0,0% das amostras. Portanto com a quantidade de produto recomendada no manual do fabricante, o aditivo não cumpriu a cicatrização de fissuras de até 0,4 mm indicada no mesmo manual.

Por fim, foi possível concluir que o processo de cura por submersão foi o único capaz de induzir a cicatrização superficial total de fissuras em 13,0% dos 23 CP's com o mesmo processo de cura, apenas com o aditivo 1.

5.2 Aprendizados

Ao decorrer do desenvolvimento dessa pesquisa, diversos conhecimentos foram sendo adquiridos a respeito dos métodos e materiais utilizados. No entanto, esses foram identificados tardiamente, não sendo possível aplicá-los no trabalho. Portanto, para conhecimento de futuros pesquisadores da área de autocicatrização, tais observações serão compartilhadas a seguir:

- É recomendável estabelecer um equipamento padrão para criar um relatório fotográfico uniforme e preciso, de preferência utilizando um tripé ou suporte

similar para que as fotos possuam a mesma escala. Também é ideal capturar as fotos com iluminação similar ou em horários similares;

- Criar as identificações das faces dos CP's próximo às fissuras, para que a identificação seja aparente no relatório fotográfico, facilitando a organização dos dados;
- Demarcar a qual altura da fissura a análise será analisada, facilitando a localização da mesma parte da fissura para relatório fotográfico. Como essa demarcação não foi feita no atual trabalho, foi necessário recorrer a comparação de fotografias tiradas anteriormente a fim de identificar qual o ponto exato analisado;
- Durante a indução das fissuras na prensa, interromper a carga antes que a fissura se propague ao redor de todo o corpo de prova, evitando que exista instabilidade na fissura;
- Realizar uma limpeza com pistola de ar comprimido ou pincel a fim de desobstruir a fissura de partículas soltas antes da primeira parcela do relatório fotográfico;
- Confeccionar uma quantidade maior de corpos de prova para evitar que imprevistos atrapalhem o decorrer da pesquisa.

5.3 Sugestões para trabalhos futuros

O tópico de autocicatrização em materiais cimentícios é relativamente recente no Brasil, sendo assim, ainda existem diversos tópicos a serem estudados e aprofundados, principalmente no campo de pesquisas brasileiro. Portanto, ficam como sugestões para trabalhos futuros:

- Avaliar a influência dos autocicatrizantes na permeabilidade dos corpos de prova, ou seja, a influência na cicatrização de microfissuras;
- Avaliar se os produtos de autocicatrização tem influência na resistência dos corpos de prova através de ensaios mecânicos de compressão;
- Utilizar métodos de avaliação que permitam analisar a cicatrização da fissura internamente, por exemplo, utilizando ultrassom, entre outros;
- Analisar a superfície das fissuras por meio de microscópio a fim de obter maior precisão na identificação da formação de cristais;

