

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
COMISSÃO DE GRADUAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

Jéssica Ferreira de Freitas San Martin

**AVALIAÇÃO DA AUTOCICATRIZAÇÃO DE CONCRETOS COM ADIÇÃO DE
CRISTALIZANTES: ANÁLISE EM OBRA E EM LABORATÓRIO**

Porto Alegre,
Maio de 2021

JÉSSICA FERREIRA DE FREITAS SAN MARTIN

**AVALIAÇÃO DA AUTOCICATRIZAÇÃO DE CONCRETOS COM ADIÇÃO DE
CRISTALIZANTES: ANÁLISE EM OBRA E EM LABORATÓRIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de
Graduação do Curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos
para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientadora: Angela Borges Masuero
Orientadora: Denise Carpena Coitinho Dal Molin

Porto Alegre,
Maio de 2021

JÉSSICA FERREIRA DE FREITAS SAN MARTIN

**AVALIAÇÃO DA AUTOCICATRIZAÇÃO DE CONCRETOS COM ADIÇÃO DE
CRISTALIZANTES: ANÁLISE EM OBRA E EM LABORATÓRIO**

Este Trabalho de Conclusão foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, maio de 2021

BANCA EXAMINADORA

Profa. Angela Borges Masuero (UFRGS)

Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil
Orientadora

Profa. Denise Carpena Coitinho Dal Molin (UFRGS)

Dra. pela Universidade de São Paulo, Brasil
Orientadora

Vanessa Giaretton Cappelleso (UGent/Bélgica)

Ms. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Fernanda Pacheco (Unisinos)

Dra. pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Brasil

Josué Augusto Arndt

Ms. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Dedico este trabalho à minha família, Eliseu, Marlene e
Lislene, e ao Felipe, pelo carinho e apoio.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer em especial às minhas orientadoras Angela Masuero e Denise Dal Molin, que são fonte de inspiração, de orientação e de motivação muito antes da realização deste trabalho. Obrigada por toda disponibilidade e paciência, é um imenso orgulho ter sido orientada por vocês.

Ao grupo de pesquisa em autocicatrização do NORIE, no qual fui bolsista de iniciação científica, Vanessa, Deividi, Natália e Josué, o empenho de vocês me inspirou e fez com que eu me apaixonasse pelo assunto. Um agradecimento em especial ao Deividi, que foi de extrema importância para realização deste trabalho sempre me orientando e ajudando quando necessário.

Aos técnicos do laboratório, Airton e Ari, pelo apoio e auxílio durante a realização dos experimentos, além das conversas descontraídas ajudando a aliviar os momentos de tensão.

Ao Núcleo Orientado para Inovação da Edificação (NORIE) por disponibilizar o Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído (LAMTAC) para a realização deste trabalho.

À empresa Engenhosul, por ter permitido a realização desse trabalho em uma de suas obras, garantindo acesso sempre que necessário para a realização dos ensaios.

Aos meus pais, Marlene e Eliseu, sem vocês não seria o que sou hoje, obrigada pela educação e por sempre me mostrarem a importância do estudo. À minha irmã Lislene e à minha vó Eny pela torcida, incentivo e apoio constante.

Ao Felipe, meu marido, meu melhor amigo, obrigada pelo apoio incessante, por ouvir meus desabafos e lamentos sempre e continuar me incentivando durante toda essa caminhada. Se não fosse teu apoio talvez eu não tivesse chegado até aqui. Obrigada.

Aos colegas e amigos que conheci durante esses anos de graduação, obrigada pela companhia e parceria. A UFRGS não seria a mesma sem vocês.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplificação dos esforços provenientes do nível d'água na estrutura.....	12
Figura 2 - Exemplos de falhas nos procedimentos de concretagem evidenciando (a) a falta de concreto e (b) a exposição de armadura	12
Figura 3 - Configuração dos solos da edificação	15
Figura 4 - Tratamento de junta de concretagem com uso de fita hidroexpansiva.....	15
Figura 5 - Composição granulométrica dos agregados	17
Figura 6 - Esquema representativo do programa experimental.....	18
Figura 7 - Processo de fatiamento (a) e (b) e de abertura de fissuras das amostras (c).....	20
Figura 8 - Representação esquemática em formato de linha do tempo de todo processo sofrido pelas amostras.....	20
Figura 9 - Representação dos ambientes analisados, onde (a) submerso sem renovação de água, (b) ambiente natural, (c) submerso com renovação constante de água e (d) ciclo	21
Figura 10 - Exemplificação das posições de leitura de onda ultrassônica realizadas.....	23
Figura 11 - Utilização de fissurômetro para identificar espessura das fissuras, onde (a) apresenta uma fissura mais fina e (b) uma fissura com maior espessura	22
Figura 12 - Representação gráfica da demarcação das zonas analisadas	22
Figura 13 - Autocicatrização de fissuras presentes no subsolo 2, onde (a) mostra a fissura no primeiro dia de acompanhamento e (b) mostra a fissura 4 meses após o início do acompanhamento	27
Figura 14 - Autocicatrização das fissuras encontradas no subsolo 1	29
Figura 15 - Corpos de prova expostos ao ambiente ciclo, onde (a) mostra o corpo de prova 1 comparando as leituras inicial e final e (b) mostra o corpo de prova 4 comparando as leituras inicial e final	30
Figura 16 – Corpos de prova expostos ao ambiente natural, onde (a) mostra o corpo de prova 3 comparando as leituras inicial e final e (b) mostra o corpo de prova 5 comparando as leituras inicial e final	31
Figura 17 - Corpos de prova expostos ao ambiente submerso sem renovação, onde (a) mostra o corpo de prova 3 comparando as leituras inicial e final e (b) mostra o corpo de prova 4 comparando as leituras inicial e final	32
Figura 18 - Corpos de prova expostos ao ambiente submerso com renovação constante de água, onde (a) mostra o corpo de prova 1 comparando as leituras inicial e final e (b) mostra o corpo de prova 2 comparando as leituras inicial e final	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ensaio químicos do Cimento Portland CP IV - 32 RS	16
Tabela 2 - Ensaio físicos e mecânicos do Cimento Portland CP IV - 32 RS.....	16
Tabela 3 - Caracterização dos agregados utilizados	17
Tabela 4 - Traço de concreto utilizado na estrutura estudada	19
Tabela 5 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação das resistências à compressão axial	24
Tabela 6 - Total de fissuras encontradas por espessura.....	25
Tabela 7 - Análise de fechamento de fissuras no Subsolo 1	25
Tabela 8 - Análise de fechamento de fissuras no Subsolo 2	26
Tabela 9 - Porcentagem de fechamento de fissuras por ambiente (a) ciclo, (b) natural (c) submerso sem renovação e (d) submerso com renovação	35
Tabela 10 - Taxa de autocatrização (TA) e Percentual de recuperação (RA) por ambiente de exposição	36

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. Objetivo	14
1.2. Edificação estudada	14
2. MATERIAIS E MÉTODOS	15
2.1. Materiais	15
2.1.1. <i>Cimento Portland</i>	15
2.1.2. <i>Agregados</i>	16
2.1.3. <i>Fibras de polipropileno aditivado</i>	17
2.1.4. <i>Aditivos</i>	17
2.2. Métodos	18
2.2.1. <i>Traço de concreto e moldagem dos corpos de prova</i>	18
2.2.2. <i>Ensaio de resistência à compressão axial</i>	19
2.2.3. <i>Preparação dos corpos de prova para os ensaios de aut cicatrização</i>	19
2.2.4. <i>Condições de cura</i>	20
2.2.5. <i>Quantificação e análise de fissuras encontradas em obra</i>	21
2.2.6. <i>Microscopia ótica</i>	22
2.2.7. <i>Ensaio de propagação de onda ultrassônica para acompanhamento da aut cicatrização</i>	23
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	24
3.1. Resistência à compressão axial	24
3.2. Levantamento de fissuras encontradas em obra	25
3.3. Microscopia ótica	26
3.3.1. <i>Microscopia realizada em obra</i>	27
3.3.2. <i>Microscopia realizada em laboratório</i>	30
3.4. Propagação de onda ultrassônica	36
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	36
REFERÊNCIAS	37

AVALIAÇÃO DA AUTOCICATRIZAÇÃO DE CONCRETOS COM ADIÇÃO DE CRISTALIZANTES: ANÁLISE EM OBRA E EM LABORATÓRIO

RESUMO

Sabe-se que a água pode ser um dos grandes causadores de manifestações patológicas no concreto armado. Em subsolos, sua ação pode ser aliada à sua alta pressão, e se somada ao aparecimento de fissuras podem ocorrer problemas de infiltração. Uma maneira amplamente estudada para mitigar esse problema é a chamada autocicatrização do concreto, definida como a capacidade de um material se recuperar, sem intervenção externa, de danos na sua estrutura. As soluções mais utilizadas em subsolos são lajes de subpressão e cortinas de concreto armado com adição de cristalizantes/impermeabilizantes. Essa adição visa potencializar o processo de autocicatrização e reduzir a permeabilidade do material. Este trabalho busca avaliar a autocicatrização de fissuras em um mesmo traço de concreto com adição de cristalizantes, tanto em estrutura real (fissuras presentes em cortinas de concreto armado, no subsolo da edificação estudada), como em ensaios de laboratório. Além de avaliar a influência de quatro diferentes ambientes de exposição (ambiente natural, ciclos de molhagem/secagem, submersas com e sem renovação) na capacidade de autocicatrização do concreto, e verificar se existe correlação entre algum dos ambientes simulados e o ambiente real de exposição. Para tanto, foram moldados corpos de prova cilíndricos (100x200)mm para análise da resistência à compressão e para análise da autocicatrização em laboratório, conforme NBR 5738 (ABNT, 2016). Em laboratório, as amostras foram serradas em fatias de dimensões 100x50mm, fissuradas e submetidas aos ambientes de exposição. Foram realizados ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica, conforme NBR 12142 (ABNT, 2010) e análise de imagem por microscopia ótica nas amostras fissuradas, no dia da fissuração e após 6 meses. Em obra, foi realizado levantamento de fissuras presentes nas cortinas de concreto armado e, posteriormente, leitura através de microscopia ótica no primeiro dia de análise e após 4 meses. Em laboratório, as amostras que permaneceram em ambiente submerso, com ou sem renovação de água, apresentaram os melhores resultados quanto ao percentual de fechamento (85%), seguidas pelas que passaram por ciclos (61%) e as expostas ao ambiente natural (50%). Em obra, a estrutura presente no subsolo 2 apresentou maior número de fissuras e melhor índice de fechamento, em relação ao subsolo 1. As espessuras encontradas estão dentro da faixa de 0,10 a 0,40mm, e o maior percentual de fechamento foi percebido nas que apresentam menor dimensão. O ensaio de propagação de onda ultrassônica aponta que as amostras expostas aos ciclos de molhagem/secagem apresentam maior percentual de recuperação, o que pode indicar uma maior recuperação interna. Por fim, foi possível visualizar o fenômeno de autocicatrização em concreto com adição de cristalizantes e confirmar a necessidade da presença de água para a ativação do mecanismo. Ao comparar as análises em laboratório e em ambiente real, observou-se que os resultados encontrados para o subsolo 2 se assemelham aos encontrados para as amostras submersas, visto que a autocicatrização foi melhor percebida nessas situações. Já o subsolo 1 apresenta resultados que podem ser comparados aos das amostras expostas ao ambiente natural, nas duas situações a autocicatrização não pôde ser visualizada de forma satisfatória.

Palavras-chave: autocicatrização, concreto, fissuras, aditivos cristalizantes.

ABSTRACT

It is known that water could be a major cause of pathological manifestations in reinforced concrete. When at underground levels, its action can be combined with its high pressure and if added to the appearance of cracks, serious infiltration problems can occur. A widely studied solution to mitigate this problem is the concrete self-healing, which can be defined as the ability of a material to recover, without external intervention, from a damage to its structure. For underground levels, the most used solutions are the anti-flotation slabs and reinforced concrete walls with the use of crystalline admixtures. Adding those admixtures to the cement matrix potentializes the self-healing process and reduces the material permeability. This study aims to evaluate the self-healing process in concrete samples with the addition of crystalline admixtures on construction site (crackings found in reinforced concrete walls, located at underground level) and on laboratorial samples. It also aims to evaluate the influence of four types of environmental exposure (natural environment, wet/dry cycles, submerged with and without water renewal) on the self-healing capacity and to check if there is a correlation between any of the laboratorial simulated environments and the real construction environment related to the self-healing capacities of the concrete. Cylindric test samples (100x200)mm were molded on laboratory to analyze the compressive strength and the self-healing capacity, according to NBR 5738 (ABNT, 2016). To evaluate the self-healing capacity, the specimens were sliced into 100x50mm slices, cracked and sent to each analysis environment. The cracked samples were subjected to the following tests at the cracking day and 6 months later: ultrasonic pulse propagation test, according to NBR 12142 (ABNT, 2010) and optical microscopy image analysis. At the construction site, a search was made to find and catalogue the cracks in the reinforced concrete walls. Afterwards, a optical microscopy was conducted at the first day of analysis and 4 months later for each of the registered cracks. In the laboratory, samples that remained in a submerged environment, with or without water renewal, showed the best results in terms of percentage of closure (85%), followed by those exposed to the cycles environment (61%) and those exposed to natural environment (50%). In the construction site, the reinforced concrete walls present in the underground level 2 showed a greater number of cracks and the most effective closure index, compared to the underground level 1. The thickness of the studied cracks were between 0,10 and 0,40mm and it was possible to see that those with less thickness obtained a higher percentage of closure. The ultrasonic pulse propagation test shows that samples that showed the highest percentage of recovery were those that was exposed to wetting/drying cycles, which may indicate greater internal recovery of the samples. After the final tests it was possible to verify the self-healing phenomena in concrete with crystalline admixtures and to confirm how important is the presence of water for the activation of the mechanism. When comparing laboratorial samples and construction site analysis it was possible to see that the results found for the underground level 2 are similar to those found for the submerged samples since self-healing showed greater results in these situations. Subsoil 1, on the other hand, presents results that can be compared to those of samples exposed to the natural environment, in both situations the self-healing could not be viewed satisfactorily.

Keywords: self-healing, concrete, cracking, crystalline admixtures.

