

**Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e  
Infraestrutura**

**Natália dos Santos Petry**

**Influência dos ambientes de exposição no fenômeno da  
autocicatrização de fissuras com idades variadas em  
concretos de cimento Portland com diferentes resistências**

Porto Alegre  
2021

**NATÁLIA DOS SANTOS PETRY**

**INFLUÊNCIA DOS AMBIENTES DE EXPOSIÇÃO NO  
FENÔMENO DA AUTOCICATRIZAÇÃO DE FISSURAS COM  
IDADES VARIADAS EM CONCRETOS DE CIMENTO PORTLAND  
COM DIFERENTES RESISTÊNCIAS**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade  
Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para  
obtenção do título de Doutor em Engenharia

**Prof<sup>a</sup>. Angela Borges Masuero**  
Doutora pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil  
Orientadora

**Prof<sup>a</sup>. Denise Carpena Coitinho Dal Molin**  
Doutora pela Universidade de São Paulo  
Orientadora

Porto Alegre  
2021

**NATÁLIA DOS SANTOS PETRY**

**INFLUÊNCIA DOS AMBIENTES DE EXPOSIÇÃO NO  
FENÔMENO DA AUTOCICATRIZAÇÃO DE FISSURAS COM  
IDADES VARIADAS EM CONCRETOS DE CIMENTO PORTLAND  
COM DIFERENTES RESISTÊNCIAS**

Esta tese de doutorado foi julgada para a obtenção do título de DOUTORA EM ENGENHARIA CIVIL, área de pesquisa em Materiais de Construção, e aprovada em sua forma final pelos Professores Orientadores e pelo Programa de Pós-Graduo em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 2021.

**Prof<sup>a</sup>. Angela Borges Masuero**

Doutora pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil  
Orientadora

**Prof<sup>a</sup>. Denise Carpena Coitinho Dal Molin**

Doutora pela Universidade de São Paulo  
Orientadora

**Prof<sup>a</sup>. Angela Danilevicz**

Coordenadora do PPGCI/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Daniel Tregnago Pagnussat (UFRGS)**

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

**Prof. Jairo José de Oliveira Andrade (PUCRS)**

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

**Prof<sup>a</sup>. Geilma Lima Vieira (UFES)**

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Dedico esse trabalho à minha família.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Deus pelo dom da vida, por pelos desafios e ensinamentos.

à minha família, meus pais, Terezinha e Deoclecio, a minha irmã, Letícia, ao meu gordinho amado, Miguel, que sempre acreditaram no meu potencial, estiveram ao meu lado dando incentivo, força e amor. Ao Fábio, meu companheiro, que sempre esteve ao meu lado, que realmente foi companheiro nas idas ao laboratório nos fins de semana, desmoldar corpos de prova, identificar, ajudar nos ensaios e a carregar muitos corpos de prova, amor obrigada pela paciência e pela ajuda em todos os momentos. A minha tia Maria Emília, obrigada pelo apoio e por todo o incentivo, és uma inspiração, professora e pesquisadora fantástica.

Às minhas queridas orientadoras, que foram meu suporte tanto técnico como emocional, vocês são especiais, mulheres fortes e destemidas. Com vocês cresci e madureci como pessoa e como professora.

Aos profes Daniel e Laís, obrigada pela parceria, pela paciência e por todo o incentivo, principalmente nesta reta final.

À profe. Ana Paula, uma amiga muito querida, sempre me incentivou.

Aos demais professores do grupo de materiais do NORIE, meu muito obrigada por todo o ensinamento.

Ao grupo de autocicatrização, Vanessa, Josué, Deividi, Fabiana e Camila, obrigada pelo auxílio, em especial a Vanessa uma amiga, mega parceira e incentivadora.

Aos bolsistas do grupo de autocicatrização, que foram essenciais no desenvolvimento deste trabalho, Aya, Jéssica, Yasmin, Luciana, Thais, Bianca.

Aos amigos da salinha, Carol, Fernanda, Rafa, Max, Iago, Robertinha, Camila, Mauro, Thiago, Marlon e Muri dividimos muitos momentos de boas risadas e muitos lanches.

Ao meu quarteto de amigos maravilhosos, Ana, Cândido, Cibeli e Érica.

As minhas bilus amadas, Ana Paula, Ariane e Maria Fernanda.

As minhas amigas queridas, Eliane e Flávia, que estiveram sempre ao meu lado com uma palavra otimista e incentivadora!

Á Lúcia queridinha, sempre nos recepcionando no Norie, com a sua simpatia, com chá ou café.

Aos Ari e o Airton, pela paciência, dedicação, auxílio na realização dos ensaios e parceria, obrigada pessoal vocês fizeram toda a diferença.

Aos meus queridos alunos, que sempre foram o maior incentivo para a busca da qualificação.

Ao setor de infraestrutura da Escola de Engenharia, que disponibilizou, a planta do quarteirão.

A prefeitura do Campus Centro, em especial a Camila Simonetti que gentilmente disponibilizou uma área para a exposição dos corpos de prova.

Agradeço ao Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (NORIE) por disponibilizar o Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído (LAMTAC) e o Laboratório de Inovação em Cimentos Ecoeficientes (Lince) para a realização da pesquisa.

Ao Laboratório de cerâmica (LACER), da UFRGS, pelo apoio na disponibilização dos equipamentos e na realização de ensaios.

Agradeço ao PPGCI/UFRGS por todo suporte e apoio à pesquisa, em especial a Karolline.

Enfim, agradeço a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para que eu chegasse até aqui. O meu muito obrigada a todos!!

*“Seja gentil, pois cada pessoa que você encontra está  
travando uma grande batalha.”*

*(Ian MacLaren)*

## RESUMO

PETRY, N. S. **Influência dos ambientes de exposição no fenômeno da autocicatrização em fissuras com idades variadas em concretos de cimento Portland com diferentes resistências**. 2021. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, UFRGS, Porto Alegre. RS

Pensando no desenvolvimento sustentável e segurança das estruturas, é necessário buscar materiais inteligentes que contribuam para o aumento da vida útil de estruturas em concreto armado. O ambiente de exposição que as estruturas estão submetidas afeta diretamente a durabilidade. Existem causas e efeitos físicos e químicos que influenciam na redução da vida útil das estruturas de concreto, os quais estão intimamente relacionados, fazendo com que frequentemente seja impossível separar a causa e o efeito da manifestação patológica. Atualmente, estudos mostram a possibilidade da autocicatrização em matrizes cimentícias, uma vez que o custo com manutenções das estruturas é elevado devido à ausência de cuidados prévios. Além do custo, há também o surgimento de fissuras em estruturas de concreto as quais comprometem diretamente a vida útil. A fissura serve como porta de entrada para diversos tipos de agentes deletérios que podem deteriorar tanto o concreto quanto sua armadura. Logo, alternativas que minimizem o efeito e até reparem a estrutura são maneiras de contribuir para sua durabilidade. Grande parte dos estudos realizados sobre autocicatrização focam em avaliar uma única relação água/cimento, indução das fissuras em idades mais jovens e/ou utilização de fibras para auxiliar na contenção da abertura e ambientes de exposição tais como ciclo de molhagem e secagem e submerso, poucos avaliam a autocicatrização em condições reais de utilização da matriz cimentícia. Desta maneira, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência do ambiente de exposição dos concretos, da relação água/cimento e da idade de abertura de fissuras no fenômeno da autocicatrização. Para isso, foi desenvolvida uma matriz experimental, na qual foram analisadas quatro relações água/cimento diferentes (0,30; 0,40; 0,50 e 0,65), quatro idades de abertura de fissuras (3, 28, 91 e 182 dias) e quatro ambientes de exposição dos concretos (natural protegido, natural, submerso e ciclos de molhagem e secagem). Os ensaios realizados foram divididos em três etapas. A primeira consiste na caracterização do concreto, sendo utilizado o ensaio de resistência à compressão axial, em todas as idades de abertura de fissuras e o ensaio de absorção de água por capilaridade, nas idades de 3 e 28 dias. A segunda etapa tem por objetivo acompanhar o fenômeno da autocicatrização através do ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e microscopia ótica, realizados a cada 28 dias após a indução da fissura. E por último, a terceira etapa consiste na verificação da autocicatrização, com o auxílio de ensaio de Termogravimetria (TGA), que foi realizado ao final dos 168 dias após a abertura das fissuras. Como resultados observou-se o ambiente de exposição submerso apresenta maior capacidade de autocicatrização para todas as relações água/cimento e idades de abertura de fissuras. O ambiente de exposição de ciclos também se mostrou benéfico, entretanto, na taxa de autocicatrização observou-se uma variação muito grande nos resultados obtidos, podendo ser decorrentes das variações internas de umidade dos corpos de prova e do local onde foram acondicionados. O ambiente natural apresentou benefícios para fissuras geradas nas idades iniciais e com espessura reduzida. Já o ambiente de exposição natural protegido foi o que menos contribuiu para a autocicatrização, tanto na taxa de autocicatrização calculada a partir do ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas quanto no ensaio de análise por microscopia ótica. Através o ensaio de termogravimetria é possível afirmar que os produtos de autocicatrização formados no selamento das fissuras é carbonato de cálcio.

**Palavras-chave:** ambiente de exposição, fissura, autocicatrização, concreto.

## ABSTRACT

PETRY, N. S. **Influence of exposure environments on the cracks self-healing phenomenon in at varying ages in Portland cement concretes with different strengths.** 2021. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, UFRGS, Porto Alegre. RS

Thinking about the sustainable development and safety of structures, it is necessary to look for intelligent materials that contribute to increasing the useful life of reinforced concrete structures. The exposure environment that structures are subjected to directly affects durability. There are physical and chemical causes and effects that influence the reduction of the useful life of concrete structures, which are closely related, making it often impossible to separate the cause and effect of the pathological manifestation. Currently, studies show the possibility of self-healing in cementitious matrices, since the cost of maintaining the structures is high due to the lack of prior care. In addition to the cost, there is also the appearance of cracks in concrete structures which directly compromise the useful life. The crack serves as an entry point for several types of harmful agents that can deteriorate both concrete and its armor. Therefore, alternatives that minimize the effect and even repair the structure are ways to contribute to its durability. Most of the studies carried out on self-healing focus on evaluating a single water/cement ratio, induction of cracking at younger ages and/or use of fibers to help contain the opening and exposure environments such as the wetting and drying cycle and submerged, few assess self-healing under real conditions of use of the cement matrix. Thus, the present work aims to evaluate the influence of the concrete exposure environment, the water/cement ratio and the crack opening age on the phenomenon of self-healing. For this, an experimental matrix was developed, in which four different water/cement ratios (0.30, 0.40, 0.50 and 0.65), four crack opening ages were analyzed (3, 28, 91 and 182 days) and four concrete exposure environments (protected natural, natural, submerged and wetting and drying cycles). The tests performed were divided into three stages. The first consists of the characterization of the concrete, using the axial compression strength test, at all crack opening ages, and the capillary water absorption test, at the ages of 3 and 28 days. The second stage aims to monitor the phenomenon of self-healing through the ultrasonic wave propagation velocity test and optical microscopy, performed every 28 days after the crack induction. And finally, the third step consists of verifying the self-healing, with the aid of tests such as Thermogravimetry (TGA), scanning electron microscopy and energy dispersive spectroscopy (SEM/EDS) that were performed at the end of 168 days after opening of the cracks. As a result, it was observed that the submerged exposure environment presents greater self-healing capacity for all water/cement ratios and crack opening ages. The cycle exposure environment also proved to be beneficial, however, in the self-healing rate there was a very large variation in the results obtained, which may be due to internal variations in the humidity of the specimens and the place where they were stored. The natural environment showed benefits for cracks generated at early ages and with reduced thickness. The protected natural exposure environment, on the other hand, contributed the least to self-healing, both in the self-healing rate calculated from the ultrasonic wave propagation velocity test and in the optical microscopy analysis test. Through the thermogravimetry test, it is possible to affirm that the hydration products formed in the sealing of the cracks is calcium carbonate.

**Keywords:** exposure environment, fissure, self-healing, concrete

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Linha do tempo das criações de comitês técnicos voltados ao autocicatrização ...	26
Figura 2: Evolução ao longo do tempo dos trabalhos publicados sobre autocicatrização .....	28
Figura 3: Evolução dos trabalhos publicados sobre autocicatrização em concretos .....	28
Figura 4: Grupo de pesquisa sobre autocicatrização NORIE/UFRGS.....	35
Figura 5: Diagrama de Venn – classificação dos fenômenos de autocicatrização de fissuras .....	39
Figura 6: Classificação do fenômeno de autocicatrização .....	40
Figura 7: Mecanismos de autocicatrização em matrizes cimentícias: (a) formação de carbonato de cálcio ou hidróxido de cálcio, (b) sedimentação de partículas, (c) hidratação continuada, (d) expansão da matriz de cimento.....	41
Figura 8: Diferentes mecanismos para autocicatrização autógena .....	42
Figura 9: Precipitação de carbonato de cálcio quando na presença CO <sub>2</sub> soluto em água ...	43
Figura 10: Precipitação de carbonato de cálcio na borda da fissura .....	44
Figura 11: Comportamento da autocicatrização autógena. (a) Restrição da largura da fissura; (b) presença de água; (c) melhor hidratação e cristalização.....	45
Figura 12: Mecanismos de autocicatrização autônoma. (a) PSA; (b) Bactéria; (c) Cápsula..	45
Figura 13: Imagens de microscopia ótica para concretos com a/c 0,3, fissuras geradas na idade de 3 dias, diferentes tipos de cimento aos 0 e 91 dias; (a) CP II-F; (b) CPIV; (c) CPV. ....	49
Figura 14: Volume ocupado por cimento, água e produtos de hidratação quando a hidratação do cimento Portland se dá em sistemas fechando.....	50
Figura 15: Volume ocupado por cimento, água e produtos de hidratação quando a hidratação do cimento Portland ocorre com uma fonte externa de água. ....	51
Figura 16: Imagem de microscopia ótica de fissuras em argamassas de referência, na idade de 3 e 28 dias e após 12 dias de exposição. (a) 3 dias; (b) 28 dias.....	53
Figura 17: Imagens de microscopia ótica de fissuras em concretos com a/c 0,5 e cimento CPV, nas idades 0 dias e 91 dias pós cura com diferentes idades de abertura de fissura. (a) 3 dias; (b) 28 dias. ....	54
Figura 18: Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura em função das classes de agressividade ambiental .....	55
Figura 19: Possibilidades de geometrias ao longo da profundidade das fissuras.....	57
Figura 20: Fechamento superficial das fissuras em diferentes tipos de ambientes de exposição. (a) submerso em água sem renovação; (b) submerso em água com renovação; (c) ciclo úmido e seco 12/12h; (d) exposto ao ar.....	59
Figura 21: Superfície da fissura (a) antes e depois da exposição em ambiente submerso; (b) em câmara ambiental com temperatura cíclica.....	60
Figura 22: Ensaio de velocidade de propagação de ondas .....	65
Figura 23: Imagem de microscopia ótica em compósito cimentício reformado com fibra de polietileno em diferentes idades após a abertura da fissura. (a) 0 dias; (b) 3 dias; (c) 14 dias; (d) 28 dias.....	67
Figura 24: (a) demarcação no corpo de prova dos pontos; (b) Exemplo da aplicação da microscopia ótica como análise qualitativa.....	67
Figura 25: Fissura em corpo de prova de argamassa. (a) antes (b) após 196 dias imerso em 165g/l NaCl.....	68
Figura 26: Imagem de microscopia ótica e análise no software Image J. (a) 0 dias; (b) 14 dias; (c) 91 dias .....	69
Figura 27: Capturas de tela geradas pelo equipamento de medição tridimensional. (a) Captura inicial; (b) ampliação do setor; (c) seleção da fissura e cicatrização. ....	69
Figura 28: Etapas do procedimento empregado. (a) Transformação do RGB em escala de cinza. (b) limiarização; (c) identificação dos contornos da fissura; (d) filtragem da imagem. ....	69
Figura 29: Comparação entre as metodologias de análises empregadas.....	70
Figura 30: Análise de produtos de autocicatrização formados em uma fissura. (a) Gráfico com a quantificação dos elementos; (b) locais onde foram realizadas as análises. ....	71

Figura 31: Avaliação de produtos de autocicatrização em fissuras. (a) Imagem obtida através de microscopia eletrônica de varredura; (b) EDS da área analisada.....	72
Figura 32: Análise química dos produtos de autocicatrização. (a) interno; (b) externo. ....	72
Figura 33: Produto de autocicatrização em concreto sem adição. (a) Imagem obtida através de microscopia eletrônica de varredura; (b) EDS da área analisada.....	73
Figura 34: Produto de autocicatrização em concreto sem adição. (a) Imagem obtida através de microscopia eletrônica de varredura; (b) EDS da área analisada.....	73
Figura 35: Formação de compostos. (a) Estalactites; (b) Termogravimétrica das estalactites. ....	75
Figura 36: Avaliação dos produtos formados na da fissura. (a) TG/DTG comparação imersão em água comum e solução marinha (b)TG/DTG comparação imersão e ciclo 12/12h.....	76
Figura 37: Avaliação dos produtos formados na borda da fissura. (a)DR-X; (b)TG/DTG; (c) MEV/EDS.....	76
Figura 38: Programa Experimental .....	77
Figura 39: Caracterização dos materiais .....	80
Figura 40: Difratoograma do cimento CII-F-40.....	83
Figura 41: Distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	83
Figura 42: Distribuição granulométrica do agregado graúdo .....	84
Figura 43: Diagrama de dosagem.....	87
Figura 44: Molde para os corpos de prova prismáticos.....	89
Figura 45: Mecanismo de abertura de fissura. (a) aparato; (b) corpo de prova posicionado no aparato; (c) aplicação de carga de compressão; (d) corpos de prova integro e fissurado.....	90
Figura 46: Ambientes de exposição dos corpos de prova: (a) natural; (b) natural protegido; (c) submerso; (d) ciclos de molhagem e secagem.....	92
Figura 47: Condições climáticas do ambiente de exposição natural – Umidade Relativa (%) .....	93
Figura 48: Condições climáticas do ambiente de exposição natural – Temperatura (°C).....	93
Figura 49: Localização dos prismas expostos ao ambiente natural .....	93
Figura 50: Disposição dos corpos de prova no ambiente natural .....	94
Figura 51: Planejamento dos ensaios.....	94
Figura 52: Aparato padrão para o ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica (a) representação gráfica; (b) registro fotográfico do ensaio em execução.....	96
Figura 53: Aparato padrão para o ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica (a) representação gráfica; (b) registro fotográfico .....	98
Figura 54: Metodologia de acompanhamento de autocicatrização por microscopia ótica (a) vista geral com marcação das microzonas; (b) representação esquemática com descrição da quantidade de imagens registradas; (c) registro fotográfico de amostra do programa experimental com sinalizações .....	99
Figura 55: Medições de espessuras de fissuras realizadas com microscopia ótica .....	99
Figura 56: Sequência do método de processamento de imagem.....	101
Figura 57: Produto resultante do processo de autocicatrização (a) imagem de microscopia ótica com ampliação de 0,65x ; (b) imagem de microscopia ótica com ampliação de 5x ....	102
Figura 58: Influência da idade e da relação água/cimento na resistência à compressão ....	104
Figura 59: Influência da idade e da relação água/cimento na absorção de água por capilaridade (a) 3 dias e (b) 28 dias.....	105
Figura 60 Absorção de água por capilaridade às 72hrs; (a) Influência da idade do concreto; (b) Influência da relação a/c.....	106
Figura 61: Relação teórica do grau de hidratação em função da idade da matriz cimentícia .....	107
Figura 62: Grau de hidratação para as diferentes relações a/c na idade de 3 dias.....	108
Figura 63: Grau de hidratação para as diferentes relações a/c na idade de 28 dias.....	108
Figura 64: Grau de hidratação para as diferentes relações a/c na idade de 91 dias.....	109
Figura 65: Grau de hidratação para as diferentes relações a/c na idade de 182 dias.....	109
Figura 66: Espessura média das fissuras em idades de abertura diferentes.....	111
Figura 67: Efeito isolado da idade de abertura das fissuras nas espessuras médias.....	113

Figura 68: Efeito isolado da relação a/c na espessura média das fissuras .....	114
Figura 69: Efeito da interação entre idade de abertura das fissuras e ambientes de exposição na espessura média das fissuras .....	114
Figura 70: Taxa de autocicatrização calculada com base na velocidade de propagação de onda ultrassônica, a/c 0,30 – abertura de fissura aos 3 dias (a) natural; (b) natural protegido; (c) submerso; (d) ciclo de molhagem e secagem.....	116
Figura 71: Taxa de autocicatrização para abertura de fissura aos 3 dias, diferentes relações água/cimento e ambientes de exposição.....	119
Figura 72: Taxa de autocicatrização para abertura de fissura aos 28 dias, diferentes relações água/cimento e ambientes de exposição.....	121
Figura 73: Taxa de autocicatrização para abertura de fissura aos 91 dias, diferentes relações água/cimento e ambientes de exposição.....	123
Figura 74: Taxa de autocicatrização para abertura de fissura aos 182 dias, diferentes relações água/cimento e ambientes de exposição.....	125
Figura 75: Efeito isolado da idade de abertura da fissuras sobre a taxa de autocicatrização na idade de 168 dias após exposição.....	127
Figura 76: Efeito isolado do ambiente de exposição dos concretos sobre a taxa de autocicatrização na idade de 168 dias após exposição. ....	128
Figura 77: Efeito isolado da relação água/cimento dos concretos sobre a taxa de autocicatrização na idade de 168 dias após exposição. ....	129
Figura 78: Influência da idade de abertura da fissura e ambiente de exposição sobre a taxa de autocicatrização na idade de 168 dias após exposição. ....	130
Figura 79: Efeito da interação entre a idade de abertura da fissura e relação água/cimento sobre a taxa de autocicatrização na idade de 168 dias após exposição. ....	132
Figura 80: Efeito da interação entre ambiente de exposição e relação água/cimento sobre a taxa de autocicatrização na idade de 168 dias após exposição. ....	133
Figura 81: Efeito da interação entre a idade de abertura da fissura, a relação água/cimento dos concretos e o ambiente de exposição sobre a taxa de autocicatrização.....	134
Figura 82: Imagem de microscopia ótica do intervalo 7, a/c 0,30 para 3 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente natural protegido, em diferentes ampliações. (a) 0,65x; (b)3,2x; (c) 5x.....	137
Figura 83: Imagem de microscopia ótica do intervalo 5, a/c 0,30, na idade de 3 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente submerso, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x; (c)5x. ....	138
Figura 84: Imagem de microscopia ótica do intervalo 2 a/c 0,30, na idade de 3 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente ciclos, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x; (c)5x. ....	138
Figura 85: Imagem de microscopia ótica do intervalo 7 a/c 0,65, na idade de 3 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente ciclos, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x; (c)5x. ....	144
Figura 86: Imagem de microscopia ótica do intervalo 1, a/c 0,30, 28 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente natural protegido, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x; (c)5x.....	146
Figura 87: Imagem de microscopia ótica do intervalo 1, a/c 0,30, 28 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente natural, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x; (c)5x. ....	147
Figura 88: Imagem de microscopia ótica do intervalo 3, a/c 0,30, 28 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente submerso, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x; (c)5x. ....	147
Figura 89: Imagem de microscopia ótica do intervalo 8, a/c 0,30, 28 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente submerso, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x; (c)5x. ....	147
Figura 90: Imagem de microscopia ótica do intervalo 1, a/c 0,40, 28 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente natural protegido, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x; (c)5x.....	149

Figura 91: Imagem de microscopia ótica do intervalo 1, a/c 0,40, 28 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente natural, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x; (c)5x. .....	150
Figura 92: Imagem de microscopia ótica do intervalo 8, a/c 0,40, 28 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente submerso, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x; (c)5x. .....	150
Figura 93: Imagem de microscopia ótica, a/c 0,40, 28 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente ciclo, em diferentes ampliações. (a)3,2x; (b)5x. ....	150
Figura 94: Imagem de microscopia ótica do intervalo 1, a/c 0,50, 28 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente natural, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x; (c)5x. .....	152
Figura 95: Imagem de microscopia ótica do intervalo 2, a/c 0,50, 28 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente natural submerso, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x; (c)5x.....	153
Figura 96: Imagem de microscopia ótica para o intervalo 5, a/c 0,50, 28 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente ciclo, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x; (c)5x. ...	153
Figura 97: Imagem de microscopia ótica para o intervalo 1, a/c 0,65, 28 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente natural protegido, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x; (c)5x.....	155
Figura 98: Imagem de microscopia ótica para o intervalo 1 a/c 0,65 para 28 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente natural. (a) (b) Ampliação 3,2x (c)Ampliação 5x.....	155
Figura 99: Imagem de microscopia ótica para o intervalo 2 a/c 0,65 para 28 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente submerso, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x; (c)5x. .....	155
Figura 100: Imagem de microscopia ótica para o intervalo 4, a/c 0,65, 28 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente ciclo, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x.....	156
Figura 101: Imagem de microscopia ótica para o intervalo 7 a/c 0,3, 91 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente ciclo, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x; (c)5x. ...	158
Figura 102: Imagem de microscopia ótica para o intervalo 7 a/c 0,4, 91 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente ciclo, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x; (c)5x. ...	160
Figura 103: Imagem de microscopia ótica para o intervalo 7 a/c 0,4, 91 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente ciclo, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x; (c)5x. ...	160
Figura 104: Imagem de microscopia ótica do intervalo 1, a/c 0,30, 168 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente submerso, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x; (c)5x. .....	166
Figura 105: Imagem de microscopia ótica do intervalo 8, a/c 0,40, 168 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente submerso em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)5x; (c)5x. .....	168
Figura 106: Imagem de microscopia ótica para o intervalo 1 a/c 0,40 para 168 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente ciclo, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x; (c)5x. .....	168
Figura 107: Imagem de microscopia ótica do intervalo 7, a/c 0,50, 168 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente submerso, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x; (c)3,2x. ....	170
Figura 108: Imagem de microscopia ótica, a/c 0,50, 168 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente ciclo. (a)Intervalo 7 ampliação 3,2x (b) Intervalo 5 Ampliação 3,2x (c)Intervalo 6 Ampliação 5x.....	170
Figura 109: Imagem de microscopia ótica para o intervalo 8 a/c 0,65 para 168 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente submerso. (a) (b) Ampliação 3,2x (c)Ampliação 5x .....	172
Figura 110: Imagem de microscopia ótica para o intervalo 8 a/c 0,65 para 168 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente ciclo. (a) (b) Ampliação 3,2x (c)Ampliação 5x.....	173
Figura 111: Espessura média inicial das fissuras na idade de abertura aos 3, 28, 91 e 182 dias para a relação a/c 0,65. ....	179
Figura 112: Efeito isolado da idade de abertura da fissura na espessura média das fissuras, para concretos com relação a/c 0,65. ....	180

Figura 113: Taxa de autocicatrização para abertura de fissura aos 3 dias, relação água/cimento 0,65 e diferentes ambientes de exposição .....	182
Figura 114: Taxa de autocicatrização para abertura de fissura aos 28 dias, relação água/cimento 0,65 e diferentes ambientes de exposição. ....	183
Figura 115: Taxa de autocicatrização para abertura de fissura aos 91 dias, relação água/cimento 0,65 e ambientes de exposição .....	185
Figura 116: Taxa de autocicatrização para abertura de fissura aos 182 dias, relação água/cimento 0,65 e ambientes de exposição .....	186
Figura 117: Efeito isolado da idade de abertura da fissura na taxa de autocicatrização para concretos com relação a/c 0,65. ....	188
Figura 118: Efeito isolado do ambiente de exposição na taxa de autocicatrização para concretos com relação a/c 0,65. ....	188
Figura 119: Efeito da interação entre a idade de abertura da fissura e ambiente de exposição na taxa de autocicatrização, para concretos com relação a/c 0,65. ....	190
Figura 120: Acompanhamento da área superficial da fissura ao longo do tempo. (a) abertura aos 3 dias; (b) abertura aos 28 dias; (c) abertura aos 91 dias; (d) abertura aos 182 dias...	201
Figura 121: Efeito isolado da idade de abertura da fissura na evolução da área média da fissura ao longo do tempo .....	203
Figura 122: Efeito isolado do ambiente de exposição na evolução da área média da fissura ao longo do tempo.....	204
Figura 123: Interação entre a idade de abertura de fissura e ambiente de exposição na evolução da área média ao longo do tempo.....	205
Figura 124: Termogravimetria derivada dos compostos formados na superfície fissuras para diferentes idades de abertura e expostas no ambiente natural protegido, para concretos a/c 0,65 .....	207
Figura 125: Termogravimetria derivada dos compostos formados na superfície fissuras para diferentes idades de abertura e expostas no ambiente natural, para concretos a/c 0,65. ....	208
Figura 126: Termogravimetria derivada dos compostos formados na superfície fissuras para diferentes idades de abertura e expostas no ambiente ciclo de molhagem e secagem, para concretos a/c 0,65 .....	209
Figura 127: Termogravimetria derivada dos compostos formados na superfície fissuras para diferentes idades de abertura e expostas no ambiente submerso, para concretos a/c 0,65 .....	209

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fatores que afetam o fenômeno de autocicatrização .....	47
Tabela 2: Mecanismos que podem desencadear a autocicatrização em fissuras .....	62
Tabela 3: Técnicas empregadas para a verificação da autocicatrização .....	63
Tabela 4: Caracterização química do cimento Portland composto com Fíler – CII F -40....	81
Tabela 5: Caracterização física do cimento Portland composto com fíler – CP II-F-40 .....	82
Tabela 6: Caracterização física do agregado miúdo .....	84
Tabela 7: Caracterização física do agregado graúdo.....	85
Tabela 8: Características físico-químicas do aditivo .....	85
Tabela 9: Traços unitários – Dosagem experimental .....	87
Tabela 10: Resultado da curva de dosagem experimental .....	87
Tabela 11: Traços unitários dos concretos produzidos .....	88
Tabela 12: Abatimento, quantidade de aditivo (% sobre a massa de cimento) e condições climáticas .....	88
Tabela 13: Ensaio de caracterização das matrizes cimentícias.....	95
Tabela 14: Ensaio de acompanhamento da autocicatrização.....	95
Tabela 15: Ensaio para a verificação dos compostos formados pela autocicatrização .....	95
Tabela 16: Resistência à compressão aos 3, 28, 91 e 182 dias de idade dos concretos....	103
Tabela 17: ANOVA ensaio de Resistência à compressão para concretos com diferentes idades .....	104
Tabela 18: Absorção de água por capilaridade aos 3 e 28 dias de idade dos concretos, após 72h de ensaio .....	105
Tabela 19: ANOVA ensaio de Absorção de água por capilaridade as 72hrs .....	105
Tabela 20: Estimativa de grau de hidratação para as diferentes idades de abertura das fissuras.....	107
Tabela 21: Espessura média das fissuras na idade de abertura aos 3, 28, 91 e 182 dias..	111
Tabela 22: ANOVA espessura média das fissuras.....	112
Tabela 23: Taxa média de autocicatrização realizada após abertura das fissuras com 3 dias de idade .....	116
Tabela 24: Taxa de autocicatrização para abertura de fissura aos 3 dias, diferentes relações água/cimento e ambientes de exposição na idade final de 168 dias.....	117
Tabela 25: Taxa de autocicatrização para abertura de fissura aos 28 dias, diferentes relações água/cimento e ambientes de exposição na idade final de 168 dias.....	120
Tabela 26: Taxa de autocicatrização para abertura de fissura aos 91 dias, diferentes relações água/cimento e ambientes de exposição na idade de 168 dias.....	122
Tabela 27: Taxa de autocicatrização para abertura de fissura aos 182 dias, diferentes relações água/cimento e ambientes de exposição na idade final de 168 dias.....	124
Tabela 28: ANOVA da taxa de autocicatrização na idade de 168 dias após exposição. ....	126
Tabela 29: Compilação dos dados da etapa de acompanhamento da autocicatrização .....	174
Tabela 30: Distribuição dos cp's em função da faixa de abertura da fissura das fissuras em função da idade de geração da fissura, relação a/c e ambiente de exposição. ....	176
Tabela 31: Distribuição das fissuras em função da faixa de abertura. ....	177
Tabela 32: Espessura média inicial das fissuras na idade de abertura aos 3, 28, 91 e 182 dias para a relação a/c 0,65. ....	178
Tabela 33: ANOVA da espessura média inicial das fissuras na idade de abertura aos 3, 28, 91 e 182 dias para a relação a/c 0,65.....	179
Tabela 34: Taxa de autocicatrização média das fissuras nas idades de abertura aos 3, 28, 91 e 182 dias aos 168 dias, para concretos com relação a/c 0,65.....	181
Tabela 35: ANOVA taxa de autocicatrização média das fissuras para a idade de 168 dias após a abertura da fissura, para concretos com relação a/c 0,65. ....	187
Tabela 36: Evolução da área média (%) das fissuras nas idades de abertura avaliadas aos 3, 28, 91 e 182 dias aos 28 e 168 dias. ....	200

Tabela 37: Redução da área da espessura da fissura na idade de 168 dias após exposição. ....	203
Tabela 38: Comparação entre taxa de autocicatrização e evolução média das fissuras, para os resultados obtidos na idade de 168 dias. ....	206

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Compilado de dissertações e teses realizados no Brasil sobre autocicatrização	29
Quadro 2: Compilação de artigos internacionais sobre o fenômeno da autocicatrização em diferentes matrizes cimentícias	32
Quadro 3: Trabalhos desenvolvidos e concluídos pelo Grupo de Autocicatrização em matrizes cimentícias NORIE/UFRGS.	35
Quadro 4: Acompanhamento da fissura por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias do CPII F, a/c 0,30 para 3 dias de idade de abertura de fissuras e diferentes ambientes de exposição	136
Quadro 5: Acompanhamento da fissura por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias do CPII F, a/c 0,40 para 3 dias de idade de abertura de fissuras e diferentes ambientes de exposição	139
Quadro 6: Acompanhamento da fissura por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias do CPII F, a/c 0,50, para 3 dias de idade de abertura de fissuras para diferentes ambientes de exposição	141
Quadro 7: Acompanhamento da fissura por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias do CPII F, a/c 0,65 para 3 dias de idade de abertura de fissuras para diferentes ambientes de exposição	142
Quadro 8: Acompanhamento da fissura por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias do CPII F, a/c 0,30 para 28 dias de idade de abertura de fissuras para diferentes ambientes de exposição	145
Quadro 9: Acompanhamento da fissura por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias do CPII F, a/c 0,40 para 28 dias de idade de abertura de fissuras para diferentes ambientes de exposição	148
Quadro 10: Acompanhamento da fissura por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias do CPII F, a/c 0,50 para 28 dias de idade de abertura de fissuras para diferentes ambientes de exposição	151
Quadro 11: Acompanhamento da fissura por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias do CPII F, a/c 0,65 para 28 dias de idade de abertura de fissuras para diferentes ambientes de exposição	153
Quadro 12: Acompanhamento da fissura por microscopia ótica aos 0, 28 e 84 dias do CPII F, a/c 0,30 para 91 dias de idade de abertura de fissuras para diferentes ambientes de exposição	156
Quadro 13: Acompanhamento por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias do CPII F, a/c 0,40 para 91 dias de idade de abertura de fissuras para diferentes ambientes de exposição	158
Quadro 14: Acompanhamento da fissura por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias do CPII F, a/c 0,50 para 91 dias de idade de abertura de fissuras para diferentes ambientes de exposição	161
Quadro 15: Acompanhamento da fissura por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias do CPII F, a/c 0,65 para 91 dias de idade de abertura de fissuras para diferentes ambientes de exposição	162
Quadro 16: Acompanhamento da fissura por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias do CPII F, a/c 0,30 para 182 dias de idade de abertura de fissuras para diferentes ambientes de exposição	164
Quadro 17: Acompanhamento da fissura por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias do CPII F, a/c 0,40 para 182 dias de idade de abertura de fissuras para diferentes ambientes de exposição	166
Quadro 18: Acompanhamento da fissura por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias do CPII F, a/c 0,50 para 182 dias de idade de abertura de fissuras para diferentes ambientes de exposição	168