- Utilizar mais de uma temperatura na cura submersa, a fim de avaliar a influência da temperatura da água na capacidade de autocicatrização dos compostos.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PISOS E REVESTIMENTOS DE ALTO DESEMPENHO. **ANAPRE Boletim Técnico 16: A retração do Concreto**. São Paulo, 2009.
- BASHIR J., KATHWARI I., TIWARY A., & SINGH K. **Bio Concrete-The Self-Healing Concrete**. *Indian Journal of Science and Technology*. 2016 Dec 16; 9(47).
- BHASKAR, S. **Self-Healing Bacterial Cementitious Concrete Composites: Development and Performance Evaluation**. PhD Dissertation. Department of Civil Engineering, Ryerson University. Toronto, Ontario, Canada. 2016.
- BLAISZIK, B.J., KRAMER, S.L.B., OLUGEBEFOLA, S.C., MOORE, J.S., SOTTOS, N.R., & WHITE, S.R. **Self-healing polymers and composites**. *Annu. Rev. Mater. Res.* 2010, 40, 179–211.
- CAPPELLESSO, V. G. **Avaliação da autocicatrização de fissuras em concretos com diferentes cimentos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.
- CHUNXIANG, Q.; HUAICHENG, C., LIFU, R.; MIAN, L. **Self-healing of early age cracks in cement-based materials by mineralization of carbonic anhydrase microorganism**. *Frontiers in Microbiology*. 2015.
- DAL MOLIN, D.C. **Fissuras em estruturas de concreto armado**. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1988.
- DOSAGEM DO CONCRETO, 1977, São Paulo-SP. **Anais**. São Paulo: IBRACON, 1977.
- DUARTE, H., BARBOSA, M., & FARIAS, B. **Fissuras em Estruturas de Concreto Armado: Estudo de Caso**. Epitaya E-Books, 2021.
- FERRARA, L., KRELANI, V., MORETTI, F., FLORES, M. R., & ROS, P. S. **Experimental characterization of the self-healing capacity of cement based materials and its effects on the material performance: A state of the art report by COST Action SARCOS WG2**. *Construction and Building Materials*, v. 167, p. 115-142, 2018.
- FIGUEREDO, E. J. P. **Metodologia de avaliação de sistemas epóxi destinados à injeção de fissuras passivas das estruturas de concreto**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Porto Alegre. Porto Alegre, 1989.
- GHOSH, S, K. **Self-Healing Materials: Fundamentals, Design Strategies, and Applications**. Wiley WCH, GmbH, 2009.

GUO, S.; CHIDIAC, S. **Self-healing concrete: a critical review**. *Csce Annual Conference. Laval (Greater Montreal)*. June 12 -15, 2019.

GUPTA; S; KUA, H.W. **Encapsulation technology and techniques in self-healing concrete**. *J. Mater. Civ. Eng.*, 2016, 28(12): 1-15.

HELENE, P. **Manual para Reparo, Reforço e Proteção de Estruturas de Concreto**. São Paulo, 1992.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA DO BRASIL – INMET. **Normais Climatológicas**. (1961/2020). Brasília - DF, 2021.

KHATTAB, I., SHEKHA, H., & ABUKAR ABDI, M. **Study on Self-healing Concrete types – A review**. *Sustainable Structures and Materials, An International Journal*, 2(1), 76-87. 2019.

MARCELLI, M. **Sinistros na construção civil: causas e soluções para danos e prejuízos em obras**. São Paulo, 2007.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. In: HASPARYK, N. P. (Ed). 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2014.

NEVILLE, A. M. **Autogenous healing - A concrete miracle?** *Concr. Int.* 2002, 24, 76–82.

PANNEM, Rama Mohanrao; CHINTALAPUDI, Karthik. **Properties of Bacterial-based Self-healing Concrete- A review**. *International Journal of ChemTech Research*. 9. 182-188. 2019.

QIAN, C.; CHEN, H.; REN, L.; LUO, M. **Self-healing of early age cracks in cement-based materials by mineralization of carbonic anhydrase microorganism**. *Front Microbiol.* 2015.

QURESHI, Tanvir; KANELLOPOULOS, Antonios; AL-TABBAA, Abir. **Autogenous selfhealing of cement with expansive minerals-II: Impact of age and the role of optimised expansive minerals in healing performance**. *Construction and Building Materials*, v. 194, p. 266-275, 2019.

REINHARDT, H., JONKERS, H., VAN TITTELBOOM, K., SNOECK, D., DE BELIE, N., DE MUYNCK, VERSTRAETE, W, WANG, J, & MECHTCHERINE, V. **Recovery against environmental action in self-healing phenomena in cement-based materials**. Dordrecht, 2013.

SISOMPHON, K.; COPUROGLU, O. **Self-healing Mortars by Using Different Cementitious Materials**. Conference: International Conference on Advances in Construction Materials through Science and Engineering. 2011.

TALAIKHOZAN, A., KEYVANFAR, A., SHAFAGHAT, A., ANDALIB, R., MAJID, M., FULAZZAKY, M. A., ZIN R, M., LEE, C. T., HUSSIN, M. W., HAMZAH N., MARWAR N. F., & HAIDAR H. **A review of self-healing concrete research development**. Geórgia, 2014.