1. INTRODUÇÃO

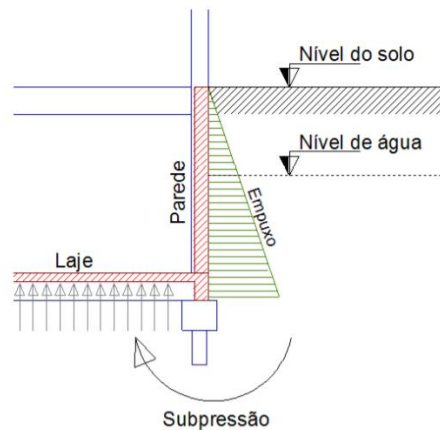
Materiais cimentícios foram amplamente empregados ao longo da história, gerando uma crescente dependência para a qualidade de vida humana. Por ser o material base da construção civil, o cimento apresenta um aumento mundial crescente de consumo ao longo dos anos. Segundo dados do United States Geological Survey (USGS, 2020), o volume estimado de produção mundial do cimento em 2020 foi de 4,10 bilhões de toneladas, enquanto em 1995 a produção global era de aproximadamente 1,39 bilhões de toneladas, totalizando em um aumento de mais de 200% em 25 anos. Para Mehta e Monteiro (2014), uma possível explicação para esse alto consumo seria pelas características encontradas no concreto: preço baixo e fácil acesso aos materiais constituintes, facilidade em moldar diferentes formas com tamanhos distintos, além de possuir uma excelente resistência à água.

No Brasil, ao longo dos anos houve uma mudança na forma de se construir, gerada, principalmente, pelo processo de racionalização e industrialização da construção. As estruturas estão cada vez mais arrojadas e o concreto atingindo resistências mais altas (MEDEIROS, 2005). Além disso, há um progressivo crescimento de demanda no ramo construtivo, ocasionando o aumento de competitividade entre as empresas construtoras. Cada vez mais faz-se necessário que o ramo da construção civil se desenvolva, de forma a atender as necessidades de um novo tipo de consumidor. A densidade populacional vem crescendo consideravelmente, e como consequência, terrenos menos propícios para a construção civil são cada vez mais utilizados. Quando há nível de lençol freático elevado no terreno, a construção de subsolos pode se tornar um grande desafio.

Sabe-se que a água pode ser um dos grandes causadores de manifestações patológicas no concreto armado, podendo comprometer a sua durabilidade. No caso de subsolos, o concreto pode sofrer a ação da água aliada à sua alta pressão, causando um ambiente ainda mais desfavorável para a estrutura. Diante disso, é necessário que se desenvolvam soluções cada vez mais eficientes para a impermeabilização desses elementos. Hoje, são conhecidas duas maneiras de evitar a entrada de água em pavimentos enterrados: a primeira se trata da utilização de sistemas de drenagem permanente, onde bombas são responsáveis por coletar e descartar a água do subsolo na rede pluvial; a segunda é a utilização de concretos com aditivos cristalizantes/impermeabilizantes para garantir a estanqueidade da estrutura. Esta última solução se apresenta como mais econômica e de menor impacto ambiental, já que na primeira será necessário um elevado gasto energético para que as bombas permaneçam em constante funcionamento, além de modificar o ambiente que não terá mais a presença do lençol freático no nível original (CORTOPASSI; OURIVES, 2017).

As chamadas lajes de subpressão e cortinas de concreto armado, com a utilização de aditivos cristalizantes/impermeabilizantes, mostram-se então como a melhor opção para ambientes enterrados e com alto nível de lençol freático. Estes elementos podem ser definidos como estrutura em contato direto com o solo e sujeitos à pressão hidrostática, ou seja, o empuxo da água em repouso gera um carregamento sobre a estrutura, sendo empuxo ascendente no caso das lajes de subpressão (CORTOPASSI; OURIVES, 2017). A Figura 1 exemplifica como atuam esses esforços na estrutura.

Figura 1 - Exemplificação dos esforços provenientes do nível d'água na estrutura



Fonte: TEIXEIRA (2020).

Segundo Mehta e Monteiro (2014), a taxa de deterioração causada pela água é ampliada pela facilidade que ocorre a sua penetração no material, por isso são necessárias medidas para garantir a estanqueidade da estrutura. O concreto por si só pode apresentar baixa permeabilidade, promovendo uma barreira eficiente contra a penetração de água. Cappellesso (2016) aponta que para reduzir a permeabilidade do concreto é necessário que se reduza a sua porosidade, seja por meio de diminuição da relação água/cimento, ou pela utilização de pozolonas, produtos hidrofugantes ou impermeabilizantes na mistura, dentre outras opções. Diante disso, deve-se realizar um estudo detalhado de qual traço de concreto deve ser empregado e quais adições deverão fazer parte de sua composição.

Entretanto, mesmo com uma especificação adequada de concreto, caso os procedimentos construtivos não estejam de acordo com o conjunto de técnicas de boas práticas da construção, podem ocorrer problemas como ninhos de concretagem, juntas defeituosas e problemas de adensamento, tornando-se caminhos facilitados para a infiltração da água (Figura 2). Para que a estrutura se torne estanque é necessário que se considere pelo menos dois aspectos: o primeiro está relacionado ao concreto, que deve possuir a resistência requerida, ser homogêneo e possuir baixa permeabilidade; já o segundo é relativo aos cuidados durante os procedimentos, sempre devem ser seguidas as boas práticas de construção para que se obtenha uma estrutura final estanque. (BRIETZ, 2014)

Figura 2 - Exemplos de falhas nos procedimentos de concretagem evidenciando (a) a falta de concreto e (b) a exposição de armadura



(a)



(b)

Fonte: Própria autora (2020).

Além das falhas que podem ocorrer durante o processo de execução das estruturas de concreto, outro meio usual de acesso de umidade e de agentes causadores de manifestações patológicas é através de fissuras que podem surgir logo após o lançamento do concreto e/ou durante a sua vida útil. Segundo Dal Molin (1988), as fissuras são parte integrante e inerente do concreto armado e mesmo tomando todas as medidas preventivas, nem sempre é possível evitar completamente o aparecimento destas. Ainda segundo a autora, um concreto fissurado tende a sofrer penetração mais rápida de agentes agressivos em direção às armaduras, quando comparado a um concreto sem falhas. Portanto, é importante o estudo de novas tecnologias para que quando ocorra o aparecimento de fissuras, o seu fechamento aconteça de forma rápida.

Embora existam diversas técnicas para a recuperação das fissuras, a maior parte delas exige a intervenção de mão de obra especializada e produtos muitas vezes onerosos. Uma forma alternativa para o fechamento de fissuras, que vem sendo amplamente estudada nos últimos anos e tem apresentado resultados satisfatórios, é a chamada autocicatrização do concreto. Segundo Ghosh (2009), a autocicatrização pode ser definida como a capacidade de um material se recuperar automaticamente e autonomamente de danos causados à sua estrutura, sem que ocorra nenhuma intervenção externa. A União Internacional de Laboratórios e Peritos em Construção Civil (RILEM), fundada em 1947, divide o processo de autocicatrização em dois grandes grupos: cicatrização autógena e cicatrização autônoma.

A cicatrização autônoma caracteriza-se pela adição de agentes químicos ou biológicos na matriz cimentícia, que tem como finalidade o auto reparo. Esses agentes podem ser utilizados de forma encapsulada ou através de sistemas vasculares e devem ser liberados quando há a ocorrência de fissuras, iniciando-se então a reação que promoverá a cicatrização da matriz cimentícia. Comumente são utilizadas microcápsulas com bactérias ou polímeros e fibras com agentes adesivos, que ao entrarem em contato com calor, ar ou água começam a reação de cicatrização (DE ROOIJ et al., 2013; TANG et al. 2015).

A cicatrização autógena é uma capacidade inata dos materiais cimentícios, e se caracteriza pela dispersão contínua de compostos com propriedades de autocicatrização intrínsecos à matriz cimentícia, como os grãos não hidratados de cimento. Com a passagem de água pelas microfissuras presentes, pode ocorrer a hidratação das partículas de cimento anidro dispersas, gerando a colmatação dessas microfissuras, caracterizando a autocicatrização da matriz. Além disso, pode ocorrer também a lixiviação do hidróxido de cálcio que, posteriormente, precipita na forma de carbonato de cálcio, selando assim a fissura. (DE ROOIJ et al., 2013; YANG et al., 2011; VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013).

A utilização de aditivos cristalizantes na mistura de concreto foi considerada como cicatrização autônoma durante muito tempo, por se tratar de uma adição. Entretanto, na recente revisão feita por De Belie et al. (2018) é apresentado como processo de autocicatrização autógena estimulado, juntamente com as adições minerais e polímeros superabsorventes, já que sua presença aprimora o processo natural de cicatrização.

Os aditivos cristalizantes são produtos comerciais e tem como objetivos potencializar a autocicatrização e reduzir a permeabilidade do material. São produtos de fácil aquisição, implementação e aplicação, porém possuem custos iniciais elevados quando comparados aos dos materiais tradicionais. Entretanto, sua utilização gera redução nos custos de inspeção, manutenção e reparo, além de permitir uma vida útil mais longa da estrutura. Ainda, possui uma limitação quanto ao seu desempenho no selamento de fissuras, segundo os fabricantes este material consegue promover o fechamento de fissuras com até 400µm. (OLIVEIRA, 2019; ACI, 2010; BREUGEL, 2012).

Embora existam alguns trabalhos que abordam o uso de aditivos cristalizantes em concretos (ARNDT, 2019; ZIEGLER et al., 2020; CUENCA et al., 2018; ROING-FLORES et al., 2016; entre outros), não foram localizadas na bibliografia pesquisas que avaliam o comportamento

em estruturas reais e correlacionam este comportamento com ensaios controlados realizados em laboratório sob diferentes condições de exposição ao longo do tempo.

1.1. Objetivo

Este trabalho tem como objetivo principal a avaliação da autocicatrização de fissuras em um mesmo traço de concreto com adição de produtos cristalizantes, tanto em estrutura real (fissuras presentes em cortinas de concreto armado, localizadas no subsolo da edificação estudada), como em ensaios de laboratório. As espessuras das fissuras analisadas foram estabelecidas entre 0,10 e 0,40mm.

Também busca-se avaliar a influência de quatro diferentes ambientes de exposição (simulados no programa experimental) na capacidade de autocicatrização do concreto, além de verificar se existe correlação entre algum dos ambientes simulados em laboratório e o ambiente real de exposição na capacidade de autocicatrização (velocidade de autocicatrização e % da fissura recuperada).

Neste trabalho foram avaliados apenas o fechamento das fissuras e a presença de água no ambiente. No entanto, a estrutura real de obra analisa pode estar sujeita ao ataque de sulfatos, devido à agressividade do ambiente em que se encontra.

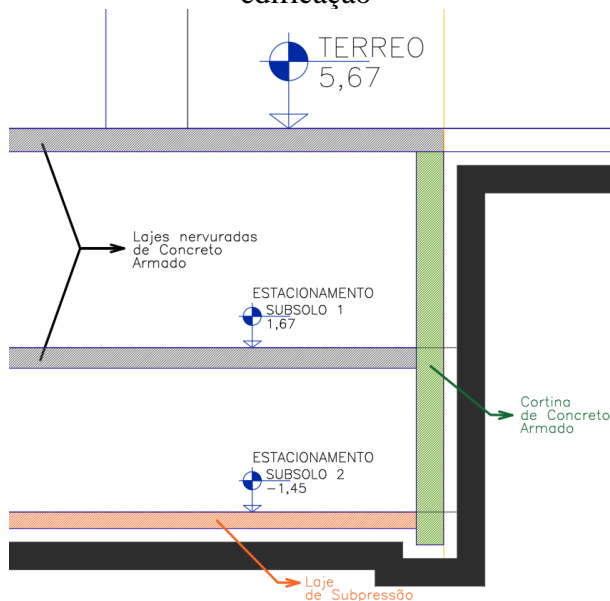
1.2. Edificação estudada

A edificação estudada possui área construída em torno de 115.000 m² e é composta por salas comerciais, hotel e shopping. É constituída por dois subsolos (estacionamentos), uma base com lajes de cerca de 20.000 m² até o 4º pavimento e uma torre ao centro com 23 pavimentos. A construção se localiza próxima à beira do lago Guaíba em Porto Alegre-RS, sendo o nível de lençol freático bem elevado, já que o corpo d'água encontra-se 4 metros acima do nível do mar (MENEGAT et al., 2006). O pavimento térreo da edificação está situado no nível 5,67m, o subsolo 1 está em 1,67m e o subsolo 2 em -1,45m.

Antes da execução das primeiras escavações no terreno, foi realizada uma parede diafragma de retenção e controle do fluxo das águas subterrâneas, composta por cortinas de estaca-prancha cravadas da superfície até atingir o impenetrável. Diante disso, foi possível a execução de toda parte enterrada da edificação. Após a construção da etapa abaixo do solo estar completa, retiraram-se as estacas-prancha, permitindo que o nível d'água voltasse ao seu estado natural, causando pressão em torno da estrutura.

A estrutura dos subsolos foi alvo de estudo de projeto especial para que apresentasse propriedades de estanqueidade, indicando o uso de aditivo cristalizante no traço do concreto. Para o subsolo 2 foi projetada laje de subpressão, e para ambos os subsolos foram especificadas cortinas de concreto armado por toda a extensão exterior da edificação. Esta configuração é mostrada na Figura 3. Por se tratar de edificação com grande extensão de área (20.000 m²), a planta baixa foi dividida em setores e as concretagens de cada um deles aconteceu em diferentes datas, de maneira a atender o cronograma da obra. Diante disso, para que não ocorresse penetração de umidade nas juntas de concretagem dessas estruturas, uma camada de primer à base de emulsão acrílica foi aplicada e, posteriormente, duas fitas hidroexpansivas foram fixadas (Figura 4).

Figura 3 - Configuração dos subsolos da edificação



Fonte: Própria autora (2021)

Figura 4 - Tratamento de junta de concretagem com uso de fita hidroexpansiva



Fonte: Própria autora (2020)

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

Neste estudo foi utilizado concreto de traço proposto pelo projetista, com previsão de resistência característica à compressão de 40 MPa aos 28 dias, sendo composto por cimento Portland pozolânico resistente a sulfatos (CPIV-32 RS), areia quartzosa, brita basáltica, fibra de polipropileno aditivado, aditivo impermeabilizante por cristalização, aditivo plastificante polifuncional e aditivo superplastificante, descritos a seguir.

2.1.1. Cimento Portland

O material aglomerante utilizado foi o cimento Portland pozolânico resistente a sulfato (CPIV-32 RS).

O cimento CP IV é caracterizado por ter em sua constituição até 50% de adições pozolânicas (em massa), que não possuem propriedades cimentícias quando usadas de maneira isolada, mas quando na presença de umidade e do hidróxido de cálcio, reagem e formam compostos com essas propriedades. Esse cimento possui ganho de resistência de forma lenta, chegando a resultados maiores ao alcançar idades superiores (NEVILLE, 2010; NBR 5736, 2016). Quando resistentes a sulfatos, os cimentos contêm propriedades para resistir a ambientes mais agressivos e devem atender aos requisitos físicos, químicos e mecânicos estabelecidos na norma NBR 16697 (ABNT, 2018).