Quadro 19: Acompanhamento da fissura por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias do CPlI F, a/c 0,65 para 182 dias de idade de abertura de fissuras para diferentes ambientes de exposição.....	171
Quadro 20: Acompanhamento por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias, 3 dias de idade de abertura de fissuras no ambiente de exposição natural.....	192
Quadro 21: Acompanhamento por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias, para 3 dias de idade de abertura de fissuras no ambiente de exposição natural protegido. ....	192
Quadro 22: Acompanhamento por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias, para 3 dias de idade de abertura de fissuras no ambiente de exposição submerso.....	193
Quadro 23: Acompanhamento por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias, para 3 dias de idade de abertura de fissuras no ambiente de exposição ciclo. ....	194
Quadro 24: Acompanhamento por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias, para 28 dias de idade de abertura de fissuras no ambiente de exposição natural.....	194
Quadro 25: Acompanhamento por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias, para 28 dias de idade de abertura de fissuras no ambiente de exposição natural protegido. ....	195
Quadro 26: Acompanhamento por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias, 28 dias de idade de abertura de fissuras no ambiente de exposição ciclo. ....	195
Quadro 27: Acompanhamento por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias, 91 dias de idade de abertura de fissuras no ambiente de exposição natural.....	196
Quadro 28: Acompanhamento por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias, 91 dias de idade de abertura de fissuras no ambiente de exposição natural protegido. ....	196
Quadro 29: Acompanhamento por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias, 91 dias de idade de abertura de fissuras no ambiente de exposição submerso.....	197
Quadro 30: Acompanhamento por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias, 91 dias de idade de abertura de fissuras no ambiente de exposição ciclo. ....	197
Quadro 31: Acompanhamento por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias, 182 dias de idade de abertura de fissuras no ambiente de exposição natural.....	198
Quadro 32: Acompanhamento por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias, 182 dias de idade de abertura de fissuras no ambiente de exposição natural protegido. ....	199
Quadro 33: Acompanhamento por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias, 182 dias de idade de abertura de fissuras no ambiente de exposição submerso.....	199
Quadro 34: Acompanhamento por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias, 182 dias de idade de abertura de fissuras no ambiente de exposição ciclo. ....	200
Quadro 35: Acompanhamento por microscopia ótica .....	202

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.....	41
Equação 2.....	41
Equação 3.....	41
Equação 4.....	41
Equação 5.....	43
Equação 6.....	43
Equação 7.....	97
Equação 8.....	98
Equação 9.....	98
Equação 10.....	101

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EE: Escola de Engenharia

PPGCI: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

CME: Centro de Microscopia Eletrônica

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

NORIE: Núcleo Orientado para Inovação na Edificação

NBR: Norma brasileira regulamentadora

ARP: aditivo redutor de permeabilidade

AGRC: agregado graúdo reciclado cerâmico

Al: alumínio

Ca: cálcio

Ca(OH)<sub>2</sub> ou CH: hidróxido de cálcio ou portlandita

CAH: aluminato de cálcio hidratado

CaCO<sub>3</sub>: carbonato de cálcio

CaO: óxido de cálcio

CAR: concreto de alta resistência

CO<sub>2</sub>: dióxido de carbono ou gás carbônico

CP: Cimento Portland

C<sub>3</sub>S: silicato tricálcico

C-S-H: silicato de cálcio hidratado

DRX: difração de raio-X

DTG: termogravimetria derivada

E: escória

EDS: espectroscopia por energia dispersiva

Fe: ferro

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: óxido de ferro

K: potássio

MEV: microscopia eletrônico de varredura

PSA: polímeros superabsorventes

RS: resistente a sulfatos

Si: silício

TG: termogravimetria

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>24</b>
1.1	CONTEXTO E JUSTIFICATIVA	26
1.2	OBJETIVOS DA PESQUISA	36
1.3	LIMITAÇÕES	36
1.4	DELIMITAÇÕES	37
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	37
<b>2</b>	<b>O FENÔMENO DA AUTOCICATRIZAÇÃO</b>	<b>38</b>
2.1	MECANISMOS DE AUTOCICATRIZAÇÃO	39
2.1.1	Cicatrização autógena	40
2.1.2	Cicatrização autônoma	45
2.2	FATORES QUE INFLUENCIAM A AUTOCICATRIZAÇÃO	46
2.2.1	Influência da relação água/cimento	47
2.2.2	Influência da idade	51
2.2.3	Espessura e geometria das fissuras	54
2.2.4	Influência do ambiente de exposição	58
2.3	MECANISMOS QUE CONTRIBUEM PARA A AUTOCICATRIZAÇÃO	61
2.4	ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DA AUTOCICATRIZAÇÃO	62
2.4.1	Medidas de transmissão de ultrassom	64
2.4.2	Microscopia ótica	66
2.4.3	Microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de energia dispersiva	70
2.4.4	Análise Termogravimétrica	74
<b>3</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL</b>	<b>77</b>
3.1	VARIÁVEIS ESTUDADAS	78
3.1.1	Variáveis de resposta ou dependentes	78
3.1.2	Variáveis controladas ou independentes	78
3.1.3	Variáveis não controladas	79
3.1.4	Variáveis fixas	79
3.2	MATERIAIS E MÉTODOS	80
3.2.1	Ensaio realizado para a caracterização dos materiais utilizados	80
3.2.2	Materiais utilizados	80
3.2.2.1	Cimento	81
3.2.2.2	Agregado miúdo	83
3.2.2.3	Agregado graúdo	84

3.2.2.4	Aditivo superplastificante .....	85
3.2.2.5	Água .....	86
3.3	<b>PRODUÇÃO DOS CONCRETOS</b> .....	86
3.3.1	<b>Dosagem dos concretos</b> .....	86
3.3.2	<b>Produção do concreto</b> .....	88
3.3.3	<b>Moldagem dos corpos de prova</b> .....	89
3.3.4	<b>Cura</b> .....	89
3.4	<b>Abertura das fissuras</b> .....	90
3.5	<b>Ambientes de exposição</b> .....	91
3.5.1	<b>Condições climáticas do ambiente de exposição natural e natural protegido</b> .....	92
3.6	<b>Ensaio realizado</b> .....	94
3.6.1	<b>Velocidade de propagação de onda ultrassônica</b> .....	95
3.6.2	<b>Microscopia ótica</b> .....	99
3.6.3	<b>Análise termogravimétrica</b> .....	101
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	103
4.1	<b>Caracterização das matrizes cimentícias</b> .....	103
4.1.1	<b>Resistência à compressão axial</b> .....	103
4.1.2	<b>Absorção de água por capilaridade</b> .....	104
4.1.3	<b>Grau de hidratação</b> .....	106
4.2	<b>Acompanhamento da autocicatrização</b> .....	110
4.2.1	<b>Espessura média das fissuras</b> .....	110
4.2.1.1	Efeito da idade de abertura da fissura sobre a espessura média das fissuras 112	
4.2.1.2	Efeito da relação a/c sobre a espessura média das fissuras .....	113
4.2.1.3	Efeito da interação de segunda ordem idade de abertura da fissura e ambiente de exposição sobre a espessura média das fissuras .....	114
4.2.2	<b>Velocidade de propagação de onda ultrassônica</b> .....	115
4.2.2.1	Efeito da idade de abertura da fissura sobre a taxa de autocicatrização .....	126
4.2.2.2	Efeito do ambiente de exposição sobre a taxa de autocicatrização .....	128
4.2.2.3	Efeito da relação água/cimento sobre a taxa de autocicatrização .....	129
4.2.2.4	Efeito da interação de segunda ordem entre Idade de abertura da fissura e ambiente de exposição sobre a taxa de autocicatrização .....	130
4.2.2.5	Efeito da interação de segunda ordem entre Idade de abertura da fissura e relação água/cimento sobre a taxa de autocicatrização .....	131
4.2.2.6	Efeito da interação de segunda ordem entre ambiente de exposição e relação água/cimento sobre a taxa de autocicatrização .....	133
4.2.2.7	Efeito da interação de terceira ordem entre idade de abertura da fissura, ambiente de exposição e relação água/cimento sobre a taxa de autocicatrização .....	134
4.2.3	<b>Microscopia ótica – Avaliação qualitativa</b> .....	135

4.2.4 Grau de hidratação x Espessura média das fissuras x taxa de autocicatrização 174	
4.3 AUTOCICATRIZAÇÃO .....	175
4.3.1 Espessura média inicial das fissuras.....	178
4.3.2 Velocidade de propagação de onda ultrassônica.....	181
4.3.3 Microscopia ótica.....	191
4.3.4 Taxa de autocicatrização x Microscopia ótica .....	205
4.3.5 Termogravimetria (TGA).....	207
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>211</b>
5.1 CONCLUSÕES.....	211
5.2 APRENDIZADOS.....	212
5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	214
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>215</b>
<b>APÊNDICE A – Resultados obtidos no ensaio de Resistência à compressão.....</b>	<b>224</b>
<b>APÊNDICE B – Resultados obtidos no ensaio de Absorção de água por capilaridade.....</b>	<b>226</b>
<b>APÊNDICE C – Resultados obtidos para o grau de hidratação dos concretos em diferentes idades.....</b>	<b>228</b>
<b>C3. Volume dos constituintes do concreto para relação a/c 0,5 .....</b>	<b>233</b>
<b>C4. Volume dos constituintes do concreto para relação a/c 0,65 .....</b>	<b>236</b>
<b>APÊNDICE E – Resultados obtidos para ensaio de velocidade propagação de onda e taxa de autocicatrização .....</b>	<b>239</b>
<b>APÊNDICE F – Imagens obtidas no processamento de imagem.....</b>	<b>246</b>
<b>ANEXO A – Distribuição granulométrica do cimento .....</b>	<b>253</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Os concretos empregados nas estruturas fissuram por diversos fatores, podendo ocorrer tanto na passagem do estado fresco para o estado endurecido, bem como ao longo da sua vida útil. Entre as principais causas de fissuração do concreto, oriundo das primeiras idades, ressalta-se a dessecação superficial, a retração plástica, a movimentação das fôrmas, a cura inadequada e o carregamento precoce (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

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. Um concreto fissurado tende a sofrer penetração mais rápida de agentes agressivos em direção às armaduras, quando comparado a um concreto sem falhas (DAL MOLIN, 1988).

Quando não tratadas, as fissuras servem de entrada para agentes agressivos, que podem levar à degradação do concreto, causando manifestações patológicas, tais como manchamento, eflorescência, carbonatação, desp passivação e corrosão de armadura, que irão impactar na redução da vida útil das estruturas (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

Vale ressaltar que a durabilidade não é uma propriedade intrínseca dos materiais, mas sim uma função que está relacionada com o desempenho dos mesmos sob determinadas condições ambientais (POSSAN, 2010). Há uma relação diretamente proporcional entre a espessura da fissura e a durabilidade do concreto, quanto maior a abertura, maior é o comprometimento da estrutura, culminando na redução da vida útil.

No Brasil, a NBR 6118 (ABNT, 2014), que trata sobre projeto de estruturas de concreto, apresenta valores limites para fissuração e proteção das armaduras quanto à durabilidade, para concretos simples, armado e protendido. A limitação é realizada de acordo com a classe de agressividade ambiental (CAA) dos concretos. A maior fissura admitida é de 0,4mm para concreto armado quando expostos em CAA I (ambiente rural e/ou submerso), 0,3mm para CAA II (ambiente urbano) e III (ambiente marinho e/ou industrial\*) e 0,2mm para CAA IV (ambiente industrial\* e respingos de maré). Para concreto protendido nível 1 nos CAA I e II a exigência relativa à fissuração também é de 0,2mm.

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), quando a abertura máxima característica das fissuras, não exceder valores da ordem de 0,2 mm a 0,4 mm, sob ação das combinações

frequentes (tipo de concreto estrutural x classe de agressividade ambiental), não impactar de forma significativa na corrosão das armaduras passivas, de acordo com as condições de agressividade do ambiente de exposição. Logo, fissuras maiores que 0,4mm podem representar um problema para as estruturas, servindo como entrada para agentes agressivos, que podem causar as manifestações patológicas nas estruturas.

Valores similares são aceitos no âmbito internacional. O ACI Committee 224R-01 (ABOU-ZEID, Mohamed *et al.*, 2001) adota limites entre 0,41mm para locais com clima seco ou peça protegida, 0,30mm para ambientes úmidos e peças em contato com o solo, 0,18mm para ambientes com agressividade química, 0,15 para ambiente marinho e 0,10mm para estruturas de contenção de líquidos.

Entretanto, nem toda fissura coloca em risco a segurança ou a durabilidade da edificação, mas pode causar abalo psicológico nos seus usuários (THOMAZ, 2014). Logo, utilizar recursos para que essas fissuras sejam seladas é uma das alternativas possíveis, tanto para evitar o desconforto do usuário, quanto para proteger a estrutura.

Atualmente há uma série de novos materiais e tecnologias que podem auxiliar no fechamento de fissuras. Dentre as possibilidades para o reestabelecimento da integridade do concreto tem-se o emprego de injeção de resina, opção esta que apresenta alto custo. Contudo, sabe-se que o próprio concreto apresenta características que podem contribuir para o selamento das fissuras. Este fenômeno é conhecido como autocicatrização (*Self-healing*).

A autocicatrização é definida como a capacidade de um material para cicatrizar, recuperar e/ou reparar danos, de forma autônoma, sem que seja necessária qualquer intervenção externa. Logo, é uma combinação de processos químicos e mecânicos, sendo estes: a precipitação de carbonato de cálcio, o bloqueio das fissuras com impurezas da água e partículas soltas de concreto, hidratação tardia dos grãos anidros de cimento e/ou pela formação do C-S-H secundário (WU *et al.*, 2012).

O comitê do RILEM 221 SHC, define autocicatrização como qualquer processo do próprio material envolvendo sua reparação e/ou melhoria de desempenho. Este comitê também estabelece uma classificação mais simplificada quanto aos fenômenos de cicatrização, sendo eles, a cicatrização autógena e a cicatrização autônoma (ROOJI *et al.*, 2013).

A cicatrização autógena consiste em um processo natural, no qual a fissura é preenchida e/ou selada sem auxílio de nenhuma ação externa, apenas com componentes intrínsecos do concreto. Desta forma, o processo de autocicatrização será considerado autógeno quando a

reparação utilizar apenas os materiais constituintes da matriz cimentícia que foram empregados com outras finalidades no meio.

Já a cicatrização autônoma é definida como o fenômeno de reparação quando se utilizam mecanismos, de alguma maneira, que não são encontrados na matéria-prima principal das matrizes cimentícias (RILEM 221 – SHC, 2013).

O processo de autocicatrização, especialmente abordado nesse estudo, acontece através da ausência ou menor influência possível de mão de obra e agentes adicionados à matriz cimentícia (aditivos cicatrizantes), sendo de natureza predominantemente química dos elementos básicos de composição do concreto.

## 1.1 CONTEXTO E JUSTIFICATIVA

Ao longo dos últimos anos vários trabalhos (KAN e SHI, 2012; HUANG, 2014; ROIG-FLORES *et al.* 2015; WANG, 2015; VIJAY *et al.*, 2017; QURESHI *et al.*, 2019) têm sido propostos para investigar a autocicatrização em matrizes cimentícias. Muitos destes estudos focaram na utilização de um elemento adicionado ao concreto para que a autocicatrização aconteça, tais como: bactérias, nanotubos, polímero superabsorventes (PSA), adições cicatrizantes, adições de carbonatos, entre outras.

O estudo do fenômeno da autocicatrização em matrizes cimentícias ganhou força com o surgimento dos comitês técnicos voltados à temática. A Figura 1 mostra um compilado dos comitês que foram criados ao longo do tempo.

Figura 1: Linha do tempo das criações de comitês técnicos voltados ao autocicatrização



Fonte: própria da autora.

No ano de 2005 iniciaram as atividades do comitê técnico 221-SHC: *Self-healing phenomena in cement-based materials*, da *The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures* (RILEM), o qual perdurou até o ano de 2013, e tendo como objetivo a preparação e publicação do Relatório do Estado da Arte, bem como a preparação de um simpósio internacional RILEM.

No ano de 2007, criou-se o Comitê técnico JCI-TC075B: *Autogenous Healing in Cementitious Materials*, do *Japan Concrete Institute* (JCI), que atuou por 2 anos. Tinha como objetivo popularizar o desempenho de autocicatrização de materiais à base de cimento; ao final deste

período de atuação, o comitê foi responsável pela elaboração e publicação do primeiro relatório.

Já no ano de 2009, o comitê técnico JCI-TC091A: *Technical Committee on Self-healing /Repairing Technology in Cement-based Materials* é criado para substituir o JCI-TC075B. Este novo comitê teve como objetivo ampliar a participação de membros e criar atividades e grupos de trabalho. Dentro do escopo dos grupos estava verificar o desempenho de métodos de avaliação da autocicatrização, analisar os mecanismos do processo de autocicatrização e determinar as características de cicatrização que podem ser avaliadas através de ensaios não destrutíveis.

No ano de 2016 teve início o comitê técnico SHE: *Self-healing concrete – Its efficiency and evolution*, da Rilem, finalizado no ano de 2020. Este comitê técnico teve por escopo atuar em 3 diferentes áreas: a primeira destinada a revisão de literatura, a segunda área é reservada à eficiência e à avaliação para concreto autocicatrizantes e por último a eficiência e a avaliação para o concreto com recuperação da funcionalidade.

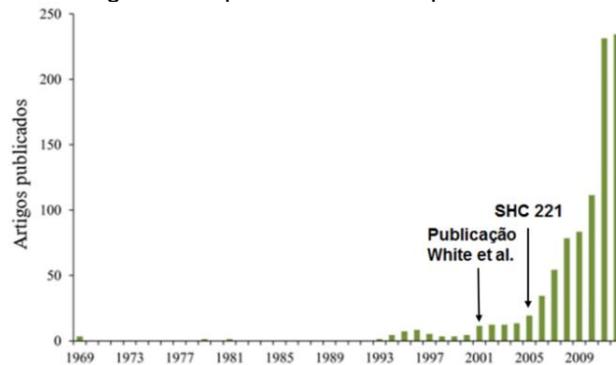
Também no ano de 2016, teve início o COST CA15202 SARCOS: *Self-healing as preventive repair of concrete structures*, finalizado em março de 2021, como o objetivo de fornecer uma estrutura para avançar na implementação de soluções inovadoras e sustentáveis para prolongar a vida útil de estruturas de concreto. O COST: Cooperação Europeia em Ciência e Tecnologia é um quadro intergovernamental pan-europeu, que tem como missão incentivar o desenvolvimento científico e tecnológico inovador, conducentes a novos conceitos e produtos e, assim, contribuir para o reforço das capacidades de investigação e inovação da Europa.

Em dezembro de 2019, o Sarcos teve como iniciativa a formação de um rede internacional de treinamento, denominada SMARTINCS (Smart, Multi-functional, Advanced Repair Technologies In Cementitious Systems). Esta rede, atualmente ativa, tem como missão implementar novas abordagens de ciclo de vida e durabilidade para os concretos autocicatrizados.

Desta forma, a comunidade científica tem explorado a temática de autocicatrização. O estudo apresentado por White *et al.* (2001), Van Titterlboom e De Belie (2013) apresenta uma compilação sobre as publicações acerca do presente tema. A primeira pesquisa na área aconteceu em 1969. Nesta, foram avaliados materiais poliméricos com a incorporação de elementos autocicatrizantes. Mais tarde, na década de 90, as pesquisas nessa área começam a aumentar, tendo o seu maior avanço quanto ao volume de estudos/publicações a partir do ano de 2009, conforme pode-se observar na Figura 2.

Ainda com base na Figura 2, observa-se que a partir do ano de criação do SHC 221, em 2005, houve um aumento substancial nas publicações de artigos relacionados ao assunto. Este comitê atuou até o ano de 2012. Já em 2013, ocorreu a publicação de um livro pelo RILEM denominada como *Star Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials* (ROOIJ *et al.*, 2013).

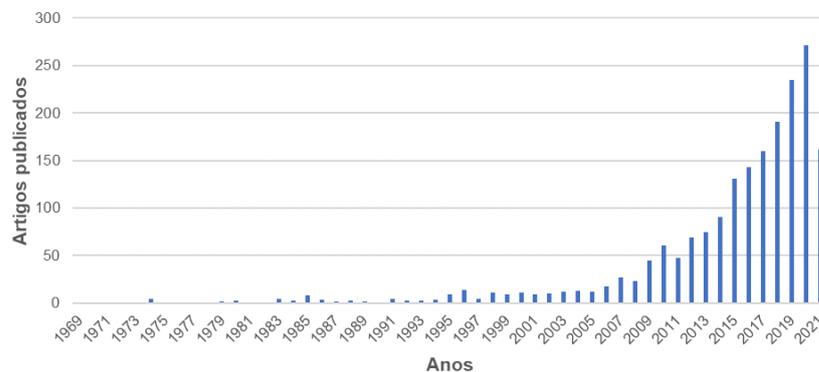
Figura 2: Evolução ao longo do tempo dos trabalhos publicados sobre autocicatrização



Fonte: Van Titterlboom e De Belie, 2013.

Com base na metodologia utilizada por Van Titterlboom e De Belie (2013) para a compilação sobre as publicações acerca a autocicatrização, e aplicada por Sidiq *et al.* (2019), foi realizada a atualização das pesquisas sobre autocicatrização em concretos (SCOPUS, 2021). Conforme é demonstrado na Figura 3. Para a realização do levantamento dos trabalhos publicados, foi utilizado o site Scopus e foi pesquisada a frase “concrete healing”.

Figura 3: Evolução dos trabalhos publicados sobre autocicatrização em concretos



Fonte: adaptada de Scopus (2021).

No Brasil, o primeiro trabalho relacionado à autocicatrização em concretos é de Vieira (2008), seguido por Takagi (2013). O Quadro 1 traz uma compilação de alguns trabalhos realizados no Brasil, foram selecionados os primeiros trabalhos e os mais atuais desenvolvidos. Vale ressaltar que a temática em nível nacional ainda é pouco explorada. Já em nível internacional, o número de trabalhos sendo desenvolvidos está em crescimento. Desta maneira, no Quadro 2, são apresentados alguns destes trabalhos.

Quadro 1: Compilado de dissertações e teses realizados no Brasil sobre autocicatrização

Autores	Objetivo	Metodologia	Principais conclusões
Vieria (2008) (NORIEUFRGS)	Verificar a influência da microfissuração causada por carregamento precoce em concretos produzidos com diferentes tipos de cimento.	Foram avaliados concretos produzidos quatro diferentes tipos de cimento (CPV ARI, CPV ARI RS, CPIX RS, CPII), com relações água/cimento de 0,35, 0,50 e 0,70, quando submetidos a um carregamento precoce de compressão em diferentes idades (1, 3 e 7 dias) e diferentes percentuais de carregamento (0%, 25%, 50% e 75%). Foram realizados ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade, velocidade de onda ultrassônica, condições de cura e ensaios de microscopia eletrônica de varredura.	Como resultados observou-se que à medida que aumenta a idade de carregamento, as propriedades mecânicas são melhoradas para todos os cimentos. Entretanto, quando se aplica os percentuais de carregamento precoce a resistência à compressão tende a aumentar, principalmente para o cimento CPV ARI. A partir da análise de microscopia foi possível visualizar microfissuras ocasionadas pelo carregamento precoce, assim como sua recuperação. Com relação aos demais cimentos pesquisados observou-se uma redução nos valores de resistência à tração e no módulo de elasticidade.
Takagi (2013) (ITA)	Comparar a influência de cimentos disponíveis no mercado nacional com percentuais distintos de escória de alto forno visando caracterizar possível potencial de cicatrização autógena de fissuras no concreto.	Foram produzidos concretos com 3 tipos de cimento (CPIIIRS, CPII E e CPV ARI), com diferentes percentuais de escória de alto forno, nas faixas de 55%, 34% e 0%. Após a cura inicial, os cp's foram pré-carregados com 90% da carga de ruptura, gerando fissuras no interior deles. Na sequência, foram expostos em ambiente submerso, para ativar o fenômeno de autocicatrização e submetidos a ensaios de laboratório após 28, 56 e 84 dias. Foram realizados ensaios de penetração de água sob pressão, resistência à compressão axial, velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, absorção de água por capilaridade e difusão de íons cloretos.	Quanto à recuperação das propriedades mecânicas e aa estanqueidade mostram maior autocicatrização as amostras com cimento CPII RS, seguidas pelo CPV ARI e CPII E. Verificou-se, também, uma tendência para uma autocicatrização mais lenta nas amostras com escória de alto forno (cimento CPII RS e CPII E), nas idades mais jovens comparados com as amostras com que utilizaram o cimento CPV ARI. O comportamento hidráulico latente da escória de alto forno nas amostras mostrou-se essencial para a autocicatrização a longo prazo.
Moreira (2016) (UNC/UnB)	Analisar o efeito do aditivo redutor de permeabilidade (ARP) em concretos com diferentes tipos de cimento Portland quanto à autocicatrização.	Foram empregadas quatro misturas de referência, conforme o tipo de cimento Portland (CPII E-40, CPII-40, CPIX-40 e CPV ARI). Quatro misturas similares às anteriores, com adição de 0,8% de aditivo redutor de permeabilidade (ARP) e, por último, uma mistura contendo cimento CPII-40, ARP e fibra de polipropileno, e fixada relação a/c de 0,45. Os corpos de prova foram mantidos em cura úmida até a realização dos ensaios. Foram realizados ensaios de resistência à compressão simples e com carregamento de 40% da carga última de ruptura, de resistência à tração por compressão diametral e de módulo de elasticidade, ensaios de penetração a água sob pressão, de permeabilidade à água e de absorção de água por capilaridade.	Quanto às propriedades mecânicas, notou-se que a variação dos resultados, entre os concretos com e sem ARP, foi de até 10% maior. A utilização do conjunto ARP e fibras levou a uma maior permeabilidade à água. Com relação à avaliação isolada do emprego do ARP, este se mostrou eficiente para reduzir a permeabilidade do concreto quando utilizado com CPII- 40, apresentando uma redução significativa da altura de ascensão da água, chegando a 44%, quando comparado com o traço de referência. Já os cimentos CPII E-40 e CPIX- 40 mostraram uma redução menor, 4% e 2%, respectivamente, já os concretos produzidos com o cimento CPV apresentaram aumento na permeabilidade.

<b>Bernardino da Silva (2016)</b> (NORIEUFRGS)	<p>Estudar o desempenho de concretos frente à retração por secagem, após submetidos a um pré-carregamento.</p>	<p>Foram empregados dois tipos de cimento (CPV ARI e CPIV), três relações a/c (0,35; 0,50 e 0,70) e duas idades de cura (7 e 28 dias).  Nas idades 1, 3 e 7 dias, os concretos foram submetidos a carregamentos de 25%, 50% e 75% da carga média de ruptura à tração na flexão;  Foram realizados os ensaios para determinação da retração por secagem, determinação da velocidade da onda ultrassônica, porosimetria por intrusão de mercúrio e microtomografia de raios X.</p>	<p>Os concretos com cimento CPV ARI apresentaram redução da retração média, fator que não aconteceu para o a/c 0,35 com cura de 7 dias.  Nos concretos produzidos com CPIV, a retração diminuiu para a a/c 0,70, para ambas as idades de cura. Um dos efeitos associados está atrelado à ocorrência de microfissuração do concreto.  A cura prolongada possibilitou hidratação dos grãos anidros de cimento expostos nas paredes das microfissuras, contribuindo para a autocicatrização, o que resultou na recuperação da capacidade resistente dos concretos, quanto aos esforços da secagem.</p>
<b>Moreira (2017)</b> (COPPE/UFRJ)	<p>Investigar o fenômeno de autocicatrização de fissuras em microconcreto de alta performance reforçado com fibras de aço e sisal.</p>	<p>Após a moldagem e cura inicial, aos 28 dias de idade, os corpos de prova submetidos à indução das fissuras, sob carga de tração direta, foram acondicionados em seguida em seus ambientes de exposição (submersos em água e ciclos) por 3 e 6 meses.  Após estes períodos, os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de tração direta, termogravimetria no material de preenchimento da fissura e tomografia computadorizada.</p>	<p>Pode-se salientar que a presença das fibras de sisal contribuiu para uma maior nucleação de produtos hidratados tais como <math>\text{CaCO}_3</math>, o C-A-S-H e C-A-H (aluminatos), sendo que as fissuras menores de <math>60\mu\text{m}</math> foram seladas e fissuras com <math>200\mu\text{m}</math> apresentaram fechamento parcial.  Observou-se, através do ensaio tomografia maior concentração de fibras de aço no terço inferior das amostras resultando em fissuras de menor abertura e maior cicatrização.</p>
<b>Venquiarutto (2017)</b> (NORIEUFRGS)	<p>Avaliar a influência da microfissuração causada nas primeiras idades na durabilidade de concretos ao longo do tempo (self-healing).</p>	<p>Foram produzidos concretos com três tipos de cimento (CPV ARI, CPIV e CII Z) e três relações água/cimento (0,35, 0,50 e 0,70).  Nas idades 1, 3 e 7 dias, os concretos foram submetidos a carregamentos de 25%, 50% e 75% da carga média de ruptura à tração na flexão. Após a aplicação do carregamento, os corpos de prova foram submetidos à cura até a realização dos ensaios mecânicos e de durabilidade, os quais foram realizados ao longo do tempo (3, 7, 28 e 91 dias).  Após o período de cura de 28 dias, foram realizados os ensaios de penetração de íons cloreto e de absorção capilar de água. Também se analisou a influência do prolongamento da cura na recuperação do dano causado pelo carregamento dos concretos nas primeiras idades.</p>	<p>Foi observada uma elevação da penetração de íons cloreto e da absorção de água com o aumento da intensidade do carregamento e da relação água/cimento dos concretos. Ainda verificou-se a existência de um processo de microfissuração causado pela ação dos pré-carregamentos dos concretos com pouca idade.  Notou-se que o aumento do período de cura dos concretos refletiu positivamente nos resultados dos ensaios mecânicos e de durabilidade. Entretanto, observou-se uma recuperação parcial das microfissuras (self-healing) com a continuidade da cura.  Observou-se que as magnitudes das microfissuras remanescentes poderiam se tornar um caminho preferencial para a entrada de íons cloreto. Todos os concretos analisados apresentaram a mesma tendência de comportamento, de redução da entrada de íons cloreto com o aumento do período de cura.</p>
<b>Capellesso (2018)</b> (NORIEUFRGS)	<p>Analisar diferentes tipos de cimentos, disponíveis no sul do Brasil, quanto à autocicatrização de concretos expostos em ambiente de secagem e molhagem.</p>	<p>Foram testados três tipos de cimento (CII F, CPIV e CPV), três relações água/cimento (0,30;0,40 e 0,50) e duas idades para a abertura das fissuras (3 e 28 dias), após a fissuração os cp's foram mantidos em ambiente de ciclo.  Foi avaliado o potencial de autocicatrização através das propriedades mecânicas, utilizando o ensaio de resistência à tração na flexão em quatro pontos. Para acompanhar ao longo do tempo a autocicatrização, foram empregados o ensaio de velocidade propagação de onda ultrassônica e análise por microscopia ótica.</p>	<p>Como resultados, obteve-se que o ensaio para verificação da recuperação das propriedades mecânicas não foi satisfatório para nenhuma combinação analisada. Em relação aos outros ensaios, os resultados apresentam maior potencial de autocicatrização para o cimento CPIV quando analisado pelo método de ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica, e para o CPV melhor resultado quando analisado pelo método de microscopia ótica.</p>

<b>Arndt (2019)</b> (NORIEUFRGS)	Avaliar a influência de diferentes aditivos cristalizantes no fenômeno de autocicatrização em concretos de cimento Portland.	Foram produzidos concretos com a adição de três aditivos cristalizantes, três relações água/cimento (0,40;0,50;0,65) e duas idades de abertura das fissuras (3 e 28 dias), após a fissuração os cp's foram mantidos em ambiente de ciclo. Foram realizados ensaios de absorção de água e penetração de água sob pressão. Também foi realizada a avaliação do fenômeno de autocicatrização através de duas técnicas: medição da cicatrização de fissuras por pulso ultrassônico e análise de imagem por microscopia óptica.	Dos dois métodos empregados para avaliar a autocicatrização, a propagação de onda ultrassônica apresentou os resultados mais expressivos. Já a avaliação por microscopia óptica os resultados não foram muito visíveis. Observou-se a contribuição gerada pelos aditivos cristalizantes na cicatrização dos concretos para todas as relações a/c avaliadas. Todos os concretos com aditivo cristalizante apresentaram uma maior taxa de autocicatrização, quando comparados ao concreto de referência, bem como a aceleração do processo.
<b>Hollmann (2020)</b> (NORIEUFRGS)	Verificar a influência dos aditivos cristalizantes na resistência à penetração de íons cloreto em concretos fissurados.	Foram confeccionados concretos utilizando três aditivos cristalizantes de diferentes marcas comerciais, adição de 5% de sílica ativa, além de um concreto de referência. Os corpos de prova foram fissurados na idade de 3 dias e submetidos a ciclos de molhagem/secagem (2 dias de imersão em água potável renovável e 12 dias fora da imersão) até as idades de 28 e 91 dias, nas quais foram realizados os ensaios. Foram realizados ensaios de resistência à compressão e de absorção de água por capilaridade. Para a avaliação da autocicatrização, foram realizados os ensaios de resistência à penetração de íons cloreto e microscopia ótica.	Observou-se que a utilização de aditivos cristalizantes e de sílica ativa não comprometeu a resistência à compressão e contribuiu para a redução da absorção de água por capilaridade dos concretos. No ensaio de resistência à penetração de íons cloreto, a incorporação de aditivos cristalizantes não mostrou benefícios em relação ao concreto de referência. Já o concreto com sílica ativa apresentou os melhores resultados. Nos corpos de prova fissurados, a redução foi de 46% na carga passante, com aumento de 69% na vida útil estimada. No ensaio de microscopia ótica, foi possível observar o fechamento das fissuras apenas nas regiões de menor espessura. Além disso, observou-se a formação de produtos lixiviados com deposição superficial em partes das fissuras.
<b>Ziegler (2020)</b> (NORIEUFRGS)	Analisar a capacidade de autocicatrização de fissuras em concretos com diferentes aditivos cristalizantes.	Os experimentos adotaram três diferentes aditivos cristalizantes disponíveis no mercado, sílica ativa e uma relação a/c de 0,4. A abertura de fissuras ocorreu aos 3 dias, e os corpos de prova foram expostos a 2 e 6 ciclos de molhagem e secagem para intensificar a ocorrência da autocicatrização. Quanto às análises, foi realizada a avaliação da autocicatrização por meio da difusão de cloretos e análise de imagens por microscopia ótica.	Observou-se que a utilização de aditivos cristalizantes e sílica ativa promoveu aos concretos uma redução da absorção de água por capilaridade e não comprometeu a resistência à compressão. Quanto ao ensaio de microscopia ótica, não foi possível observar o fechamento das fissuras em todos os concretos ao longo do tempo. No ensaio de difusão de cloretos, a incorporação dos aditivos reduziu a passagem de cloretos pelos concretos fissurados. Após 6 ciclos, verificou-se uma redução de 59,72% na difusão de cloretos. O concreto com a sílica ativa apresentou um aumento de 32,15% da difusão de cloretos em relação ao de referência.
<b>Pacheco (2020)</b> (Unisinos)	Analisar a eficácia das técnicas de autorregeneração e autocicatrização de elementos de concreto, e diferentes condições de cura e exposição.	Foram analisados quatro mecanismos de autocicatrização: consumo de cimento, utilização de pozolanas, uso de soluções químicas e uso de soluções bacterianas. Utilizou-se condições de exposição: cura submersa e úmida, com inserção em câmara de carbonatação e com exposição em névoa salina. Foram realizados ensaios de resistência à compressão e índices físicos. E para avaliar a cicatrização foi empregado os ensaios de microscópio de alta precisão, ensaios de microscopia eletrônica de varredura e difração de raios-X.	Observou-se nas amostras onde se avaliou o consumo de cimento e que foram expostas ao ambiente de carbonatação, os produtos de cicatrização formados foram o C-S-H, C-A-S-H e CaCO <sub>3</sub> . Nas amostras contendo adições pozolânicas, notou-se que entre os valores médios o maior deles foi de 0,53mm para CC e 0,45mm para CP e entre os produtos identificados, há C-S-H, CaCO <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub> , CaO, entre outros produtos de hidratação. Nas amostras com soluções bacterianas, verificou-se a presença de CaCO <sub>3</sub> , C-S-H e SiO <sub>2</sub> .