THOMAZ, E. **Trincas em edifícios: causas, prevenção e recuperação**. 2. ed. rev. e ampl. São Paulo: Oficina de Textos, 2020.

VAN TITTELBOOM, K.; DE BELIE, N. ***Self-Healing in Cementitious Materials—A Review***. *Materials*, v. 6, n. 6, 2013.

WANG, J. Y.; SOENS, H.; VERSTRAETE, W.; De Belie, N. (2014) Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores. *Cement and Concrete Research* 56 (2014) 139–152.

WU, M., JOHANNESSON, B., & GEIKER, M. ***A Review: Self-Healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material***. *Construction and Building Materials*, 2012.

YANG, Y., LEPECH, M.D., YANG, E.-H., & LI, V.C. ***Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet-dry cycles***. *Cem. Concr. Res.* 2009, 39, 382–390.

ANEXO A – DADOS COLETADOS

DADOS INICIAIS			MEDIÇÕES (mm)					
CP	TIPO	CURA	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4	SEMANA 5	SEMANA 6
9	Convencional	Submersa	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,10
10	Convencional	Submersa	0,15	0,25	0,25	0,25	0,15	0,15
11	Convencional	Submersa	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
12	Convencional	Submersa	0,25	0,25	0,25	0,25	0,20	0,15
13	Convencional	Submersa	0,25	0,25	0,25	0,25	0,20	0,20
14	Convencional	Submersa	0,25	0,25	0,25	0,25	0,20	0,20
15	Convencional	Submersa	0,25	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
16	Convencional	Submersa	0,30	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
17	Convencional	Câmara Climática	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
18	Convencional	Câmara Climática	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
19	Convencional	Câmara Climática	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
20	Convencional	Câmara Climática	0,25	0,30	0,25	0,25	0,25	0,25
21	Convencional	Câmara Climática	0,20	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
22	Convencional	Câmara Climática	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
23	Convencional	Ambiente	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
24	Convencional	Ambiente	0,40	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
32	Aditivo 1	Submersa	0,35	0,10	0,25	0,15	0,05	0,00
33	Aditivo 1	Submersa	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
34	Aditivo 1	Submersa	0,30	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
35	Aditivo 1	Submersa	0,20	0,20	0,20	0,15	0,10	0,05
36	Aditivo 1	Submersa	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
37	Aditivo 1	Submersa	0,25	0,20	0,20	0,15	0,10	0,10
38	Aditivo 1	Submersa	0,20	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
39	Aditivo 1	Câmara Climática	0,20	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
40	Aditivo 1	Câmara Climática	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
41	Aditivo 1	Câmara Climática	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
42	Aditivo 1	Câmara Climática	0,35	0,35	0,30	0,30	0,30	0,25
43	Aditivo 1	Câmara Climática	0,20	0,20	0,20	0,20	0,15	0,15
44	Aditivo 1	Câmara Climática	0,25	0,30	0,30	0,20	0,20	0,15
45	Aditivo 1	Ambiente	0,25	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
54	Aditivo 2	Submersa	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
55	Aditivo 2	Submersa	0,20	0,15	0,10	0,10	0,10	0,10
56	Aditivo 2	Submersa	0,30	0,20	0,25	0,20	0,25	0,20
57	Aditivo 2	Submersa	0,25	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
58	Aditivo 2	Submersa	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
59	Aditivo 2	Submersa	0,20	0,15	0,15	0,15	0,10	0,10
60	Aditivo 2	Submersa	0,20	0,15	0,15	0,10	0,10	0,10
61	Aditivo 2	Submersa	0,20	0,20	0,20	0,15	0,15	0,15
62	Aditivo 2	Câmara Climática	0,40	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
63	Aditivo 2	Câmara Climática	0,40	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
64	Aditivo 2	Câmara Climática	0,30	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25

65	Aditivo 2	Câmara Climática	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
66	Aditivo 2	Câmara Climática	0,25	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
67	Aditivo 2	Câmara Climática	0,20	0,20	0,20	0,20	0,15	0,15
68	Aditivo 2	Ambiente	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
69	Aditivo 2	Ambiente	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15