Por se tratar de concreto usinado, os resultados dos ensaios químicos, físicos e mecânicos foram fornecidos pela central de concreto, assim como a massa específica do material. Foram realizados os ensaios em diferentes datas dentro do mesmo lote. Os resultados dos ensaios químicos são apresentados na Tabela 1, já os dos ensaios físicos e mecânicos na Tabela 2. A massa específica calculada e fornecida pelo fornecedor é 2,77 g/cm³.

Tabela 1 - Ensaio químicos do Cimento Portland CP IV - 32 RS

Ensaio químicos						
	Constituintes	Média	Desvio Padrão	Valor Mínimo	Valor máximo	Limite Normativo (NBR 16697:2018)
Teor (%)	Perda ao fogo	4,1	0,5	3,5	4,4	≤ 6,5
	Óxido de Magnésio (MgO)	4,4	0,2	4,2	4,5	N/E
	Oxido Sulfúrico (SO ₃)	1,9	0,1	1,9	2,0	≤ 4,5
	Resíduo Insolúvel (RI)	27,3	0,2	27,2	27,5	N/E

Fonte: Usina de concreto (2020).

Tabela 2 - Ensaio físicos e mecânicos do Cimento Portland CP IV - 32 RS

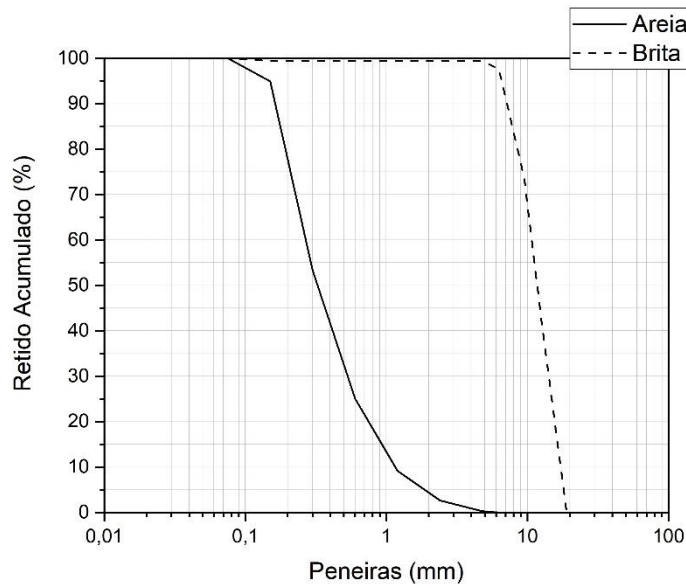
Ensaio físicos e mecânicos						
Características e propriedades		Média	Desvio Padrão	Valor Mínimo	Valor máximo	Limite Normativo (NBR 16697:2018)
Finura (%)	#200	0,2	0,1	0,2	0,3	≤ 8,0
	#325	5,6	0,3	5,4	5,9	N/E
Blaine (cm ² /g)		4540,0	98,5	4460,0	4650,0	N/E
Água de consistência (%)		29,4	0,4	29,0	29,8	N/E
Tempo de Pega	Início (min)	230,0	20,0	210,0	250,0	≥ 60
	Fim (min)	253,3	11,5	240,0	260,0	≤ 720
Expansibilidade a quente (mm)		0,0	0,0	0,0	0,0	≤ 5,0
Resistência à Compressão (MPa)	1 dia	12,9	0,1	12,8	13,0	N/E
	3 dias	22,3	0,4	22,0	22,8	≥ 10,0
	7 dias	26,5	0,7	25,9	27,2	≥ 20,0
	28 dias	39,3	0,3	39,0	39,6	≥ 32,0 e ≤ 49,0

Fonte: Usina de Concreto (2020).

2.1.2. Agregados

Como agregados miúdos foram utilizadas areias quartzosas fina e média. A primeira é proveniente de cava, já a segunda de leito de rio. Os agregados graúdos utilizados foram britas 0 e 1 de origem basáltica. Todos os ensaios de caracterização foram realizados pelo fornecedor do concreto usinado, de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009). A Figura 5 apresenta a curva granulométrica dos agregados utilizados, as areias fina e média foram representadas na mesma curva, assim como as britas 0 e 1. Também foram informados o módulo de finura e o diâmetro máximo de cada agregado utilizado (Tabela 3).

Figura 5 - Composição granulométrica dos agregados



Fonte: Usina de Concreto (2020).

Tabela 3 - Caracterização dos agregados utilizados

	Areia média	Areia fina	Brita 1	Brita 0
Módulo de Finura	2,61	1,04	6,96	6,42
D. máx (mm)	4,8	0,6	19	12,5

Fonte: Usina de Concreto (2020).

2.1.3. Fibras de polipropileno aditivado

No traço de concreto foram utilizadas fibras de polipropileno aditivado com comprimento de 12 mm. Segundo o fabricante, a sua composição parte de finos filamentos que são obtidos através de extrusão, passando por tratamento superficial para melhor dispersão em concreto. Ainda segundo o fornecedor, suas principais funções são a diminuição de fissuras por retração plástica e por assentamento, o controle da exsudação e da segregação do concreto, e o aumento da resistência ao fogo e do desgaste quando em estado endurecido. Segundo Homma et al. (2009), algumas fibras podem atuar como espaços de nucleação para a precipitação de produtos da cicatrização, contribuindo assim para este fenômeno.

O fabricante fornece algumas propriedades físicas como densidade relativa de 0,91, deformação na ruptura de 25%, ponto de fusão de 160°C e ponto de ignição de 365°C.

2.1.4. Aditivos

Foram utilizados três tipos diferentes de aditivos: impermeabilizante por cristalização, plastificante polifuncional e superplastificante.

O aditivo impermeabilizante por cristalização é constituído por cimento Portland, compostos químicos ativos e rastreador químico e tem como finalidade selar fissuras e poros do concreto contra a penetração de água e agentes agressivos.

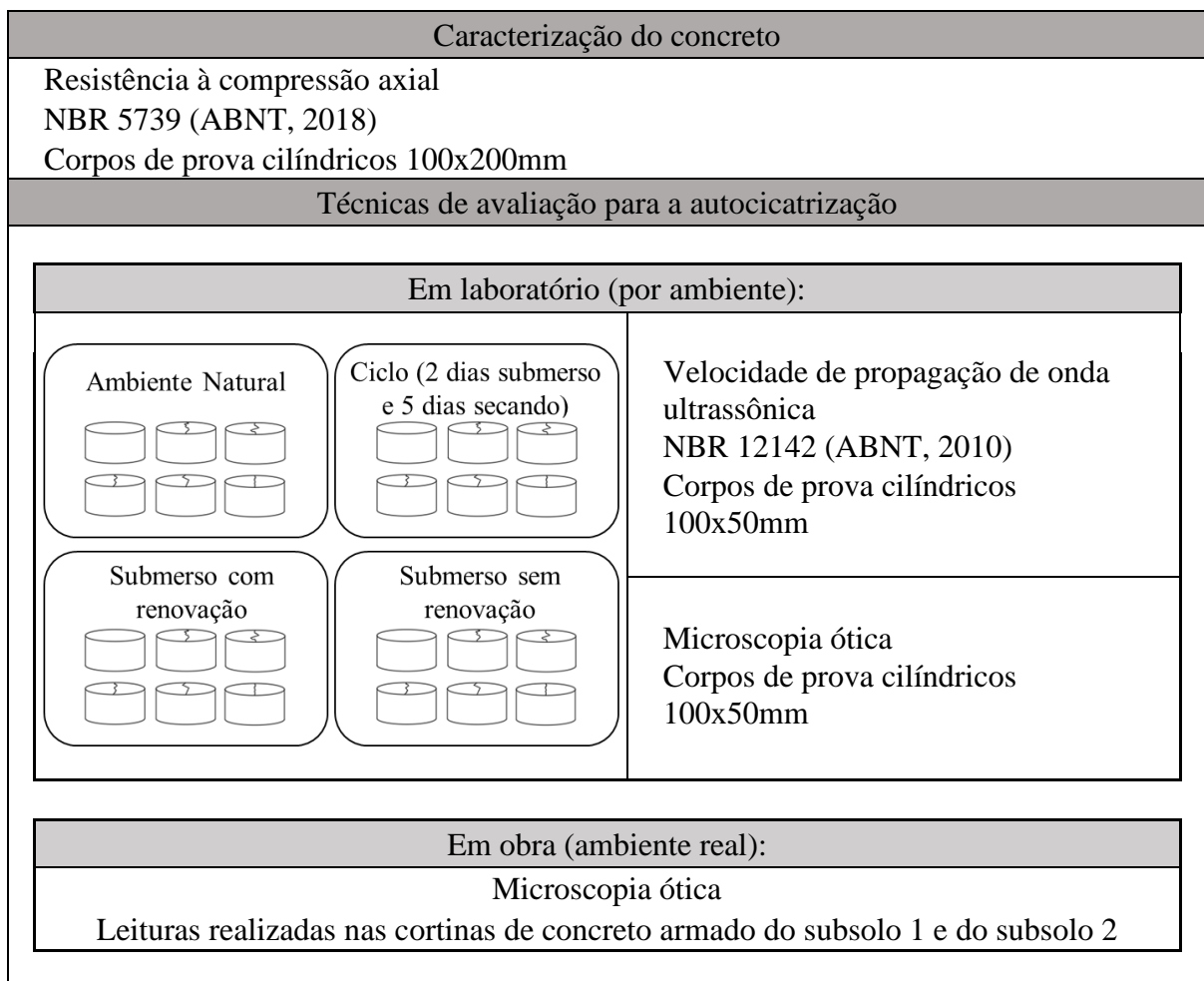
O aditivo superplastificante possui aspecto líquido com cor amarelada e tem como objetivo a redução de água através da dispersão do material aglomerante dada pelos policarboxilatos. Segundo o fabricante, seu pH está entre 8,5 e 10,5 e a massa específica entre 1,055 e 1,100 g/cm³, ambos de acordo com NBR 10908 (ABNT, 2008).

O aditivo plastificante polifuncional também tem como objetivo a boa dispersão das partículas de cimento, reduzindo a tensão superficial da água de mistura, além de melhorar a trabalhabilidade do concreto. Seu estado é líquido com cor castanha e possui uma densidade de 1,11 kg/l de acordo com NBR 10908 (ABNT, 2008), segundo o fabricante.

2.2. Métodos

Neste estudo a metodologia empregada tem o intuito de acompanhar a autocicatrização do concreto em ambiente real de obra e em ensaios de laboratório. Para melhor entendimento do programa experimental proposto, foi concebido esquema representativo dos ensaios realizados (Figura 6).

Figura 6 - Esquema representativo do programa experimental



Fonte: Própria autora (2021).

2.2.1. Traço de concreto e moldagem dos corpos de prova

O traço utilizado na cortina de concreto armado da edificação em estudo foi proposto pelo projetista e encontra-se na Tabela 4. A resistência característica à compressão esperada aos 28 dias de idade é de 40 MPa e a sua classe de abatimento é S160. A relação água cimento foi estipulada em 0,43 e o teor de argamassa em 53,5%.

Tabela 4 - Traço de concreto utilizado na estrutura estudada

Constituintes	Materiais secos (kg/m ³)	Traço unitário (em massa)
Cimento Portland CPIV-32 RS	385	1
Areia quartzosa fina	255	0,662
Areia quartzosa média	595	1,545
Brita 0	429	1,114
Brita 1	644	1,673
Fibra de polipropileno aditivado	0,30	0,001
Aditivo impermeabilizante por cristalização (0,8%)	3,08	0,008
Aditivo plastificante polifuncional (0,5 %)	1,92	0,005
Aditivo superplastificante (0,8%)	3,08	0,008
Água	165	0,429

Fonte: Projetista (2020).

Ao chegar em obra, os concretos de todos os caminhões passam pelo ensaio de abatimento de tronco de cone (slump teste), de acordo com a NBR NM 67 (ABNT, 1998), norma vigente na época. O abatimento encontrado sempre deve estar dentro do limite estipulado de 200±20mm para ser apto para moldagem.

Para análise da resistência à compressão, foram moldados 2 corpos de prova por caminhão betoneira, para cada idade de controle, conforme NBR 5738 (ABNT, 2016).

Para análise da autocicatrização em laboratório foram moldados 20 corpos de prova de formato cilíndrico (100x200)mm de concreto de um mesmo caminhão betoneira, conforme NBR 5738 (ABNT, 2016).

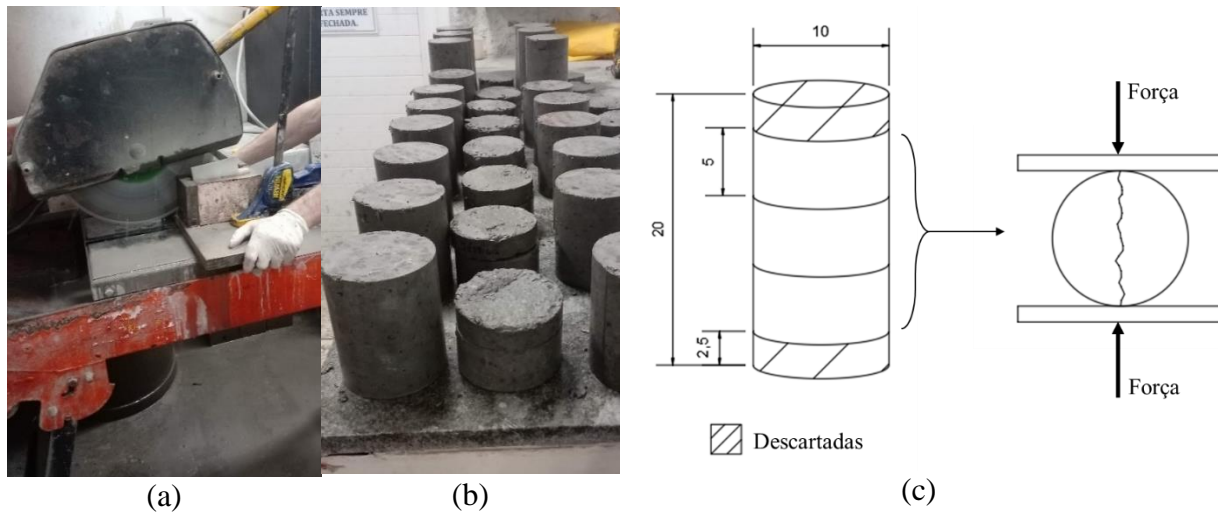
2.2.2. Ensaio de resistência à compressão axial

Os ensaios de ruptura por compressão axial foram realizados por empresa terceirizada responsável pelo controle tecnológico da construção, conforme NBR 5739 (ABNT, 2018). Dois corpos de prova por caminhão de concreto, foram submetidos ao ensaio aos 7 dias de idade e outros dois foram submetidos aos 28 dias de idade. Todas as amostras tiveram seus topos planificados por retífica hidráulica.