Quadro 2: Compilação de artigos internacionais sobre o fenômeno da autocicatrização em diferentes matrizes cimentícias

<b>Autores</b>	<b>Matriz cimentícia</b>	<b>Variáveis</b>	<b>Técnicas de análise</b>	<b>Condições ambientais<sup>1</sup></b>	<b>Principais conclusões</b>
<b>Homma et al. (2009)</b>	Compósito cimentício reforçado com fibra	- Utilização de três tipos de fibra: fibra de polietileno, fibra de aço e fibra híbrida (polietileno + aço); - a/c 0,45; - abertura de fissura aos 7 dias de idade.	- Ensaio de permeabilidade de água; - ensaio de tração uniaxial; - microscopia ótica; - espectroscopia Raman.	- Submerso em água, com temperatura de 20°C, sem renovação por 28 dias após a abertura da fissura.	De um modo geral observou-se que o coeficiente de permeabilidade da água reduziu e a resistência à tração melhorou. O produto resultante da autocicatrização foram cristais de carbonato de cálcio verificado por Análise de espectroscopia Raman, foi analisado apenas a formação na área superficial da fissura.
<b>Sisomphon e Çopuroglu (2011)</b>	Argamassa com diferentes materiais cimentícios	- Substituição do cimento por Aditivo Cristalino e por Aditivo expansivo; - tela de arame galvanizado para controlar a largura de abertura da fissura; - a/c = 0,25; - abertura de fissura aos 28 dias.	- Ensaio de permeabilidade de água; - microscopia ótica;	- Submerso em água, com renovação a cada 7 dias.	As substituições foram benéficas ao selamento da fissura. O uso isolado dos aditivos contribuiu para o fechamento de fissuras menores que 200µm aos 14 dias. Para aberturas entre 200-400µm apenas a combinação entre os aditivos contribuiu para o selamento na idade de 28 dias. Quanto à característica do material de selamento, observou-se uma formação de etringita em forma de rede, a qual foi considerada benéfica para a formação do carbonato de cálcio na área próxima à superfície. Uma hipótese levantada, a rede formada pela etringita nas paredes da fissura serviria de suporte, permitindo uma maior precipitação de carbonato de cálcio.
<b>Sisomphon et al. (2013)</b>	Compósito cimentício com a incorporação de aditivo expansivo.	- Substituição do cimento por aditivo cristalino e por aditivo expansivo; - fibra PVA; - a/c = 0,25 - abertura de fissura aos 28 dias.	- Resistência à flexão; - microscopia ótica; - MEV/EDS.	- Submerso sem renovação e adição de água durante o período de exposição; - submerso com renovação de água a cada 12h; - ciclo úmido e seco 12/12h com renovação de água; - exposto ao ar em ambiente interno de laboratório.	Quanto às condições ambientais o ciclo foi o que apresentou melhores respostas, seguido pelo submerso em água com renovação, submerso sem renovação e exposto em ambiente interno de laboratório não apresentou nenhuma contribuição significativa. O estudo avaliou a formação de compostos na parte interna da fissura e na borda superior, sendo constatado que o principal produto de cura encontrado na parte interna foi a mistura de CaCO <sub>3</sub> , C – S – H e etringita. Já na borda o produto resultante da autocicatrização foi o carbonato de cálcio puro.

<b>Roig-flores et al. (2015)</b>	Concreto	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Adição de aditivo cristalizante;</li> <li>- a/c = 0,45;</li> <li>- abertura de fissura aos 2 dias de idade.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ensaio de permeabilidade de água;</li> <li>- microscopia ótica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Submerso em água sem renovação;</li> <li>- contato com uma coluna de água de 2cm na parte superior da fissura e armazenado em câmara úmida;</li> <li>- câmara controlada com temperatura de 20°C e UR 95 ± 5%;</li> <li>- exposto ao ar em ambiente de laboratório, sem contato com o ambiente externo.</li> </ul>	<p>Foram avaliadas fissuras com abertura de até 300µm. A quantificação da área da fissura utilizando pixels pretos foi um método com grandes dispersões. A presença de água favorece a ocorrência da autocatrização, tanto em concretos com como sem aditivo cristalizante. A condição submersa foi a que apresentou melhores resultados, seguido pelas amostras que estão em contato com uma coluna de água, posteriormente em câmara controlada e por último exposto ao ar em ambiente de laboratório.</p>
<b>Maes et al. (2016)</b>	Argamassas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Substituição parcial do cimento por EAF;</li> <li>- a/c = 0,45;</li> <li>- selagem lateral dos corpos de prova com resina epóxi;</li> <li>- abertura de fissura aos 24 dias de idade.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Penetração de cloreto com nitrato de prata;</li> <li>- coeficiente de difusão;</li> <li>- microscopia ótica;</li> <li>- difração de raio-X;</li> <li>- MEV/EDS.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ciclo úmido e seco em água destilada – 12/12h;</li> <li>- ciclo úmido e seco em água com 33 g/l NaCl – 12/12h, com a finalidade de simular ambiente marítimo.</li> </ul>	<p>Observou-se que a autocatrização autógena ocorre de forma mais rápida por meio da precipitação de carbonato de cálcio e hidratação contínua quando exposta em ambiente cíclico quando comparado ao ambiente submerso. Resalta-se também que a autocatrização decorrente do ambiente submerso seja por hidratação contínua.</p>
<b>Cueca et al. (2018)</b>	Concreto reforçado com fibra de aço	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Concretos com e sem adição de aditivo cristalizante;</li> <li>- a/c = 0,50;</li> <li>- abertura de fissura aos 28 dias de idade.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ensaio de resistência à compressão;</li> <li>- ensaio de resistência à flexão;</li> <li>- microscopia ótica;</li> <li>- MEV/EDS.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Submerso em água;</li> <li>- exposto ao ar livre;</li> <li>- ciclos úmidos e secos, 4 dias imersos em água e 3 dias exposto ao ar livre.</li> </ul>	<p>As amostras que apresentaram melhor desempenho quanto à autocatrização estavam expostas no ambiente submerso. O aditivo cristalizante favoreceu a ocorrência da autocatrização. Na parte interna da fissura foi observada a presença de cristais de etringita, na borda externa foi encontrada a presença de CaCO<sub>3</sub>.</p>
<b>Lauch et al. (2020)</b>	Concreto reforçado com fibra de aço	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Agente expansivo à base de sulfoaluminato de cálcio</li> <li>- a/c = 0,43</li> <li>- abertura de fissura aos 28 dias por flexão de 3 pontos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ensaio de resistência à compressão;</li> <li>- módulo de elasticidade;</li> <li>- permeabilidade à água;</li> <li>- MEV e EDS.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Imersão em água;</li> <li>- ciclos úmidos/secos (3,5 dias úmido e 3,5 dias seco em câmara climatizada a 21±3 °C e 45±10% UR;</li> <li>- ao ar livre – período de inverno em Montreal/Canada.</li> </ul>	<p>Foi observado que a autocatrização depende exclusivamente da composição da mistura e das condições de exposição. Concretos sem agente expansivo apresentaram taxa de autocatrização maior quando imersos, já os concretos com o agente expansivo apresentaram melhores respostas quando expostos a ciclos úmidos e secos. Para esta última combinação o ambiente ao ar livre também se mostrou benéfico em um prazo de exposição maior. A autocatrização obtida para concretos com agente expansivo exposto ao ar livre, com 9 meses, corresponde aproximadamente a 25 dias em imersão e 11 dias em ciclo úmido e seco.</p>

<sup>1</sup> Ambiente de exposição dos corpos de prova após a abertura da fissura.

Analisando os trabalhos realizados tanto no Brasil quanto no exterior, se observa que ainda há lacunas que precisam ser sanadas. A primeira se dá na forma de geração da fissura, visto que a sua configuração geométrica, como tortuosidade, espessura e profundidade, influenciam diretamente na capacidade de autocicatrização dos concretos.

Outro aspecto importante, que também está relacionado diretamente com a abertura da fissura, é a utilização de armadura e/ou fibras na matriz cimentícia. Diversos autores (Cappellesso, 2016; Moreira, 2017; Cueva *et al.*, 2018) salientam que esses materiais influenciam diretamente nos resultados obtidos no ensaio de propagação de ondas ultrassônicas, utilizado como forma de quantificar a autocicatrização nas matrizes. Entretanto, o emprego de fibras e armaduras interfere no momento da geração da fissura, uma vez que evitam a ruptura brusca do corpo de prova, separando-o em duas partes.

Também se observa que grande parte dos estudos apresentados emprega nas suas matrizes cimentícias, relações a/c baixas, de até 0,45. Relação esta que influencia diretamente na disponibilidade de grãos de cimento anidro, propiciando desta forma a ocorrência da autocicatrização autógena. Pouco se explora o fenômeno da autocicatrização para relações a/c maiores e para espectros mais amplos. Vale lembrar que a NBR 6118 (ABNT, 2014) permite a utilização de concretos com relação a/c até 0,65 para elementos estruturais de concreto armado em ambientes com classe de agressividade ambiental I. Desta maneira, é importante avaliar relações a/c maiores que 0,45, uma vez que são proporções empregadas pela indústria da construção civil no Brasil.

Quanto à idade de geração da fissura, pode-se observar que grande parte das pesquisas se limitam à idade de 28 dias. Embora, quando se pense na aplicação prática das matrizes cimentícias, sabe-se que as fissuras podem acontecer durante toda a sua vida útil. É importante entender como e se acontece o fenômeno da autocicatrização quando as fissuras surgem em idades mais tardias.

Quanto ao ambiente de exposição dos materiais para a incidência do fenômeno de autocicatrização, grande parte dos estudos realiza simulações de locais onde haja a incidência de água. Entretanto, não reflete a realidade do emprego do concreto nas estruturas. Elevada parcela dos elementos estruturais fica em contato direto com as intempéries ou fica protegido. Logo, se fazem necessários estudos que simulem estas condições.

Diante de todas as considerações apresentadas, nota-se que não há estudos que mostrem a interrelação entre diferentes ambientes de exposição, principalmente em pesquisas nacionais, variação da relação água/cimento e variação na idade de abertura de fissuras sobre o fenômeno da autocicatrização das matrizes cimentícias.

Com o objetivo de contribuir para o avanço de pesquisas relacionadas ao fenômeno de autocicatrização, no ano de 2016 iniciou-se o desenvolvimento de um macroprojeto no Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (NORIE/UFRGS), intitulado como Grupo de autocicatrização em matrizes cimentícias. Entretanto, o NORIE já vem desenvolvendo estudos relacionados ao fenômeno desde os meados de 2000. O primeiro trabalho concluído no núcleo sobre autocicatrização foi a tese de Vieira (2008).

O grupo é organizado em temas de pesquisa, que avaliam a influência de diferentes fatores no fenômeno da autocicatrização, quais sejam: tipos de cimento, ambiente de exposição, utilização de aditivos cristalizantes, influência de polímeros superabsorventes, durabilidade de concretos com aditivos e influência do uso de bactérias nas matrizes cimentícias, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4: Grupo de pesquisa sobre autocicatrização NORIE/UFRGS



Fonte: própria da autora.

Como frutos das pesquisas do grupo, atualmente já foram concluídos 11 estudos, entre trabalho de conclusão de curso, dissertações de mestrado e teses de doutorado, conforme demonstra o Quadro 3.

Quadro 3: Trabalhos desenvolvidos e concluídos pelo Grupo de Autocicatrização em matrizes cimentícias NORIE/UFRGS.

Trabalho de conclusão de curso	Dissertação	Tese
Cappellesso, 2016 Hirata, 2018 San Martin, 2021	Cappellesso, 2018 Maurense, 2018 Arndt, 2019 Ziegler, 2020 Hollman, 2020	Vieira, 2008 Bernardino da Silva, 2016 Venquiarutto, 2017

Fonte: própria da autora.

Diante deste panorama, este trabalho tem como objetivo avaliar diferentes tipos de ambiente de exposição de concretos (natural protegido, natural desprotegido, submerso em água e ciclos de molhagem e secagem) frente ao fenômeno da autocicatrização. Vale ressaltar que grande parte dos trabalhos são desenvolvidos em pastas (HUANG *et al.*, 2014) ou

argamassas (HANNAT; KEER, 1983; SNOECK *et al.*, 2016; MAES *et al.*, 2016), poucos avaliam a autocicatrização em concretos (ROIG-FLORES *et al.*, 2015; CUECA *et al.*, 2018; LAUCH *et al.*, 2020). Com a finalidade de verificar o fenômeno de autocicatrização mais próximo da realidade, optou-se pela realização em concreto. Ainda há uma lacuna a ser preenchida quanto à influência da autocicatrização exercida pelo ambiente de exposição, algumas pesquisas salientam que a ciclagem é a que apresenta resultados mais promissores, enquanto outras apontam o ambiente submerso.

## 1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo principal desta pesquisa é avaliar a influência dos ambientes de exposição no fenômeno da autocicatrização autógena de fissuras com idades de abertura variadas em concretos convencionais de cimento Portland com diferentes resistências.

Objetivos específicos da pesquisa:

- avaliar a influência da relação  $a/c$  na espessura da fissura e na ocorrência da autocicatrização;
- verificar a influência da idade da abertura da fissura na sua espessura e na incidência da autocicatrização;
- analisar através do ensaio de termogravimetria os produtos de autocicatrização formados junto a superfície da fissura.

## 1.3 LIMITAÇÕES

Consideram-se como limitações deste trabalho:

- a) ambiente de preparo dos concretos fora de ambiente climatizado;
- b) câmara utilizada para ciclos de secagem/molhagem sem controle de umidade relativa, apenas temperatura e medições das condições do ambiente (temperatura e umidade relativa);
- c) variação da 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.

## 1.4 DELIMITAÇÕES

O presente trabalho apresenta as seguintes delimitações:

- a) avaliação de quatro relações água/cimento: 0,30, 0,40, 0,50 e 0,65;
- b) avaliação de quatro idades de aberturas de fissuras: 3, 28, 91 e 182 dias;
- c) condições ideais de cura até as idades de abertura de fissuras, conforme NBR 5738 (ABNT, 2015);
- d) quatro tipos de ambientes de exposição para todas as amostras, natural protegido, natural desprotegido, submerso e ciclos de molhagem e secagem (2/12dias, respectivamente);

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em cinco capítulos.

No primeiro são apresentadas a introdução e a contextualização sobre o tema que será abordado nesta pesquisa.

O segundo capítulo é referente à revisão bibliográfica, abrangendo os conceitos ligados ao fenômeno de autocicatrização, tratando sobre os mecanismos, gatilhos para a ocorrência da cicatrização, técnicas de avaliação empregadas na literatura e influência dos diferentes tipos de ambientes de exposição dos concretos diante do fenômeno da autocicatrização.

No capítulo três é apresentado o programa experimental elaborado para o desenvolvimento da presente pesquisa, bem como os materiais empregados, produção e traço dos concretos, preparação das amostras, ensaios executados e tipos de cura.

No quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos e realizada a análise dos mesmos.

No quinto capítulo serão apresentadas as conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

## 2 O FENÔMENO DA AUTOCICATRIZAÇÃO

O concreto é sensível à formação de fissuras, que podem ser causadas pelas ações de cargas e tensões oriundas das deformações ao longo de toda a sua vida útil, podendo prejudicar a durabilidade das estruturas. A fissura permite a entrada de diversos agentes agressivos, tanto em meio líquido quanto gasoso. Para evitar a migração destes para o interior do concreto, podendo chegar às armaduras, medidas de reparação são necessárias. No entanto, a necessidade de reparos não programados aumentam o custo do ciclo de vida útil das estruturas, uma vez que demanda mão de obra qualificada para a realização dos mesmos e consomem mais matéria-prima (VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013).

Segundo De Belie *et al.* (2018), o aparecimento de pequenas fissuras com largura menor que 300 µm de largura, no concreto é quase inevitável, não necessariamente causando risco de colapso para a estrutura, mas certamente prejudicando sua funcionalidade, acelerando sua degradação, diminuindo sua vida útil e sustentabilidade.

O concreto armado, atualmente é o sistema estrutural mais empregado em obras no Brasil. Desta forma, pensar em maneiras de aumentar sua durabilidade e conseqüentemente aumentar sua vida útil é um modo de contribuir para o desenvolvimento sustentável, visando a redução dos impactos ambientais gerados pelas diversas atividades da indústria da construção civil.

Para Ferrara *et al.* (2018), estimular e/ou projetar a funcionalidade da autocicatrização em matrizes cimentícias por meio de adição e tecnologias personalizadas, a fim de torná-la mais confiável do ponto de vista da engenharia, tem sido considerado viável para aumentar a durabilidade das estruturas de concreto armado e contribuir para aumentar sua vida útil.

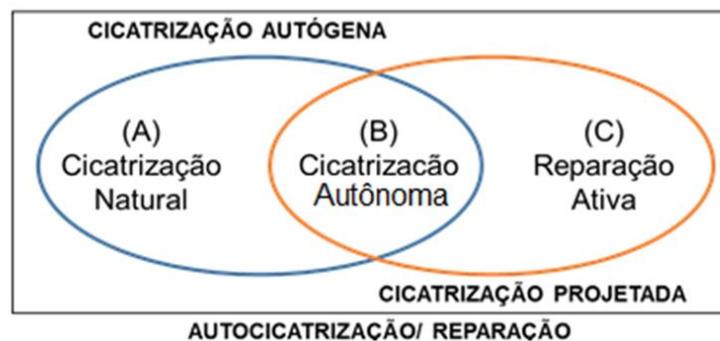
Segundo Van Tittelboom e De Belie (2013), o fenômeno de autocicatrização é relativamente antigo e bem conhecido para o concreto. A autocicatrização é definida como a capacidade de um material para curar, recuperar e/ou reparar danos automaticamente, de forma autônoma, sem que seja necessária qualquer intervenção externa. Logo é uma combinação de processos químicos e mecânicos, sendo que pode resultar de vários fatores, sendo estes: a precipitação de carbonato de cálcio, bloqueio das fissuras com impurezas da água e partículas soltas de concreto, hidratação tardia dos grãos anidros de cimento e/ou pela expansão do C-S-H (WU *et al.*, 2012).

## 2.1 MECANISMOS DE AUTOCICATRIZAÇÃO

Quanto aos mecanismos de autocicatrização, de acordo com Igarashi *et al.* (2009), o fenômeno de cicatrização pode ser classificado em: cicatrização natural, cicatrização autônoma e reparação ativa. Dentre esses fenômenos, os mecanismos relacionados podem ser a cicatrização ou a reparação, sendo que nestas categorias os fenômenos são separados em autocicatrização e cicatrização projetada.

O comitê técnico JCI-TCO75B (IGARASHI; KUNIEDA; NISHIWAKI, 2009) estabeleceu alguns conceitos mais detalhados, concebendo assim o diagrama de Venn, conforme Figura 5, que mostra os mecanismos e fenômenos de autocicatrização.

Figura 5: Diagrama de Venn – classificação dos fenômenos de autocicatrização de fissuras



Fonte: JCI - TC075B, 2009.

A cicatrização natural é um fenômeno no qual as fissuras que existem no concreto são naturalmente seladas, apenas tendo um ambiente que contenha umidade. A cicatrização autônoma é o fenômeno de reparação quando se utilizam materiais, de alguma forma, que não são encontrados na matéria-prima principal das matrizes cimentícias e sim por incorporação de materiais específicos para este fim (ROOIJ *et al.*, 2013). Desta forma, podem ser adicionados, ao concreto, polímeros superabsorventes (PSA), aditivos redutores de permeabilidade (ARP), microcápsulas, nanotubos, aditivos expansivos, cinza volante e/ou bactérias calcinogênicas. Já a reparação ativada é um fenômeno no qual as fissuras existentes no concreto são recuperadas por um mecanismo de dispositivos incorporados à matriz. Assim, a cicatrização autógena é o conceito que engloba a cicatrização natural e a cicatrização autônoma, sendo que todo o fenômeno de reparação das fissuras no concreto envolve um ambiente com umidade.

O comitê do RILEM 221 (SHC, 2013) define autocicatrização como qualquer processo do próprio material envolvendo sua reparação e/ou melhoria de desempenho. Este comitê também estabelece uma classificação mais simplificada quanto aos fenômenos de cicatrização, sendo eles: cicatrização autógena e cicatrização autônoma (autônômica), os

quais serão descritos detalhadamente nos próximos itens (ROOIJ; VAN TITTELBOOM; DE BELIE; SCHLANGEN, 2013).

Diante do exposto, o grupo de autocicatrização NORIE/UFRGS, entende que o fenômeno se divide em três tipos: Autocicatrização autógena (Natural), Autocicatrização autônoma (projetada) e Autocicatrização por repaço, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6: Classificação do fenômeno de autocicatrização

AUTOCICATRIZAÇÃO AUTÓGENA (Natural)	AUTOCICATRIZAÇÃO AUTÔNOMA (Projetada)	AUTOCICATRIZAÇÃO POR REPARAÇÃO (depois de fissurado)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipos de cimentos;</li> <li>• Adições pozolânicas;</li> <li>• Fibras;</li> <li>• Idade de ocorrência do dano;</li> <li>• Relação água/cimento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Microcápsulas;</li> <li>• Fibras ocas;</li> <li>• Bactérias;</li> <li>• Adições minerais;</li> <li>• Fibras;</li> <li>• Aditivos cristalizantes;</li> <li>• Nanotubos;</li> <li>• Polímeros superabsorventes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aditivos cristalizantes;</li> <li>• Insuflação sob pressão do gás tetrafluorsilicato.</li> </ul>

Fonte: Grupo autocicatrização NORIE/UFRGS

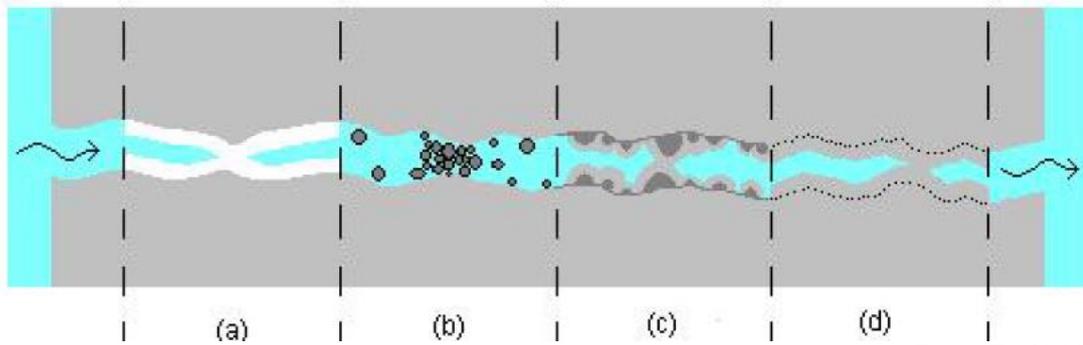
### 2.1.1 Cicatrização autógena

A cicatrização autógena de materiais cimentícios é o fenômeno que consiste no fechamento parcial ou total das fissuras e implicitamente, na recuperação parcial da durabilidade inicial e nos desempenhos mecânicos das matrizes cimentícias (DE BELIE *et al.*, 2018).

Na autocicatrização autógena, os principais produtos formados no fechamento das fissuras são: carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), proveniente da lixiviação do hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) (QIAN *et al.*, 2010; HUANG, 2014; SNOECK *et al.*, 2016) e hidratos de silicato de cálcio (C-S-H) (KAN e SHI, 2012; SNOECK *et al.*, 2016). Wu *et al.* (2012) e Huang e SU (2016) citam que o fechamento demonstrado por imagens de microscopia ótica está relacionado, principalmente, à formação de carbonato de cálcio devido ao processo de lixiviação do hidróxido de cálcio. Para Rooij *et al.* (2013), a precipitação do carbonato de cálcio depende da temperatura, do pH e da concentração dos reagentes, sendo o produto com maior contribuição para a autocicatrização das fissuras.

Segundo Ter Heide (2005), a literatura não é conclusiva quanto às causas que levam a autocicatrização, sendo que vários mecanismos são descritos, conforme representado na Figura 7.

Figura 7: Mecanismos de autocicatrização em matrizes cimentícias: (a) formação de carbonato de cálcio ou hidróxido de cálcio, (b) sedimentação de partículas, (c) hidratação continuada, (d) expansão da matriz de cimento.



Fonte: Ter Heide, 2005.

As etapas apresentadas na Figura 5 estão descritas a seguir:

a) formação de carbonato de cálcio ou hidróxido de cálcio: o hidróxido de cálcio é um produto da reação de hidratação do cimento, desta maneira pode se dissolver na água dentro da fissura e se precipitar próximo à superfície, conforme Equação 1.



Para que ocorra a formação do carbonato de cálcio, a água na fissura deve conter dióxido de carbono dissolvido, sendo que a reação química da formação de carbonato de cálcio está descrita na Equação 2.



O  $\text{Ca}^{2+}$  é liberado do hidróxido de cálcio, que se encontra dissolvido na pasta de cimento, conforme Equação 3.



$\text{CO}_3^{2-}$  vem da água contendo  $\text{CO}_2$ , ilustrado pela Equação 4.



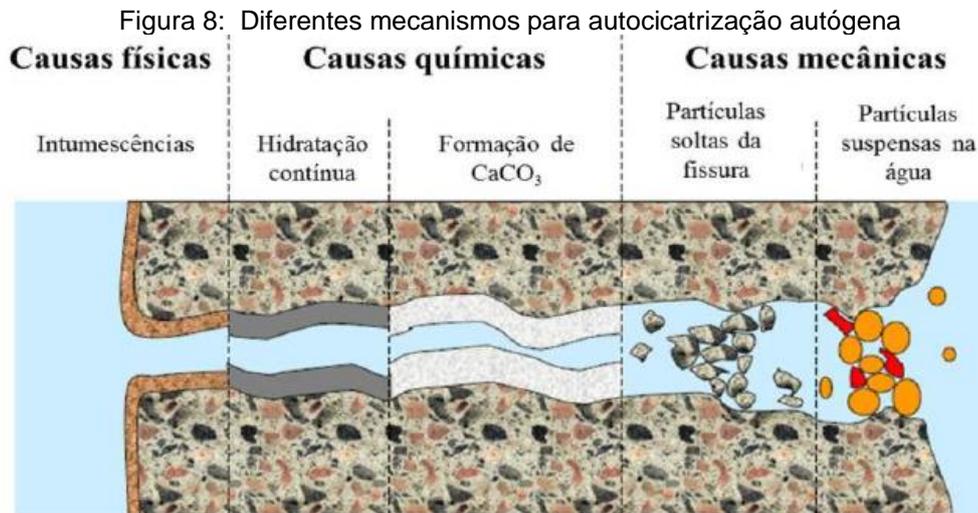
b) sedimentação de partículas: partículas provenientes da água presente na fissura ou partículas de cimento que se desprendem da superfície da fissura podem ser transportadas pelo fluxo de água e podem ficar presas nas menores espessuras da fissura, assim essas partículas preenchem o espaço existente;

c) hidratação contínua: os grãos anidros de cimento presentes nas proximidades da fissura se hidratam e os produtos gerados por este processo preenchem a fissura;

d) aumento de volume da matriz de cimento: quando as superfícies de fissura incham por causa da saturação, provocam uma redução na mesma. Isso pode auxiliar o fechamento de pequenas fissuras e/ou funcionar como estímulo a outras causas de autocicatrização em

fissuras maiores, entretanto, quando o concreto está secando, a fissura terá sua espessura afetada, sendo que está é aumentada novamente.

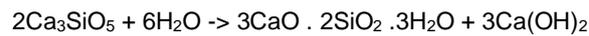
Reinhardt *et al.* (2013) classificam os mecanismos de autocicatrização autógena em três diferentes causas, conforme Figura 8, sendo elas: físicas, químicas e mecânicas.



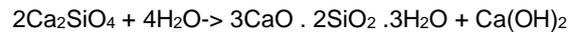
Fonte: Reinhardt *et al.*, 2013.

Estes autores caracterizam a causa física em decorrência do aumento do volume da pasta de cimento hidratada, reduzindo desta forma a espessura da fissura. Quanto às causas químicas, estas são divididas em duas: a primeira consiste na hidratação contínua do cimento, na qual os grãos anidros são hidratados pela presença da água pós fissuração, ressaltando que este processo não é responsável, exclusivamente, pelo selamento das fissuras, geralmente associado a ele está o aumento do volume da pasta de cimento. Entretanto, a combinação do aumento do volume e da hidratação do cimento apresentam um papel fundamental, principalmente, para fissuras com espessura menor que 0,1mm, já para espessuras maiores a influência torna-se menor. O outro processo químico apontado é a formação do carbonato de cálcio e o crescimento de cristais na superfície das fissuras. Reinhardt *et al.* (2013) ressaltam ainda as causas mecânicas que podem compreender dois mecanismos, a primeira consiste na presença de partículas finas na água que passa pela fissura e pequenas partículas de concreto, ambas acabam se depositando na fissura e contribuindo para um tamponamento.

Segundo Li *et al.* (2013), o principal mecanismo de autocicatrização autógena está ligado à produção de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), produto resultante da hidratação do cimento, o qual é conhecido por conferir resistência à pasta de cimento hidratada. Sabe-se que a produção de C-S-H ocorre quando o silicato de tricálcio (C<sub>3</sub>S – alita) e silicato dicálcico (C<sub>2</sub>S - belita) reagem com a água, formando desta maneira o C-S-H e hidróxido de cálcio (CH - portlandita), conforme Equação 5 e Equação 6:



Equação 5

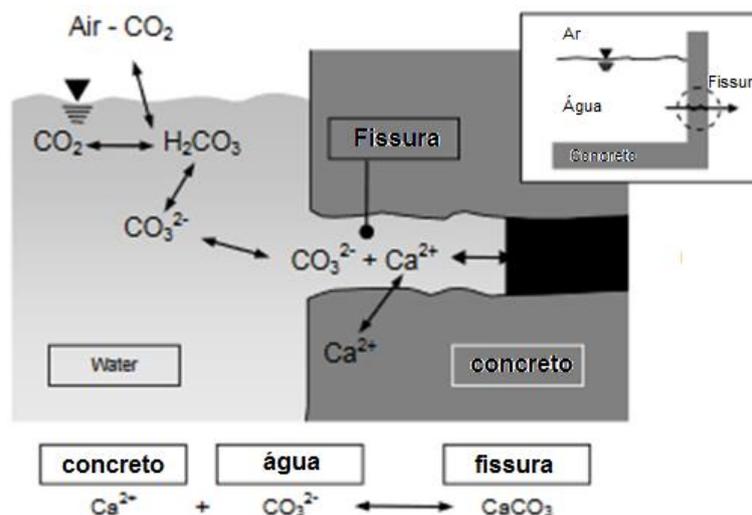


Equação 6

Durante a hidratação do cimento, alguns grãos contendo belita não reagem completamente, resultando em núcleos não hidratados rodeados por C-S-H e CH, podendo ser considerado um encapsulamento natural de minerais reativos no concreto. Durante ocorrência da fissura, essas cápsulas acabam sendo expostas à atmosfera e à água e começam a se hidratar, o que provoca uma expansão volumétrica capaz de fechar completamente pequenas fissuras (LI *et al.*, 2013).

Pode-se perceber que a literatura é imparcial quanto aos produtos formados em decorrência do fenômeno de autocicatrização. Edvardsen (1999) estudou os efeitos da autocicatrização em fissuras em concreto em contato constante com a água, e observou que o maior efeito de cura ocorreu nos primeiros dias, especificamente entre 3 e 5 dias de exposição à água. Também se observou que o produto de autocicatrização formado era composto pela precipitação de  $\text{CaCO}_3$  e que a taxa de crescimento do cristal dependia da largura da fissura e pressão da água. Sendo que o processo de formação do cristal primeiro se deu pela cinética do crescimento do cristal na superfície. Ainda de acordo com Edvardsen (1999), quando o  $\text{CO}_2$  presente no ar se dissolve na água, os íons  $\text{CO}_3^{2-}$  se difundem na borda da fissura, ocorrendo a precipitação do  $\text{CaCO}_3$  na fissura quando a concentração de íons  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{CO}_3^{2-}$  atinge um nível de supersaturação, conforme mostra a Figura 9. Cuenca e Serna (2021), também salientam que em fissuras em ambientes imersos podem ser seladas ou curadas com carbonato de cálcio, que é produzido quando os íons de cálcio da portlandita,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , reage com dióxido de carbono,  $\text{CO}_2$ , presente na água,  $\text{H}_2\text{O}$ .

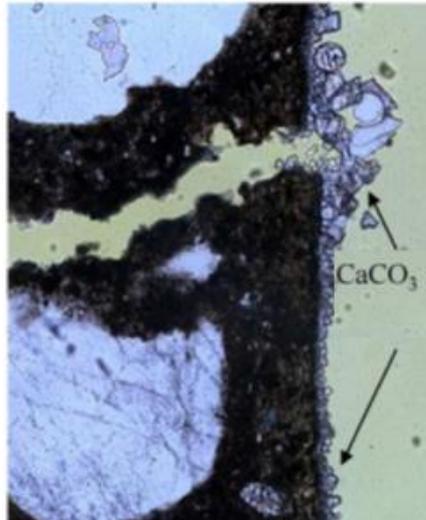
Figura 9: Precipitação de carbonato de cálcio quando na presença  $\text{CO}_2$  soluto em água



Fonte: Edvardsen, 1999.

Já Sisomphon *et al.* (2012) abordam que próximo à borda da fissura há uma concentração de  $\text{CO}_2$  maior do que dentro da mesma, assim o  $\text{CaCO}_3$  tende a se precipitar perto da borda da fissura, conforme demonstra a Figura 10.

Figura 10: Precipitação de carbonato de cálcio na borda da fissura



Fonte: Sisomphon e Çopuroğlu, 2010.

Von Greve-Dierfeld (2020) salienta que a cinética e o mecanismo de carbonatação depende do grau de saturação do concreto e a pressão de  $\text{CO}_2$  que dependem das condições de exposição, tais como umidade relativa, tempo de contato da água com a superfície do concreto e temperatura do ambiente de exposição.

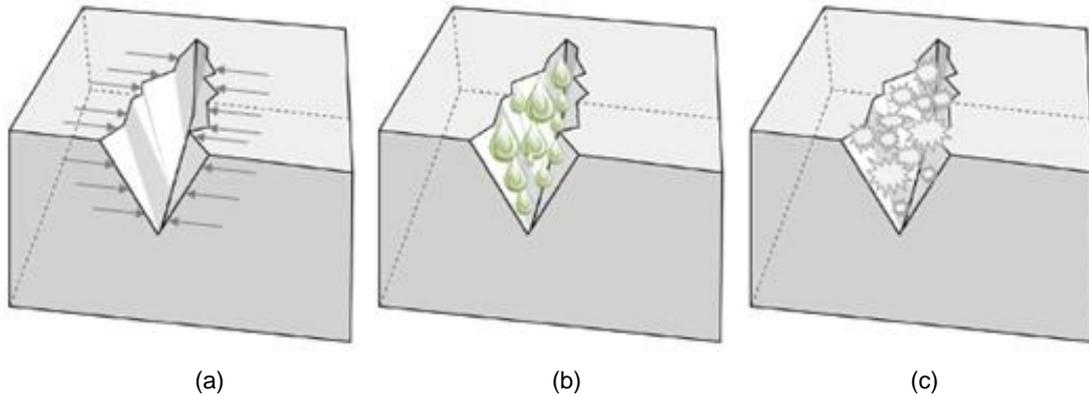
Um fator que influencia diretamente na capacidade de ocorrência da cicatrização autógena é a idade do concreto no momento da fissura (VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013). Sabe-se que concretos nas idades iniciais apresentam um teor relativamente alto de partículas de cimento anidro, que na presença de água favorece a hidratação contínua, sendo o principal mecanismo de cicatrização (NEVILLE, 2002). Deve-se considerar que o cimento se hidrata rapidamente nas primeiras idades, mas cerca de 26% do cimento ainda permanece sem hidratação no concreto mesmo após um período de 28 meses, conforme foi observado no trabalho de Gruyaert *et al.* (2010), o qual avaliou a hidratação de cimento Portland.

Segundo Qureshi *et al.* (2018), embora o potencial de cicatrização autógena reduza com o aumento da idade do concreto, não há estudos que relacionem quantitativamente o estado de hidratação do cimento com seu comportamento intrínseco de autocicatrização.

Van Tittelboom e De Belie (2013) consideram que a autocicatrização autógena é algo secundário, pois estará limitada a pequenas fissuras estáticas e por depender de possíveis

reações de hidratação. Ainda de acordo com as autoras, a cicatrização autógena é mais efetiva quando a largura das fissuras é restrita (Figura 11a) e existe a presença da água (Figura 11b), desta maneira melhorando a possibilidade de hidratação ou cristalização contínua (Figura 11c).

Figura 11: Comportamento da autocicatrização autógena. (a) Restrição da largura da fissura; (b) presença de água; (c) melhor hidratação e cristalização.