2.2.3. Preparação dos corpos de prova para os ensaios de autocicatrização

Aos 13 dias de idade, as amostras passaram por processo de fatiamento. Inicialmente, retiraram-se os topos com medida 100x25mm e estes foram descartados. Em seguida, a parte central do corpo de prova foi serrada em 3 partes de tamanho 100x50mm que foram destinadas para fissuração. Na Figura 7 (a) e (b) é possível visualizar os corpos de prova durante o processo de fatiamento, já na Figura 7 (c) observa-se um esquema para exemplificar a metodologia utilizada para corte e fissuração.

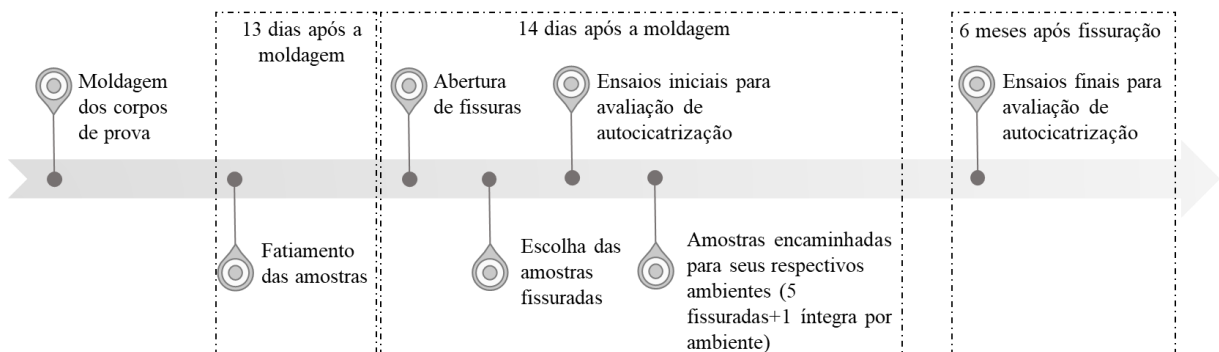
Figura 7 - Processo de fatiamento (a) e (b) e de abertura de fissuras das amostras (c)



Fonte: Própria autora (2020).

Com 14 dias de idade, as amostras foram fissuradas. Das 60 fatias internas dos corpos de prova moldados, 4 permaneceram íntegras para servirem como referência e as outras 56 amostras sofreram fissuração. Dessas, foram escolhidas 20 fatias, que apresentavam fissuras mais uniformes e retilíneas ao longo de sua extensão, para seguirem para os diferentes ambientes analisados, sendo 5 amostras por ambiente. Além disso, foram estipuladas fissuras que apresentassem espessura dentro da faixa de 0,10 a 0,40mm. Para melhor entendimento, elaborou-se uma representação esquemática de todo o processo ao qual as amostras foram sujeitas (Figura 8).

Figura 8 - Representação esquemática em formato de linha do tempo do programa experimental



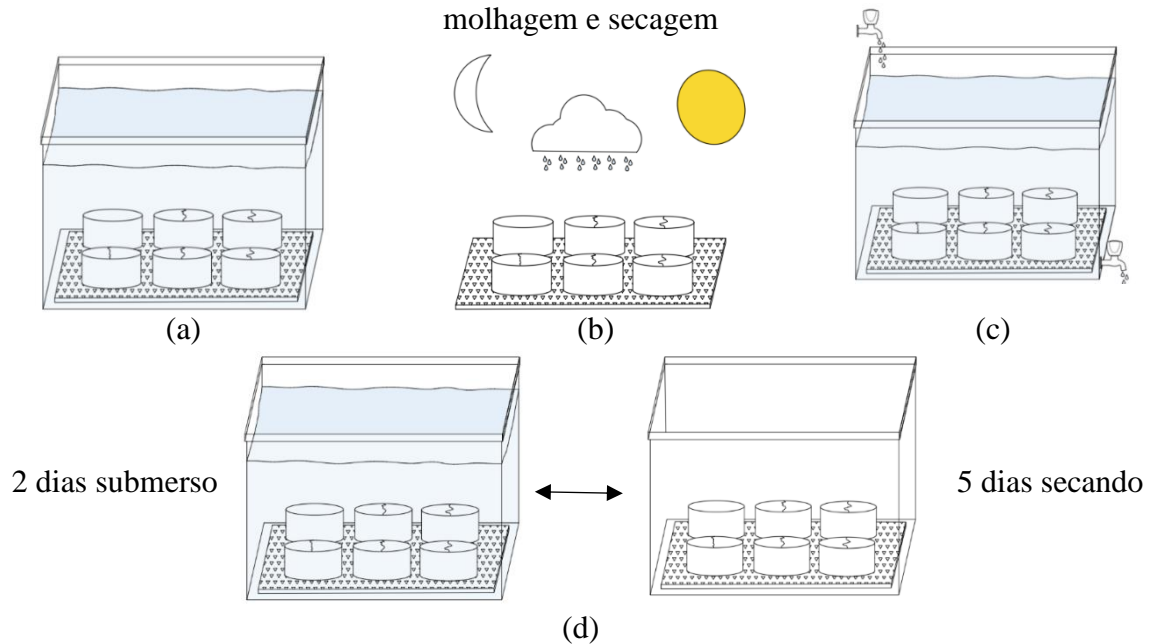
Fonte: Própria autora (2021).

2.2.4. Condições de cura

Os corpos de prova foram mantidos em temperatura ambiente por 24 horas após sua moldagem, cobertos por lona plástica, sendo desmoldados após esse período. Em seguida, aqueles destinados à ruptura por compressão axial foram encaminhados a tanques de água saturada com cal, ficando submersos até o dia do ensaio. Já aqueles destinados à fissuração foram encaminhados para câmara úmida com umidade maior que 95% e temperatura constante de $23 \pm 2^\circ\text{C}$, conforme NBR 5738 (ABNT, 2008), por 13 dias, até o momento de serem fatiados. Posteriormente ao processo de fatiamento, as amostras permaneceram em temperatura ambiente por 1 dia antes de serem fissuradas.

Após a escolha das amostras fissuradas a serem estudadas, elas seguiram para 4 ambiente diferentes de cura, sendo uma íntegra e cinco fissuradas por ambiente. Seis fatias permaneceram submersas em água durante todo o tempo de avaliação (Figura 9 (a)), seis foram mantidas expostas ao ambiente natural (Figura 9 (b)), seis passaram por ciclos de molhagem e secagem (2 dias submersas em água e 5 dias secando) (Figura 9 (d)) e 6 permaneceram submersas em tanque com água renovada constantemente (Figura 9 (c)), este último método tem como objetivo simular a ação da água presente na estrutura real estudada. Para os ambientes submersos e de ciclos de molhagem/secagem foi utilizada água proveniente de torneira. Além disso, todas as amostras permaneceram com a face, onde a fissura analisada estava presente, virada para cima.

Figura 9 - Representação dos ambientes analisados, onde (a) submerso sem renovação de água, (b) ambiente natural, (c) submerso com renovação constante de água e (d) ciclo de molhagem e secagem



Fonte: Própria autora (2020).

2.2.5. Quantificação e análise de fissuras encontradas em obra

A edificação possui uma extensão de cerca de 580 metros lineares de cortina, sendo sua concretagem executada em diferentes épocas, de acordo com os setores pré-estabelecidos. Devido à data de realização deste trabalho, o levantamento contemplou apenas cerca de 300 metros lineares de cortina.

Cerca de 6 meses após a execução e cura do concreto das áreas estudadas, foi realizado levantamento das fissuras presentes ao longo de sua extensão através de análise visual, tanto no subsolo 1 quanto no subsolo 2. Diante disso, foi possível quantificar as fissuras existentes e verificar quais apresentaram algum fechamento ao longo do tempo analisado, além de definir as suas espessuras através do uso de um fissurômetro (Figura 10).

Figura 10 - Utilização de fissurômetro para identificar espessura das fissuras, onde (a) apresenta uma fissura com 0,15mm e (b) uma fissura com 0,40mm



(a)

(b)

Fonte: Própria autora (2020).

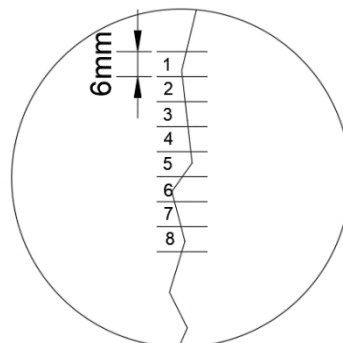
2.2.6. Microscopia ótica

O ensaio de microscopia ótica tem o objetivo de identificar, através de análise visual, o fechamento das fissuras estudadas. Foram analisadas fissuras identificadas nas cortinas de concreto armado da edificação estudada e em corpos de prova fissurados em laboratório. Diante disso, o seu comportamento em diferentes ambientes pode ser analisado e comparado quantitativamente quando em ambiente real.

As fissuras encontradas em obra foram analisadas durante 4 meses através da utilização de microscópio digital portátil de modelo BW1008-500x com ampliação entre 5x e 500x. Foi definido e demarcado um ponto inicial da fissura e a partir dele realizou-se as capturas de imagem de microscopia. Foram realizadas leituras no dia inicial de acompanhamento e no dia final.

As amostras fissuradas em laboratório tiveram um acompanhamento de 6 meses, com leituras realizadas com a utilização de microscópio ótico Zeiss Stemi 508, com ampliação entre 2x e 250x. As imagens foram extraídas com ampliação de 0,8x e foram realizadas em uma das faces das amostras, a que permaneceu voltada para cima nos ambientes analisados. De acordo com a metodologia adotada por Ziegler (2020), foram demarcadas 8 zonas com 6mm de espessura (Figura 11), sendo possível a captura de imagem de cada zona e posteriormente a montagem de imagem integral de cada fissura. As demarcações foram feitas na região central dos corpos de prova.

Figura 11 - Representação gráfica da demarcação das zonas analisadas



Fonte: Própria autora (2021).

A partir das imagens registradas dos corpos de prova e com a utilização do software Zen (específico do microscópio empregado), fez-se a medição da espessura das fissuras em duas datas, no dia do fissuramento e 6 meses após. A cada zona demarcada foram realizadas 3 leituras de espessura da fissura e calculada a média delas. Diante disso, foi possível quantificar a média da espessura das fissuras dos corpos de prova e a porcentagem de seu fechamento através da equação 4. Esse método se assemelha ao utilizado por Ferrara et. al (2018).

$$F (\%) = 1 - \frac{e_f}{e_i} \quad \text{Eq. 4}$$

Onde:

F – porcentagem de fechamento da fissura (%);

e_f – espessura média inicial, na data da fissuração (mm);

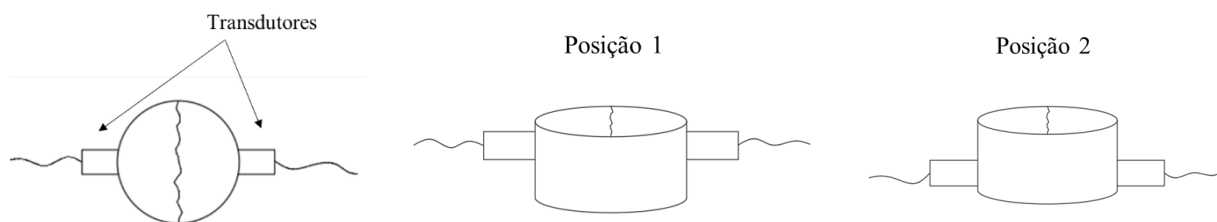
e_i – espessura média final, 6 meses após a fissuração (mm).

2.2.7. Ensaio de propagação de onda ultrassônica para acompanhamento da autocicatrização

Este ensaio é não destrutivo e serve para determinar a velocidade de ondas ultrassônicas longitudinais. Lorenzi et al. (2003) apontam que o ensaio ultrassônico é considerado um dos mais promissores dentre os métodos de ensaios não destrutivos, pois com ele é possível realizar um controle total da estrutura, como por exemplo, detectar as regiões heterogêneas e a compacidade do material. Este ensaio tem como objetivo verificar a homogeneidade do concreto, a presença de microfissuras ou de possíveis falhas durante a concretagem.

O ensaio foi feito em todos os corpos de prova dos 4 diferentes ambientes analisados de acordo com as recomendações da NBR 8802 (ABNT, 2019). Foram realizadas três leituras em duas posições distintas em cada amostra, a fim de encontrar o tempo médio de propagação das ondas. Para tanto, foi utilizado o aparelho Pundit Lab, da marca Proceq, com transdutores de 28mm de diâmetro e frequência de 150 kHz. Para a leitura das velocidades utilizou-se transmissão direta, que consiste em posicionar os transdutores em faces opostas da amostra, sendo de forma perpendicular à fissura. As leituras aconteceram no dia em que as amostras sofreram a fissuração e 6 meses após esse evento, para que assim seja possível comparar a compacidade ao longo do tempo dos diferentes corpos de prova analisados. Para garantir que as leituras fossem realizadas no mesmo lugar, foram realizadas marcações nas amostras. A Figura 12 demonstra as posições dos corpos de prova onde foram realizadas as leituras.

Figura 12 - Exemplificação das posições de leitura de onda ultrassônica realizadas



Fonte: Própria autora (2020).

Para a determinação da velocidade, foram medidos os comprimentos (L) de todos os corpos de prova, na direção do ensaio. Através desses valores e da medição de tempo (t) apresentada pelo equipamento, pode-se calcular a velocidade (V) utilizando-se a equação 1.

$$V = \frac{L}{t} \quad \text{Eq. 1}$$

Como realizado no trabalho de Arndt (2019), foram feitas leituras em corpos de prova íntegros e fissurados. Dessa forma, é possível diferenciar a parcela referente à hidratação da matriz cimentícia (amostra íntegra) da parcela referente ao fechamento das fissuras devido ao fenômeno da autocicatrização (amostras fissuradas). Para essa análise, foi definida a taxa de autocicatrização (TA) de cada corpo de prova fissurado em relação à amostra sem fissuração, através da equação 2.

$$TA (\%) = \frac{V_{f,n}}{V_{i,n}} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

TA – taxa de autocicatrização (%);

$V_{f,n}$ – velocidade de propagação de onda ultrassônica da amostra fissurada na idade analisada;

$V_{i,n}$ – velocidade de propagação de onda ultrassônica da amostra íntegra na idade analisada.

A partir da determinação da taxa de autocicatrização da amostra é possível calcular seu percentual de recuperação, através da equação 3.

$$RA (\%) = TA_f - TA_i \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

RA – percentual de recuperação (%);

TA_f – taxa de fissuração do corpo de prova na idade final (6 meses após a abertura de fissura);

TA_i – taxa de fissuração do corpo de prova na idade inicial (abertura de fissura).

Segundo Mehta e Monteiro (2014), as velocidades de onda ultrassônica em concreto tendem a aumentar quando em condições saturadas. Por isso, todos os corpos de prova ficaram em ambiente natural, secando, por aproximadamente 1 dia antes das leituras, a fim de que as amostras provenientes dos diferentes ambientes analisados estivessem com nível aproximado de saturação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Resistência à compressão axial

Através de amostragem total, definiu-se a resistência média, o desvio padrão e o coeficiente de variação dos concretos utilizados nas cortinas de concreto armado dos subsolos 1 e 2 da edificação estudada. Os resultados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação das resistências à compressão axial

Local	Idade (dias)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
Subsolo 1	7	31,86	7,32	23
	28	41,98	7,15	17
Subsolo 2	7	37,84	6,62	17
	28	48,75	7,03	14

Fonte: Própria autora (2020).

Como colocado anteriormente, a resistência característica à compressão (fck) esperada aos 28 dias de idade era de 40 MPa. Pelos resultados obtidos, no subsolo 1 observa-se que apesar de a média ser superior ao fck requerido, alguns caminhões não atenderam o estabelecido. Foram analisados 54 caminhões betoneira e destes 18 apresentaram resultados abaixo do esperado. Em obra, fez-se um estudo dos resultados obtidos em concretos de mesmo traço utilizados ao longo da execução de toda edificação, e foi possível concluir que a sua resistência tende a crescer, em média, 10% entre 28 e 63 dias. Diante disso, concluiu-se que aos 63 dias todos os concretos estariam de acordo com o fck requerido pelo projetista.

3.2. Levantamento de fissuras encontradas em obra

As fissuras encontradas nas cortinas de concreto armado da edificação foram analisadas de acordo com a sua espessura e seu fechamento ao longo do tempo. Ao observar a Tabela 6 é possível verificar que foram encontradas fissuras de espessura entre 0,10mm e 0,40mm, sendo a primeira a mais recorrente em ambos os subsolos, aparecendo em 40% dos casos no subsolo 1 e em 33% no subsolo 2.

Tabela 6 - Total de fissuras encontradas por espessura

Espessura (mm)	Subsolo 1		Subsolo 2	
	Número total de fissuras	% de cada espessura de fissura	Número total de fissuras	% de cada espessura de fissura
0,10	12	40	20	33
0,15	3	10	9	15
0,20	3	10	11	18
0,25	5	17	5	8
0,30	4	13	6	10
0,35	1	3	5	8
0,40	2	7	4	7
TOTAL	30	100	60	100

Fonte: Própria autora (2020).

As estruturas de concreto têm como manifestação patológica característica o aparecimento de fissuras, visto que o concreto possui baixa resistência à tração e está sujeito a uma série de solicitações térmicas e hidráulicas que geram retrações e contrações na peça estrutural. É importante que a abertura das fissuras respeite os limites impostos pela norma NBR 6118, para que não implique em perda de durabilidade ou de segurança quanto aos estados-limites últimos. Esta norma aponta valores da ordem de 0,20mm a 0,40mm como abertura máxima característica das fissuras, em função da classe de agressividade ambiental, para que elas não tenham importância significativa quanto à corrosão de armaduras. (SOUZA & RIPPER, 2009; NBR 6118, ABNT 2014)

Nas Tabela 7 e Tabela 8, pode-se visualizar o levantamento quanto ao fechamento, de acordo com as espessuras, das fissuras encontradas. A Tabela 7 refere-se ao subsolo 1, enquanto a Tabela 8 refere-se ao subsolo 2.

Tabela 7 - Análise de fechamento de fissuras no Subsolo 1

Espessura (mm)	Com fechamento (un.)	Sem fechamento (un.)	Total de Fissuras	Com fechamento (%)
0,10	2	10	12	17%
0,15	0	3	3	0%
0,20	0	3	3	0%
0,25	0	5	5	0%
0,30	0	4	4	0%
0,35	0	1	1	0%
0,40	0	2	2	0%
TOTAL	2	25	30	7%

Fonte: Própria autora (2020).

Tabela 8 - Análise de fechamento de fissuras no Subsolo 2

Espessura (mm)	Com fechamento (un.)	Sem fechamento (un.)	Total de Fissuras	Com fechamento (%)
0,10	12	8	20	60%
0,15	3	6	9	33%
0,20	2	9	11	18%
0,25	1	4	5	20%
0,30	0	6	6	0%
0,35	0	5	5	0%
0,40	1	3	4	25%
TOTAL	19	41	60	32%

Fonte: Própria autora (2021).

No subsolo 1 ocorreu fechamento em apenas 7% das fissuras encontradas, enquanto no subsolo 2 verificou-se fechamento em 32%. Essa diferença se deve, provavelmente, ao nível de água do terreno, que permaneceu, em média, 1,45, ou seja, estava abaixo do nível do subsolo 1 (cota 1,67, conforme mostrado na Figura 3). Posto isso, é coerente que o subsolo 2 apresente maior porcentagem de fissuras fechadas, visto que é de extrema importância a presença de umidade para que ocorra o fenômeno de autocicatrização. Além de proporcionar a hidratação de grãos de cimento anidro, a umidade reage com o aditivo cristalizante da mistura, gerando C-S-H que se deposita nas fissuras existentes. A água também auxilia na lixiviação do hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) contribuindo para a deposição de carbonato de cálcio (CaCO_3) nas fissuras (REDDY et al., 2019; WU et al. 2012). Roig-Flores et al. (2016) em seu trabalho comprovaram que o principal produto formado em fissuras presentes em concretos com adição de cristalizantes é o carbonato de cálcio.

Enquanto o subsolo 2 estava em contato constante com o lençol freático, o subsolo 1 teve contato apenas com a penetração de água proveniente de precipitação, não se mostrando suficiente para fechamento das fissuras encontradas.

Ao observar as Tabela 7 e Tabela 8, é possível constatar que as menores espessuras representam o maior número de fissuras com fechamento. Segundo os fabricantes de aditivo cristalizantes, ao adicionar esses materiais na matriz cimentícia é possível que fissuras com até 0,4mm de espessura sofram algum tipo de selamento. De Belie et al. (2018) apontam que, mesmo quando não há nenhum tipo de adição potencializadora, a própria matriz cimentícia possui capacidade de autocicatrização de fissuras inferiores a 0,3mm, quando há presença de água.

Cuenca et al. (2018) ao analisar diferentes espessuras de fissuras em concreto com adição de cristalizante, observam que a autocicatrização autógena acontece de forma mais relevante em fissuras consideradas pequenas, com até 0,15mm de espessura. Van Tittelboom e De Belie (2013), em seu estudo, apontam que há grande divergência entre autores sobre a espessura máxima possível a ser selada, entretanto, deixam claro que a eficácia da autocicatrização está diretamente ligada à espessura da fissura, quanto menor essa última, maior será a taxa de autocicatrização apresentada. Além disso, Cappellesso (2018) aponta que, se a espessura da fissura for muito elevada, a perda por lixiviação do hidróxido de cálcio pode se tornar maior do que o ganho referente ao selamento da fissura pela precipitação de carbonato de cálcio.

3.3. Microscopia ótica

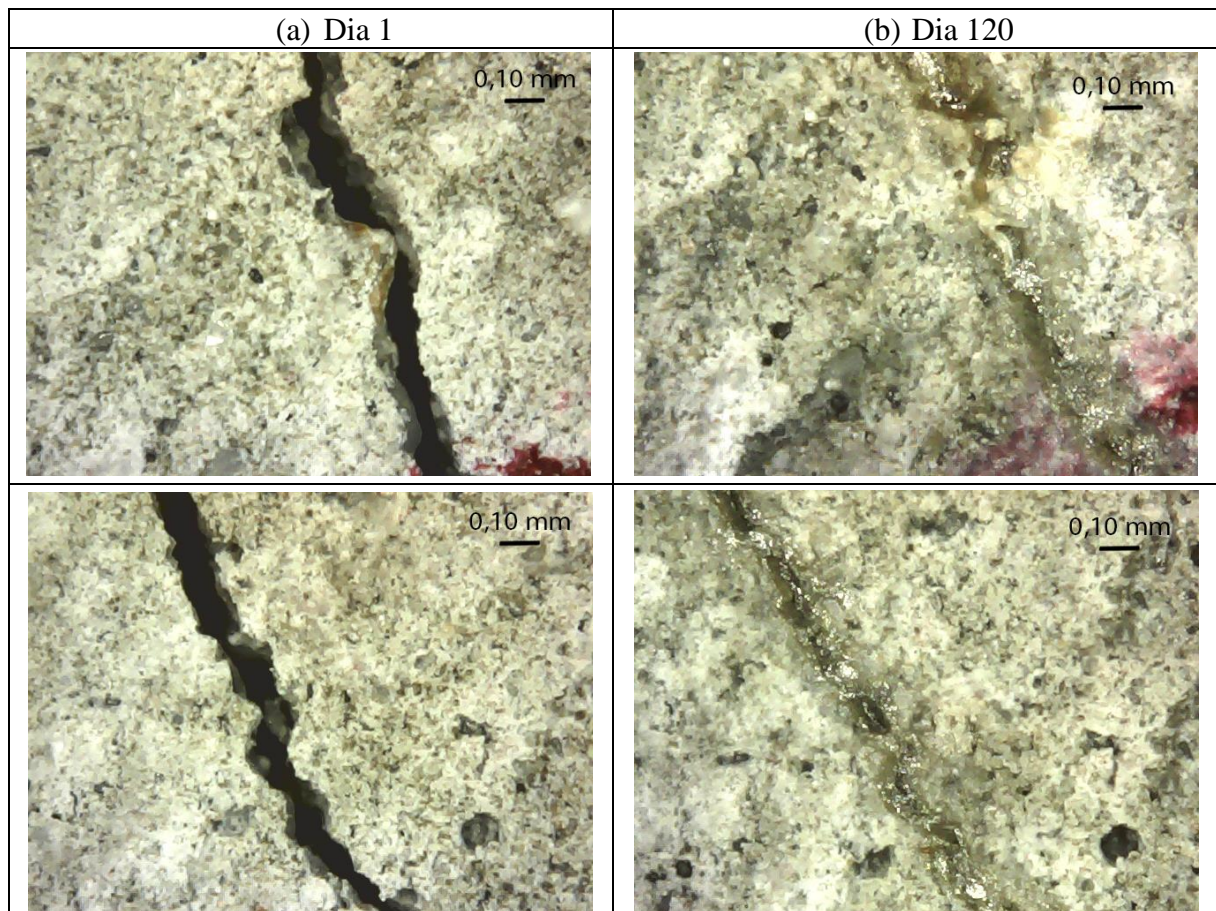
Foram realizadas leituras de microscopia ótica conforme descrito no item 2.2.7, analisando fissuras presentes em ambiente de obra e de laboratório.

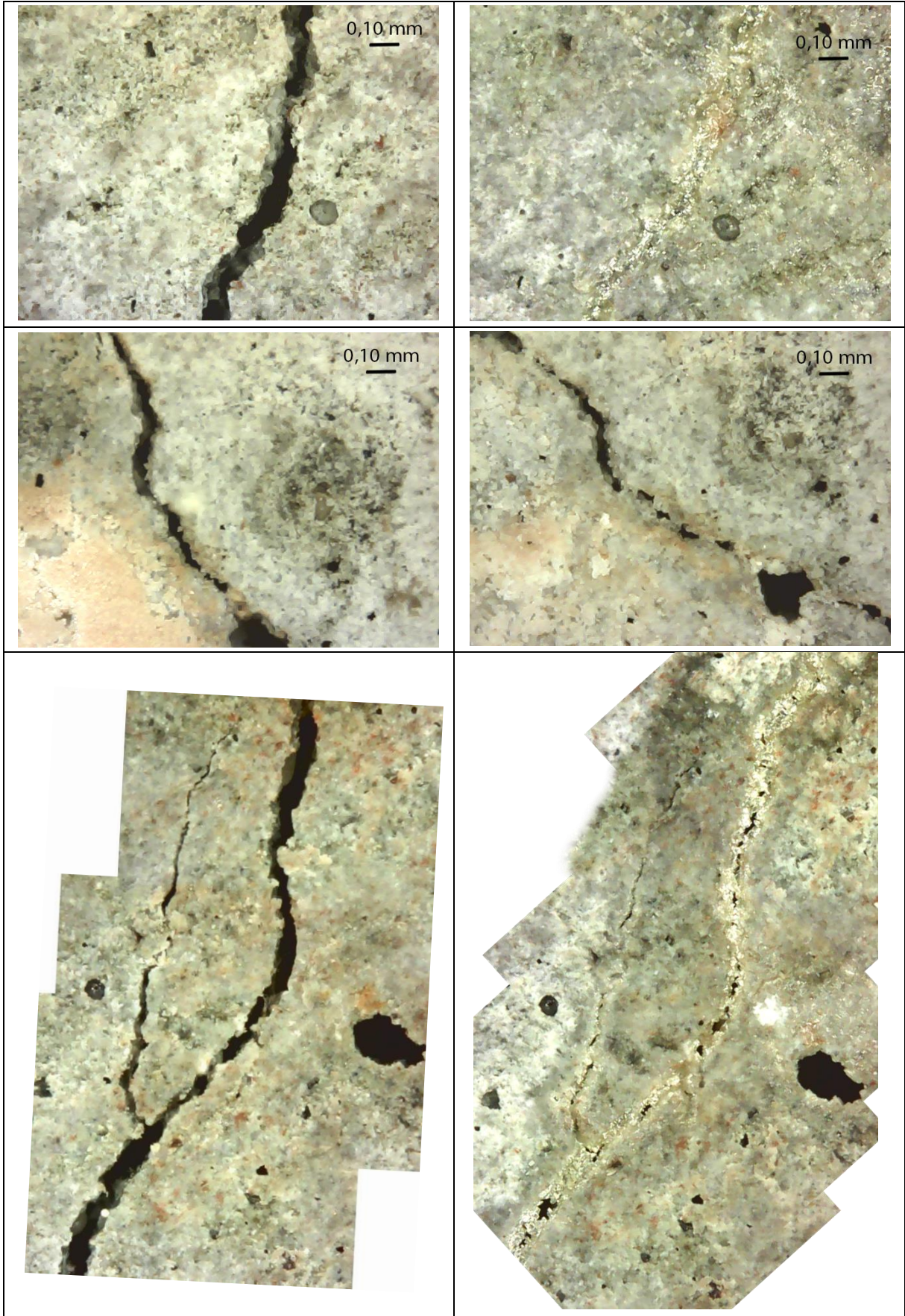
No ensaio de microscopia ótica é possível observar o comportamento superficial da fissura ao longo do tempo, se ocorre a formação de produtos químicos que promovem o seu fechamento. Sabe-se que a autocicatrização autógena tem como principais produtos causadores de fechamento de fissura o carbonato de cálcio (CaCO_3), proveniente da lixiviação do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e os hidratos de silicato de cálcio (C-S-H). (HUANG, 2014; SNOECK et al., 2016; KAN, 2012). Cabe salientar que a microscopia ótica permite identificar mais claramente a formação do carbonato de cálcio, que precipita na borda externa da fissura, do que o C-S-H, que se forma no interior da fissura e muitas vezes demora para fechar a parte visível da fissura (CAPPELLESSO, 2018).