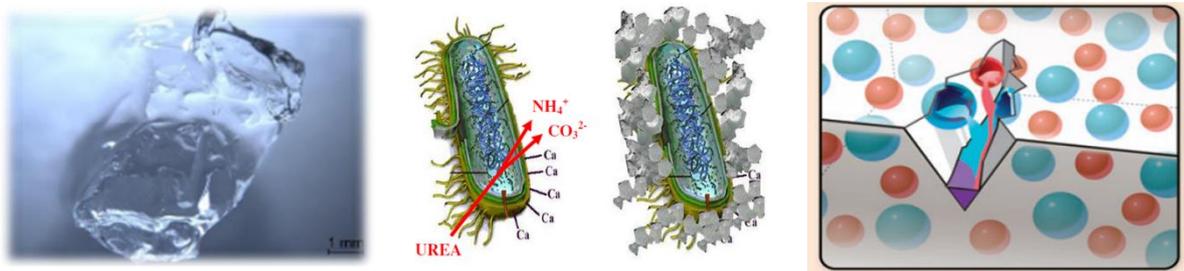


Fonte: Van Tittelboom; De Belie, 2013.

### 2.1.2 Cicatrização autônoma

Segundo Moreira (2016), a cicatrização autônoma é referente a uma cicatrização involuntária da fissura, a partir da inserção de materiais específicos na matriz do concreto, tais como polímeros superabsorventes (PSA), bactérias calcinogênicas, microcápsulas, fibras ocas preenchidas com material selante ou aditivos redutores de permeabilidade (ARP). Na Figura 12 são demonstrados alguns mecanismos de autocicatrização autônoma.

Figura 12: Mecanismos de autocicatrização autônoma. (a) PSA; (b) Bactéria; (c) Cápsula.



(a)  
Fonte: MAURENTE, 2018.

(b)  
Fonte: ROOIJ *et al.*, 2013

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

A autocicatrização autônoma é o fenômeno de reparação quando se utilizam materiais, de alguma forma, não encontrados na matéria-prima principal das matrizes cimentícias e sim por incorporação (RILEM 221 – SHC, 2013). Desta forma, pode dizer que a autocicatrização autônoma consiste na reparação que utiliza materiais não presentes no sistema, sendo

necessário a concepção ou a incorporação para que a autocicatrização seja promovida. Assim, refere-se a uma cicatrização involuntária da fissura, a partir de inserções realizadas no concreto (MOREIRA, 2016), como os bioconcretos e os SAP's.

Dentro da cicatrização autônoma, a forma com que o fenômeno inicia pode classificá-lo em dois tipos, sendo o primeiro em cicatrização ativa, quando há alguma intervenção para que a autocicatrização aconteça. Tem-se como exemplo a utilização da temperatura. E a cicatrização passiva, ocorre quando é desencadeada sem que haja interferência humana, tendo como exemplo o uso de materiais encapsulados ou sistemas vasculares.

O bioconcreto se baseia na inserção de colônias de bactérias e de lactato de cálcio na fabricação do concreto, os quais vão se desenvolvendo através de espaços vazios das fissuras ao consumir o lactato de cálcio, formando calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) (MOREIRA, 2016). Elas são capazes de selar fissuras de até 0,8mm e morrem quando as células são incorporadas nos cristais de  $\text{CaCO}_3$  ou quando todos os nutrientes são consumidos (TAKAGI, 2013).

Os SAP's são polímeros inseridos também no momento de fabricação do concreto, estes têm grande capacidade de absorção de água e soluções aquosas. Quando absorvem os líquidos, os polímeros incham formando um gel, selando as fissuras (MOREIRA, 2016).

## 2.2 FATORES QUE INFLUENCIAM A AUTOCICATRIZAÇÃO

Segundo Ferrara *et al.* (2018), a capacidade de autocicatrização irá depender da idade de surgimento da fissura, largura da fissura, bem como da presença significativa de água. A idade da indução interfere na disponibilidade de grãos de cimento não hidratado, um dos fatores que contribui para a autocicatrização autógena. A presença e/ou disponibilidade de água irá depender dos ambientes onde estes concretos forem expostos, não havendo na literatura uma quantificação mínima de água que as matrizes necessitam para desenvolverem produtos de cicatrização. A espessura da fissura vai influenciar a velocidade com que o fechamento acontece, sendo que fissuras mais estreitas tendem a ter um selamento mais rápido, pois não há necessidade de uma quantidade muito grande de produtos de cicatrização para isso acontecer.

Entretanto, não apenas estes 3 motivos que influenciam na autocicatrização, para Rooij *et al.* (2013), há uma série fatores que influenciam a autocicatrização em matrizes cimentícias, desde a composição do concreto, presença de água e até características das fissuras, conforme Tabela 1.

Tabela 1: Fatores que afetam o fenômeno de autocicatrização

Concreto	Água	Fissura
Tipo de cimento	Pressão	Espessura
Tipo de adição	Gradiente de pressão	Profundidade
Tipo de agregados	Dureza	Geometria
Idade	pH	Fissura ramificada
	Temperatura	Aglomerados de fissuras

Fonte: adaptado de ROOIJ *et al.*, 2013.

Diante do exposto e corroborando com os objetivos desta pesquisa, alguns destes itens serão discutidos a seguir.

### 2.2.1 Influência da relação água/cimento

A relação água/cimento está diretamente relacionada com as propriedades do concreto, principalmente quanto à resistência mecânica, porosidade e durabilidade. Influenciando também na disponibilidade de grãos anidros de cimento e no grau de hidratação das matrizes cimentícias.

Há uma relação água/cimento mínima para que ocorra a hidratação completa do cimento, quando ele for curado em água, sendo de aproximadamente 0,36. Quando a a/c é menor que esta, o espaço que resulta é inadequado para que ocorra a acomodação dos produtos de hidratação. Entretanto, quando a cura é realizada em sistema fechado, onde não há água externa à mistura, a relação água/cimento precisa ser maior que 0,36 para que ocorra a hidratação completa do cimento (NEVILLE, 2013).

Segundo Pagé e Spiratos (2000), a hidratação do cimento Portland pode ser finalizada em decorrência de três situações, a primeira se dá quando não há mais compostos de cimento anidro, a segunda quando a água já não consegue mais atingir os grãos de cimento não hidratados e a terceira quando não há mais água disponível.

Desta maneira, segundo Gomes *et. al* (2013), a hidratação do cimento é influenciada pela sua finura, sendo que as partículas de dimensão menor tendem a se dissolver e se hidratar de forma mais veloz, desaparecendo. Já as partículas de dimensões maiores vão se reduzindo, entretanto, estas podem acabar por ser envolvidas pelos compostos hidratados, permanecendo, assim, não hidratadas. Apenas partículas com dimensão menor que 50µm tem capacidade de se hidratarem por completo, logo partículas maiores não conseguem atingir a hidratação completa.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), de acordo com o tamanho dos grãos não hidratados e do grau de hidratação, algumas partículas de cimento anidro podem ser encontrados na microestrutura das matrizes após muito tempo após a hidratação.

Para Neville (2016), os produtos da hidratação do cimento têm solubilidade baixa em água, sendo que o cimento hidratado se adere aos grãos de cimento não hidratado e se precipitam.

Sabe-se que uma possibilidade da ocorrência da cicatrização autógena é a partir da contínua hidratação dos minerais que compõe o clínquer e carbonatação de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), desta maneira as fissuras podem se regenerar com o passar do tempo (VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013).

Uma das condições essenciais para que ocorra a autocicatrização autógena do concreto é que exista disponibilidade de grãos de cimento não hidratados, para que possam se hidratar e preencher as fissuras com os produtos formados. Para tanto, outra condição básica é a presença de água para possibilitar a reação de hidratação dos grãos de cimento remanescentes (LI e YANG, 2007; YANG *et al.*, 2009).

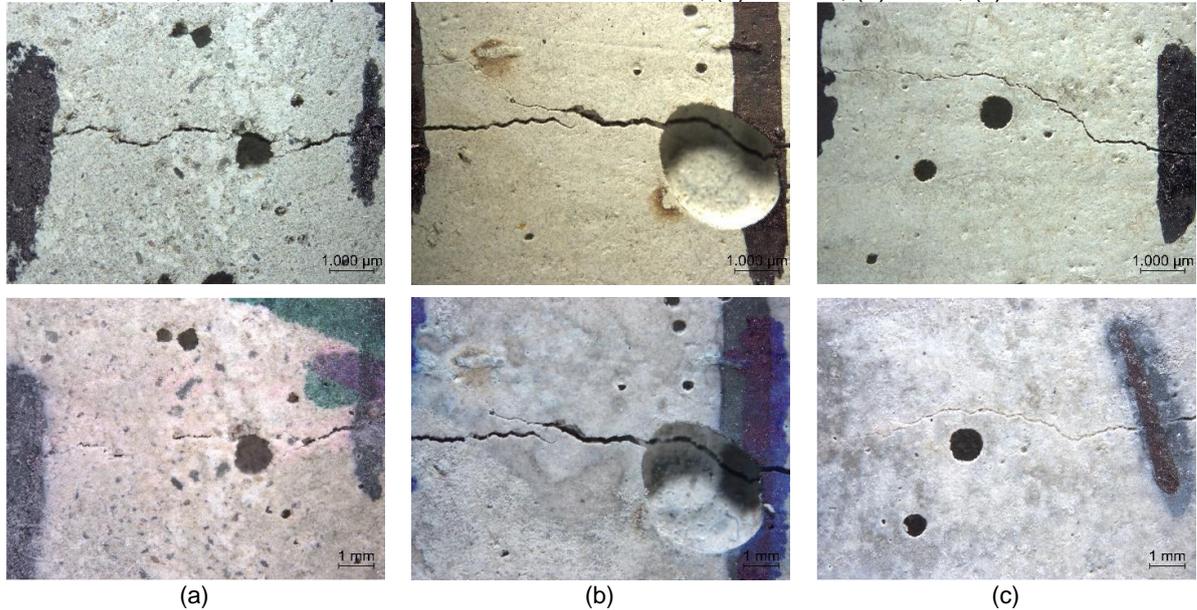
Partindo do princípio de que uma das formas de incidência da autocicatrização autógena é a existência de grãos de cimento anidro na matriz, é preciso compreender que durante a cinética de hidratação do cimento, o concreto endurecido será constituído por compostos resistentes e compostos não resistentes (porosidade) e que esta cinética é influenciada diretamente para relação água/cimento das matrizes e pelo tipo de cimento empregado.

Segundo Neville (2016), a presença de filler pode intensificar a hidratação do cimento, pois age como ponto de nucleação. O outro apontamento está relacionado à incorporação parcial do  $\text{CaCO}_3$  à fase de C-S-H, beneficiando desta forma a estrutura da pasta de cimento hidratada.

Cappellesso (2018) avaliou a autocicatrização em concretos com diferentes tipos de cimento, CP II-40, CP IV e CPV-ARI, 3 diferentes relações a/c (0,3, 0,4, 0,5) e as fissuras geradas aos 3 e 28 dias de idade e como ambiente de exposição utilizou ciclo de molhagem e secagem (2/12 dias), respectivamente. Concluiu, que concretos com menores relações a/c apresentaram maior grau de dano na matriz cimentícia no momento da fissuração. Observou também, que o cimento CP IV apresentou maior taxa de autocicatrização quando avaliado através do ensaio de propagação de ondas ultrassônicas. Quando a análise foi realizada através das imagens por microscopia ótica, para o CP II-F, observou-se maior formação de material sobre a superfície da fissura, atribuindo comportamento provavelmente a lixiviação do hidróxido de cálcio e posterior formação do  $\text{CaCO}_3$ , quando comparado com os resultados obtidos para o

CP IV. A Figura 13 demonstra o efeito da autocicatrização em concretos com relação a/c 0,3, para fissuras abertas na idade de 3 dias, para diferentes tipos de cimento empregados.

Figura 13: Imagens de microscopia ótica para concretos com a/c 0,3, fissuras geradas na idade de 3 dias, diferentes tipos de cimento aos 0 e 91 dias; (a) CP II-F; (b) CPIV; (c) CPV.



Fonte: Cappellesso (2018).

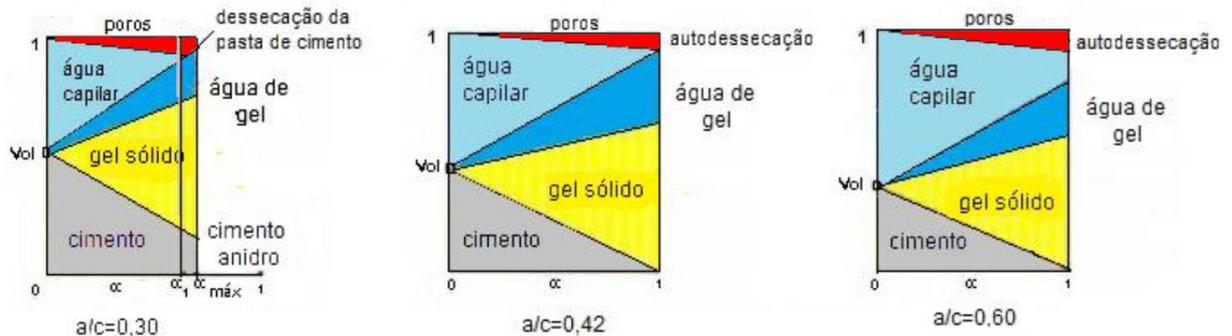
Gagné e Argouges (2012) estudaram a autocicatrização autógena em argamassas com relações água cimento de 0,35, 0,45 e 0,60. Foram avaliadas fissuras com espessura entre  $50 \pm 15$ ,  $105 \pm 15$  e  $220 \pm 35$   $\mu\text{m}$ , geradas aos 28 dias e aos 6 meses de idade da matriz e armazenadas em ambiente com  $23^\circ\text{C}$  e umidade relativa de 100%. Observaram que o mecanismo de fechamento se deu por carbonatação e formação de produtos de hidratação secundários, ainda notaram que fissuras mais estreitas ( $50\mu\text{m}$ ) tendem a ter taxa de autocicatrização mais lentas quando comparadas com fissuras maiores ( $200\mu\text{m}$ ), uma vez que nestas o espaço disponível para o crescimento dos produtos não é limitado e por permitir a entrada de  $\text{CO}_2$  e água com maior facilidade. Outra conclusão importante está ligada a relação a/c, observou-se que ela não foi um fator chave à autocicatrização de argamassas expostas em ambiente com 100% de UR, não sendo possível detectar um efeito claro do a/c na cinética da autocicatrização.

Van Tittelboom *et al.* (2012) avaliaram a autocicatrização de fissuras em argamassas, reforçada com barra de aço, com relação a/c de 0,4 e 0,5, três diferentes tipos de cimento e substituição de parte do cimento por escória de alto-forno e cinzas volante. As fissuras foram geradas na idade de 28 dias por flexão de 3 pontos e foram mantidas imersas em água por até 42 dias. Concluíram que o aumento da relação a/c de 0,4 para 0,5, reduziu a autocicatrização autógena decorrente da hidratação contínua.

Segundo Shim *et al.* (2015), concretos com uma relação  $a/c$  0,4, durante a cinética de hidratação, apenas 70% do cimento irá reagir, sobrando 30% de grãos não hidratados na pasta de cimento. Desta forma, quanto menor a relação  $a/c$ , o autor acredita que maior será a quantidade de grãos anidros. Logo, se uma fissura ocorrer neste concreto e o mesmo for exposto à presença de água, as partículas anidras serão hidratadas, causando a autocicatrização autógena.

O esquema apresentado na Figura 14, mostra que para um sistema fechado, onde não há perda ou ganho de água através de uma fonte externa, a hidratação completa não é atingida. Entretanto, quando a relação  $a/c$  for igual ou superior a 0,42 observa-se este fenômeno, conforme apontado por Jensen e Hansen (2001).

Figura 14: Volume ocupado por cimento, água e produtos de hidratação quando a hidratação do cimento Portland se dá em sistemas fechando.

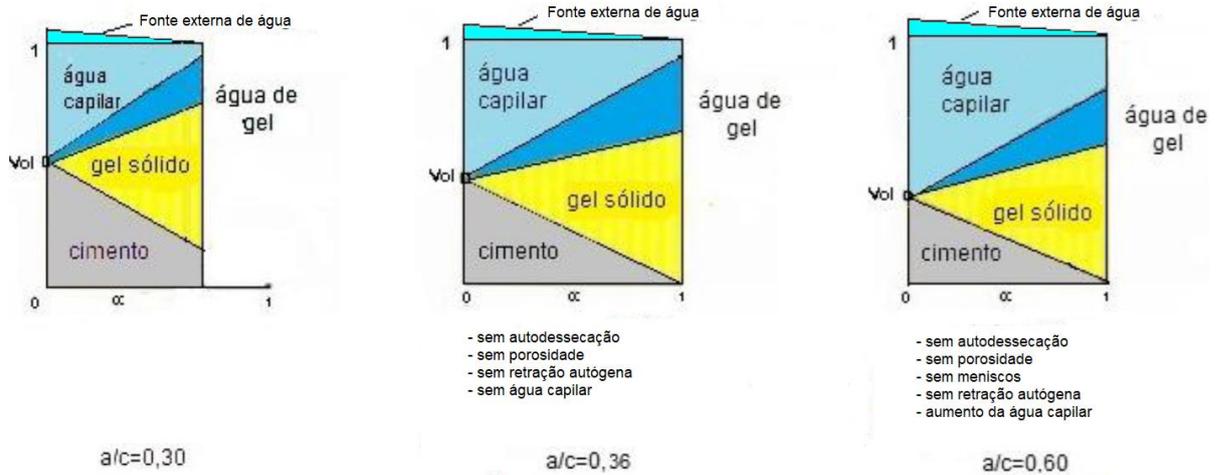


Fonte: adaptado Morin *et al.* (2001), apud Shim *et al.* (2015).

Desta forma, Shim *et al.* (2015) salienta que se uma fissura surgir no concreto sobre estas condições, quando exposta a presença de água os grãos anidros de cimento podem se hidratar e os produtos gerados pela reidratação tendem a preencher as fissuras.

Para Jensen e Hansen (2001), quando há uma fonte externa de água durante a hidratação, acredita-se que é possível obter uma pasta de cimento hidratada sem porosidade, exceto a presença de bolhas geradas pelo ar aprisionado, para relações  $a/c$  menores ou igual a 0,36. Na Figura 15, pode-se observar que a existência de uma fonte externa de água durante o período de hidratação para concretos com relações  $a/c$  de 0,36 e 0,60, observa-se uma redução na autodessecação, porosidade e retração autógena.

Figura 15: Volume ocupado por cimento, água e produtos de hidratação quando a hidratação do cimento Portland ocorre com uma fonte externa de água.



Logo, para Shim *et al.* (2015), o controle sobre a porosidade e o grau de hidratação do cimento pela água são os principais fatores para a incidência do fenômeno de autocicatrização nas matrizes cimentícias.

Há uma lacuna de conhecimento quanto ao estudo da influência da relação água/cimento sobre a autocicatrização autógena. Poucos são os trabalhos que tecem comparação entre estas variáveis. Acredita-se que esta carência esteja atrelada à grande variabilidade resultante na espessura das fissuras, indo ao encontro ao que Cappellesso (2018) apontou na sua pesquisa, matrizes com relações  $a/c$  menores geram fissuras com grau de dano maior quanto comparado com fissuras em concretos com relação  $a/c$  maiores.

Na presente pesquisa, optou-se por estudar concretos com relação  $a/c$  variando entre 0,3, 0,4, 0,5 e 0,65, com o intuito de avaliar a autocicatrização em relação  $a/c$  mais baixos como 0,3 e 0,4, onde o fechamento da fissura pode ocorrer pela presença de cimento anidro e concretos com relação  $a/c$  mais altos, uma vez que a NBR 6118 (ABNT, 2014) prevê a utilização de  $a/c \leq 0,65$  para concreto armado em ambiente com classe de agressividade I.

### 2.2.2 Influência da idade

De Belie *et al.* (2018) ressaltam que a autocicatrização autógena pode ser atrelada a precipitação de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio, bloqueio mecânico e obstrução dos volumes de fissura por pequenas partículas, inchaço e reidratação da pasta de cimento próximo à fissura.

Desta forma, fissuras geradas em concreto jovens, tendem a autocicatrização autógena, por haver maior disponibilidade de grãos anidros de cimento desta forma gerando a reidratação da pasta de cimento, quando na presença de água (NEVILLE, 2002).

Deve-se considerar que o cimento se hidrata rapidamente nas primeiras idades, mas cerca de 26% do cimento ainda permanece sem hidratação no concreto, mesmo após um período de 28 meses, conforme foi observado no trabalho de Gruyaert *et al.* (2010), o qual avaliou a hidratação de cimento Portland.

Para Neville (2016), a velocidade de precipitação dos produtos hidratados reduz de forma contínua ao longo do tempo, assim, mesmo após 28 dias em contato com a água é possível encontrar uma quantidade considerada de grãos anidros, sendo que a hidratação completa do cimento, em condições normais, só será possível para partículas menores do que 50  $\mu\text{m}$ .

Segundo Qureshi *et al.* (2019), a capacidade de autocicatrização autógena dos materiais cimentícios está diretamente relacionada à idade da mistura de pasta de cimento na formação de fissuras, sendo que o fator idade é quantitativamente correlacionado com o grau de hidratação de materiais cimentícios.

Na pesquisa realizada por Ter Heide e Schlangen (2007) observa-se que a capacidade de recuperação da resistência é menor em concretos em que a fissuração aconteceu em idades mais avançadas, quando estabelecida comparação com concretos fissurados nas primeiras idades. Para Neville (2002) em concretos com idades mais avançadas, a autocicatrização autógena tem como mecanismo a carbonatação.

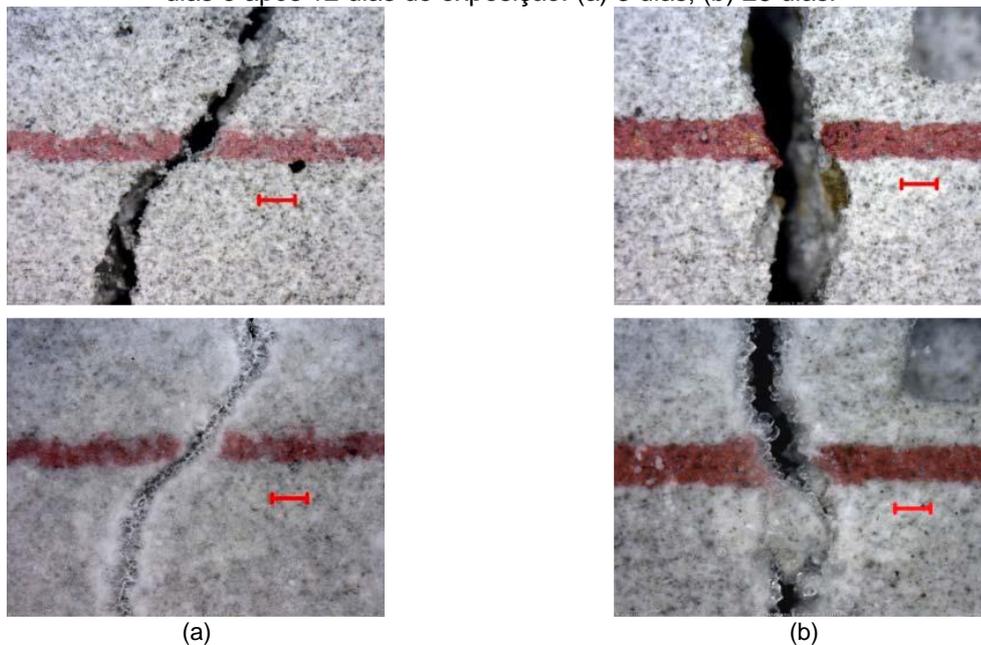
Segundo Qureshi *et al.* (2018), embora o potencial de cicatrização autógena reduza com o aumento da idade do concreto, não há estudos que relacionem quantitativamente o estado de hidratação do cimento com seu comportamento intrínseco de autocicatrização. Fato que também foi observado no trabalho de Hung e SU (2016), que avaliou compósitos cimentícios, o autor ressalta que compostos cimentícios quando submetidos a fissuração em idades iniciais apresentam um melhor potencial para a autocicatrização.

Grande parte dos trabalhos sobre autocicatrização avalia fissuras geradas em apenas uma idade. Roig-flores *et al.* (2015) trabalhou com fissuras induzidas aos 2 dias de idade. Ziegler (2020) e Hollmann (2020) avaliaram a autocicatrização em concretos com aditivo cristalizante para fissuras geradas aos 3 dias de idade. Homa *et al.* (2009) avaliou fissuras abertas aos 7 dias de idade. No trabalho de Maes *et al.* (2016), as fissuras ocorreram na idade de 24 dias. Cappellesso (2018) avaliou fissuras geradas aos 3 e 28 dias. E uma parcela maior de pesquisas avalia o fenômeno de autocicatrização em fissuras geradas aos 28 dias

(SISOMPHON E ÇOPUROGLU, 2011; SISOMPHON *et al.*, 2013; SULEIMAN E NEHDI, 2018; CUECA *et al.*, 2018; LAUCH *et al.*, 2020).

Jaroenratanapirom e Sahamitmongkol (2011) analisaram argamassas com diferentes aditivos quanto à autocicatrização de fissuras geradas nas idades de 3 e 28 dias com espessura de até 300µm, mantidas submersas em água. O estudo mostrou que todas as matrizes apresentaram capacidade de autocicatrização, entretanto o tempo necessário para que o fechamento da fissura ocorresse foi proporcional a largura dela. Também foi observado que as fissuras geradas na idade de 3 dias apresentaram melhor desempenho quando comparado as induzidas aos 28 dias. Na Figura 16, pode-se observar a diferença de espessura gerada em fissuras com idades de abertura diferentes (3 e 28 dias), bem como formação de produtos de autocicatrização na superfície da fissura.

Figura 16: Imagem de microscopia ótica de fissuras em argamassas de referência, na idade de 3 e 28 dias e após 12 dias de exposição. (a) 3 dias; (b) 28 dias.



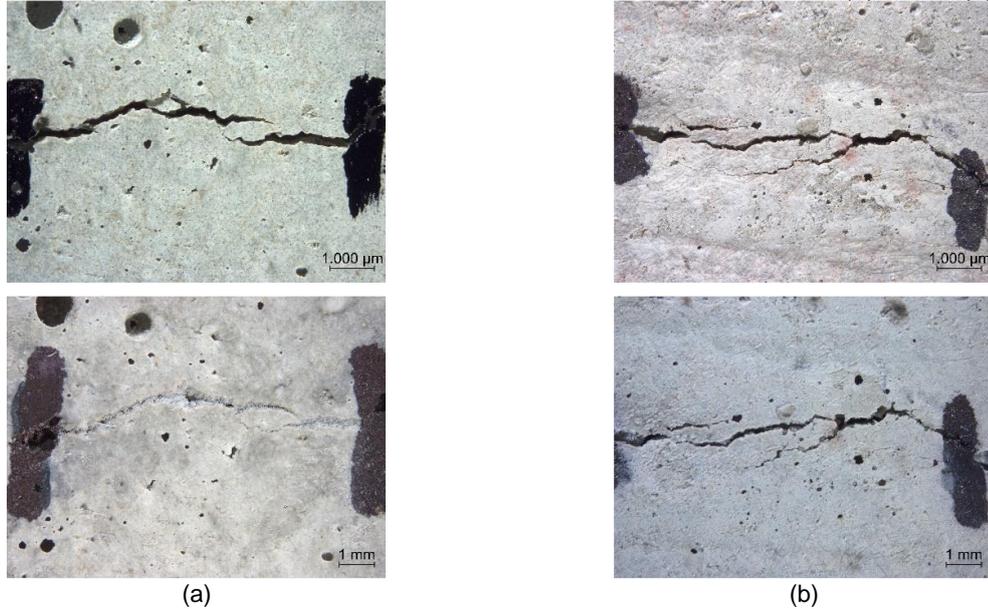
Fonte: Jaroenratanapirom e Sahamitmongkol (2011).

Roig-Flores *et al.* (2015) avaliaram fissuras geradas aos 2 dias de idade e abertura de até 300µm em concretos com adição de aditivo cristalizante, expostas em diversos ambientes de exposição. Como principais resultados notou-se que a presença de água favoreceu a incidência da autocicatrização para todos os tipos de concreto avaliado.

Cappellesso (2018) estudou fissuras geradas aos 3 e 28 dias, e observou que independentemente do tipo de cimento, a espessura inicial da fissura não sofreu alteração em função da idade da indução da fissura. Quanto à taxa de autocicatrização, calculada através do ensaio de velocidade de propagação de ondas, de uma forma geral as fissuras geradas aos 3 dias apresentaram maior taxas de autocicatrização quando comparadas às fissuras de

28 dias. Fato que reflete no ensaio de microscopia ótica, onde observa-se uma tendência a maior acúmulo dos produtos de hidratação na superfície da fissura para as que foram geradas aos 3 dias quando comparadas à idade de 28 dias. Na Figura 17 observa-se o efeito da autocicatrização em concretos com relação a/c 0,5 e cimento CPV, para fissuras abertas nas idades de 3 e 28 dias.

Figura 17: Imagens de microscopia ótica de fissuras em concretos com a/c 0,5 e cimento CPV, nas idades 0 dias e 91 dias pós cura com diferentes idades de abertura de fissura. (a) 3dias; (b) 28 dias.



Fonte: Cappellesso (2018).

Segundo Snoeck (2015), concretos mais jovens apresentam maior quantidade de grãos de cimento não hidratado, quando fissuras precocemente desenvolvem géis de C-S-H, decorrente da hidratação contínua e posterior precipitação de carbonato.

Nesta pesquisa, o efeito da idade será avaliado com duas abordagens. Primeiro será analisado se a idade de indução da fissura influencia diretamente na autocicatrização autógena das fissuras, avaliando 4 idades de abertura de fissura, aos 3, 28, 91 e 182 dias de idade, contemplando concretos onde a cinética de hidratação está no início, em pleno desenvolvimento e praticamente finalizada. A segunda abordagem está relacionada com a avaliação da autocicatrização ao longo do tempo.

### 2.2.3 Espessura e geometria das fissuras

A NBR 6118 (ABNT, 2014), que trata sobre projetos de estruturas de concreto, apresenta critérios admissíveis para a fissuração em função das classes de agressividade ambiental, conforme demonstrado na Figura 18, onde se observa as exigências relativas, aceitando fissuras entre 0,2 a 0,4mm. Já a publicação do ACI 318 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2008) relata que fissuras inferiores a 0,3 mm em áreas externas e 0,4 mm em áreas internas

não apresentam risco às estruturas de concreto armado, havendo o cobrimento correto para a situação empregada.

Figura 18: Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura em função das classes de agressividade ambiental

Tabela 13.4 – Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental

Tipo de concreto estrutural	Classe de agressividade ambiental (CAA) e tipo de protensão	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações em serviço a utilizar
Concreto simples	CAA I a CAA IV	Não há	–
Concreto armado	CAA I	ELS-W $w_k \leq 0,4$ mm	Combinação frequente
	CAA II e CAA III	ELS-W $w_k \leq 0,3$ mm	
	CAA IV	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	
Concreto protendido nível 1 (protensão parcial)	Pré-tração com CAA I ou Pós-tração com CAA I e II	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	Combinação frequente
Concreto protendido nível 2 (protensão limitada)	Pré-tração com CAA II ou Pós-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação frequente
		ELS-D <sup>a</sup>	Combinação quase permanente
Concreto protendido nível 3 (protensão completa)	Pré-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação rara
		ELS-D <sup>a</sup>	Combinação frequente

<sup>a</sup> A critério do projetista, o ELS-D pode ser substituído pelo ELS-DP com  $a_p = 50$  mm (Figura 3.1).  
 NOTAS  
 1 As definições de ELS-W, ELS-F e ELS-D encontram-se em 3.2.  
 2 Para as classes de agressividade ambiental CAA-III e IV, exige-se que as cordoalhas não aderentes tenham proteção especial na região de suas ancoragens.  
 3 No projeto de lajes lisas e cogumelo protendidas, basta ser atendido o ELS-F para a combinação frequente das ações, em todas as classes de agressividade ambiental.

Fonte: ABNT NBR 6118:2014.

É importante considerar a classe de agressividade do ambiente de exposição, pois quanto mais agressivo mais restritivo será a espessura da fissura. Isso vale também para o tipo armadura utilizado com concreto. Concreto protendido apresenta uma maior restrição quanto à fissuração quando comparado ao concreto armado.

Segundo Van Tittelboom e De Belie (2013), a autocicatrização autógena é algo secundário, pois está limitada a pequenas fissuras estáticas e por possíveis reações de hidratação. Com relação à largura máxima da fissura que pode ser selada pela cicatrização autógena, os autores apresentam divergência de opiniões, sendo observados estudos que avaliam fissuras entre 50 e 300  $\mu\text{m}$ .

Em estudos posteriores, De Belie *et al.* (2018) abordam que a autocicatrização autógena em matrizes cimentícias não deve ser limitada a fissuras com espessura de cerca de 100  $\mu\text{m}$ , uma vez que o surgimento de fissuras até 300  $\mu\text{m}$  é inevitável no concreto, embora não causem um risco de colapso na estrutura, podem afetar a vida útil visto elas aceleram a degradação da estrutura.

Reinhardt e Joss (2003) avaliaram a influência da espessura da fissura e a variação da temperatura quanto à autocicatrização autógena de concretos de alta resistência. Quanto às larguras, foram analisadas entre 50 a 200  $\mu\text{m}$ , e quanto à temperatura, foi avaliada entre 20 e 80  $^{\circ}\text{C}$ . Os autores concluíram que fissuras menores apresentam uma autocicatrização mais rápida do que fissuras com larguras maiores. E quanto à temperatura, observaram que uma temperatura maior favorece o processo de autocicatrização mais rápido, uma vez que a variação de temperatura influencia nos processos de transporte e lixiviação de água e na velocidade das reações químicas.

Yang *et al.* (2009) avaliaram a influência da largura da fissura quanto à autocicatrização autógena, e concluíram que em materiais à base de cimento, fissuras com espessuras menores que 150  $\mu\text{m}$  é notável a ocorrência da autocicatrização. Entretanto, os autores salientam que em larguras menores que 50  $\mu\text{m}$  o desempenho é mais satisfatório.

Ahn e Kishi (2010) avaliaram fissuras com larguras entre 100 e 300 $\mu\text{m}$ , sendo esta última a largura máxima tolerada pelos códigos de construção, em concretos com a utilização de adições minerais e aditivos químicos. Estes foram curados por um período de 120 dias, sendo realizada a indução da fissura em seguida, após os corpos de prova passaram novamente por um processo de cura submersa por um período de 200 dias. Observaram que aos 14 dias já havia a deposição de materiais ao longo da fissura, aos 28 dias a mesma encontrava-se praticamente toda selada.

Sisomphon e Copuroglu (2011) avaliaram argamassas com diferentes materiais cimentícios, através do ensaio de permeabilidade à água e microscopia ótica, quando submetidos à ambiente submerso. E concluíram que fissuras menores que 200 $\mu\text{m}$  apresentaram formação de material já com 14 dias de idade, e fissuras com espessura entre 200-400  $\mu\text{m}$ , precisaram de um pouco mais de tempo, entretanto com 28 dias já era possível observar o selamento da fissura.

Jaroenratanapirom e Sahamitmongkol (2011) analisaram argamassas com diferentes aditivos quanto à autocicatrização de fissuras geradas nas idades de 3 e 28 dias com espessura de até 300 $\mu\text{m}$ , mantidas em submersão em água. As fissuras com espessura entre 100-200 $\mu\text{m}$  apresentaram selamento em menor tempo quando comparada a fissura entre 200-300 $\mu\text{m}$ , na Figura 20 é possível observar esta diferença.

Gagné e Argouges (2012), estudaram a autocicatrização autógena em fissuras com geometria controlada, de argamassas com relações água cimento de 0,35, 0,45 e 0,60 mantidas em ambiente com 100% de UR. Concluíram que fissuras com espessura de 50 $\mu\text{m}$  apresentam uma taxa de autocicatrização lenta. Já fissuras com espessura maior que 200 $\mu\text{m}$

demonstraram uma taxa de autocicatrização mais rápida, os autores acreditam que este fato possa estar atrelado ao espaço disponível na microestrutural da matriz. Mas fissuras com mais de 300 $\mu\text{m}$  de largura apresentaram a menor taxa de autocicatrização quando comparada com as demais situações.

Maes *et al.* (2016), avaliaram fissuras entre 100-300 $\mu\text{m}$  em argamassa com substituição parcial do cimento por de escória de alto forno, submetidas a ambientes de exposição cíclicos. Observaram que o fechamento completo foi característico de fissuras com espessura de até 100  $\mu\text{m}$  para ambiente marinho.