3.3.1. Microscopia realizada em obra

Foram realizadas leituras em diferentes fissuras pela extensão da cortina de concreto armado presente na edificação. Conforme o levantamento realizado nas Tabela 7 e Tabela 8, na microscopia ótica também foi possível identificar fechamento apenas nas fissuras presentes no subsolo 2, não sendo possível visualizar cicatrização nas encontradas no subsolo 1. Na Figura 13 é possível observar a autocicatrização de algumas fissuras encontradas no subsolo 2. Na Figura 14, são apresentadas imagens do subsolo 1, com 4 meses de diferença e sem presença de mudança visual no fechamento da fissura.

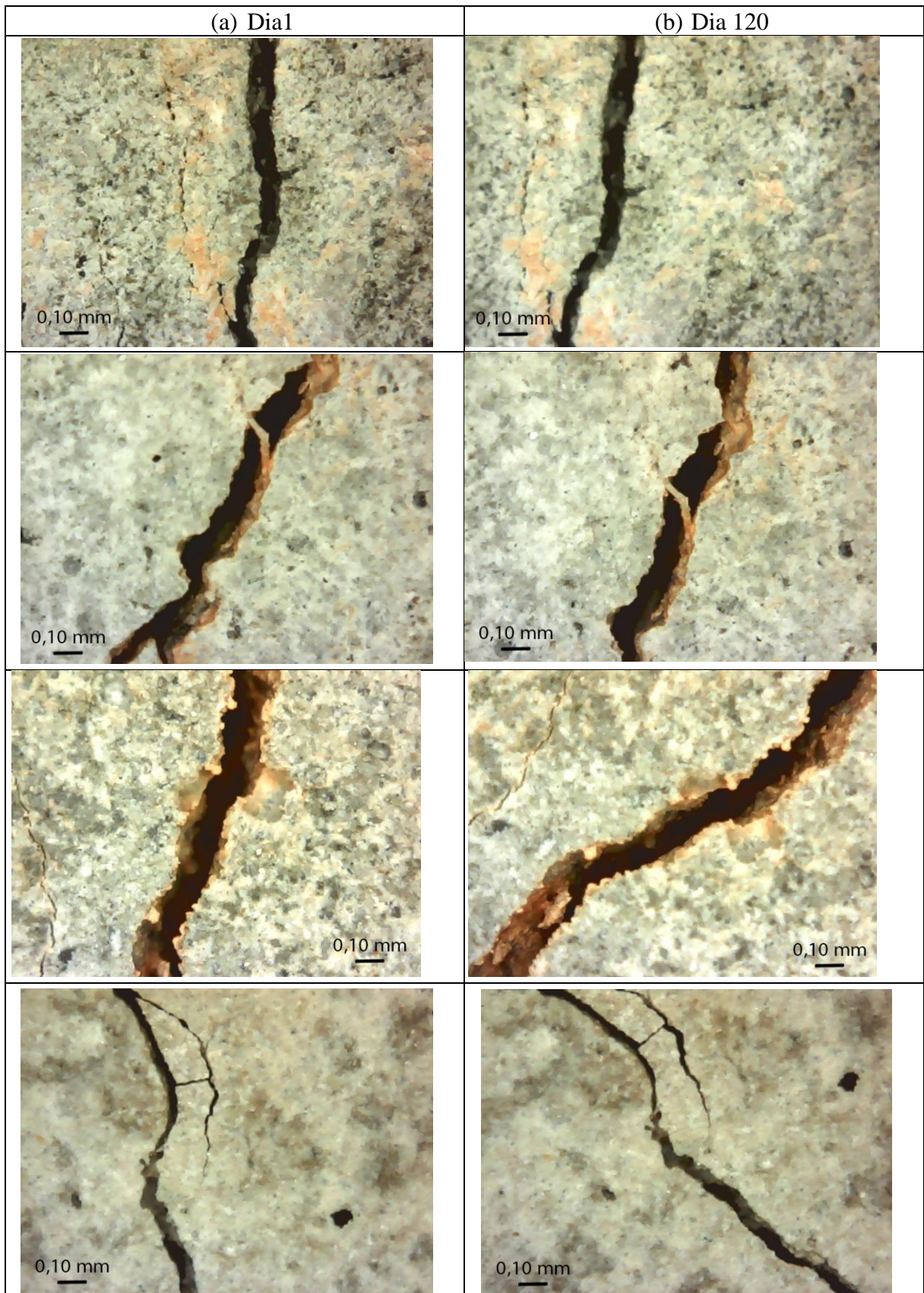
Figura 13 - Autocicatrização de fissuras presentes no subsolo 2, onde (a) mostra a fissura no primeiro dia de acompanhamento e (b) mostra a fissura 4 meses após o início do acompanhamento





Fonte: Própria autora (2021).

Figura 14 - Autocicatrização das fissuras encontradas no subsolo 1 onde (a) mostra a fissura no primeiro dia de acompanhamento e (b) mostra a fissura 4 meses após o início do acompanhamento



Fonte: Própria autora (2020).

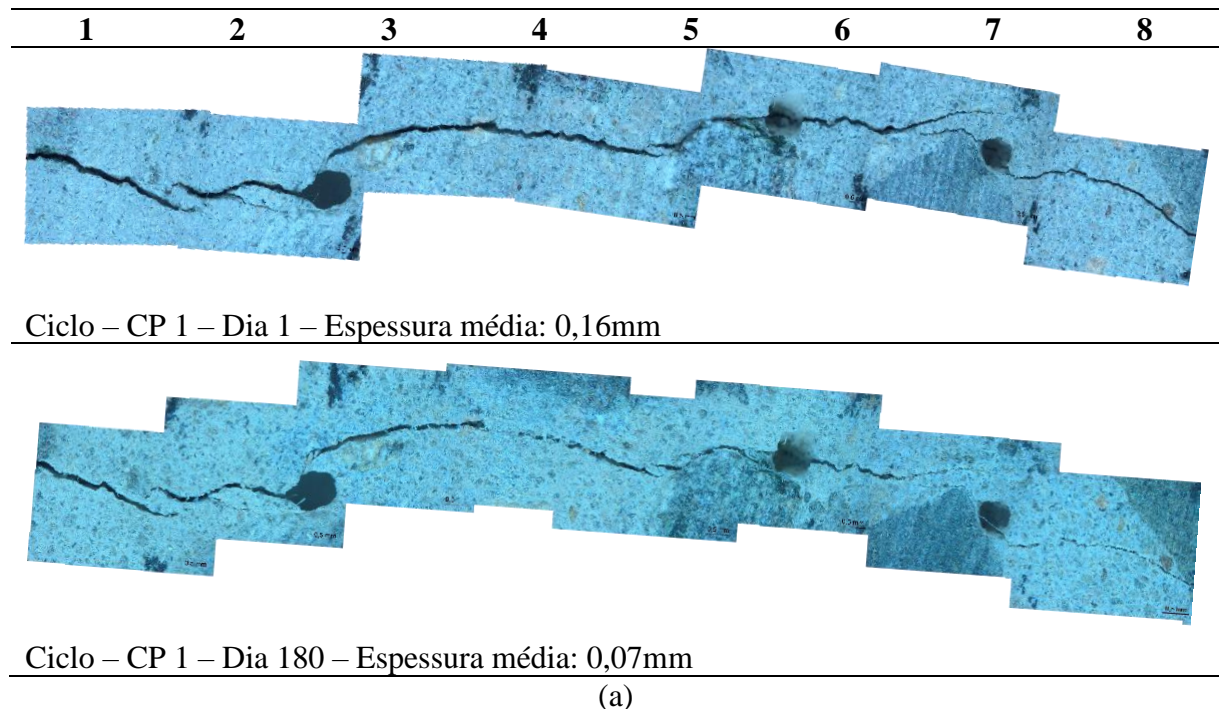
As imagens capturadas por microscopia em obra corroboram com os dados já demonstrado no item 3.2, onde as fissuras presentes no subsolo 2 apresentaram maior índice de fechamento em relação às encontradas no subsolo 1. Como explicado anteriormente, o motivo provável para esse resultado é a presença de água de uma forma mais constante no subsolo 2 do que no subsolo 1. Em seu trabalho, Ter Heide e Schlangen (2007) constataram que os concretos, quando em condições saturadas, apresentaram recuperação da capacidade resistente, entretanto, quando em ambiente apenas úmido, mesmo que com umidade relativa alta (95%), a cicatrização percebida não foi significativa. Roig-Flores et al. (2016) avaliaram concretos com adições de cristalizantes e constataram que a recuperação das fissuras ocorre de forma mais acentuada quando o material se encontra submerso do que quando disposto em câmaras úmidas.

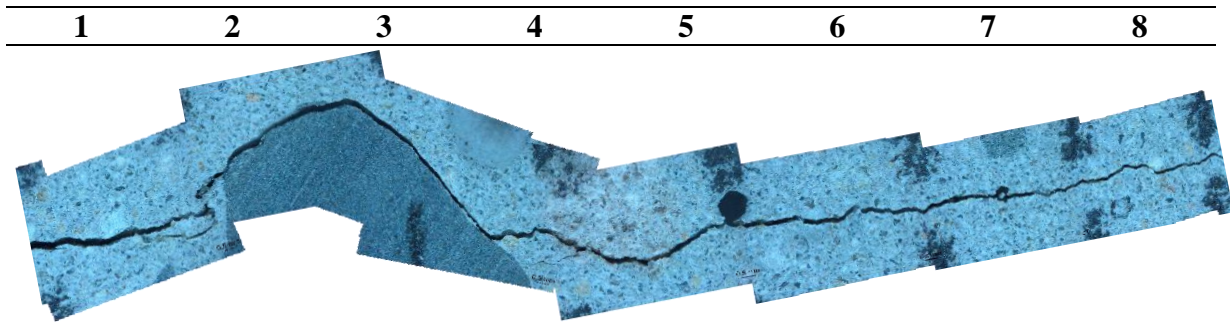
Como Roig-Flores et al. (2016) já comprovaram, é provável que os cristais visíveis no fechamento das fissuras sejam de carbonato de cálcio, proveniente da lixiviação do hidróxido de cálcio.

3.3.2. Microscopia realizada em laboratório

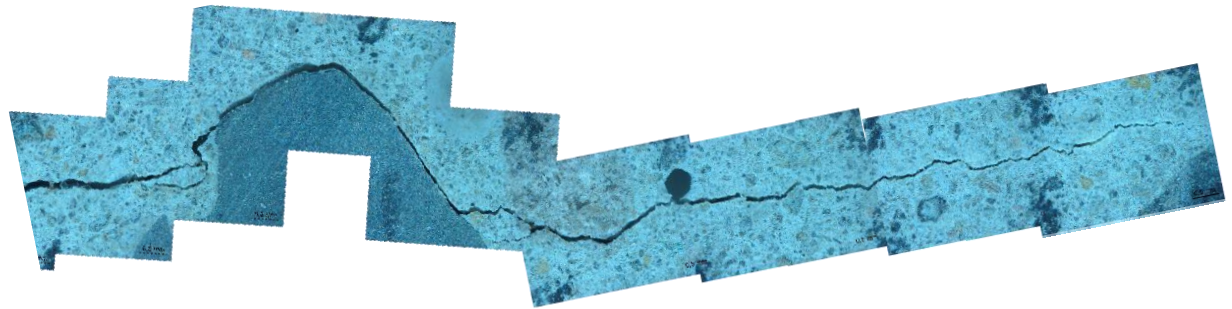
Foram realizadas leituras nos 5 corpos de prova fissurados em cada ambiente em duas idades distintas (dia de fissuração e 6 meses após essa data). As imagens foram capturadas na face que ficou voltada para cima nos ambientes de análise. Como o número de imagens é elevado foram escolhidas duas amostras de cada ambiente para serem apresentadas. As amostras escolhidas foram as que apresentaram maior diferenciação visual em relação ao fechamento das fissuras.

Figura 15 - Corpos de prova expostos ao ambiente ciclo, onde (a) mostra o corpo de prova 1 comparando as leituras inicial e final e (b) mostra o corpo de prova 4 comparando as leituras inicial e final





Ciclo – CP 4 – Dia 1 – Espessura média: 0,20mm

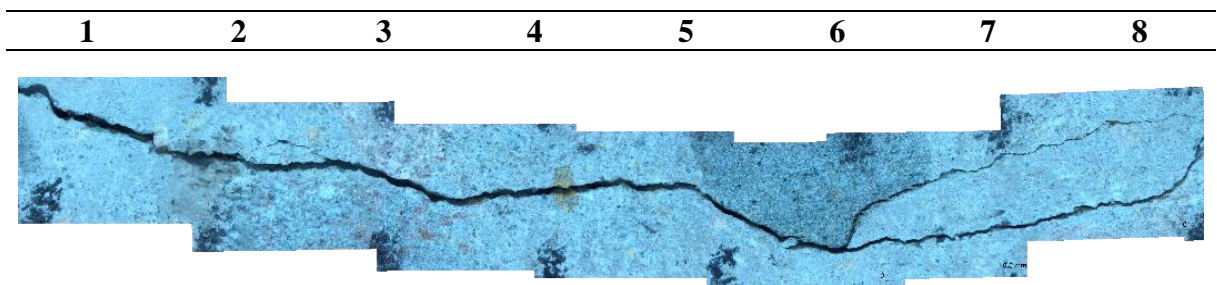


Ciclo – CP 4 – Dia 180 – Espessura média: 0,08mm

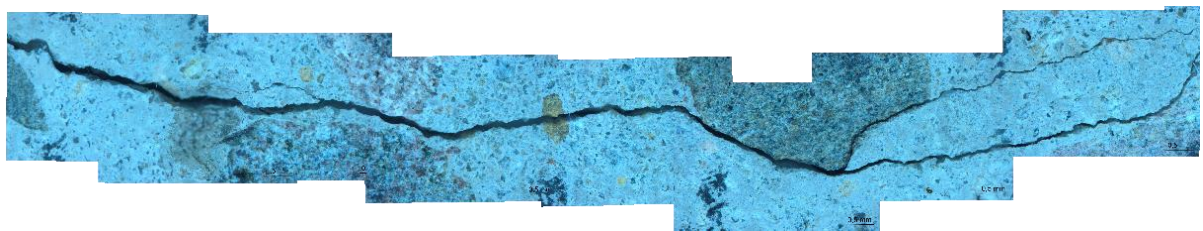
(b)

Fonte: Própria autora (2021).