Cappellesso (2018) avaliou fissuras com espessura de até 400  $\mu\text{m}$ , abertas nas idades de 3 e 28 dias. Observou-se que independente do tipo de cimento empregado e da idade de abertura da fissura, fissuras geradas em concretos com relação água cimento de 0,3 apresentaram maior espessura e maior variabilidade, conforme a relação a/c vai sendo reduzida nota-se uma diminuição na espessura da fissura bem como uma redução na variabilidade das medidas.

Outro fator que precisa ser ter cuidado é a forma de geração da fissura, segundo Ferrara *et al.* (2018) uma fissura que é gerada por meio do ensaio de resistência à flexão de três ou quatro pontos, apresenta largura variável ao longo de sua profundidade, sendo que a fissura apresentar uma maior largura em sua parte inferior e reduz sua largura em direção à ponta superior. Os mesmos autores salientam que as fissuras geradas por tração direta, apresentam largura mais uniforme.

Roig-Flores *et al.* (2015) observaram que a geometria interna da fissura, ao longo da sua profundidade, é um fator que deve ser verificado, uma vez que trechos mais estreitos da fissura tendem a desenvolver produtos de autocicatrização mais rápidos do que pontos com espessura maior. Na Figura 19, os autores trazem possibilidades de geometria interna para as fissuras, sempre sinalizando que os pontos com menor largura tendem a desencadear o início da autocicatrização, o que pode não corresponder com as imagens superficiais das fissuras.

Figura 19: Possibilidades de geometrias ao longo da profundidade das fissuras



Fonte: Roig-Flores *et al.* (2015).

Na primeira fase deste trabalho serão avaliadas fissuras com espessuras entre 50 e 400µm. No segundo momento serão avaliadas fissuras com espessura menores que 200 µm.

#### 2.2.4 Influência do ambiente de exposição

Alguns pesquisadores têm se dedicado a estudar a influência que o ambiente de exposição aos quais concretos fissurados estão submetidos exerce no fenômeno de autocicatrização (SISOMPHON *et al.*, 2013; JAROENRATANAPIROM; SAHAMITMONGKOL, 2010). É unânime que a presença de água é fundamental para que o fenômeno ocorra, seja a autocicatrização autógena ou autonôma (VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013). Sabe-se também que cada ambiente de exposição, em função da presença de CO<sub>2</sub>, água e/ou umidade e outros componentes, vai resultar em diferentes tipos de materiais para o selamento das fissuras. Uma das principais causas atreladas a autocicatrização autógena (colmatação) nas matrizes cimentícias está baseada nas causas químicas com a hidratação contínua e a formação de CaCO<sub>3</sub> (ROOIJ *et al.*, 2013).

Logo, a autocicatrização é iniciada apenas com a entrada de água pelas fissuras, as condições de exposição à umidade, seja pela umidade relativa do ar, pela exposição às águas das chuvas, tipicamente observadas em estruturas desabrigadas, ou pela total saturação nas estruturas submersas em água, têm influência sobre a resposta do material em se autocicatrizarem (TER HEIDE e SCHLANGEN, 2007; LI e YANG, 2007; YANG *et al.*, 2009; ROIG-FLORES *et al.*, 2015; HUNG, 2016; CUECA *et al.*, 2018).

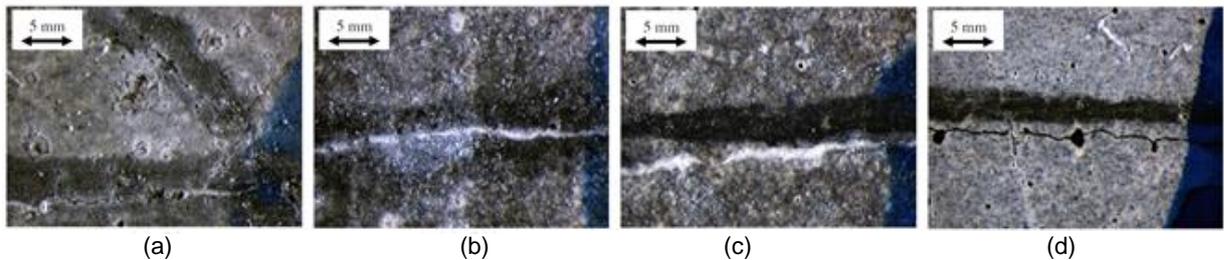
Apesar da literatura sobre autocicatrização de materiais à base de cimento venha aumentando significativamente nos últimos anos, ainda há escassez de estudos sobre como a exposição ambiental afeta a autocicatrização (SULEIMAN e NEHDI, 2018).

Fissuras com aberturas entre 0,1 e 0,2 mm, quando submetidas às condições de exposição úmida, podendo ser com molhagem periódica ou imersas, sem fluxo de água em alta velocidade ou alta pressão, tentem a sofrer a colmatação autógena. Essa colmatação deve-se, principalmente, à hidratação do cimento anidro quando entra em contato com a água (NEVILLE, 2016). Ainda segundo Neville (2016), a colmatação autógena é facilitada pela formação do carbonato de cálcio insolúvel, caso ocorra a carbonatação, sendo este formado a partir do hidróxido de cálcio do cimento solubilizado e lixiviado.

O trabalho realizado por Roig – Flores *et al.* (2015) investigou a autocicatrização de concretos com aditivo cristalizante quando expostos em quatro diferentes tipos de ambiente: imerso em água sem renovação, em contato com uma camada de água sob pressão, câmara úmida e exposto ao ar sem influência externa. Como conclusão, os concretos que ficaram imersos em água tiveram uma taxa de cicatrização de 0,90, seguido pelos concretos que ficaram em

contato com a água, câmara úmida e a menor taxa foi apresentada pelo exemplar exposto ao ar. Logo percebeu-se que quanto maior a oferta de água melhor foi a resposta para a autocicatrização.

Figura 20: Fechamento superficial das fissuras em diferentes tipos de ambientes de exposição. (a) submerso em água sem renovação; (b) submerso em água com renovação; (c) ciclo úmido e seco 12/12h; (d) exposto ao ar.



Fonte: adaptado de Sisomphon *et al.* (2013).

O mecanismo da autocicatrização autógena é geralmente atribuído à hidratação dos grãos de cimento anidro e pode ser auxiliado por carbonatação, o material de ligação formado contém cristais de cálcio carbonatado e hidróxido de cálcio (HOMMA *et al.* 2009). Vários pesquisadores observaram formação de produtos cimentícios, como AFt, AFm e  $\text{CaCO}_3$  em fissuras, e cristais de hidróxido de cálcio em vazios de ar em concreto fissurado (KISHI, 2007; SISOMPHON *et al.*, 2013; SULEIMAN E NEHDI, 2018; CUECA *et al.*, 2018). A hipótese é de que esses produtos de hidratação tenham sido lixiviados e recristalizados em água que adentrou na fissura.

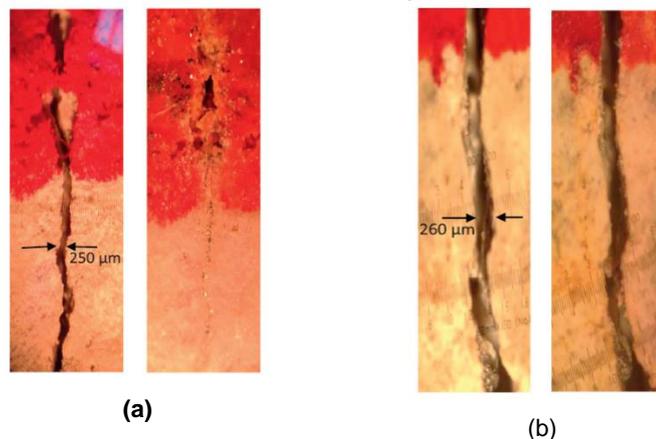
Homma *et al.* (2009) avaliaram a capacidade de autocicatrização em compósitos cimentícios reforçados com três diferentes tipos de fibra. As amostras foram curadas em água até os 28 dias de idade, após foram submetidas à indução da fissura. Com a utilização de microscopia ótica foi possível verificar a formação de produtos de cristalização ao longo da fissura. Para verificar que tipo de material era formado, foi empregada análise de espectroscopia Raman. Foram avaliados: uma amostra do compósito cimentício sem os produtos de cristalização, outra com o produto formado e a terceira amostra foi de um carbonato de cálcio puro. A partir desta análise se comprovou que os produtos de cristalização que selaram a fissura eram compostos de carbonato de cálcio.

Segundo Homma *et al.* (2009), o dióxido de carbono no ar é dissolvido em água e o íon cálcio  $\text{Ca}^{2+}$  é derivado do concreto. Logo, a combinação entre o  $\text{CO}_2$  e o  $\text{Ca}^{2+}$  resulta na produção de cristais de carbonato de cálcio. Então, o carbonato de cálcio cristaliza sobre a superfície da fissura, resultando com o passar do tempo em uma redução da largura da mesma, reparando o concreto fissurado.

Cueca *et al.* (2018) analisaram a capacidade de autocicatrização de concretos reforçados com fibra de aço, com largura de fissura inferior a 250 $\mu\text{m}$  e três diferentes tipos de ambientes de exposição: imerso em água, exposto ao ar livre e ciclos úmidos e secos. Como resultado pode-se ressaltar que apenas as amostras que permaneceram expostas à água ou parcialmente e apresentavam largura menor que 300 $\mu\text{m}$  conseguiram um selamento completo. Já as amostras que ficaram expostas ao ar livre mostraram baixa capacidade de selamento da fissura. Outro fato salientado pelos autores é quanto à presença de produtos ao longo da fissura. Por meio de MEV com EDS foi possível encontrar produtos resultantes das reações de hidratação retardadas e de carbonatação, assim como a presença de cristais de etringita no preenchimento das fissuras.

Suleiman e Nehdi (2018) avaliaram a influência da exposição ao ambiente de argamassas produzidas com cimento contendo adição de cinza volante no teor de 20%. Foi fixada uma única relação a/c em 0,35. Após 28 dias de cura, as argamassas foram fissuradas, a largura resultante deste processo ficou entre 50 e 500 $\mu\text{m}$ . Após as amostras foram acondicionadas em dois ambientes de exposição; o primeiro foi submerso em água deionizada com temperatura controlada em 19 $^{\circ}\text{C}$  e o segundo ambiente foi uma câmara ambiental com temperatura cíclica entre -10 à 40 $^{\circ}\text{C}$  e UR entre 20 e 90%. Em ambos os ambientes as amostras foram monitoradas por um ano. Como resultado, observou-se que as amostras acondicionadas na câmara não demonstraram sinais de autocicatrização, entretanto nas que foram mantidas em contato com a água notou-se sinais de autocicatrização, conforme demonstrado na Figura 21.

Figura 21: Superfície da fissura (a) antes e depois da exposição em ambiente submerso; (b) em câmara ambiental com temperatura cíclica.



Fonte: adaptado de Suleiman e Nehdi (2018).

Cuenca e Serne (2021) avaliaram a autocicatrização autógena de concretos reforçados com fibra em quatro ambientes de exposição; câmara úmida (temperatura constante de 20 $^{\circ}\text{C}$  e 100% UR), imersão em água (temperatura de 25 $^{\circ}\text{C}$ ), imersão em água do mar artificial e cura

térmica (2 dias em água à 90°C e 28 dias em câmara úmida com temperatura de 20°C e 100% UR). Os concretos foram produzidos com a/c 0,2, as fissuras foram geradas com 2 dias, foram avaliadas microfissuras entre 10 e 20 e microfissuras de até 0,4mm. As maiores taxas de autocicatrização foram obtidos para as condições: cura térmica, imersão em água, imersão em água do mar e câmara úmida.

Poucos estudos analisam a capacidade de autocicatrização em matrizes cimentícias expostas em ambientes reais, nas pesquisas desenvolvidas por Herbert e Li (2012), Herbert e Li (2013) e Lauch *et al.* (2020), os autores apontam essa deficiência e mostram que expor os concretos em ambientes naturais, com a incidência de insolação, precipitação e outros fatores ambientais de forma direta, não impede a matriz de autocicatrizarem-se. Os pesquisadores salientam a importância de outros trabalhos serem realizados avaliando ambientes naturais de exposição.

Conforme já tratado anteriormente, a autocicatrização pode ser decorrente do processo de carbonatação, desta forma, segundo Von Greve-Dierfeld (2020) o mecanismo de carbonatação e a cinética dependem do grau de saturação do concreto e da pressão parcial de CO<sub>2</sub> que, por sua vez, depende das condições de exposição (por exemplo, umidade relativa, volume e duração do contato da água com a superfície do concreto e as condições de temperatura).

Diante do exposto, muitos pesquisadores estão realizando estudos relativos à autocicatrização de materiais à base de cimento, entretanto grande parte dos trabalhos não explora análises quanto às condições de exposição, empregando na sua grande maioria os ambientes submerso e/ou ciclos de molhagem e secagem, sendo que os demais ambientes pouco são analisados. No Brasil, especificamente no RS, não há nenhum estudo que compare os efeitos do clima local (umidade, temperatura, incidência de chuva) no fenômeno da autocicatrização. Nesta pesquisa serão avaliados quatro diferentes ambientes de exposição para os concretos fissurados, sendo eles: natural protegido, natural, submerso e ciclos de molhagem e secagem.

### 2.3 MECANISMOS QUE CONTRIBUEM PARA A AUTOCICATRIZAÇÃO

Van Tittelboom e De Belie (2013) apresentam de forma resumida os mecanismos que podem desencadear a autocicatrização em fissuras, divididos em três grandes grupos, os quais descrevem mecanismos de gatilho como forma de contribuição para a ocorrência do processo de autocicatrização e o resultado para cada um dos mecanismos adotados. O primeiro gatilho está atrelado ao ingresso de líquidos e gases nas fissuras, o segundo está atrelado ao fornecimento de calor e o terceiro compreende mecanismos interligados à formação da

fissura. Desta forma, na Tabela 2 são apresentados esses mecanismos de gatilho e o resultado obtido, a partir da aplicação de cada um.

Tabela 2: Mecanismos que podem desencadear a autocicatrização em fissuras

MECANISMO DE GATILHO	RESULTADO	
Ingresso de líquidos e gases	Água + CO <sub>2</sub>	Cristalização por catalisador com precipitação de fases fibrosas de calcita
	Água	Cicatrização autógena – hidratação contínua
	Água+CO <sub>2</sub>	Cicatrização autógena – precipitação de CaCO <sub>3</sub>
	Água	Expansão, intumescência e precipitação de aditivos
	Água	Intumescência de polímeros superabsorventes e cicatrização autógena
	Umidade relativa alta	Intumescência de polímeros superabsorventes e cicatrização autógena
	Solução de cloretos	Degradação do revestimento de tubos porosos de PP e liberação de Ca(NO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> através dos poros
	Água +CO <sub>2</sub>	Ativação de esporos e precipitação bacteriana de CaCO <sub>3</sub>
	Água	Precipitação bacteriana de CaCO <sub>3</sub>
	CO <sub>2</sub>	Degradação do revestimento envolto em partículas de argilas expansivas e liberação de Na <sub>2</sub> PFO <sub>3</sub>
Fornecimento de calor	90°C + água	Fechamento de fissuras por fita retráteis de polietileno de tereftalato (PET) seguido pela cicatrização autógena
	100° C	Derretimento do revestimento de cera envolto em cápsula porosas de PP e liberação de Metil Metacrilato
	150° C	Derretimento de partículas de copolímeros de acetato de vinil-etileno VAE
	48° C	Derretimento do revestimento de parafina e agentes retardadores de hidratação
	93° C	Derretimento de filmes de copolímeros de VAE ao redor de arames espiradas e liberação de resinas epóxi
Formação da fissura	+ água	Fechamento de fissuras por fibras superelásticas de ligas metálicas com memória de forma segundo pela cicatrização autógena
	+ água	Rompimento das cápsulas e liberação de agentes cicatrizantes
	+ água	Delaminação de fibras vegetais e liberação de agentes cicatrizantes
	+ água	Atuação do bombeamento e injeção de agentes cicatrizantes por dentro de camada de concreto poroso

Fonte: Adaptado de Van Tittelboom e De Belie, 2013.

## 2.4 ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DA AUTOCICATRIZAÇÃO

Sabendo os fatores que podem influenciar e os mecanismos que podem desencadear o fenômeno da autocicatrização, é necessário compreender as técnicas disponíveis atualmente que possibilitam realizar sua verificação.

De acordo com Çopuroğlu *et al.* (2013), existem muitas técnicas para o estudo dos materiais cimentícios, muitas destas podem ser empregadas para a avaliação do fenômeno de autocicatrização, desde a verificação da selagem da fissura até a recuperação frente às ações mecânicas.

Van Tittelboom e De Belie (2013) apontam uma série de técnicas que podem ser empregadas para a verificação da autocicatrização, que podem ser divididas em três grupos. O primeiro,

consiste em maneiras de visualização e determinação; o segundo, está relacionado a ensaios que mostram a recuperação da estanqueidade e o último consiste em métodos para avaliação da recuperação das propriedades mecânicas do sistema. Na Tabela 3 é possível observar as técnicas elencadas por estas autoras, onde para cada técnica estão indicadas as possibilidades de utilização, ou melhor, os dados que são possíveis de serem obtidos.

Tabela 3: Técnicas empregadas para a verificação da autocicatrização

	<b>TÉCNICAS</b>	<b>POSSIBILIDADES</b>
<b>Visualização e determinação</b>	Microscópio ótico + análise de imagens	Visualização da deposição e determinação da taxa de cicatrização
	Microscópio eletrônica de varredura	Visualização da deposição de cristais
	Microscópio eletrônico de varredura ambiental	Visualização do rompimento das cápsulas parcialmente embutidas
	Análise de seção fina	Visualização da deposição de cristais no interior da fissura
	Radiografia de raios-x	Visualização da liberação do agente encapsulado de cápsula embutida
	Tomografia de raios-X	Visualização da liberação do agente encapsulado de cápsula embutida em 3D
	Correlação de imagem digital	Visualização do fechamento da fissura mediante tratamento térmico de SMA
	Análise por difração de raios-x	Determinação dos materiais cristalinos
	Espectroscópio Raman	Determinação da composição química
	Análise no infravermelho	Determinação dos produtos precipitados
<b>Recuperação da estanqueidade</b>	Permeabilidade à água – baixa pressão	Vazão de água através da fissura (cicatrizada)
	Permeabilidade à água – alta pressão	Vazão de água através da fissura (cicatrizada)
	Permeabilidade ao ar	Vazão de ar através da fissura (cicatrizada)
	Absorção de água por capilaridade	Absorção de água por capilaridade da fissura (cicatrizada)
	Radiografia por nêutrons	Visualizar a absorção de água por capilaridade
	Teste de corrosão	Resistência contra corrosão
	Delaminação por sais de degelo	Resistência contra delaminação por sais de degelo
	Difusão de cloreto	Resistência contra o ingresso de cloretos
	Pressão Osmótica	Resistência contra o ingresso de íons
	Medições de transmissão de ultrassom	Continuidade do material
<b>Recuperação de propriedades mecânicas</b>	Ensaio de compressão	Recuperação em resistência, rigidez e/ou energia obtida quando recarregar o corpo de prova cicatrizado
	Ensaio de tração na flexão	
	Ensaio de flexão em três pontos	
	Ensaio de flexão em quatro pontos	
	Deformação horizontal coluna/quadro	Formação de novas fissuras contra e a reabertura de fissuras antigas
	Laje de carga de impacto	
	Análise de emissão acústica	Recuperação de energia/ observar o rompimento da cápsula
	Análise de frequência de ressonância	Recuperação da consistência

Fonte: Adaptado de Van Tittelboom e De Belie, 2013.

Cabe ressaltar que algumas técnicas apontadas pelas autoras, requerem equipamentos específicos que muitas vezes não estão disponíveis nos laboratórios.

A seguir serão discutidas algumas técnicas, as quais foram empregadas ao longo desta pesquisa.

#### 2.4.1 Medidas de transmissão de ultrassom

Muhammad *et al.* (2016) compilaram uma série de testes empregados para avaliar o efeito da autocicatrização na macroestrutura das matrizes cimentícias, sendo que o ensaio de velocidade de propagação de ondas é apontado como uma das alternativas para avaliar a autocicatrização interna.

Segundo Çopuroğlu *et al.* (2013), as ondas ultrassônicas se propagam mais facilmente em concreto endurecido (4000-5000 m/s) do que na água (1480 m/s) ou no ar (350 m/s). Quando há uma fissura não selada, as ondas percorrem resultando em um aumento do tempo de transmissão, entretanto, quando a fissura está fechada, as ondas tendem a se propagar em tempos reduzidos. Desta forma, é possível a utilização do ensaio de propagação de onda ultrassônica como indicativo de fechamento interno da fissura.

Ahn *et al.* (2017) realizaram um estudo onde abordaram as principais aplicações de técnicas para a autocicatrização em matrizes cimentícias. Os ensaios não destrutivos, baseado em ultrassom, avaliados foram: medição da velocidade de pulso, transmissão de ondas de superfície, ultrassom difuso e análise de emissão acústica e técnicas de interferência de ondas. Como conclusão apontam que o ensaio de medição da velocidade de pulso é o mais empregado como técnica para avaliação, entretanto, o fechamento parcial da fissura e as condições de umidade podem influenciar nos resultados obtidos.

Tomczak *et al.* (2020) salientam que a densidade do material formado para o selamento da fissura impacta no resultado do ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. Segundo os autores, quando o preenchimento da fissura se der com C-S-H fibroso, a mudança resultante no UPV pode ser menos perceptível quando comparado com o selamento com carbonato de cálcio.

Quanto à autocicatrização, o ensaio de medida de transmissão de ultrassom é um dos mais difundidos, sendo utilizado para verificar o fechamento das fissuras ao longo do tempo. Ferrara *et al.* (2018) salienta que as técnicas ultrassônicas têm sido amplamente utilizadas ao longo do tempo para o mapeamento de falhas internas, fissuras e vazios nas matrizes cimentícias, ressalta ainda a eficiência das técnicas na caracterização do selamento da fissura e recuperação do desempenho oriundos da autocicatrização.

Dentre as possibilidades de emprego, a utilização do ensaio de velocidade de propagação de pulso ultrassônico pelo método direto é um dos mais empregados para a avaliação da recuperação das matrizes cimentícias quanto à autocicatrização (FERRARA *et al.*, 2018).

Embora seja um ensaio extremamente simples de ser executado e que traz resultados positivos quanto à avaliação da autocicatrização interna, é necessário considerar na análise dos resultados que parte das mudanças encontradas são decorrente da hidratação do cimento, logo esta parcela deve ser desconsiderada.

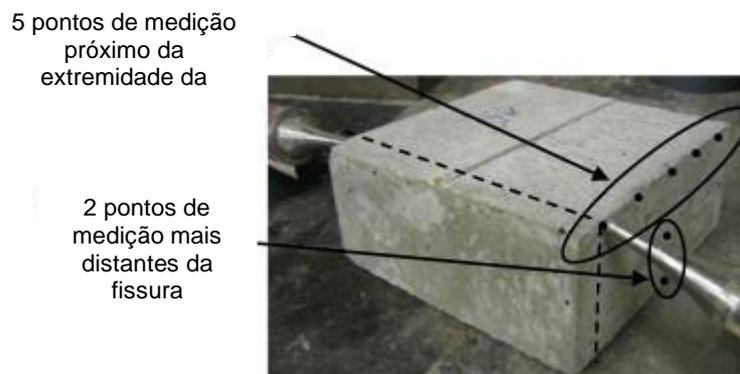
Quanto ao tipo de transdutor a ser empregado, Ahn *et al.* (2017) tratam que são empregados geralmente transdutores com frequência entre 20 a 100kHz.

Tomczak *et al.* (2020) utilizam em seu trabalho amostras de controle, sem a presença de fissuras, para poder comparar as mudanças, separando o quanto é feito da autocicatrização e o quanto é resultante da hidratação contínua do cimento.

Cappellesso (2018) utilizou o ensaio de velocidade de propagação de ondas para determinar a taxa de autocicatrização das matrizes, sendo possível verificar o incremento na taxa para algumas combinações estudadas. A autora salienta a importância de se trabalhar com corpos de prova de referência, sendo possível subtrair da taxa de autocicatrização o incremento ocasionado pela hidratação contínua da pasta de cimento.

Tittelboom *et al.* (2010) empregou o ensaio de VPU para avaliar a autocicatrização em matrizes cimentícias com a adição de bactérias, na Figura 22 é possível verificar o equipamento utilizado e os pontos de leitura pré-definidos. Foi empregado um transdutor com frequência entre 40 e 50kHz para a realização de medidas de transmissão direta, paralelas a fissura. Compara os resultados de antes e depois, foi possível verificar que o tempo de transmissão reduziu, indicando uma recuperação da matriz.

Figura 22: Ensaio de velocidade de propagação de ondas



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

Wons *et al.* (2021) empregaram o ensaio de VPU para avaliar a autocicatrização em concretos com diferentes teores de cinza volante e fissuras abertas em duas idades (7 e 28 dias). Os corpos de prova foram expostos em ciclo de molhagem e secagem (78h imersos e 90h em

ambiente de laboratório). Para a realização das leituras foi utilizado o transdutor de 50mm de diâmetro e frequência de 54Hz. Como resultados observaram, que os concretos fissurados na idade de 7 dias responderam melhor a autocicatrização quando comparados aos concretos com fissura gerada aos 28 dias. Os autores salientam que o ensaio parece ser sensível para acompanhar a autocicatrização.

Embora o ensaio de VPU se mostre muito promissor para o auxílio na verificação do fenômeno da autocicatrização, é importante salientar que alguns fatores podem afetar os resultados, tais como, o tamanho do agregado, tipo de cimento, relação água/cimento, adições, idade do concreto, temperatura do concreto, tamanho da amostra e a presença de fibras de aço (Naik *et al.*, 2003)

#### 2.4.2 Microscopia ótica

Embora seja uma técnica simples de ser executada, é comum encontrar fotomicrografia exageradas e fora de foco, o que dificulta a análise. Desta forma, para evitar esses problemas, na microscopia ótica, deve-se cuidar a colocação dos elementos óticos, fonte de iluminação e configurações de diafragma de campo (ÇOPUROĞLU *et al.*, 2013). Ainda segundo estes autores, a partir das imagens de microscopia ótica da superfície, é possível não apenas trabalhar com análises qualitativas, mas também é possível realizar análises quantitativas, assim, pode-se verificar a ocorrência e a quantidade de produtos resultantes da autocicatrização que selam a fissura.

Para que as imagens geradas a partir do microscópio ótico possibilitem análises qualitativas e quantitativas alguns cuidados são necessários. Roig-Flores *et al.* (2015), aplicaram no seu estudo uma limpeza superficial da amostra fissurada com a utilização de ar comprimido. Roig-Flores *et al.* (2016) utilizam um processo de secagem das amostras que estavam em ambiente submerso, com o objetivo de secar a superfície e desta forma evitar um brilho excessivo nas imagens.

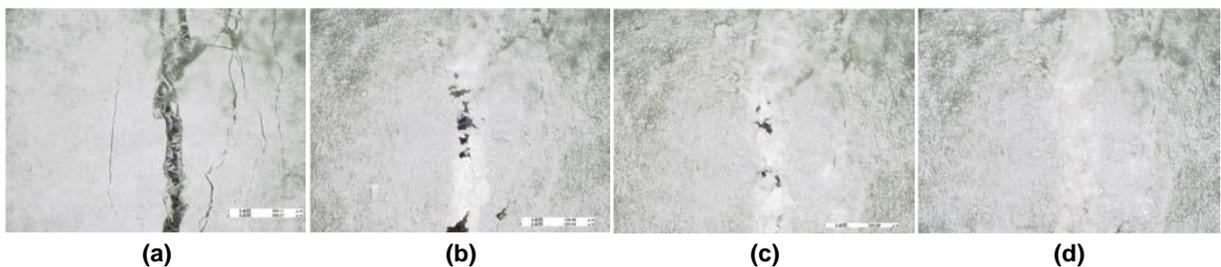
Ferrara *et al.* (2018) salientam que quanto maior o comprimento de uma fissura que é analisado, maior será a representatividade desta análise. Desta forma trabalhar com um único seguimento desta fissura não se torna representativo de todo o processo de autocicatrização que pode ocorrer. Embora a literatura saliente a necessidade de avaliar segmentos mais amplos da fissura, grande parte dos trabalhos se detem em avaliar um único trecho da fissura.

Com a utilização das imagens coletadas através da microscopia ótica é possível analisar a largura média ao longo da fissura e área da mesma, através da utilização de pixels.

A microscopia ótica é uma das técnicas não destrutivas mais empregadas para a avaliação da superfície das fissuras.

Homma *et al.* (2009) analisaram a capacidade de autocicatrização em compósitos cimentícios reforçados com diferentes tipos de fibras. As fissuras foram induzidas com 7 dias de idade da matriz. A microscopia ótica foi empregada de forma qualitativa para monitorar a formação dos produtos de autocicatrização e de forma quantitativa para avaliar a espessura da fissura ao longo do tempo. Na Figura 23 observa-se o emprego da técnica para uma fissura com 0,368mm no compósito cimentício reforçado com fibra de polietileno nas idades de 0, 3, 14 e 28 dias de idade após a abertura da fissura, qualitativamente e quantitativamente é possível observar o selamento completo da fissura, logo o emprego da técnica se mostrou benéfica.

Figura 23: Imagem de microscopia ótica em compósito cimentício reformado com fibra de polietileno em diferentes idades após a abertura da fissura. (a) 0 dias; (b) 3 dias; (c) 14 dias; (d) 28 dias.

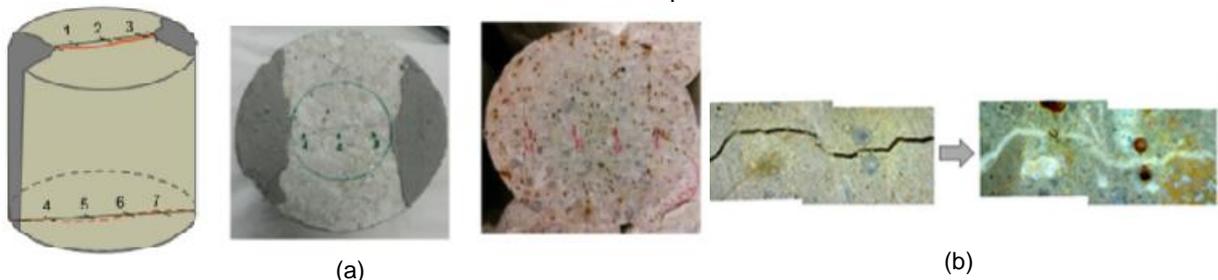


Fonte: Homma *et al.* (2009).

Sisomphon *et al.* (2012) avaliaram a autocicatrização de argamassas com diferentes materiais cimentícios.

Roig-Flores *et al.* (2016) estudaram a capacidade de autocicatrização de aditivo cristalizante em concretos, para a estimar a largura média das fissuras, foram coletados 7 pontos, 3 na parte superior do corpo de prova e 4 na base, conforme demonstrado na Figura 24. As imagens de cada ponto foram realizadas com o auxílio de um microscópio ótico, elas foram utilizadas para uma avaliação qualitativa do fechamento das fissuras.

Figura 24: (a) demarcação no corpo de prova dos pontos; (b) Exemplo da aplicação da microscopia ótica como análise qualitativa.



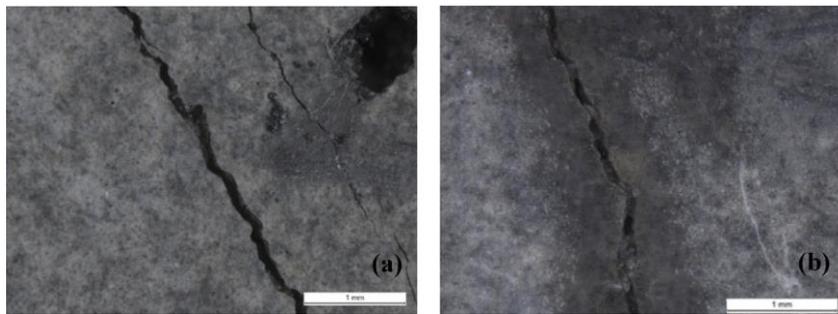
Fonte: adaptado de Roig-Flores *et al.* (2016).

As imagens geradas através de microscopia ótica, podem ser empregadas para avaliação quantitativa do fechamento das fissuras. Para isso, segundo Stefanidou *et al.* (2021), é possível determinar o índice de cicatrização com a parametrização da largura e da área da fissura. Para avaliar o fechamento da largura, os outros orientam, a realizar a medida em um

ponto específico ou determinar através da média do comprimento, transversal a fissura. Entretanto, avaliar utilizando a área mostra-se a maneira mais confiável e direta para a avaliação da eficiência da autocicatrização.

Maes *et al.* (2016), realizaram o acompanhamento da autocicatrização através de microscopia ótica, foram utilizados corpos de prova cilíndricos, a fissura foi induzida através de tração direta. Foram realizadas 3 medidas em 10 locais fixos ao longo do comprimento da fissura após os ciclos 3,7, 14, 21, 28, 49 e 98 (1 ciclo = 1 dias). As imagens foram analisadas por meio do software *ImageJ*, sendo calculada a taxa de fechamento a fissura, em percentual, através da diferença entre a largura média da fissura inicial e a largura média restante comparada à largura da fissura média inicial. Na Figura 25 pode-se observar as imagens utilizadas a quantificação do fechamento da fissura.

Figura 25: Fissura em corpo de prova de argamassa. (a) antes (b) após 196 dias imerso em 165g/l NaCl

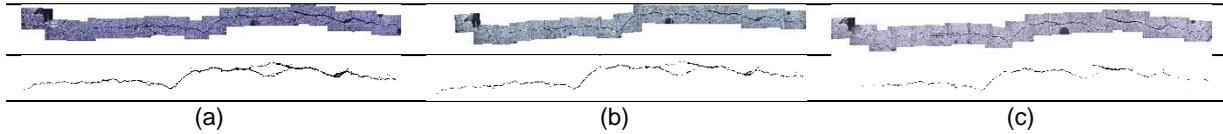


Fonte: Maes *et al.* (2016).

Suleiman *et al.* (2019) avaliaram a influência de adições minerais em argamassas na autocicatrização, dentro das técnicas empregadas para avaliar o fenômeno empregaram a microscopia ótica para acompanhar o fechamento das fissuras bem como realizar uma análise quantitativa, foi utilizado um microscópio Carton 40x para a realização das imagens. Através da análise quantitativa os autores estimaram um índice de vedação da fissura.

Cappellesso *et al.* (2019) utilizaram as imagens de microscopia ótica para a quantificação da área da fissura através da quantificação de pixels, com o auxílio do software *Image J*. Para isso o comprimento da fissura foi fracionado, facilitando a captura das imagens, a coleta das imagens foi realizada aos 0, 14 e 91 dias de idade após submetidos aos ciclos de molhagem e secagem. Na Figura 26 nota-se o processo de quantificação das áreas da fissura com a comparação de pixels.

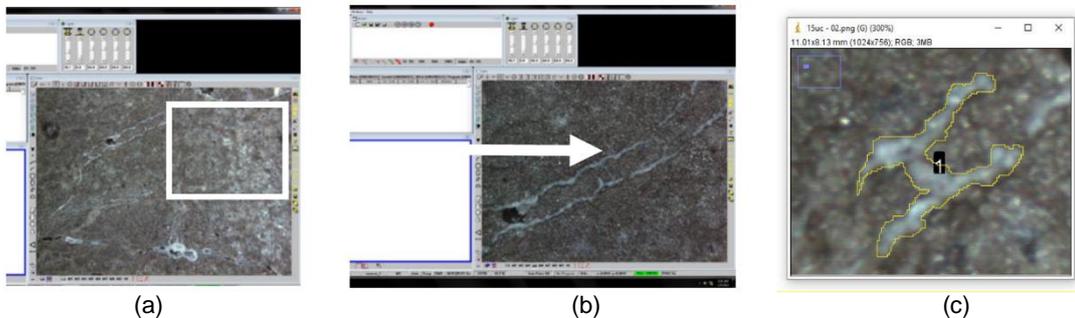
Figura 26: Imagem de microscopia ótica e análise no software Image J. (a) 0 dias; (b) 14 dias; (c) 91 dias



Fonte: Cappelleso *et al.* (2019).

Pacheco (2020) empregou nas suas análises sistema de medição óptico, para realizar a verificação da cicatrização nas suas matrizes cimentícias. Após a coleta das imagens, elas foram processadas com o auxílio da ferramenta computacional *ImageJ*. A Figura 27 demonstra a forma de aquisição das imagens.