Figura 16 – Corpos de prova expostos ao ambiente natural, onde (a) mostra o corpo de prova 3 comparando as leituras inicial e final e (b) mostra o corpo de prova 5 comparando as leituras inicial e final

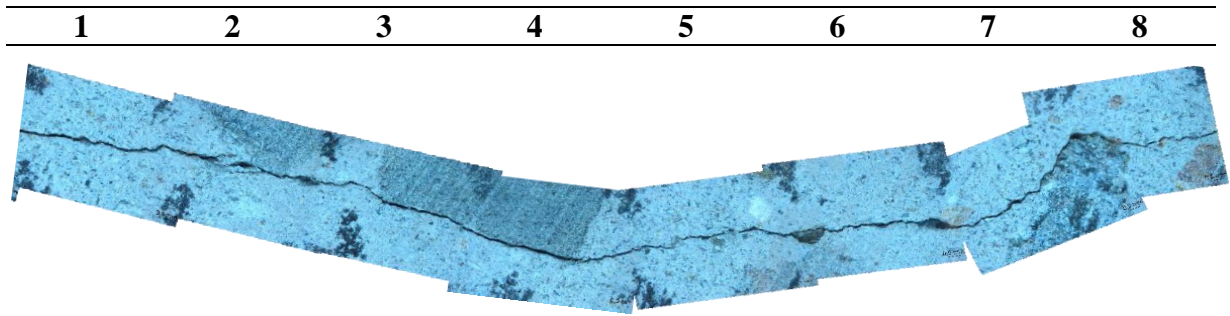


Natural – CP 3 – Dia 1 – Espessura média: 0,21mm

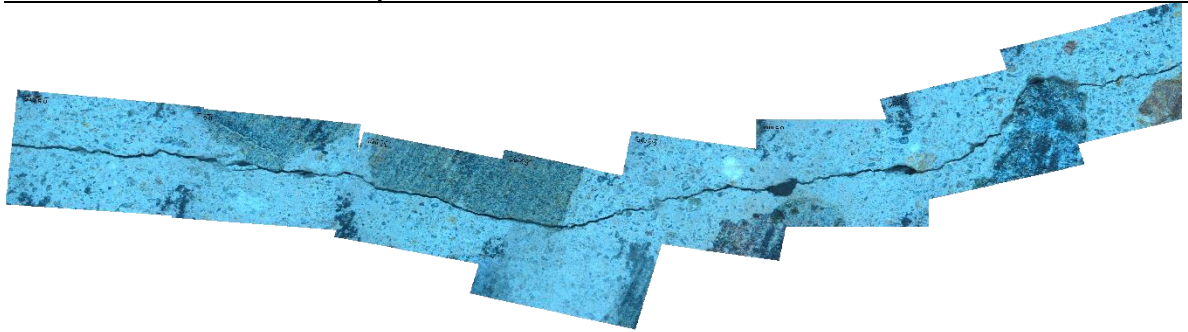


Natural – CP 3 – Dia 180 – Espessura média: 0,09mm

(a)



Natural – CP 5 – Dia 1 – Espessura média: 0,09mm

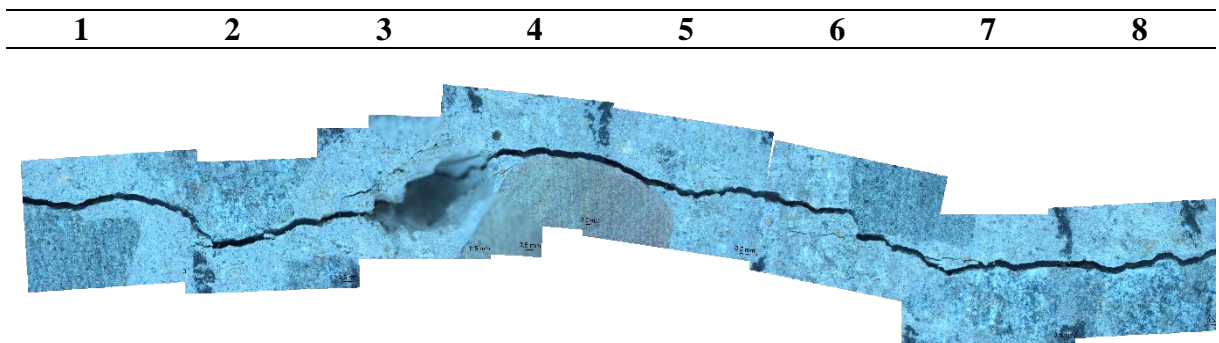


Natural – CP 5 – Dia 180 – Espessura média: 0,05mm

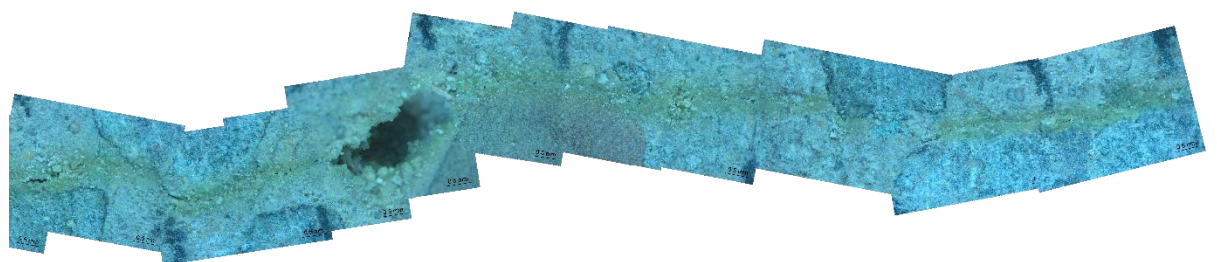
(b)

Fonte: Própria autora (2021).

Figura 17 - Corpos de prova expostos ao ambiente submerso sem renovação, onde (a) mostra o corpo de prova 3 comparando as leituras inicial e final e (b) mostra o corpo de prova 4 comparando as leituras inicial e final

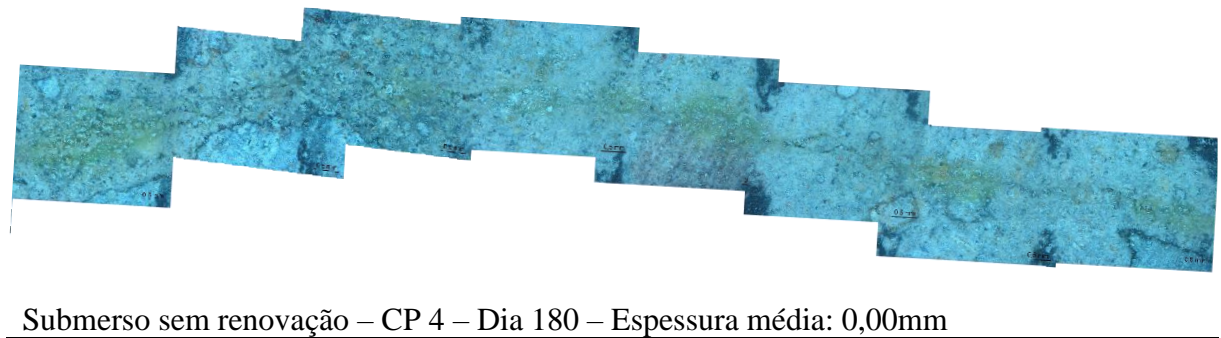
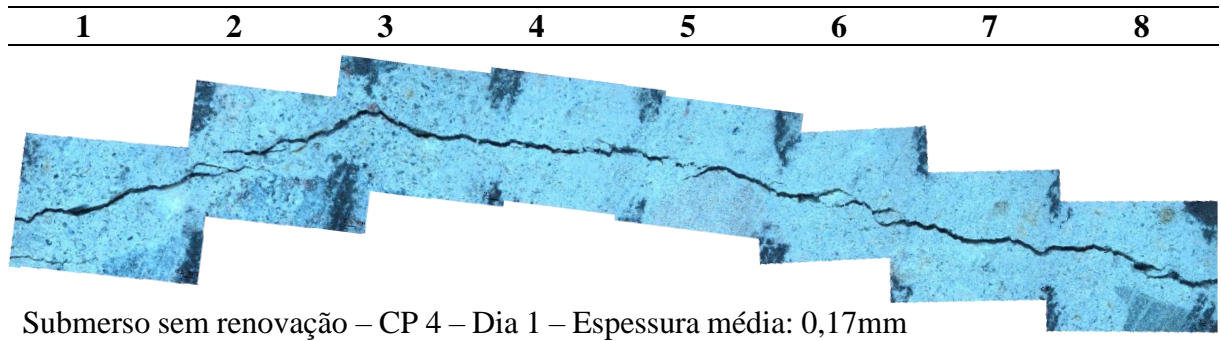


Submerso sem renovação – CP 3 – Dia 1 – Espessura média: 0,25mm



Submerso sem renovação – CP 3 – Dia 180 – Espessura média: 0,01mm

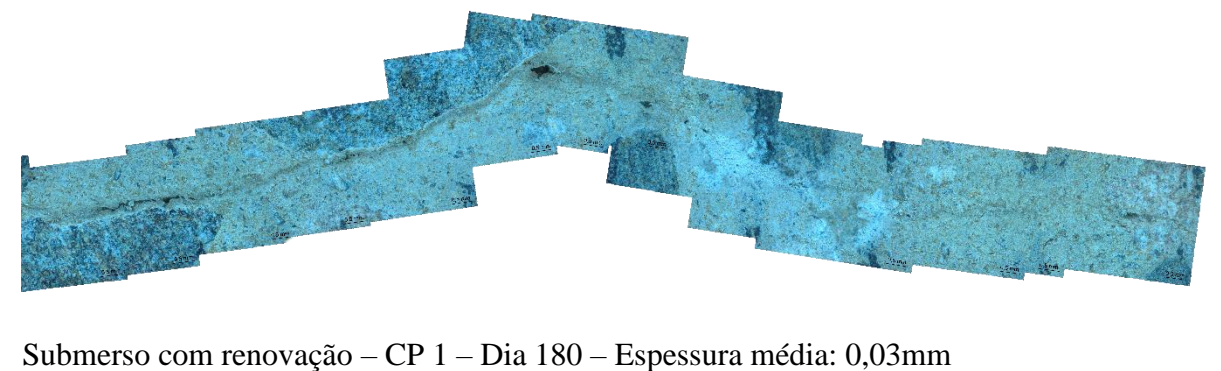
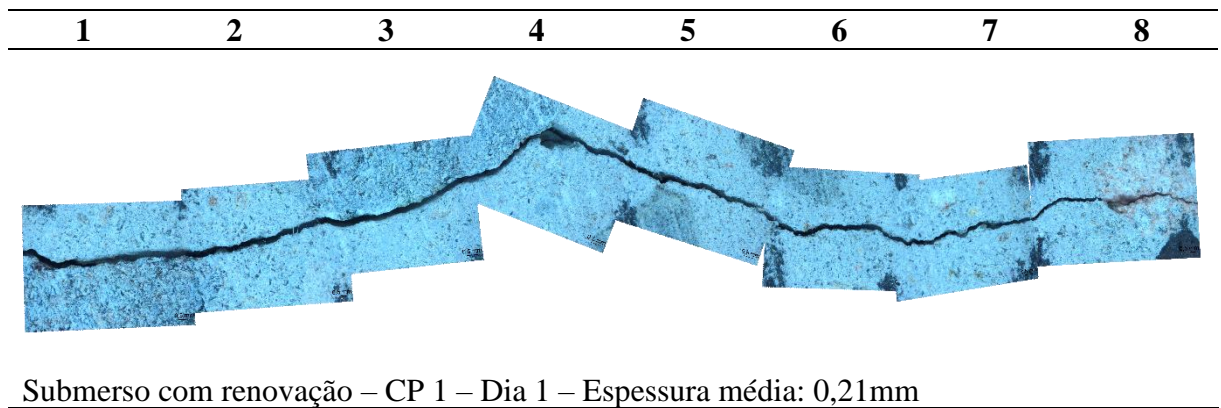
(a)



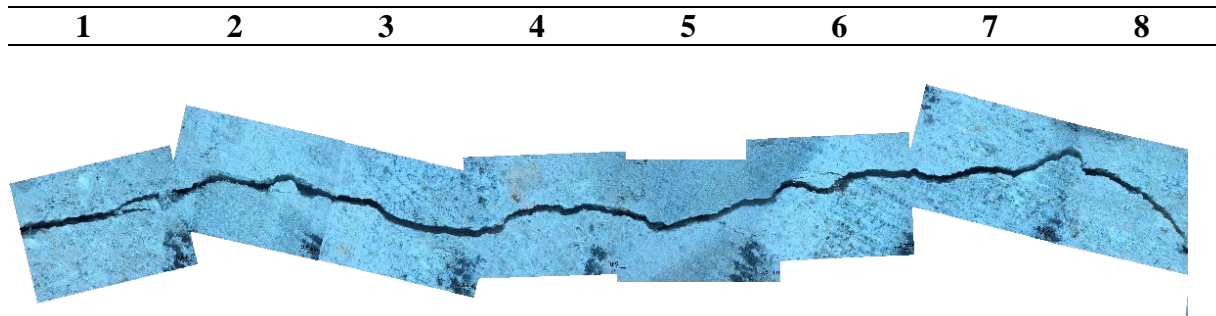
(b)

Fonte: Própria autora (2021).

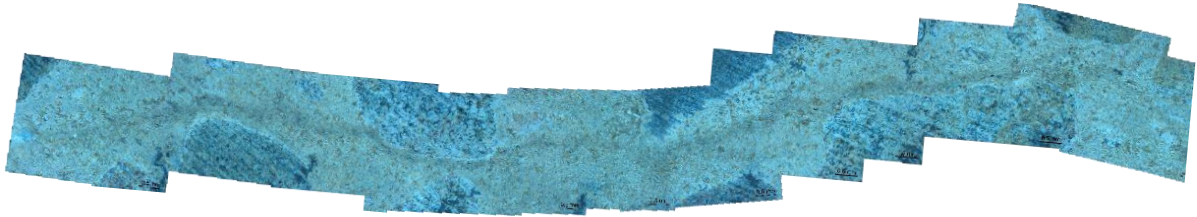
Figura 18 - Corpos de prova expostos ao ambiente submerso com renovação constante de água, onde (a) mostra o corpo de prova 1 comparando as leituras inicial e final e (b) mostra o corpo de prova 2 comparando as leituras inicial e final



(a)



Submerso com renovação – CP 2 – Dia 1 – Espessura média: 0,21mm



Submerso com renovação – CP 2 – Dia 180 – Espessura média: 0,03mm

(b)

Fonte: Própria autora (2021).