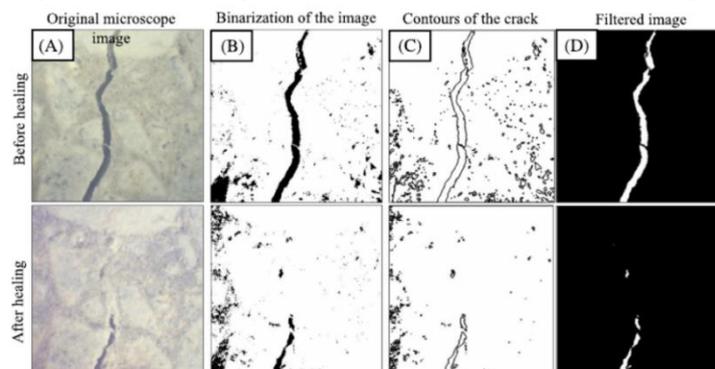
Figura 27: Capturas de tela geradas pelo equipamento de medição tridimensional. (a) Captura inicial; (b) ampliação do setor; (c) seleção da fissura e cicatrização.



Fonte: Pacheco (2020).

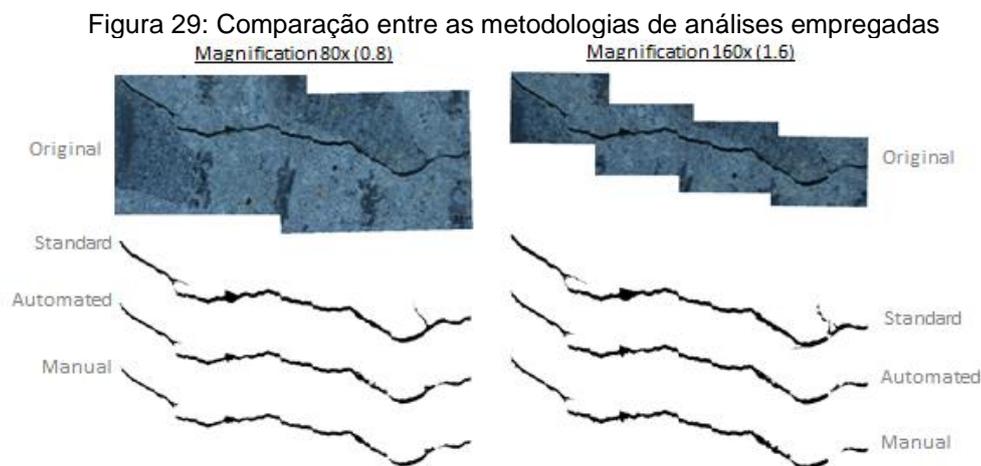
Stefanidou *et al.* (2021) desenvolveram um algoritmo de análise de imagem, baseado na identificação computacional dos limites da fissura, para evitar impacto do operador sobre a captura da imagem. Os autores salientam que todas as imagens registradas precisam apresentar a mesma escala, iluminação e posição com a finalidade de facilitar a comparação e ser confiável. A Figura 28 demonstra o processo empregado, o algoritmo foi desenvolvido na linguagem de programação Python usando o Biblioteca OpenCV para fornecer identificação e quantificação confiável da área de fissura.

Figura 28: Etapas do procedimento empregado. (a) Transformação do RGB em escala de cinza. (b) limiarização; (c) identificação dos contornos da fissura; (d) filtragem da imagem.



Fonte: Stefanidou *et al.* (2021).

Garay *et al.* (2021) avaliaram duas metodologias para a quantificação (manual e automatizada) de fissuras utilizando análise de imagens, através da quantificação de pixels, área, perímetro e a espessura da fissura como ferramenta para avaliar a autocicatrização. As quais foram comparadas com uma metodologia considerada padrão. Foram contempladas duas magnificações 80x e 160x, conforme demonstrado na Figura 29. Os autores concluíram que a magnificação das imagens influencia na sensibilidade da detecção dos pixels da fissura e que a metodologia automatizada se mostra mais promissora, entretanto salientam que são necessárias outras avaliações.



Fonte: Garay *et al.* (2021).

A microscopia ótica é uma ferramenta importante para auxiliar na avaliação da autocicatrização, podendo ser empregada de forma qualitativa, onde pode-se observar a formação dos produtos e/ou de forma quantitativa, sendo possível associar outras ferramentas para a realização da quantificação do selamento da fissura.

#### 2.4.3 Microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de energia dispersiva

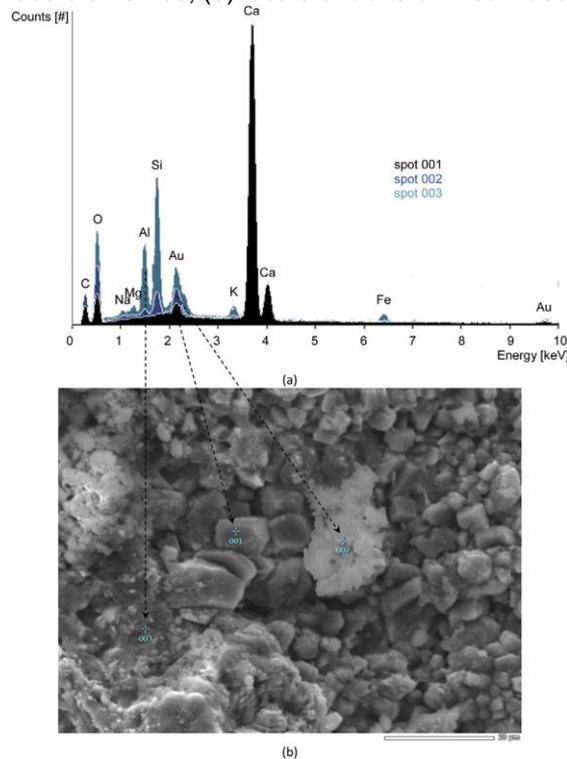
Segundo Huang e Ye (2015), atualmente grande parte das pesquisas sobre autocicatrização utilizam ensaios de microestrutura, tais como Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Microscopia eletrônica de Varredura de Emissão, espectroscopia por energia dispersiva e difração de raio-X para a quantificação e identificação dos produtos formados ao longo do processo de autocicatrização.

A microscopia eletrônica de varredura (MEV), juntamente com a espectroscopia dispersiva por energia (EDS), são boas técnicas para o estudo das microestruturas dos materiais cimentícios (SCRIVENER *et al.*, 2015).

Snoeck *et al.* (2016) analisaram a autocicatrização autógena de materiais cimentícios com a adição de polímeros superabsorventes (PSA). A partir da utilização de MEV com espectroscopia por energia dispersiva (EDS) foi possível avaliar os produtos formados nas

amostras de fissuras. Os autores confirmaram a presença da cristalização de  $\text{CaCO}_3$  como o principal mecanismo de autocicatrização, sendo auxiliado pela presença do PSA, conforme é demonstrado na Figura 30. Snoeck *et al.* (2016) salientam que a autocicatrização está ligada a formação do C-S-H, a dissolução e re-deposição de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e formação da calcita formada a partir da carbonatação do hidróxido de cálcio.

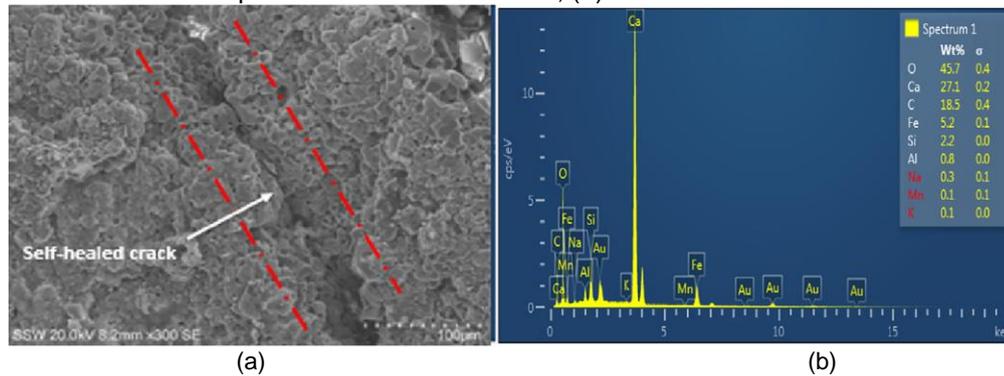
Figura 30: Análise de produtos de autocicatrização formados em uma fissura. (a) Gráfico com a quantificação dos elementos; (b) locais onde foram realizadas as análises.



Fonte: Snoeck *et al.* (2016).

Suleiman e Nehdi (2018) avaliaram a influência da exposição ao ambiente de argamassas produzidas com cimento contendo adição de cinza volante no teor de 20%, com a utilização de MEV com EDS, foi possível verificar produtos formados para o fechamento das fissuras em amostras submersas em água deionizada pelo período de um ano. Verificou-se que produtos resultantes na superfície da fissura eram compostos principalmente de cálcio, carbono e oxigênio, o que pode indicar a presença de  $\text{CaCO}_3$ . Os autores salientam que os produtos da autocicatrização apresentam cristais de formas variadas, tanto regulares quanto irregulares. Na Figura 31 é possível observar a morfologia dos compostos bem como sua composição química.

Figura 31: Avaliação de produtos de autocicatrização em fissuras. (a) Imagem obtida através de microscopia eletrônica de varredura; (b) EDS da área analisada.

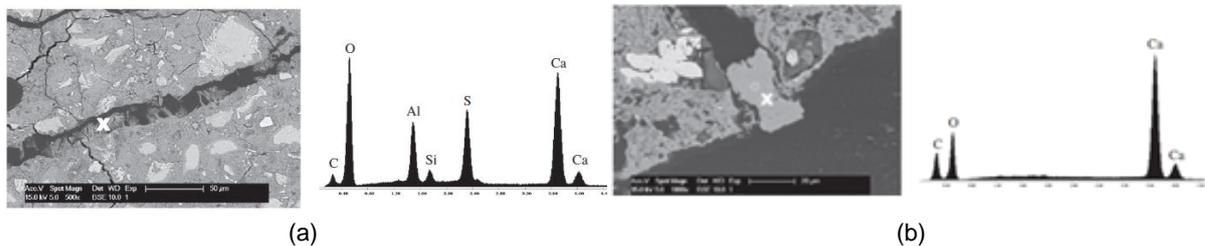


Fonte: Suleiman e Nehdi (2018).

Sisomphon e Çopuroğlu (2012) salientam que a formação de  $\text{CaCO}_3$  como um produto de cura se deve à lixiviação, à re-deposição de íons cálcio  $\text{Ca}^{2+}$  da matriz cimentícia e à difusão de carbonatos nas fissuras, corroborando os apontamentos realizados por Suleiman e Nehdi (2018).

Sisomphon *et al.* (2013) avaliaram a formação de compostos na parte interna da fissura e na borda externa. Constatou-se diferença nos materiais de selamento encontrados, na parte interna observou-se a presença de  $\text{CaCO}_3$ , C – S – H e etringita, acredita-se que a formação da etringita tenha ocorrido por causa do tipo de cimento utilizado. Já na borda externa o produto resultante da autocicatrização foi o carbonato de cálcio puro. Na Figura 32, observa-se a composição química dos produtos de autocicatrização formados em fissuras expostas em ambiente submerso com água comum por um período de 28 dias, na parte interna e externa da fissura.

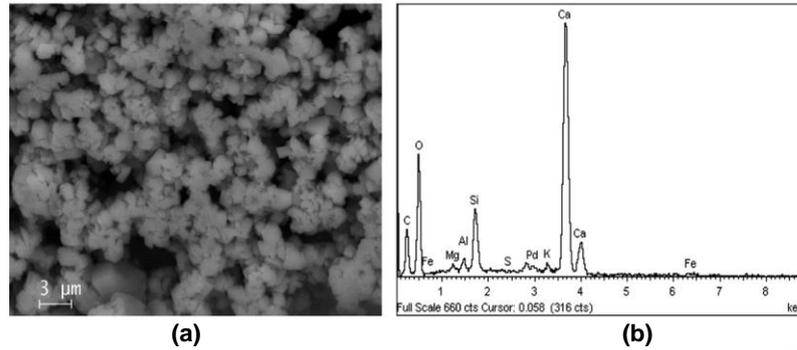
Figura 32: Análise química dos produtos de autocicatrização. (a) interno; (b) externo.



Fonte: Sisomphon *et al.* (2013).

Cuecas *et al.* (2018) coletaram o material formado na superfície da fissura, e observaram a presença de  $\text{CaCO}_3$  como um dos produtos resultantes da autocicatrização em concretos sem adição e expostos ao ambiente submerso em água. Outro fato analisado está ligado a morfologia dos cristais, que tendem a serem cúbicos, conforme é demonstrado na Figura 33.

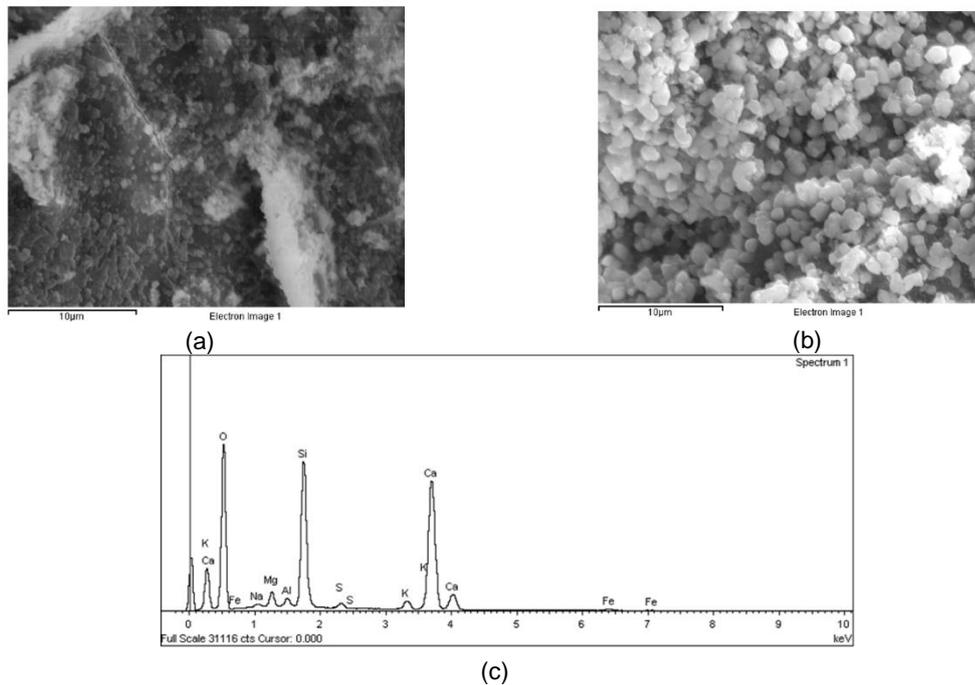
Figura 33: Produto de autocicatrização em concreto sem adição. (a) Imagem obtida através de microscopia eletrônica de varredura; (b) EDS da área analisada.



Fonte: Cuecas *et al.* (2018).

Cuenca e Serne (2021) avaliaram os produtos de autocicatrização autógena, de concretos reforçados com fibra, internos e externos a fissura para as condições de exposição, cura térmica e imersão em água do mar, pois apresentaram as melhores taxas de autocicatrização calculada através do ensaio de microscopia. Os autores observaram na superfície da fissura uma quantidade grande de pequenos cubos de  $\text{CaCO}_3$ , o que não se refletiu externamente, conforme demonstrado na Figura 34.

Figura 34: Produto de autocicatrização em concreto sem adição. (a) Imagem obtida através de microscopia eletrônica de varredura; (b) EDS da área analisada.



Fonte: Adaptado de Cuenca e Serne (2021).

Corroborando com Snoeck *et al.* (2016), Suleiman e Nehdi (2018), Sisomphon e Çopuroğlu (2012), Sisomphon *et al.* (2013) e Cuecas *et al.* (2018), Ferrara *et al.* (2017) trata que parte dos selamentos encontrados nas fissuras são oriundos da hidratação tardia, uma vez que após a fissura ser gerada, ela fica exposta à umidade externa, produzindo cristais de C-S-H,

também ressaltam que a fissura é porta à entrada de  $\text{CO}_2$  presente no ar ou dissolvido na água, logo a combinação do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  com o  $\text{CO}_2$  são responsáveis pela formação do  $\text{CaCO}_3$ , contribuindo para autocicatrização autógena. Sendo o equilíbrio entre as duas reações função do ambiente de exposição e dos materiais componentes da matriz cimentícia.

#### 2.4.4 Análise Termogravimétrica

A termogravimetria determina a perda de massa da amostra em função da temperatura determinadas por termogravimetria (TG) e a termogravimetria derivada (DTG), sendo possível, desta maneira, determinar o tipo de composto presente no material de autocicatrização das fissuras.

Pela derivação da TG identifica-se mais facilmente as temperaturas características de decomposição dos minerais.

Segundo Lothenbach *et al.* (2016), a TG é capaz de identificar hidratos amorfos, como C-S-H ou AH<sub>3</sub>, e pode ser usado de forma complementar a outras técnicas, como a difração de raios-X (DRX) e DTG e DTA (ou DSC), as quais geralmente mostram picos semelhantes. Pois muitas reações de mudança de massa, como a perda de água, também estão associadas a alterações endotérmicas na entalpia.

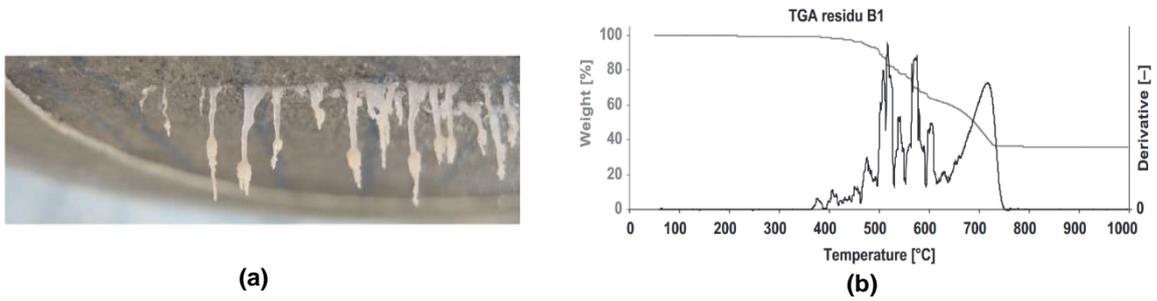
Taylor (1997) dividi a decomposição de materiais através de TG em três faixas: as perdas de massa entre temperaturas de 30°C e 450°C, representam a decomposição do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), das fases aluminato e dos compostos de magnésio. Perda de massa na faixa, entre 450°C e 605°C, representa a decomposição do hidróxido de cálcio e, a decomposição do carbonato de cálcio entre 605°C e 1.000°C.

Já John e Cincotto (2010), observado entre 400°C e 500°C o pico característico da portlandita e, entre 600°C e 800°C, picos devido a decomposição dos carbonatos.

Segundo Hoppe Filho *et al.* (2017), a dissociação do anidrido carbônico do carbonato de cálcio  $\text{CaCO}_3$  ocorre a temperaturas superiores a 450 °C. Vieira *et al.* (2016) e Lothenbach *et al.* (2016) salientam que a decomposição total acontece à temperatura de 900 °C.

Snoeck *et al.* (2014) avaliou a autocicatrização em argamassas com microfibras e polímero superabsorvente. A fibra foi empregada com o objetivo de limitar a largura da fissura. A análise termogravimétrica foi empregada para avaliar os produtos formados na fissura após os ensaios de permeabilidade. Os cristais foram removidos cuidadosamente dos corpos de prova e submetidos ao ensaio. Optou-se pelo emprego do aumento gradual de temperatura (10°C/min) até atingir temperatura de 1000°C, as medidas foram em ambiente de hélio. A Figura 35 mostra a formação das estalactites em uma das faces da fissura após ensaios de permeabilidade e a TGA delas.

Figura 35: Formação de compostos. (a) Estalactites; (b) Termogravimétrica das estalactites.

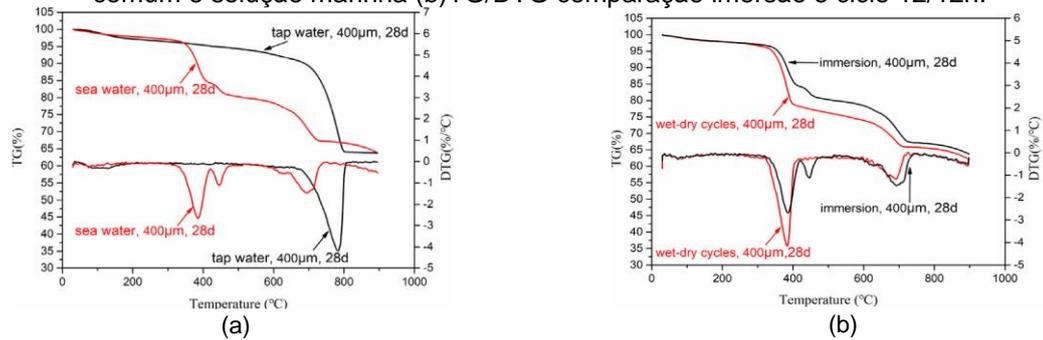


Fonte: Adaptado de Snoeck *et al.* (2014).

A partir da TGA Snoeck *et al.* (2014) afirmam que as estalactites são formadas por  $\text{CaCO}_3$  e por produtos lixiviados, pode-se observar que o pico entre 700-750°C equivale a dissociação do carbonato de cálcio, formando o  $\text{CaO}$  e  $\text{CO}_2$ .

Liu *et al.* (2019) analisaram o efeito de diferentes tipos de ambiente de exposição sobre a autocicatrização em pasta de cimento. Os ambientes investigados foram: ciclo de molhagem e secagem, com água comum e solução simulando água do mar e imersão em água comum e solução marinha, foram avaliadas fissuras com espessura de 150 $\mu\text{m}$  e 400 $\mu\text{m}$  e dois períodos de cura, 28 e 56 dias. Para avaliar os produtos de autocicatrização encontrados nas bordas da fissura, empregaram a termogravimetria. A Figura 36, mostra as curvas de TG/DTG dos produtos da reação de autocicatrização, quando exposto em diferentes ambientes. Na Figura 36 a, os autores compara os produtos formados nos ambientes: imerso em água da torneira e solução marinha, e concluem que o produto de autocicatrização formado quando as amostras estão expostas em água da torneira é  $\text{CaCO}_3$  (pico entre 600-800°C). Para a imersão em solução marinha os produtos são divididos em 3 faixas: picos ente 350-420°C podem ser atribuídos a decomposição do  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , já na temperatura de aproximadamente 450°C a perda de massa pode ser causada pela decomposição do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , e os picos entre 600-800°C podem ser atribuídos a decomposição do  $\text{CaCO}_3$ . Na Figura 36 b, os autores comparam os produtos formados a partir da imersão em solução marinha e ciclo de molhagem e secagem, e concluem que nas duas situações á a formação de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (picos próximos à 400°C) e carbonato de cálcio (pico entre 600-800°).

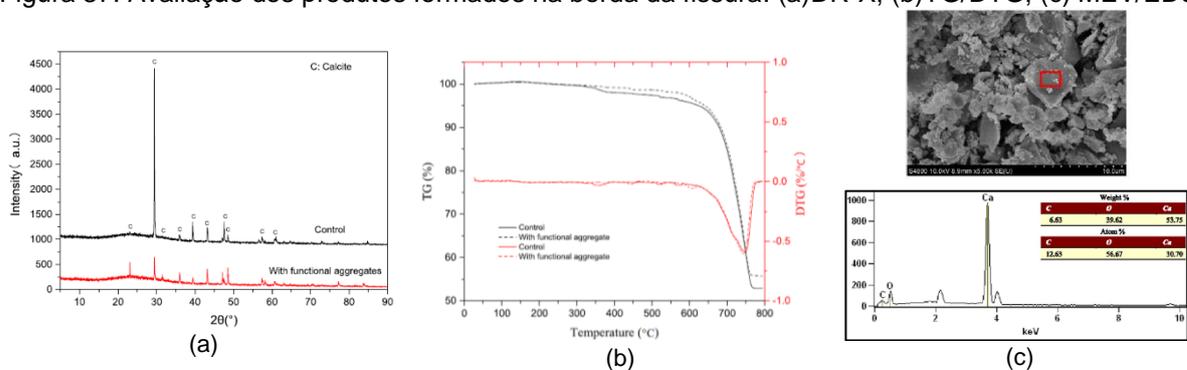
Figura 36: Avaliação dos produtos formados na da fissura. (a) TG/DTG comparação imersão em água comum e solução marinha (b) TG/DTG comparação imersão e ciclo 12/12h.



Fonte: adaptado de Liu *et al.* (2019).

Luo *et al.* (2021) avaliaram argamassas com e sem agregados artificiais funcionais, com a utilização de fibra de polipropileno para auxiliar na integridade das amostras após a fissuração. As fissuras foram geradas na idade de 3 dias, através do ensaio de resistência à tração, após 28 dias observaram a formação de produtos de autocicatrização tanto na parte interna quanto na borda da fissura. Para avaliar os produtos encontrados junto a borda da fissura, estes foram raspados com auxílio de uma pinça, secos em dessecador à vácuo e moídos para passarem na peneira de malha 75µm. Para verificar os produtos formados internamente a fissura o corpo de prova foi quebrado ao meio e foram cortados transversalmente a fissura. Após realizaram os ensaios de difração de raio-x, microscopia eletrônica de varredura, espectroscopia de energia dispersiva e TG. Nas amostras de controle (sem agregado funcional), observaram que os produtos formados internamente a fissura eram oriundos da hidratação contínua de grãos de cimento anidro para a formação de C-S-H, os outros salientam que não é fácil identificar a formação recente do composto mas é possível. Na borda da fissura foi observado, através da difração, picos de calcita e na TG/DTG notou-se a decomposição de compostos na faixa entre 600 à 800°C, atribuída a liberação do dióxido de carbono pela decomposição do carbonato de cálcio, conforme apresentado na Figura 37.

Figura 37: Avaliação dos produtos formados na borda da fissura. (a)DR-X; (b)TG/DTG; (c) MEV/EDS.



Fonte: adaptado de Luo *et al.* (2021).

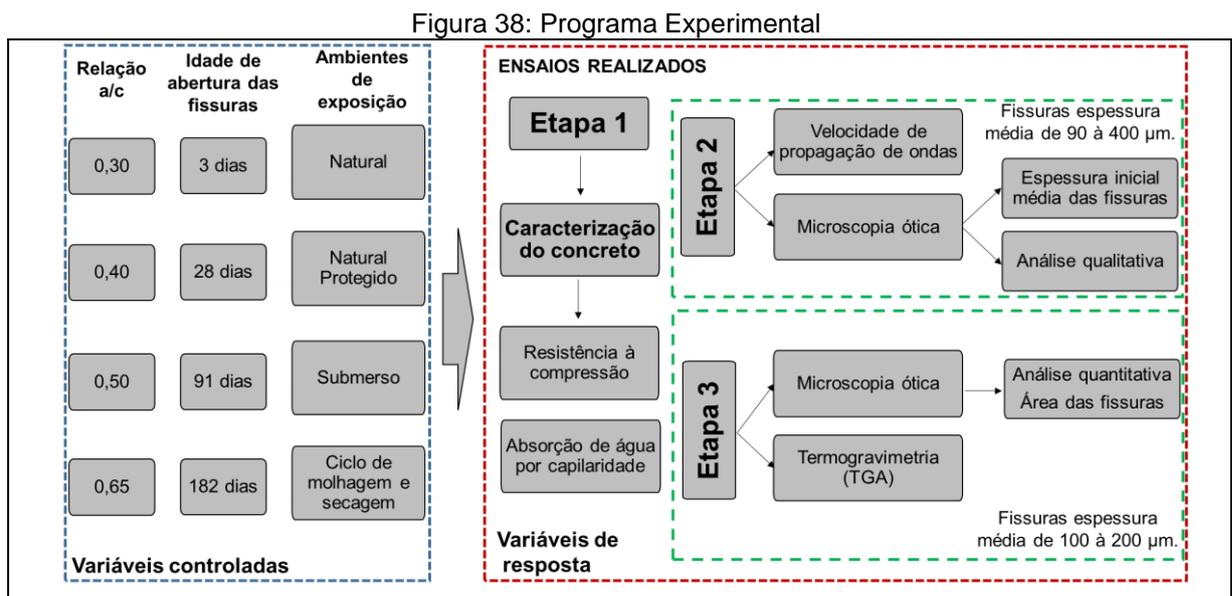
O ensaio de termogravimétrica se mostra eficiente para auxiliar na verificação dos produtos de autocicatrização formados tanto na superfície da fissura quando no seu interior.

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Uma pesquisa experimental se caracteriza por manusear diretamente as variáveis relacionadas ao objeto de estudo, visto que a relação entre a causa e o efeito de um fenômeno ocorre pelo manejo destas variáveis através da criação de situações de controle (CERVO; BERVIAN, 2002).

Para se alcançar os objetivos propostos neste trabalho, foi desenvolvido um programa experimental que possibilitasse a análise do comportamento do concreto fissurado quanto à autocicatrização. Este programa baseia-se em um planejamento estatístico que permite trabalhar com variáveis controladas, no qual é possível empregar ferramentas de análise da influência de cada variável, permitindo, deste modo, uma maior confiança nos resultados. O planejamento experimental se iniciou após o embasamento teórico com a definição das variáveis de resposta e dos fatores controláveis, sendo estas necessárias para alcançar os objetivos propostos pela pesquisa.

A pesquisa foi dividida em três etapas, sendo que a primeira compreende a caracterização dos concretos utilizados, a segunda etapa visa acompanhar a autocicatrização ao longo do tempo e a terceira tem como objetivos verificar se a autocicatrização ocorreu e quais os compostos formados. As variáveis controláveis e de respostas podem ser visualizadas na Figura 38.



Fonte: própria da autora

Foram fixadas quatro relações água/cimento, que são: 0,30; 0,40; 0,50 e 0,65. Optou-se por um espectro mais amplo para melhor compreender as diferentes situações normalmente empregadas pelo setor da construção civil no Brasil.

Foram definidas quatro idades para a abertura das fissuras: 3, 28, 91 e 182 dias após a produção do concreto. Concretos com idades mais jovens, simulando a desforma e sobrecarga precoce das estruturas, e idades mais avançadas, simulando a ação do tempo e/ou uma sobrecarga gerada por reformas. Na literatura atual (HOMMA *et al.*, 2009; SISOMPHON *et al.*, 2013; MAES *et al.*, 2016; CUECA *et al.*, 2018, LAUCH *et al.*, 2020) grande parte das pesquisas optam por trabalhar com uma única idade para a indução da fissura e escolhem idades mais jovens, pela maior probabilidade de fechamento da fissura em virtude da maior quantidade de grãos de cimento anidro nestas condições.

Quanto ao ambiente de exposição dos corpos de prova de concreto, após a abertura da fissura, foram definidos 4 tipos: ciclos de molhagem e secagem, submerso sem renovação da água, natural desprotegido (ambiente aberto e descoberto) e natural protegido (ambiente coberto, sem contato direto com as intempéries). Grande parte das estruturas estará exposta em ambiente natural em contato direto com as intempéries. Desta forma, para simular situações mais próximas da realidade encontrada no dia a dia da construção civil, optou-se por avaliar também o ambiente natural desprotegido e natural protegido. Atualmente, não há pesquisas que destinaram-se a estudar ambientes naturais com as características da cidade de Porto Alegre/RS.

### 3.1 VARIÁVEIS ESTUDADAS

A seguir são apresentadas as variáveis estudadas no presente trabalho.

#### 3.1.1 Variáveis de resposta ou dependentes

As variáveis de respostas serão divididas em três etapas, sendo a primeira etapa para a caracterização dos concretos utilizados, que será realizada através do ensaio de resistência à compressão e absorção de água por capilaridade. A segunda etapa de variáveis está atrelada ao acompanhamento da autocicatrização ao longo do tempo e compreende os ensaios de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e microscopia ótica. A terceira etapa está atrelado à verificação dos produtos de autocicatrização formados junto à superfície da fissura e abrange o ensaio de termogravimetria.

#### 3.1.2 Variáveis controladas ou independentes

As variáveis controladas ou variáveis independentes são aqueles parâmetros do processo que foram eleitos para serem estudados em vários níveis no experimento, em virtude da sua

influência nas variáveis de resposta. Desta maneira, as variáveis controladas nesta pesquisa são:

- a) relação água/cimento: 0,30; 0,40; 0,50 e 0,65;
- b) idade de abertura de fissuras: 3, 28, 91 e 182 dias após a moldagem;
- c) ambiente de exposição: ciclos de molhagem e secagem (2 dias de molhagem e 12 dias de secagem, com renovação de água a cada ciclo), submerso em água de abastecimento público sem renovação, natural e natural protegido.

Quanto ao amplo espectro das relações água/cimento, justifica-se pelo fato de acompanhar a faixa de relação a/c permitidos para estruturas em concreto, estabelecida pela NBR 6118 (ABNT, 2014) e mais utilizadas pelo setor da construção civil no Brasil.

Através da escolha da idade de abertura de fissuras, pretende-se verificar a real influência da idade do concreto no fenômeno da autocicatrização, tais como possibilidade e velocidade de ocorrência.

Quanto à escolha dos ambientes de exposição, pretende-se simular diferentes condições de exposição que podem se encontrar as estruturas sendo mais próximas da realidade, uma vez que é de extrema importância verificar a possibilidade de autocicatrização em diferentes meios e suas limitações. O ambiente de exposição que as estruturas são submetidas afeta diretamente sua vida útil, logo compreender o fenômeno frente a estas situações é de extrema importância.

### 3.1.3 Variáveis não controladas

Variáveis não controladas são as variáveis que por restrições técnicas não puderam ser controladas durante o experimento, tais como, a temperatura e a umidade relativa do ar do ambiente de produção dos concretos, entretanto foram monitoradas ao longo do processo.

### 3.1.4 Variáveis fixas

As variáveis constantes são aquelas que não foram escolhidas como prioritárias na pesquisa e, portanto, foram mantidas constantes durante o experimento. Sendo elas:

- a) tipo de cimento: cimento Portland II-F classe 40;
- b) equipamentos de confecção dos concretos e de realização de ensaios;
- c) operadores;
- d) cura até a idade de abertura das fissuras, que consiste em deixar os corpos de prova durante suas primeiras 24 horas em sala com temperatura ambiente e com proteção superior (lona plástica), para evitar a perda de água. Procedida da desmoldagem e

armazenamento dos mesmos em câmara úmida, com umidade relativa  $\geq 95\%$  e temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  até a idade de abertura das fissuras, após o qual cada grupo foi alocado em seu ambiente de exposição;

e) abatimento dos concretos em  $220 \pm 20$  mm.

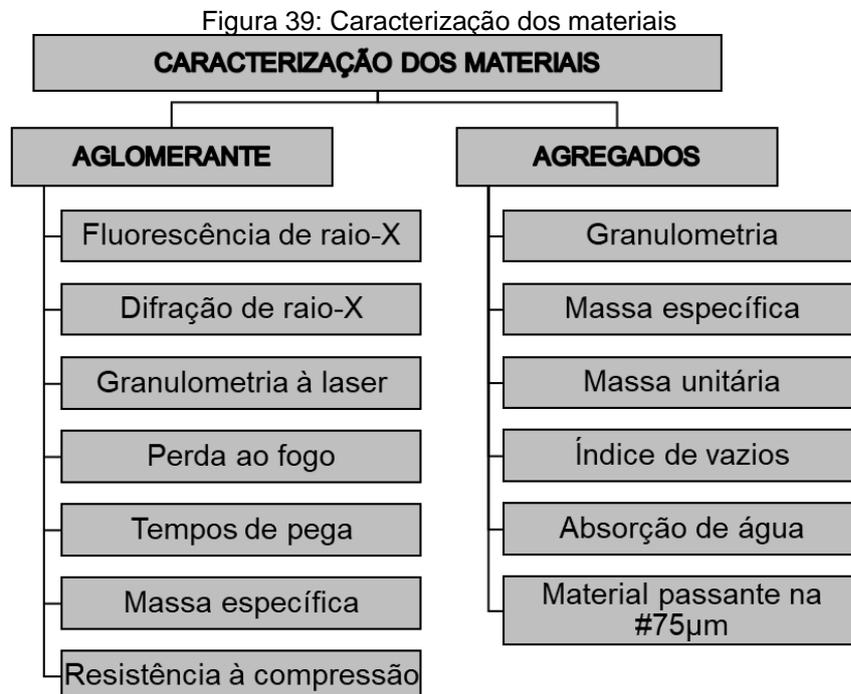
Optou-se por utilizar o cimento Portland CP II-F, classe de resistência 40MPa, por ser um dos cimentos que contém a menor quantidade de adições quimicamente ativas em sua composição.

## 3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir é apresentada a caracterização de todos os materiais empregados neste trabalho, bem como os métodos empregados para as análises.

### 3.2.1 Ensaios realizados para a caracterização dos materiais utilizados

Antes de iniciar o programa experimental propriamente dito, foi necessário realizar ensaios para caracterização química e física do cimento e dos agregados. Na Figura 39 são apresentados os ensaios realizados.



Fonte: própria da autora

### 3.2.2 Materiais utilizados

Neste item, são apresentados os materiais que foram utilizados no presente trabalho e suas respectivas características físicas e químicas.

### 3.2.2.1 Cimento

Foi empregado neste trabalho o Cimento Portland composto com Filler (CP II-F) com classe de resistência de 40MPa, recebido a granel de uma indústria de concreto por meio de doação.

Na Tabela 4, são apresentados o teor de óxidos deste cimento, determinado por fluorescência de raios X (FRX), realizada com aparelho marca Shimadzu, modelo XRF1800, do Laboratório de cerâmica (LACER), da UFRGS.

Os limites de norma utilizados para realizar a comparação com os resultados obtidos nos ensaios são referentes à NBR 11578 (ABNT, 1991), uma vez que o cimento Portland composto com fíler foi fabricado e recebido anteriormente à modificação da NBR 16697 (ABNT, 2018). Desta forma, o CPII-F utilizado pode apresentar adição de 6-10% de material carbonático.

Analisando os dados obtidos na Tabela 4, pode-se notar que a quantidade de  $SO_3$  é ligeiramente superior ao limite estabelecido pela NBR 11578 (ABNT, 1991), os demais óxidos encontram-se dentro dos parâmetros.

Tabela 4: Caracterização química do cimento Portland composto com Fíler – CPII F -40

Composto	(%)	Limites de Norma <sup>2</sup> (%)
Óxido de cálcio (CaO)	66,48	-
Dióxido de silício (SiO <sub>2</sub> )	12,78	-
Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3,77	-
Trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )	6,84	≤ 4
Óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4,13	-
Óxido de magnésio (MgO)	1,45	≤ 6,5
Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)	1,19	-
Pentóxido de difósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,20	-
Óxido de estrôncio (SrO)	0,09	-
Óxido de manganês (MnO)	0,08	-
Óxido de zinco (ZnO)	0,06	-
CO <sub>2</sub>	2,93	≤ 5

<sup>2</sup> Limites estabelecidos pela NBR 11578 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1997).

Fonte: Grupo autocicatrização NORIE/UFRGS.

Na Tabela 5 é apresentada, de forma resumida, a caracterização física deste material. Para a realização da caracterização da área específica do grão de cimento foi empregado o método de B.E.T, realizado no LACER/UFRGS, equipamento Quantachrome, modelo Nova 100. Para determinação da distribuição granulométrica e diâmetro médio das partículas do cimento, foi realizado o ensaio de granulometria a laser no LACER/UFRGS,

através da utilização do equipamento CILAS, Particle Size Analyser, modelo CILAS 1180 Liquid. O ensaio foi desenvolvido por via úmida, disperso em meio líquido à base de álcool isopropílico, sendo feito um tratamento ultrassônico prévio para garantir a dispersão das partículas, com duração de 60 segundos. É utilizado um feixe de laser de  $\lambda = 830,625 \text{ nm}$  para medir o tamanho das partículas que o atravessam, em uma faixa de análise de 0,04 a 2500  $\mu\text{m}$ . O ensaio de perda ao fogo foi realizado no LAMTAC/NORIE/UFRGS.

Tabela 5: Caracterização física do cimento Portland composto com fíler – CP II-F-40

Cimento Portland Composto com Fíler		Normas	Limites de Norma <sup>3</sup>
Área específica ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	5,79	NBR 16372:2015	$\geq 0,280$
Diâmetro médio ( $\mu\text{m}$ )	12,84	-	-
Diâmetro 10% ( $\mu\text{m}$ )	0,34	-	-
Diâmetro 90% ( $\mu\text{m}$ )	35,78	-	-
Massa específica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	3,11	NBR 16605:2017	-
Tempo de pega (h)	Início de pega (min)	220	$\geq 60$
	Fim de pega (min)	275	$\leq 600$
Resistência à compressão (MPa)	3 dias	31,0	$\geq 15$
	7 dias	38,0	$\geq 25$
	28 dias	43,4	$\geq 40$
Perda ao fogo (%)	5,2	NBR NM 18:2012	$\leq 6,5$

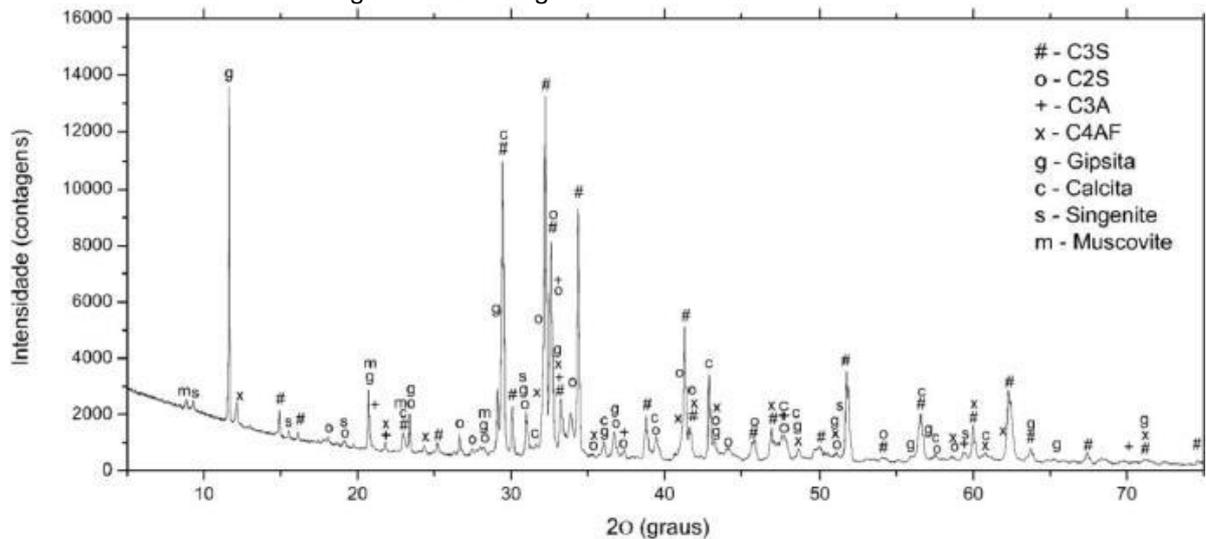
<sup>3</sup> Limites estabelecidos pela NBR 11578 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1997).

Fonte: Grupo autocicatrização NORIE/UFRGS.

A análise de difração de Raios X, para avaliação qualitativa dos materiais, foi realizada no IIT Fossil - Instituto Tecnológico de Micropaleontologia, da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS). Para a realização deste ensaio, os materiais foram passados pela peneira nº200. Foi utilizado um difratômetro modelo Empyrean da Malvern Panalytical (vs. 7.9d 20161215), com material do ânodo de cobre (Cu) – modelo Empyrean Cu LFF HR (9430 033 7310x) DK412109 e detector proporcional de área (PIXcel3D-Medipix3 1x1), intensidade de raios  $\text{CuK}\alpha$  ( $1=1,541874 \text{ \AA}$ ) e  $\text{CuK}\beta$  ( $1=1,392250 \text{ \AA}$ ), com faixa de varredura de  $5^\circ$  a  $80^\circ$ , ao passo de 0,05. A identificação das fases cristalinas presentes nas amostras foi efetuada através do software X'Pert High Score, comparando os resultados obtidos através das análises dos picos principais de cada fase identificada nas fichas PDF (*Powder Diffraction Files*).

Na Figura 40, é possível verificar o difratograma do cimento CII – F - 40 empregado nesta pesquisa, bem como as fichas utilizadas para análise que estão descritas com o número, seguidas da qualidade da ficha entre parênteses, sendo S referente às fichas Star e C referente às fichas *Calculated*, nome químico e a fórmula química da ficha.

Figura 40: Difratoograma do cimento CII-F-40



C3S: PDF 01-073-0599 (C) - Calcium Silicate Oxide -  $\text{Ca}_3(\text{SiO}_4)\text{O}$ ;

C2S: PDF 00-033-0302 (S) - Calcium Silicate -  $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$ ;

C3A: PDF 00-038-1429 (S) - Calcium Aluminum Oxide -  $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ ;

C4AF: PDF 01-074-0803 (C) - Iron Aluminum Calcium Oxide -  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{Al}_2\text{O}(\text{CaO})_4$ ;

Gipsita: PDF 00-033-0311 (S) - Calcium Sulfate Hydrate -  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ;

Calcita: PDF 01-072-1652 (C) - Calcium Carbonate -  $\text{CaCO}_3$ ;

Singenite: PDF 00-028-0739 (S) - Potassium Calcium Sulfate Hydrate -  $\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ;

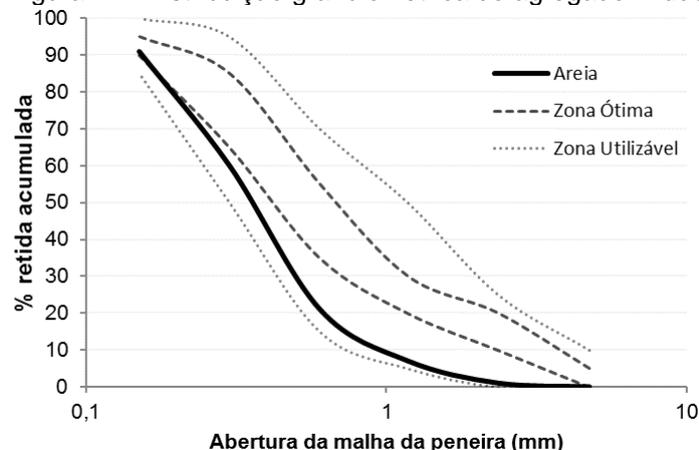
Muscovite: PDF 01-075-0948 (C) - Potassium Aluminum Silicate Hydroxide -  $\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ .

Fonte: Grupo autocatização NORIE/UFRGS

### 3.2.2.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo empregado é uma areia natural quartzosa lavada. A composição granulométrica foi determinada a partir do ensaio previsto na NBR NM 248 (ABNT, 2003). Para isso, foram utilizadas as peneiras da série normal, sendo que o agitação do conjunto foi realizado de forma manual. Na Figura 41 e Tabela 6 observa-se o resultado da distribuição granulométrica deste agregado.

Figura 41: Distribuição granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Grupo autocatização NORIE/UFRGS.

Tabela 6: Caracterização física do agregado miúdo

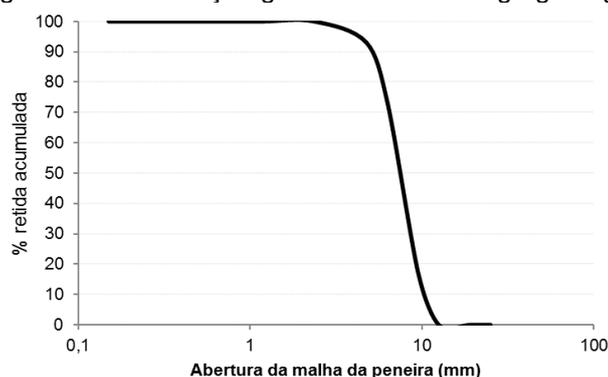
Abertura das peneiras (mm)	AMOSTRA		NBR 7211 (2009)			
	Média Retida (%)	Média Retida Acumulada (%)	Retida Acumulada (%) - em massa			
			Limites inferiores		Limites Superiores	
			Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
4,75	0	0	0	0	5	10
2,36	1	1	0	10	20	25
1,18	7	8	5	20	30	50
0,60	15	23	15	35	55	70
0,30	42	65	50	65	85	95
0,15	27	92	85	90	95	100
Fundo	8	100	-	-	-	-
<b>Módulo de Finura</b>			1,89		NBR NM 248:2003	
<b>Dimensão Máxima (mm)</b>			2,36			
<b>Massa Específica (g/cm³)</b>			2,54		NBR NM 52:2009	
<b>Massa Específica Saturado Superfície Seca (g/cm³)</b>			2,57			
<b>Massa Específica Aparente (g/cm³)</b>			2,62			
<b>Absorção de Água (%)</b>			1,30		NBR NM 30:2001	
<b>Massa Unitária (g/cm³)</b>			1,49		NBR NM 45:2006	
<b>Índice de vazios (%)</b>			44			
<b>Material fino passante na peneira 75 µm por lavagem</b>			1,6		NBR NM 46:2001	

Fonte: Grupo autocicatrização NORIE/UFRGS

### 3.2.2.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado é de origem basáltica. A composição granulométrica do agregado graúdo foi determinada a partir do ensaio previsto na NBR NM 248 (ABNT, 2003). Para isso, foram utilizadas as peneiras da série normal, sendo que o agitação do conjunto foi realizado de forma manual. Na Figura 42 e a Tabela 7 estão demonstradas a distribuição granulométrica e as características físicas do agregado.

Figura 42: Distribuição granulométrica do agregado graúdo



Fonte: Grupo autocicatrização NORIE/UFRGS

Tabela 7: Caracterização física do agregado graúdo

Abertura das peneiras (mm)	AMOSTRA		NBR 7211 (2005)				
	Média Retida (%)	Retida Acumulada (%) - em massa	Retida Acumulada (%) - em massa				
			Zona Granulométrica - d/D <sup>1</sup>				
			4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
25	0	0	-	0 - 5	5 - 25 <sup>2</sup>	87 - 100	-
19	0	0	-	2 - 15 <sup>2</sup>	65 <sup>2</sup> - 95	95 - 100	-
12,5	0	0	0 - 5	40 <sup>2</sup> - 65 <sup>2</sup>	92 - 100	-	-
9,5	17	17	2 - 15 <sup>2</sup>	80 <sup>2</sup> - 100	95 - 100	-	-
6,3	56	73	40 <sup>2</sup> - 65 <sup>2</sup>	92 - 100	-	-	-
4,75	20	93	80 <sup>2</sup> - 100	95 - 100	-	-	-
2,36	7	100	95 - 100	-	-	-	-
1,18	0	100	-	-	-	-	-
0,60	0	100	-	-	-	-	-
0,30	0	100	-	-	-	-	-
0,15	0	100	-	-	-	-	-
Fundo	0	100	-	-	-	-	-
<b>Módulo de Finura</b>					6,10	NBR NM 248:2003	
<b>Dimensão Máxima (mm)</b>					12,50		
<b>Massa Específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>					3,01	NBR NM 53:2009	
<b>Massa Específica Saturado Superfície Seca (g/cm<sup>3</sup>)</b>					2,94		
<b>Massa Específica Aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>					2,91		
<b>Absorção de Água (%)</b>					1,20	NBR NM 30:2000	
<b>Massa Unitária (g/cm<sup>3</sup>)</b>					1,51	NBR NM 45:2006	
<b>Índice de Vazios (%)</b>					43		
<b>Material fino passante na peneira 75 µm por lavagem</b>					0,30	NBR NM 46:2001	

Fonte: Grupo autocicatrização NORIE/UFRGS

## 3.2.2.4 Aditivo superplastificante

A Tabela 8 mostra as características físico-químicas do aditivo empregado na produção dos concretos.

Tabela 8: Características físico-químicas do aditivo

Características do aditivo superplastificante	
Base química	Policarboxilato
Aspecto	Líquido
Cor	Alaranjado
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,080-1,120
Sólidos (%) <sup>1</sup>	49,28
Dosagem (%) sobre a massa do cimento	0,3 – 2,0

<sup>1</sup> Ensaio realizado no LAMTAC/NORIE/UFRGS

Fonte: adaptado do fabricante

### 3.2.2.5 Água

A água utilizada para a produção dos concretos é proveniente da rede pública de abastecimento do município de Porto Alegre, sendo o Departamento Municipal de Água e Esgotos (DMAE) responsável pelo controle e distribuição.

A água empregada para os ambientes de exposição submerso e para o período de imersão dos ciclos de molhagem e secagem foi também proveniente da rede pública distribuída pelo DMAE. Segundo os relatórios apresentados no site da Prefeitura Municipal de Porto Alegre para controle de qualidade e parâmetros da água, durante os meses de realização dos ciclos, o pH da água no bairro que oferece atendimento à UFRGS manteve média de pH igual a 6,3, podendo apresentar variabilidade, conforme DMAE, de 6,0 a 9,5. Vale ressaltar que a água de abastecimento público é considerada adequada ao uso em concretos, sem necessidade de ensaios.

## 3.3 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS

Para a produção dos concretos empregados neste trabalho, primeiramente foi realizado um estudo de dosagem experimental, o qual possibilitou a determinação dos traços que seriam empregados em função da relação a/c.

### 3.3.1 Dosagem dos concretos

Embora normalmente se utilizem valores mais próximos de relação agregado/aglomerante (m), para o ajuste de traço, neste trabalho, por envolver um número maior de pesquisas e necessitar concretos de alta e mais baixa resistência, foi forçada uma abertura das relações agregado/aglomerante, variando de 2 a 6,5, mesmo sabendo que esta decisão refletiria no aumento do consumo de cimento para o extremo da curva de dosagem, concretos mais ricos.

A dosagem dos concretos foi realizada de acordo com o método proposto pelo IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1992), que consiste na determinação do teor ideal de argamassa da mistura para um determinado traço, fixando-se um valor de abatimento. Para uma maior abrangência de nível de resistência foi definida a utilização de quatro traços, visando abranger um intervalo maior de relações água/cimento. Iniciou-se a dosagem pelo traço 1:5, considerado intermediário. O teor de argamassa seca determinado experimentalmente para o traço intermediário foi de 52% e o abatimento do concreto foi fixada em  $220 \pm 20$  mm, ensaio realizado conforme preconizado pela NBR NM 67 (ABNT, 1998). Após, foram realizados os traços: 1:6,5, seguido pelo traço 1:2 e 1:3,5. Para todos os traços foi mantido fixo o teor de argamassa seca e o abatimento.

A Tabela 9 mostra os quantitativos empregados, bem como o abatimento para cada traço.

Tabela 9: Traços unitários – Dosagem experimental

Traço unitário					Materiais utilizados na mistura				Abatimento (mm)
m	Cimento	Areia	Brita	a/c	cimento (kg)	areia (kg)	brita (kg)	Aditivo (g)	
2	1	0,56	1,44	0,29	13,89	7,78	20,00	29,86	210
3,5	1	1,34	2,16	0,39	9,26	12,41	20,00	19,91	200
5	1	2,12	2,88	0,47	6,94	14,72	20,00	14,93	220
6,5	1	2,90	3,60	0,73	5,56	16,11	20,00	11,94	200

Fonte: própria da autora

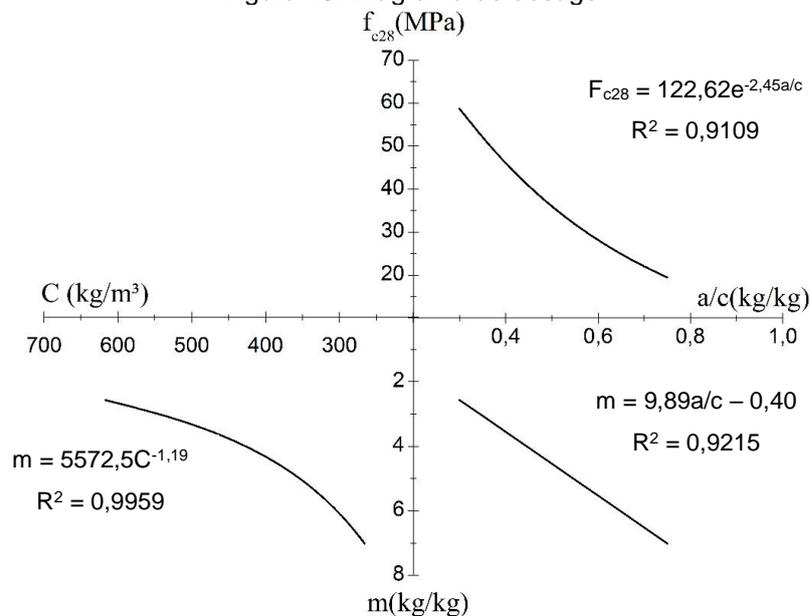
Para todos os traços, foram moldados corpos de prova para a determinação da resistência à compressão axial, conforme previsto pela NBR 5739 (ABNT, 2007), o que permitiu determinar o diagrama de dosagem apresentado na Figura 43 e Tabela 10.

Tabela 10: Resultado da curva de dosagem experimental

Traço unitário (1:m) (kg/kg)	Relação água/cimento (a/c)	Aditivo (%)	$f_{c28}$ potencial (MPa)	Consumo cimento real (kg/m <sup>3</sup> )
1:2	0,29	0,22	67,5	741
1:3,5	0,39	0,22	47,2	489
1:5	0,47	0,22	31,6	358
1:6,5	0,73	0,22	22,2	276

Fonte: própria da autora

Figura 43: Diagrama de dosagem



Fonte: Grupo autocicatrização NORIE/UFRGS

Conforme era esperado, observam-se altos consumos de cimento para os concretos produzidos, uma vez que a curva de dosagem foi ajustada para valores bem distantes de relação água/cimento, mantendo os outros parâmetros fixos. Sabe-se que concretos com

consumos de cimento muito alto, não são ideais em termos econômicos, devendo-se realizar a otimização de traço. Mas é reflexo de se tentar manter fixos os parâmetros, consumos mais altos de cimento do que se realizasse um ajuste para os traços ricos e outro para os traços pobres. Outro fator que pode ter influenciado nesse consumo foi a lamelalidade do agregado graúdo.

A partir do diagrama de dosagem, foi possível estabelecer os traços empregados neste trabalho, com as relações água/cimento fixadas em 0,30; 0,40; 0,50 e 0,65. A Tabela 11 apresenta os quantitativos utilizados para cada um dos traços.

Tabela 11: Traços unitários dos concretos produzidos

Traço unitário					Materiais utilizados na mistura				Consumo cimento real (kg/m <sup>3</sup> )
m	Cimento	Areia	Brita	a/c	cimento (kg)	areia (kg)	brita (kg)	Aditivo (g)	
2,56	1	0,85	1,71	0,30	11,70	9,97	20,00	25,15	642
3,55	1	1,37	2,18	0,40	9,15	12,51	20,00	19,68	481
4,54	1	1,88	2,66	0,50	7,52	14,15	20,00	16,17	390
6,03	1	2,65	3,37	0,65	5,93	15,74	20,00	12,75	287

Fonte: própria da autora

A Tabela 12 mostra os abatimentos obtidos para cada relação a/c e as condições do ambiente de laboratório no momento da realização dos concretos.

Tabela 12: Abatimento, quantidade de aditivo (% sobre a massa de cimento) e condições climáticas

a/c	Abatimento (mm)		Temperatura (°C)	Umidade Relativa (%)
	Betonada 1	Betonada 2		
0,30	200	200	23,3	79,3
0,40	210	200	25,8	77,9
0,50	240	230	24,5	65,0
0,65	220	230	24,5	65,0

Fonte: própria da autora

### 3.3.2 Produção do concreto

O concreto foi realizado em betoneira de eixo vertical com capacidade de 200 litros, sendo que antes do uso do equipamento, ela foi imprimada com os materiais utilizados para este trabalho. A ordem de mistura dos foi mantida constante em todas as betonadas, sendo brita, 1/3 da água, cimento, 2/3 da água, parte do aditivo superplastificante, areia e o restante do aditivo superplastificante, com vistas a padronizar o processo para o ajuste final na consistência. Desde a colocação da água até a realização do ensaio de abatimento, foram fixados quatro minutos e após o ensaio misturava-se por mais 30 segundo e iniciava-se o processo de moldagem.

### 3.3.3 Moldagem dos corpos de prova

Foram moldados corpos de prova cilíndricos 100x200mm para os ensaios de resistência à compressão axial e absorção de água por capilaridade e prismas 100x100x50mm para os ensaios de velocidade de propagação de onda ultrassônica e microscopia ótica (Figura 44).

Figura 44: Molde para os corpos de prova prismáticos



Fonte: Grupo autocicatrização NORIE/UFRGS

Adotou-se um prisma com dimensões reduzidas para a realização do ensaio de velocidade de propagação de onda e microscopia ótica, em virtude do elevado número de corpos de provas que seriam ensaiados simultaneamente e para possibilitar o transporte deles para os locais onde seriam realizados os ensaios. Para se chegar nestas dimensões optou-se por trabalhar com uma brita com dimensão máxima de 12,5mm, e as dimensões da fôrma partiram da relação entre o tamanho do agregado graúdo e da fôrma, sendo que a menor dimensão seria 4x maior que a dimensão máxima característica do agregado. A outra dimensão foi definida a partir da relação da altura (h) x espessura (e) igual a 2 ( $h/e \leq 2$ ).

O adensamento dos corpos de prova foi realizado de forma mecanizada, com o auxílio de uma mesa vibratória. Para os corpos de prova cilíndricos foi seguida a NBR 5738 (ABNT, 2016). E para os corpos de prova prismáticos o procedimento adotado compreendeu três camadas de concreto, igualmente preenchidas com vibração de 15 segundos em cada. Optou-se por realizar adensamento em mesa vibratória para evitar a possibilidade de formação de vazios tanto nos cp's cilíndricos quanto nos prismáticos.

### 3.3.4 Cura

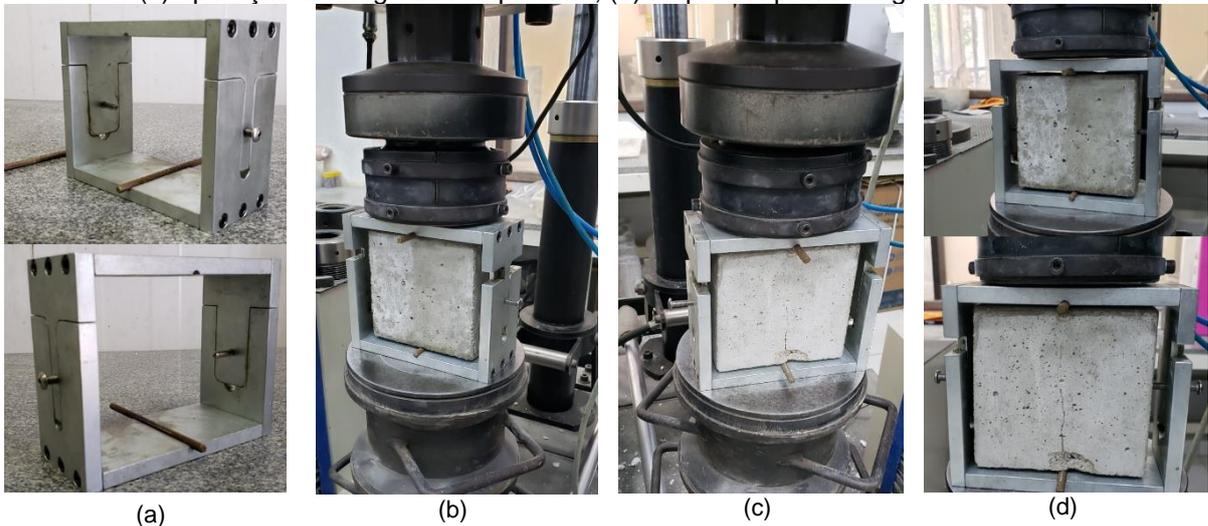
Após a moldagem dos corpos de prova, estes foram acondicionados em temperatura ambiente nas primeiras 24 horas, cobertos com sacos plásticos. Posteriormente, foram desmoldados e armazenados em câmara úmida com temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  e umidade maior

ou igual a 95%, onde permaneceram até as datas dos ensaios, segundo a NBR 5738 (ABNT, 2015).

### 3.4 Abertura das fissuras

Para a realização da abertura das fissuras nos prismas foi desenvolvido um aparato no qual o corpo de prova era posicionado, era aplicada uma carga de compressão com velocidade de  $0,45 \pm 0,15$  MPa/s de forma constante, até que o surgimento da primeira fissura fosse observado na parte frontal do prisma, conforme demonstrado na Figura 45. O aparato encontra-se patenteado (BR 10 2019 007947 9).

Figura 45: Mecanismo de abertura de fissura. (a) aparato; (b) corpo de prova posicionado no aparato; (c) aplicação de carga de compressão; (d) corpos de prova íntegro e fissurado.



Fonte: Grupo autocicatrização NORIE/UFRGS.

Para evitar fissuras com espessura muito divergentes, o aparato era dotado de restrição nas laterais. As fissuras geradas por este método, em sua maioria, eram unidirecionais e aconteciam na parte frontal e posterior dos prismas, nem sempre iguais nas duas faces. A fissura não apresentava espessura uniforme ao longo de toda a sua extensão, sendo mais ampla na borda inferior.

A indução das fissuras ocorreu em quatro idades pré-definidas, aos 3, 28, 91 e 182 dias após a moldagem dos corpos de prova. Optou-se por descartar fissuras menores que  $50\mu\text{m}$  e maiores que  $400\mu\text{m}$ , uma vez que a literatura trata que fissuras dentro destes limites são mais suscetíveis ao fenômeno da autocicatrização autógena.

### 3.5 Ambientes de exposição

Como esta pesquisa tem por objetivo avaliar a influência do ambiente de exposição dos concretos frente ao fenômeno de autocicatrização. Foram escolhidos quatro ambientes de exposição para a realização da cura dos concretos, após a realização da abertura das fissuras, conforme segue:

- a) **ambiente natural protegido:** local aberto, mas com proteção contra a incidência direta das intempéries (chuva e raios solares), coberto e ventilado;
- b) **ambiente natural:** área aberta com incidência direta das intempéries, com orientação a noroeste-sudeste, na cidade de Porto Alegre/RS, Latitude: -30.0535, Longitude: -51.1748 e Altitude: 41,18, com espaçamento de 5cm entre os corpos de prova;
- c) **submerso:** água potável sem renovação, em local com temperatura e umidade não controlados, optou-se por manter sempre uma lâmina de água de pelo menos 3cm sobre os corpos de prova;
- d) **ciclo de molhagem e secagem – 2/12d:** ambiente onde os corpos de prova foram submersos em água potável por um período de 2 dias seguido por 12 dias em ambiente seco em câmara sem temperatura e umidade controladas.

Em todos os ambientes de exposição, os corpos de prova foram acondicionados de forma a manter a fissura perpendicular à superfície de apoio. Na Figura 46, são demonstrados os quatro ambientes de exposição empregados.

Figura 46: Ambientes de exposição dos corpos de prova: (a) natural; (b) natural protegido; (c) submerso; (d) ciclos de molhagem e secagem



(a)



(b)



(c)



(d)

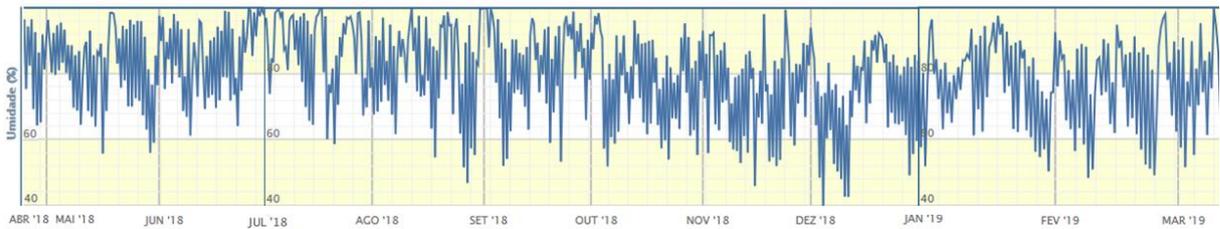
Fonte: própria da autora

### 3.5.1 Condições climáticas do ambiente de exposição natural e natural protegido

Sabendo que os principais fatores que influenciam nos parâmetros de autocicatrização no ambiente de exposição natural são as condições climáticas como temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), umidade relativa do ar (%), precipitação (mm), radiação ( $\text{KJ}/\text{m}^2$ ) e velocidade do vento (m/s), foram coletados dados durante o período de exposição.

A Figura 47 mostra as variações de umidade da cidade de Porto Alegre/RS durante todo o período de exposição dos prismas. Observa-se que durante este período a umidade relativa ficou na média de aproximadamente 70%, chegando a valores abaixo em 40% entre dezembro/2018 e janeiro de 2019.

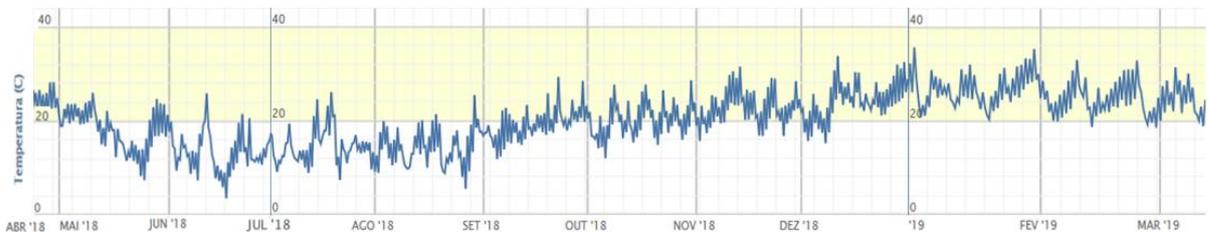
Figura 47: Condições climáticas do ambiente de exposição natural – Umidade Relativa (%)



Fonte: site do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET

A Figura 48 apresenta a amplitude térmica na cidade de Porto Alegre/RS, durante o período de exposição dos prismas no ambiente Natural e Natural Protegido. Observa-se que durante este período, a temperatura variou em média 30°C, com temperatura mínima de 3°C em meados de junho/2018 e 38°C em janeiro/2019.

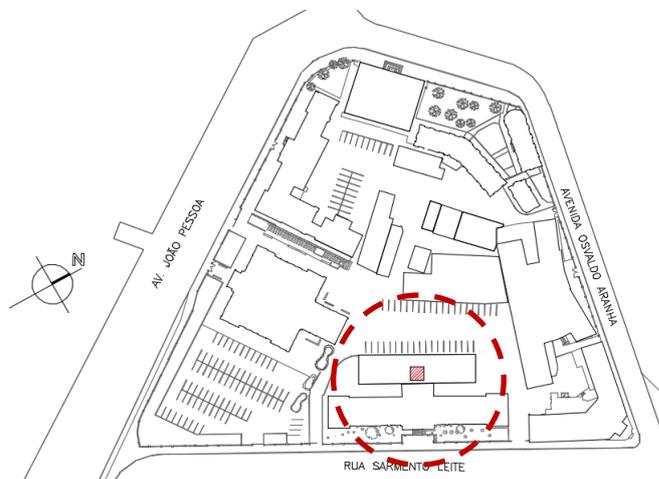
Figura 48: Condições climáticas do ambiente de exposição natural – Temperatura (°C)



Fonte: site do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET

Na Figura 49 é apresentado o local onde os prismas do ambiente natural foram acondicionados durante o período de exposição. Foi utilizado o terraço do prédio 11209 de salas de aula do campus Centro/UFRGS, quartiereão 1, local gentilmente disponibilizado pela Prefeitura do Campus Centro. Área aberta com incidência direta das intempéries, com orientação a noroeste-sudeste, na cidade de Porto Alegre/RS, Latitude: -30.0277 e Longitude: -51.2287.

Figura 49: Localização dos prismas expostos ao ambiente natural



Fonte: material disponibilizado pela SINFRA/EE/UFRGS

A Figura 50 mostra o local onde os corpos de prova ficaram expostos no ambiente natural. Foram dispostos na orientação solar sudeste-noroeste, afastados um do outro 5 cm, para permitir a incidência das intempéries. O espaço ocupado em uma área sem o tráfego de pessoal e de acesso restrito.

Figura 50: Disposição dos corpos de prova no ambiente natural



Fonte: própria da autora

### 3.6 Ensaios realizados

Na Figura 51, estão expressos os ensaios que foram realizados ao longo do presente trabalho, que foi dividido em três etapas: Caracterização do concreto, Acompanhamento da autocicatrização e verificação da autocicatrização.