Através das imagens em microscopia ótica é possível perceber que as amostras que permaneceram no ambiente submerso, com e sem renovação, apresentaram o maior fechamento da fissura, seguido pelas que passaram por ciclo e depois as do ambiente natural, que apresentaram baixo índice de fechamento.

Arndt (2019) e Ziegler (2020) analisaram por microscopia ótica concretos com adição de cristalizante submetidos a ciclos de molhagem e secagem e ambos verificaram que o fenômeno de autocicatrização não apresentou os resultados esperados. Arndt (2019) aponta como hipótese para esse resultado o ciclo de 14 dias (2 dias submersos e 12 dias secando) utilizado, que permanecia predominantemente seco, enquanto outros autores, como Roig-Flores et al. (2016), utilizando ciclos de 24 horas (12 horas de secagem) e Sisomphon et al. (2012), com ciclos de 6 dias (3,5 dias secando) tiveram melhores visualizações da cicatrização ao utilizarem maior tempo de cura submersa.

Já era esperado que o ambiente natural mostrasse o resultado menos eficaz, visto que nesse ambiente a presença de água acontece apenas quando ocorre precipitação. Ferrara et al. (2014), Krelani e Ferrara (2013) e Roing-Flores et al. (2016) observaram que quando o concreto é submetido à cura submersa apresenta melhor resultado, enquanto quando submetido à exposição ao ar apresenta baixo índice de fechamento das fissuras.

Os resultados encontrados no ensaio de microscopia ótica são comprovados pelo cálculo da porcentagem de fechamento da fissura (equação 4), apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Porcentagem de fechamento de fissuras por ambiente (a) ciclo, (b) natural (c) submerso sem renovação e (d) submerso com renovação

	Ciclo			Natural		
	Espessura inicial média (mm)	Espessura final média (mm)	% de fechamento	Espessura inicial média (mm)	Espessura final média (mm)	% de fechamento
CP 1	0,16	0,07	58	0,22	0,11	53
CP 2	0,28	0,12	57	0,20	0,11	45
CP 3	0,28	0,12	56	0,21	0,09	54
CP 4	0,20	0,08	58	0,18	0,09	49
CP 5	0,15	0,04	73	0,09	0,05	48
Média % de fechamento	61%			50%		

(a)

(b)

	Submerso sem renovação			Submerso com renovação		
	Espessura inicial média (mm)	Espessura final média (mm)	% de fechamento	Espessura inicial média (mm)	Espessura final média (mm)	% de fechamento
CP 1	0,29	0,09	68	0,21	0,03	85
CP 2	0,34	0,05	87	0,29	0,00	99
CP 3	0,25	0,01	98	0,16	0,04	76
CP 4	0,17	0,00	99	0,13	0,00	100
CP 5	0,23	0,07	72	0,13	0,04	66
Média % de fechamento	85%			85%		

(c)

(d)

Fonte: Própria autora (2021).

Diante dos resultados apresentados, é possível perceber que para o ambiente natural a espessura inicial da fissura não teve grande influência no percentual de fechamento. Já para os outros três ambientes, nota-se que há uma leve influência, para corpos de prova com espessuras iniciais menores há um percentual de fechamento ligeiramente mais alto que para espessuras maiores. Ao comparar os resultados encontrados em laboratório e os encontrados em obra é possível notar que há uma relação. O subsolo 2 permanece em contato constante com a água, portanto, pode ser relacionado aos corpos de prova submetidos aos ambientes submersos e ambas as situações foram as que apresentaram maior índice de fechamento de fissuras. Já o subsolo 1, que apresenta contato predominantemente com a água proveniente de precipitação, apresentou resultados não satisfatórios, assim como os corpos de prova submetidos ao ambiente natural. Já os corpos de prova submetidos aos ciclos apresentaram um resultado médio em relação aos outros ambientes.

3.4. Propagação de onda ultrassônica

Após as leituras de velocidade do pulso ultrassônico, foram calculados a taxas de autocicatrização (equação 2) e o percentual de recuperação (equação 3) para cada ambiente. Os valores médios estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Taxa de autocicatrização (TA) e Percentual de recuperação (RA) por ambiente de exposição

Ambiente	TA inicial média (%)	TA final média (%)	RA (%)
Submerso sem renovação	67	84	17
Natural	60	74	14
Submerso com renovação	78	100	23
Ciclo	59	92	32

Fonte: Própria autora (2020).

O concreto analisado apresenta baixa relação água/cimento (0,43), e foi fissurado aos 14 dias de idade. Em seu trabalho, Arndt (2019), mostra que concretos com adição de cristalizantes e baixa relação água/cimento tendem a apresentar maior percentual de recuperação, chegando perto de 20% aos 91 dias, quando submetidos a ciclos de molhagem e secagem. Concretos fissurados em idade precoce possuem maior presença de grãos de cimento anidro, que ao se hidratarem contribuem significativamente para a autocicatrização autógena verificada. (FERRARA et al., 2018; TER HEIDE e SCHLANGEN, 2007). Cabe salientar que os resultados da velocidade de onda ultrassônica permitem identificar mais claramente a formação do C-S-H, que se forma no interior da fissura, e é de difícil visualização por microscopia ótica (CAPPELLESSO, 2018).

Ao observar os resultados da Tabela 10, é possível verificar que o ambiente com maior percentual de recuperação foi o de ciclos de molhagem/secagem, seguido de submerso com renovação constante de água, submerso sem renovação e ambiente natural, respectivamente. Sisomphon et al. (2013), encontraram esta mesma ordem de condições de exposição quanto a sua eficiência, quando analisaram a recuperação das propriedades mecânicas de amostras de concreto com adição de cristalizantes. Ma et al. (2014), apontam a formação de CaCO_3 nos períodos de secagem dos concretos submetidos a ciclos como o responsável pelo melhor desempenho de cicatrização autógena em relação a amostras submersas.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a realização desse estudo, foi possível visualizar o fenômeno de autocicatrização em concreto com a adição de cristalizantes e confirmar a necessidade da presença de água para a ativação do mecanismo.

Em ambiente real foi constatado maior fechamento das fissuras que permaneciam abaixo do nível de lençol freático enquanto as que permaneciam acima apresentaram índice de fechamento muito baixo.

Em laboratório foram analisados diferentes ambientes. Visualmente as fissuras com maior índice de fechamento foram as que permaneceram submersas, com e sem renovação, o que comprova a importância da água para a reação de autocicatrização. Já para o ensaio de ondas ultrassônicas, as amostras que apresentaram melhor resultado foram as expostas ao ciclo (2 dias submersas e 5 dias secas), isso pode indicar que a estrutura mais interna dessas amostras sofreu maior cicatrização que a parte mais externa, que é visualizada no ensaio de microscopia ótica. Porém, as amostras submersas também apresentaram bons percentuais de recuperação, sendo que as que permaneceram com renovação constante de água tiveram um resultado levemente

superior que as submersas sem renovação. Além disso, o fato de as amostras estarem apenas a um dia secando pode influenciar na leitura da onda ultrassônica, visto que a saturação do corpo de prova está ligada ao aumento da sua velocidade. Como o concreto pode demorar para secar completamente, um dia pode não ter sido suficiente e as amostras podem ter sido afetadas. Ao comparar as análises em laboratório e em ambiente real de obra, foi possível observar que quando abaixo do nível do lençol freático a estrutura apresentou o mesmo comportamento que os corpos de prova submetidos ao ambiente submerso, com ou sem renovação. Visualmente, em ambas as situações, ocorreu a maior percepção do fenômeno da autocicatrização.

REFERÊNCIAS

- American Concrete Institute Committee 212, “Report on Chemical Admixtures for concrete (ACI 212.3R-10),” 2010
- ARNDT, J. A. **Avaliação de aditivos cristalizantes na autocicatrização de concretos de cimento Portland.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5736:** Cimento Portland – Ensaio de pozolanicidade para cimentos Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:** Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:** Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto - Procedimentos. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211:** Agregados para concreto - Especificações. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802:** Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10908:** Aditivos para argamassa e concreto – Ensaio de caracterização. Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697:** Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 67:** Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.
- BREUGEL, K. VAN. **Self-healing material concepts as solution for aging infrastructure.** 37th Conference on Our World in Concrete & Structures, p. 1–17, 2012.
- BRITEZ, C. et al. **Estanqueidade de lajes de subpressão: caso MIS-RJ.** Rev. IBRACON Estrut. Mater. 2014, vol. 7, n. 6, p. 913-921. ISSN 1983-4195.
- CAPPELLESSO, V. G. **Uso de impermeabilizante por cristalização para redução da permeabilidade do concreto.** Porto Alegre, 2016. 141 p. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- CAPPELLESSO, V. G. **Avaliação da autocicatrização de fissuras em concretos com diferentes cimentos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2018.

CORTOPASSI, R. S.; OURIVES, C. N. **Concreto pode garantir estanqueidade a obras enterradas**. AECweb, Revista Digital Materiais e Soluções. 2017. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/concreto-pode-garantir-estanqueidadea-obras-enterradas_13897_10_0> Acesso em: 02 nov. 2020.

CUENCA, E.; TEJEDOR, A.; FERRARA, L. **A methodology to assess crack-sealing effectiveness of crystalline admixtures under repeated cracking-healing cycles**. Construction and Building Materials, v. 179, p. 619–632, 2018a.

DAL MOLIN, D. C. C. **Fissuras em estruturas de concreto armado: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no estado do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1988.

DE BELIE, N. et al. **A Review of Self-Healing Concrete for Damage Management of Structures**. Advanced Materials Interfaces, v. 5, n. 17, p. 1–28, 2018.

DE ROOIJ, M.; VAN TITTELBOOM, K.; DE BELIE, N.; SCHLANGEN, E. **Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials**. State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 221-SHC, 11. Springer Science & Business Media, 2013.

FERRARA, L.; KRELANI, V.; CARSANA, M. **A “fracture testing” based approach to assess crack healing of concrete with and without crystalline admixtures**. Construction and Building Materials, v. 68, p. 535–551, 2014a.

FERRARA, L. et al. **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.

GOSH, S. K. (ed.). **Self-healing materials: fundamentals, design strategies and applications**. In: Self-healing materials: fundamentals, design strategies and applications. p. 1-28. Weinheim: Wiley-VCH, 2009.

GUZLENA, S.; SAKALE, G. **Self-healing concrete with crystalline admixture – a review**. Materials Science and Engineering, v. 660, 7 p., 2019.

HOMMA, D; MIHASHI, H.; NISHIWAKI, T. **Self-Healing Capability of Fibre Reinforced Cementitious Composites**. Journal of Advanced Concrete Technology, v. 7, n. 2, p. 217-228, 2009.

HUANG, H.; YE, G.; DAMIDOT, D. **Effect of blast furnace slag on self-healing of microcracks in cementitious materials**. Cement and Concrete Research, v. 60, p. 68–82, 2014.

KRELANI, V.; FERRARA, L. **Self healing capacity of concrete with crystalline additives : natural vs . Accelerated exposure conditions**. ICSHM2013, n. June 2013, p. 2013–2017, 2013.

LORENZI, A; CAETANO, L. F.; DRUNN, M. T.; FILHO, L. C. P. S. **Utilização de ultrassom para o monitoramento de estruturas de concreto**. Em: 111 Pan-American Conference for Nondestructive Test. Rio de Janeiro, 2003.

MA, H.; QIAN, S.; ZHANG, Z. **Effect of self-healing on water permeability and mechanical property of Medium-Early-Strength Engineered Cementitious Composites**. Construction and Building Materials, v. 68, p. 92–101, 2014.

- MEDEIROS, H. **Alerta! Deformações excessivas – Edifícios expõem patologias de todo tipo, principalmente na alvenaria. Porque as estruturas estão deformando como nunca?**.2005. Disponível em: <<http://www.piniweb.com.br>> Acesso em: 15 março 2019. 4p.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**: 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014
- MENEGAT, R.; PORTO, M.L.; CARRARO, C.C.; FERNANDES, L.A.A. (Coords.). (2006) **Atlas ambiental de Porto Alegre**. 3. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS. 228 p.
- NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**: 2. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.
- OLIVEIRA, A. DE S. **Estudo do potencial de aditivo cristalizante como estimulador de aut cicatrização de fissuras de matrizes cimentícias**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, p. 5–10, 2019.
- REDDY, T. C. S.; RAVITHEJA, A. **Macro mechanical properties of self healing concrete with crystalline admixture under different environments**. Ain Shams Engineering Journal, v. 10, n. 1, p. 23–32, 2019.
- ROIG-FLORES, M.; PIRRITANO, M.; SERNA, P.; FERRARA, L. **Effect of crystalline admixtures on the self-healing capability of early-age concrete studied by means of permeability and crack closing tests**. Construction Build Master. v. 114 p. 447–457. 2016.
- SISOMPHON, K.; COPUROGLU, O.; KOENDERS, E. A. B. **Effect of exposure conditions on self healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating various cementitious materials**. Construction and Building Materials, v. 42, p. 217–224, 2013.
- SOUZA, V. C., & RIPPER, T. (2009). **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. São Paulo: PINI.
- TANG, W.; KARDANI, O.; CUI, H. **Robust evaluation of self-healing efficiency in cementitious materials - A review**. Construction and Building Materials, v. 81, p. 233–247, 2015.
- TEIXEIRA, E. P. **Subpressão nas lajes e lançamento de empuxo considerando o nível de água**, 2014. Disponível em: <<http://faq.altoqi.com.br/content/204/1429/pt-br/subpress%C3%A3o-nas-lajes-e-lan%C3%A7amento-de-empuxo-considerando-o-n%C3%ADvel-de-%C3%A1gua.html>>. Aceso em: 20 fev. 2020.
- TER HEIDE, N.; SCHLANGEN, E. **Self-healing of early age cracks in concrete**. Proceedings of the first international conference on self-healing materials. Noordwijk aan Zee, The Netherlands, 2007.
- USGS, United States Geological Survey. **Cement - World Production and Capacity**. 2020.
- VAN TITTELBOOM, KIM; DE BELIE, N. **Self-healing in cementitious materials-a review**. *Materials*, v. 6, n. 6, p. 2182-2217. 2013
- 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 28. Elsevier. 2012. p.571-583
- YANG, Y.; YANG, E. H.; LI, V. C. **Autogenous healing of engineered cementitious composites at early age**. In: Cement and concrete research 41, no. 2, p. 176-183. 2011.

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

ZIEGLER, F. ; MASUERO, A. B. ; PAGNUSSAT, D. ; DAL MOLIN, D. C. C. . **Evaluation of Internal and Superficial Self-Healing of Cracks in Concrete with Crystalline Admixtures.** Materials **JCR**, v. 4947, p. 1-18, 2020.