Figura 51: Planejamento dos ensaios



Fonte: própria da autora

Na primeira etapa foi realizada a caracterização do concreto, sempre nas mesmas idades de indução das fissuras nos prismas de concreto, quais sejam, 3, 28, 91 e 182 dias. Os corpos de prova submetidos aos ensaios de caracterização, após a desforma, foram mantidos em câmara úmida, com temperatura e umidade controladas, até o momento da realização dos procedimentos para o ensaio, conforme exibido na Tabela 13.

Tabela 13: Ensaios de caracterização das matrizes cimentícias

ENSAIO	Quantidade de CP's	Norma	Idade de realização dos ensaios (dias)
Resistência à compressão axial	3	NBR 5739:2018	3
			28
			91
			182 <sup>1</sup>
Absorção de água por capilaridade	3	NBR 9779:2012	3 28

<sup>1</sup> Em função de problemas no equipamento utilizado para o ensaio de resistência à compressão, não foi possível realizá-lo para as relações a/c 0,3 e 0,4 na idade de 182 dias.

Fonte: própria da autora

Na segunda etapa, foram realizados ensaios para acompanhar a evolução do fenômeno de autocicatrização. Os ensaios foram realizados com intervalo de 28 dias a partir da data de abertura de fissuras, para todas as idades analisadas: 3, 28, 91 e 182 dias, conforme detalhado na Tabela 14. O ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas foi realizado antes e após a indução da fissura.

Tabela 14: Ensaios de acompanhamento da autocicatrização

ENSAIO	Quantidade de CP's	Norma	Idade de realização dos ensaios (dias) após indução da fissura
Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas	6 <sup>1</sup>	NBR 8802:2013	0
			28
			56
			84
Microscopia ótica	2	-	112
			140
			168

<sup>1</sup> Algumas combinações estudadas apresentam números diferentes de corpos de prova, essa diferença se deu em função das perdas ao longo do processo, seja no momento de geração da fissura, transporte para a realização dos ensaios ou por outros motivos.

Fonte: própria da autora

Na terceira etapa, foi realizado ensaio que auxiliasse no entendimento do processo de autocicatrização, após a execução dos ensaios da segunda etapa, conforme Tabela 15. Com a realização deste ensaio foi possível identificar a formação de produtos cicatrizantes e quais suas características.

Tabela 15: Ensaios para a verificação dos compostos formados pela autocicatrização

ENSAIO	Quantidade de CP's	Idade de realização dos ensaios (dias)
Termogravimetria (TGA)	1	No final dos ensaios

### 3.6.1 Velocidade de propagação de onda ultrassônica

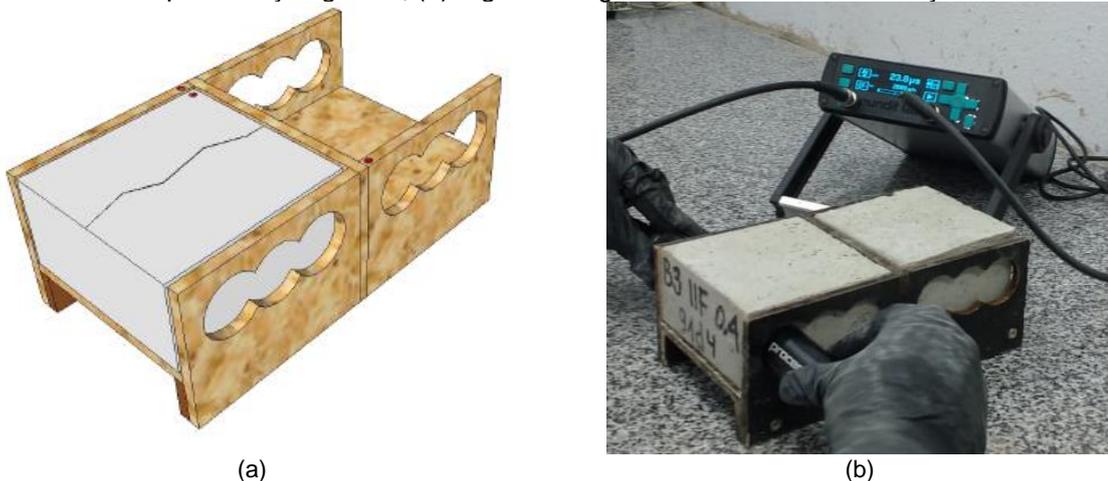
A determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica é um ensaio não destrutivo empregado para determinar a velocidade de propagação de ondas longitudinais,

normalizado pela NBR 8802 (ABNT, 2013), e tem a finalidade de comparar a homogeneidade de concretos e detectar eventuais falhas de concretagem.

O equipamento utilizado apresenta transdutores de 28 mm de diâmetro e frequência de 150 kHz. A NBR 8802 (ABNT, 2019) recomenda cuidar a dimensão mínima da peça, em função da frequência dos transdutores e da velocidade de propagação do pulso ultrassônico, desta maneira os corpos de prova que foram empregados apresentavam uma lateral com dimensão de 50 mm. Logo, a opção mais adequada foi a utilização do transdutor com frequência de 150kHz, minimizando as influências que podem acometer o resultado do ensaio. Para que se pudesse analisar a influência das fissuras, utilizou-se transmissão direta, na qual os transdutores foram posicionados em laterais opostas do corpo de prova prismático. Foram realizadas leituras do tempo de propagação de onda em três pontos distintos do corpo de prova prismático, sendo que em cada ponto foram coletadas três velocidades, totalizando 9 leituras por prisma. Para a análise dos dados, foi considerada a menor velocidade em cada ponto analisado e realizada a média entre todos eles.

De maneira a garantir que o tempo de propagação coletado fosse sempre nos mesmos pontos, foi desenvolvido um aparato, pelo grupo de autocicatrização (NORIE/UFRGS), para padronizar o posicionamento dos transdutores em todas as amostras, conforme mostra a Figura 52.

Figura 52: Aparato padrão para o ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica (a) representação gráfica; (b) registro fotográfico do ensaio em execução



Fonte: Grupo autocicatrização NORIE/UFRGS.

Foi realizado o ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas antes da indução da fissura, considerada como leitura de referência para o parâmetro da autocicatrização. Após a abertura da fissura foi realizada novamente a leitura, em seguida os corpos de prova foram acondicionados em seus respectivos ambientes de exposição. Para realizar o

acompanhamento ao longo do tempo e detectar a possível formação de produto de autocicatrização, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas a cada 28 dias. Dentre os cuidados tomados, um deles era sempre limpar as faces laterais dos corpos de prova antes e depois da realização do ensaio. Os corpos de prova que estavam em ambiente submerso eram retirados da água sempre seis horas antes da realização do ensaio, para que suas faces estivessem secas durante a realização do ensaio.

Optou-se por registrar o tempo de propagação de ondas e estimar a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas, para descartar a influência da falta de precisão na confecção das formas para a produção dos corpos de prova prismáticos, o que poderia resultar em cp's com pequenas variações em suas dimensões. Para isso, antes e depois da abertura da fissura, foi realizada a medição em 3 pontos do corpo de prova, perpendicular à fissura, após foi calculada a média do comprimento, utilizada para o cálculo da velocidade de propagação de ondas, conforme estabelece a NBR 8802 (ABNT, 2013).

A partir dessas leituras, foi realizada uma estimativa do percentual de autocicatrização das fissuras, onde empregou-se a Equação 7.

$$T_{t0} = \frac{V_{ti}}{V_{t0}} \times 100 \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

$T_{t0}$  = taxa de autocicatrização (%);

$V_{t0}$  = velocidade de propagação de onda ultrassônica antes da abertura da fissura, no tempo zero;

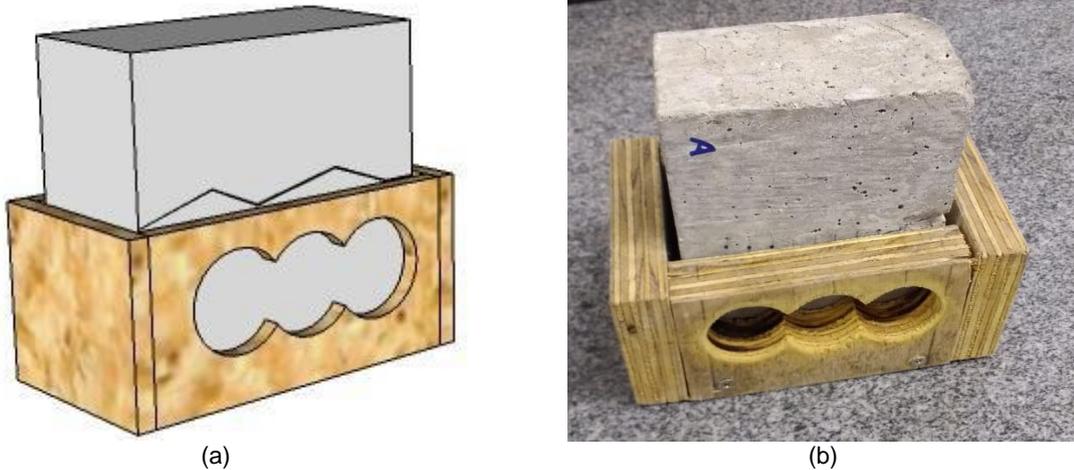
$V_{ti}$  = velocidade de propagação de onda ultrassônica após a abertura da fissura, nas idades de acompanhamento.

Conforme será apresentado no capítulo de resultados, observou-se que a comparação de velocidade de propagação de ondas estipulada inicialmente não se mostrou eficiente, pois a hidratação contínua do cimento influenciou os resultados, pois ocorria uma redução da porosidade, proporcionando um aumento na velocidade de propagação de onda e reduzindo o tempo de propagação no concreto (MEHTA, MONTEIRO, 2014).

Na sequência, optou-se por realizar, adicionalmente, o ensaio também em uma das faces do corpo de prova prismático (definida como lateral íntegra), com o intuito de obter uma medida de referência da velocidade de propagação de onda. Foi definida aleatoriamente uma das faces e partir desta definição, todas as leituras ocorreram nesta posição. As mensurações foram feitas em três diferentes pontos, e em cada um dos pontos foram realizadas três leituras, totalizando 9 leituras por primas, conforme demonstrado na Figura 53. Para a análise dos dados

foi considerada a menor velocidade em cada ponto analisado e realizada a média entre todos eles.

Figura 53: Aparato padrão para o ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica (a) representação gráfica; (b) registro fotográfico



Fonte: Grupo autocicatrização NORIE/UFRGS.

Foi possível estabelecer uma relação entre as velocidades de propagação de ondas, para uma mesma amostra, obtendo assim a medida da velocidade de propagação de ondas, no corpo de prova, longitudinal à fissura, correlacionando com a velocidade de propagação de ondas da lateral íntegra, para cada idade de acompanhamento, conforme indicada na Equação 8.

$$R_t = \frac{V_f}{V_i} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

$R_t$  = fator relacional entre as velocidades de propagação de ondas ultrassônicas entre lateral fissurada e lateral íntegra.

$V_f$  = velocidade de propagação de onda ultrassônica na lateral fissurada.

$V_i$  = velocidade de propagação de onda ultrassônica na lateral íntegra.

A partir da adoção do cálculo do fator relacional entre as velocidades de propagação de ondas é possível separar o efeito da hidratação contínua do efeito do fenômeno da autocicatrização. Através da determinação do fator relacional pode-se realizar a quantificação da taxa de autocicatrização para cada idade de acompanhamento, conforme demonstrado na Equação 9.

$$TA_i = \left[ \left( \frac{R_{ti}}{R_{t0}} \right) - 1 \right] * 100 \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

$TA_i$  = taxa de autocicatrização, em percentual, na idade de acompanhamento (i).

$R_{ti}$  = fator relacional  $R_t$  na idade de acompanhamento (i).

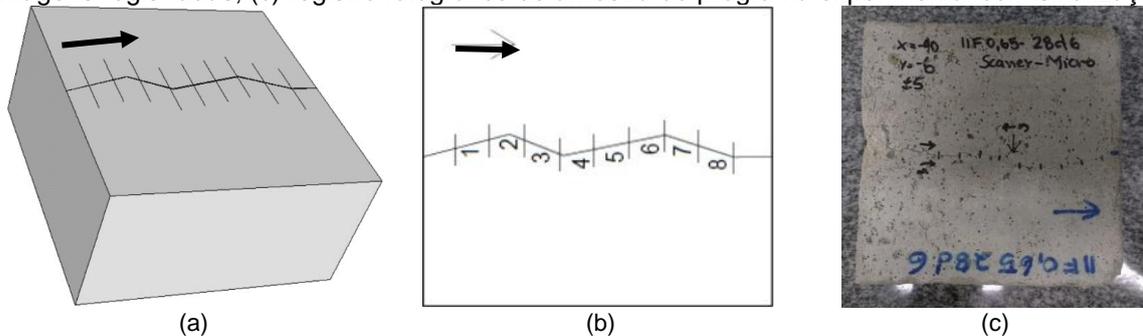
$R_{t0}$  = fator relacional  $R_t$  ao 0 dia de idade.

### 3.6.2 Microscopia ótica

Utilizou-se o microscópio óptico Zeiss Stemi 508, com ampliação entre 2x e 250x, para a análise superficial das fissuras contidas nas amostras. A técnica envolvendo a microscopia ótica foi empregada de três formas diferentes, a primeira com o objetivo de quantificar a espessura média das fissuras que seriam trabalhadas, a segunda consistiu em uma análise qualitativa do fechamento de uma fissura criada em um corpo de prova prismático e a terceira forma foi empregada para análise quantitativa do fechamento da fissura.

Para a aplicação das metodologias propostas, os corpos de prova prismáticos foram divididos em oito microzonas, com 8mm cada, conforme mostra a Figura 54. Foram capturadas imagens de cada microzona com uma distância focal de 0,65x e ampliação de 2x.

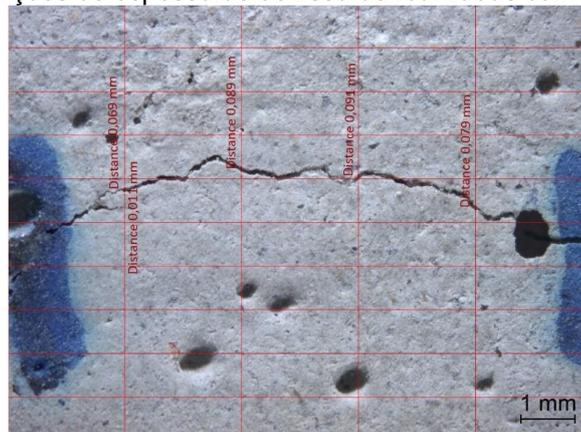
Figura 54: Metodologia de acompanhamento de autocicatrização por microscopia ótica (a) vista geral com marcação das microzonas; (b) representação esquemática com descrição da quantidade de imagens registradas; (c) registro fotográfico de amostra do programa experimental com sinalizações



Fonte: Grupo autocicatrização NORIE/UFRGS.

A partir da subdivisão, para que se pudesse verificar a espessura média das fissuras, em cada microzona foram realizadas quatro leituras de espessura (Figura 55), totalizando 32 pontos por corpo de prova, todas realizadas na data de abertura da fissura. Para o acompanhamento da autocicatrização, foram escolhidos, de forma aleatória, apenas dois corpos de prova, por variável, para que fossem realizadas imagens ao longo do tempo.

Figura 55: Medições de espessuras de fissuras realizadas com microscopia ótica



Fonte: Grupo autocicatrização NORIE/UFRGS.

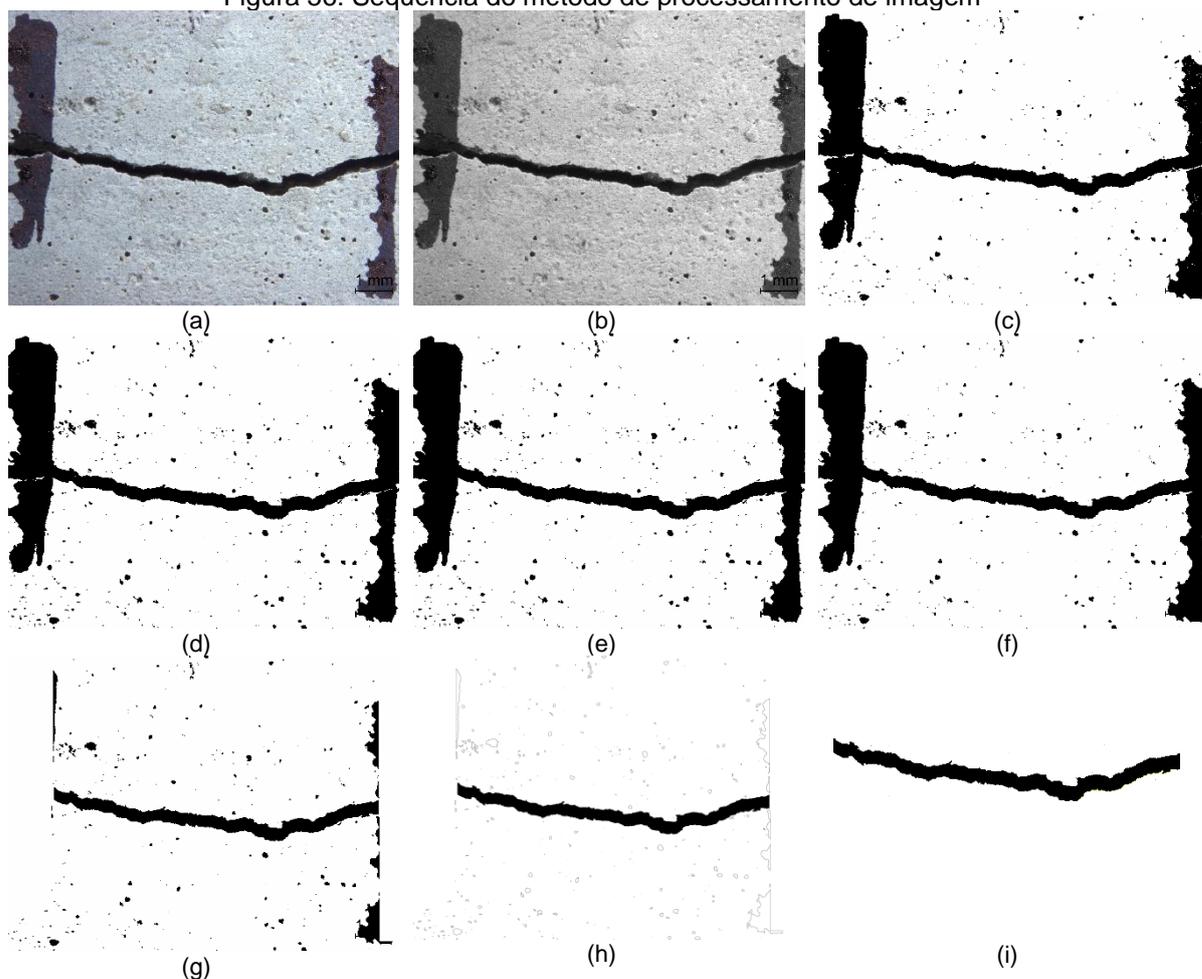
Conforme será discutido no Capítulo 4: Resultados e Discussões, para realizar uma análise de forma quantitativa, quanto à influência exercida pelo ambiente de exposição na autocicatrização dos concretos, optou-se por adotar um método de processamento de imagem, aplicado apenas para a relação a/c 0,65 e para duas microzonas, a 4 e 5. Optou-se por estas duas microzonas, pois as mesmas então centralizadas nos corpos de prova prismáticos. Desta forma descartando a influência das bordas e da variação da espessura da fissura, não analisando as microzonas onde a fissura é mais estreita e/ou mais espessa.

Para a quantificação, foi empregado o software Fiji, sendo ele um pacote de processamento de imagem de código aberto baseado no *ImageJ*. A Figura 56 exemplifica a sequência utilizada através de mecanismos presentes no software, baseada em filtragem, com a finalidade de realizar um melhor destacamento da fissura, possibilitando uma melhor forma de obtenção de dados, caracterizando a fissura.

As principais etapas são descritas a seguir:

- a.** Realizar a aquisição da imagem no modelo de cores RGB (Figura 56 a);
- b.** escalar a imagem através de uma medida conhecida;
- c.** transformar a imagem RGB em escala de cinza – 8 bit (Figura 56 b);
- d.** aplicar um Thershold, em um nível específico na imagem, transformando da escala de cinza para em nível lógico 0 e 1 em cada pixel da imagem (Figura 56 c);
- e.** aplicar uma filtragem de dilatação na imagem, com a finalidade de realizar a conexão entre os pixels vizinhos (Figura 56 d);
- f.** aplicar uma filtragem de preenchimento da imagem, para cobrir os pixels vazios dentro da fissura (Figura 56 e);
- g.** aplicar uma filtragem de erosão da imagem, com o objetivo de eliminar os pixels sem conectividade entre si (Figura 56 f);
- h.** recortar as bordas laterais das imagens, com a finalidade de padronizar a mesma delimitação para todas as análises da mesma fissura (Figura 56 g);
- i.** aplicar ferramenta de seleção na área dos pixels da fissura, de modo manual (Figura 56 h);
- j.** aplicar ferramenta de descarte dos demais pontos, que não foram selecionados no item anterior (Figura 56 i);
- k.** aplicar ferramenta para coletar as informações da seleção, tais como área e perímetro da fissura.

Figura 56: Sequência do método de processamento de imagem



Fonte: própria da autora

Para avaliar a autocicatrização das fissuras ao longo do tempo através da evolução da média da área, foi utilizada a Equação 10.

$$EA_i = \left[ \left( \frac{A_{ti}}{A_{t0}} \right) - 1 \right] * 100 \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

$EA_i$  = evolução da área média da fissura, em percentual, na idade de acompanhamento (i).

$A_{ti}$  = Área da fissura na idade de acompanhamento (i).

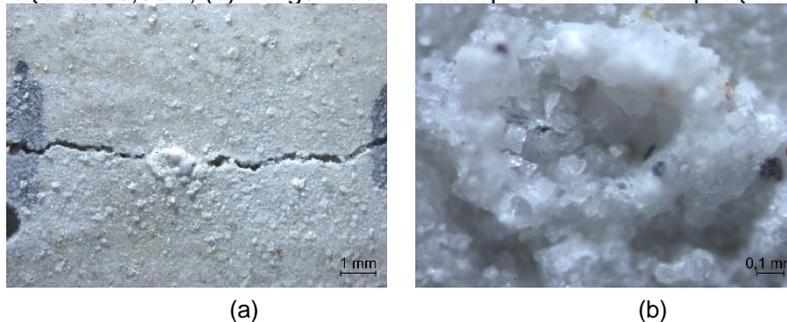
$A_{t0}$  = Área da fissura na idade de abertura da fissura.

### 3.6.3 Análise termogravimétrica

Para este ensaio foi utilizado um analisador termogravimétrico da marca TA Instruments, modelo Q50, com capacidade de aquecimento de até 1000°C, a uma taxa de aquecimento de 20°C/min, do laboratório Lince/NORIE/UFRGS.

Este ensaio foi feito ao final do processo de acompanhamento da autocicatrização. Para isso, escolheu-se um corpo de prova para a realização da coleta do material presente na superfície da fissura. Para verificar se quais os produtos formados no selamento da fissura, validando a incidência ou não da autocicatrização autógena nos concretos. A Figura 57 mostra o acúmulo de produto de autocicatrização coletado para as análises.

Figura 57: Produto resultante do processo de autocicatrização (a) imagem de microscopia ótica com ampliação de 0,65x ; (b) imagem de microscopia ótica com ampliação de 5x



Fonte: própria da autora

Os corpos de prova selecionados, aleatoriamente para este ensaio, permaneceram no ambiente de exposição até a data da realização da análise. A coleta do material ocorreu por meio de raspagem da superfície com o auxílio de um bisturi, sendo realizada momentos antes da realização do ensaio. Foram coletados 5mg de cada amostra. Os corpos de prova submerso foram retirados do ambiente de exposição e mantidos em ambiente com temperatura e umidade controlado por 6h.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos ao longo da pesquisa e serão realizadas as discussões.

### 4.1 Caracterização das matrizes cimentícias

Para controle tecnológico dos concretos produzidos empregou-se o ensaio de resistência à compressão axial, aos 3, 28, 91 e 182 dias, em cp's cilíndricos e íntegros e o ensaio de absorção de água por capilaridade nas idades de 3 e 28 dias em cp's cilíndricos e íntegros. O controle tecnológico foi realizado nas mesmas idades em que foram realizadas as aberturas das fissuras nos cp's prismáticos.

#### 4.1.1 Resistência à compressão axial

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova são apresentados na Tabela 16. As médias foram adquiridas através da ruptura de quatro corpos de prova, nas idades de 3, 28, 91 e 182 dias. No Apêndice A, encontram-se todos os valores obtidos.

Tabela 16: Resistência à compressão aos 3, 28, 91 e 182 dias de idade dos concretos

		<i>a/c</i>			
		<b>0,30</b>	<b>0,40</b>	<b>0,50</b>	<b>0,65</b>
<b>3 dias</b>	<b>Média (MPa)</b>	43,00	29,14	25,94	20,18
	<b>DPV (MPa)</b>	1,36	1,63	1,02	0,65
	<b>CV (%)</b>	3,15	5,59	3,94	3,20
<b>28 dias</b>	<b>Média (MPa)</b>	46,07	30,67	27,85	23,94
	<b>DP (MPa)</b>	5,78	2,56	2,94	1,38
	<b>CV (%)</b>	12,55	8,34	10,55	5,76
<b>91 dias</b>	<b>Média (MPa)</b>	50,67	32,20	30,30	25,69
	<b>DP (MPa)</b>	4,04	0,17	1,73	0,93
	<b>CV (%)</b>	7,97	0,52	5,72	3,60
<b>182 dias</b>	<b>Média (MPa)</b>	-	-	32,28	27,57
	<b>DP (MPa)</b>	-	-	1,49	1,14
	<b>CV (%)</b>	-	-	4,60	4,12

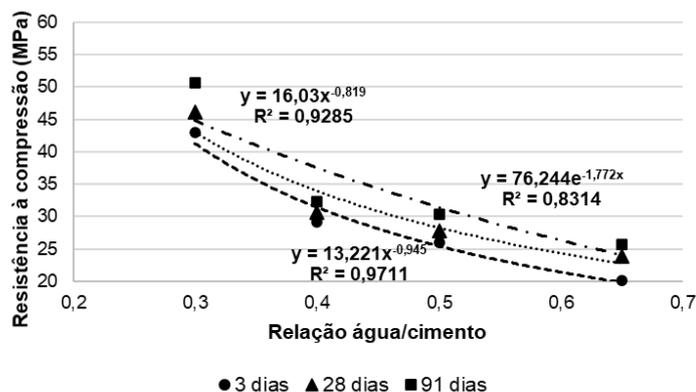
\*DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação

Fonte: própria da autora

Na Figura 58, estão as curvas obtidas para cada idade ensaiada. Conforme esperado há um incremento na resistência à compressão com o aumento da idade dos concretos e concretos com relação a/c maiores geram menores resistências à compressão. A curva para a idade

de 182 dias não foi gerada, uma vez que os dados para as relações a/c 0,3 e 0,4 foram perdidos por problemas técnicos no equipamento de ensaio.

Figura 58: Influência da idade e da relação água/cimento na resistência à compressão



Fonte: própria da autora

Na Tabela 17 são apresentados os resultados da análise de variância realizado para os dados de Resistência à compressão, para as idades de 3, 28 e 91 dias. Não foram consideradas nesta análise os resultados obtidos aos 182 dias.

Tabela 17: ANOVA ensaio de Resistência à compressão para concretos com diferentes idades

Efeitos	SQ	GL	SQF	Teste F	p	Sig.
Idade do concreto	160,7629	2	80,3814	13,47939	0,000079	S
a/c	135,2823	1	135,2823	22,68587	0,000053	S
Idade do concreto * a/c	19,8813	7	2,8402	0,47628	0,843457	N
Error	166,9720	28	5,9633			

SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade (n-1); SQF: média quadrática; Teste F(calc): valor calculado de F; p: nível de significância; Se  $p < 5\%$  = efeito significativo

Pode-se observar que das variáveis analisadas, tanto a idade do concreto quanto a relação água/cimento são consideradas significativas, conforme era esperado. Entretanto a interação entre idade do concreto e a/c não foi considerada significativa.

#### 4.1.2 Absorção de água por capilaridade

Os resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade dos corpos de prova são apresentados na

Tabela 18. As médias foram adquiridas através do ensaio de três corpos de prova, nas idades de 3 e 28 dias. No Apêndice B, encontram-se todos os valores obtidos.

Tabela 18: Absorção de água por capilaridade aos 3 e 28 dias de idade dos concretos, após 72h de ensaio

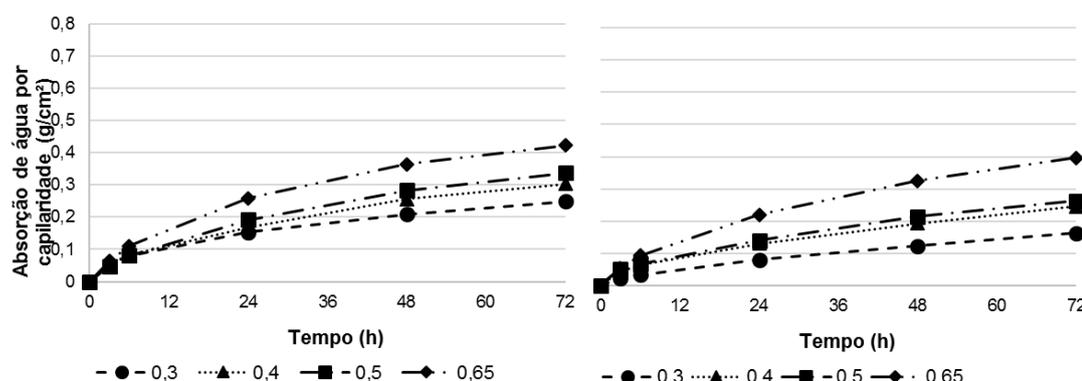
		<i>a/c</i>			
		<i>0,30</i>	<i>0,40</i>	<i>0,50</i>	<i>0,65</i>
<b>3 dias</b>	<b>Média (g/cm<sup>2</sup>)</b>	0,25	0,30	0,34	0,42
	<b>DP (g/cm<sup>2</sup>)</b>	0,05	0,11	0,03	0,04
	<b>CV (%)</b>	21,27	34,77	9,37	9,77
<b>28 dias</b>	<b>Média (g/cm<sup>2</sup>)</b>	0,16	0,24	0,26	0,38
	<b>DP (g/cm<sup>2</sup>)</b>	0,02	0,01	0,01	0,04
	<b>CV (%)</b>	13,63	3,98	3,56	11,20

\*DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação

Fonte: própria da autora

Na Figura 59, é demonstrada a evolução da absorção de água por capilaridade ao longo do tempo para cada concreto, nas idades de 3 e 28 dias. Conforme esperado, quanto maior a relação a/c maior a taxa de absorção de água por capilaridade e observa-se também a redução da absorção quando comparadas as idades de 3 e 28 dias.

Figura 59: Influência da idade e da relação água/cimento na absorção de água por capilaridade (a) 3 dias e (b) 28 dias



Fonte: própria da autora

Na Tabela 19, são apresentados os resultados da análise de variância realizada para os dados de absorção de água por capilaridade às 72hrs, para as idades de 3 e 28 dias.

Tabela 19: ANOVA ensaio de Absorção de água por capilaridade as 72hrs

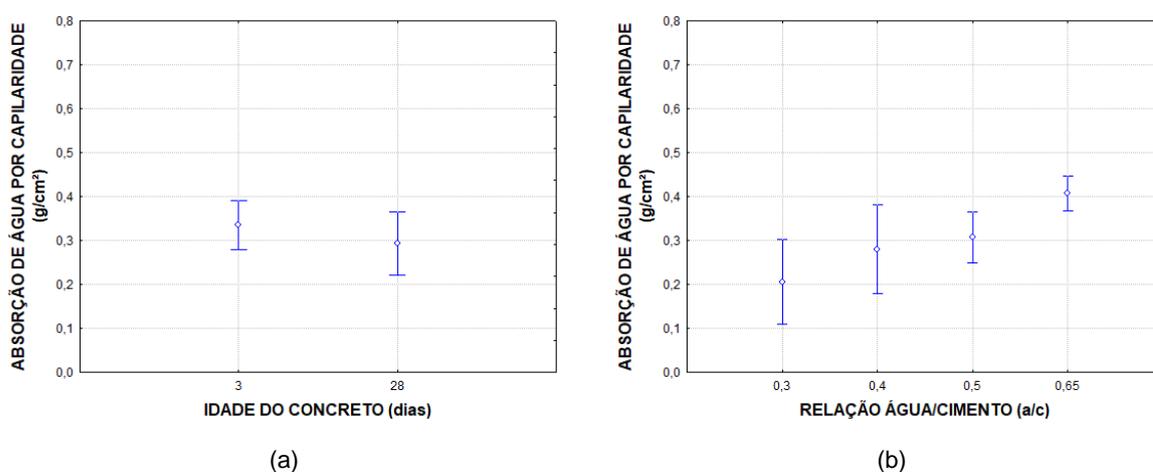
Efeitos	SQ	GL	SQF	Teste F	p	Sig.
Idade do concreto	0,018518	1	0,018518	6,4547	0,024626	S
a/c	0,117919	3	0,039306	13,7011	0,000255	S
Idade do concreto * a/c	0,002922	3	0,000974	0,3395	0,797143	N
Error	0,037295	13	0,002869			

SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade (n-1); SQF: média quadrática; Teste F(calc): valor calculado de F; p: nível de significância; Se  $p < 5\%$  = efeito significativo

É possível perceber que das variáveis analisadas, tanto a idade do concreto quanto a relação água/cimento foram consideradas significativas, conforme era esperado. Entretanto, a interação entre idade do concreto e a/c não foi considerada significativa.

A Figura 60 mostra a influência causada pela idade do concreto e pela relação água/cimento sobre a absorção de água por capilaridade, quando analisada nas 72hs. Conforme esperado, a absorção reduz com o aumento da idade do concreto e aumentou com o incremento da relação a/c.

Figura 60 Absorção de água por capilaridade às 72hrs; (a) Influência da idade do concreto; (b) Influência da relação a/c.



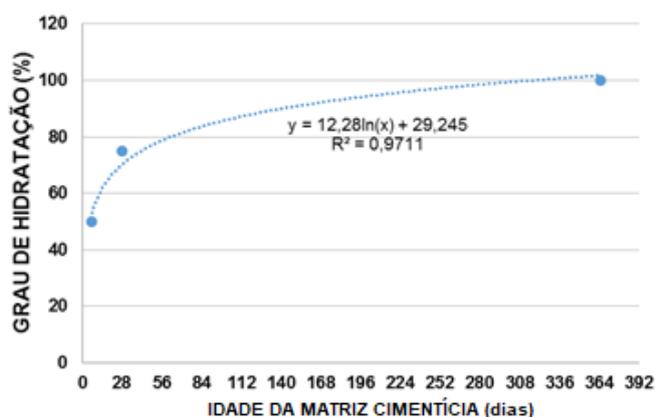
Fonte: própria da autora

#### 4.1.3 Grau de hidratação

Sabendo que o grau de hidratação do concreto pode influenciar na autocicatrização autógena, foram calculados os compostos resistentes e porosidade para todos os concretos avaliados, através do modelo representativo da estrutura da pasta proposto por Powers e Brownyard (1947 apud BROUWERS, 2004, p.1697) e quantificado o cimento anidro para cada relação a/c empregada. Foi calculado também o grau de hidratação dos concretos para cada idade de abertura de fissuras. Mehta e Monteiro (2014) abordam que o grau de hidratação que varia conforme sua idade, sendo que pastas de cimento com relação a/c de 0,63, apresentam aos 7 dias grau de hidratação de aproximadamente 50%, para os 28 dias de idade o grau passa à 75% e apenas na idade de 365 dias o concreto atingirá grau de hidratação de 100%.

A partir das estimativas apresentadas, foi elaborada a Figura 61, considerando uma hidratação de 50% na idade de 7 dias, 75% para 28 dias e 100% na idade de 365 dias, a partir destes três pontos, foi ajustada uma equação logarítmica em função da curva.

Figura 61: Relação teórica do grau de hidratação em função da idade da matriz cimentícia



Fonte: adaptado de Mehta e Monteiro (2014).

A partir da equação presumida na Figura 61, foi possível estimar o grau de hidratação dos concretos para cada idade de abertura de fissura empregada neste trabalho, conforme demonstrado na Tabela 20.

Tabela 20: Estimativa de grau de hidratação para as diferentes idades de abertura das fissuras

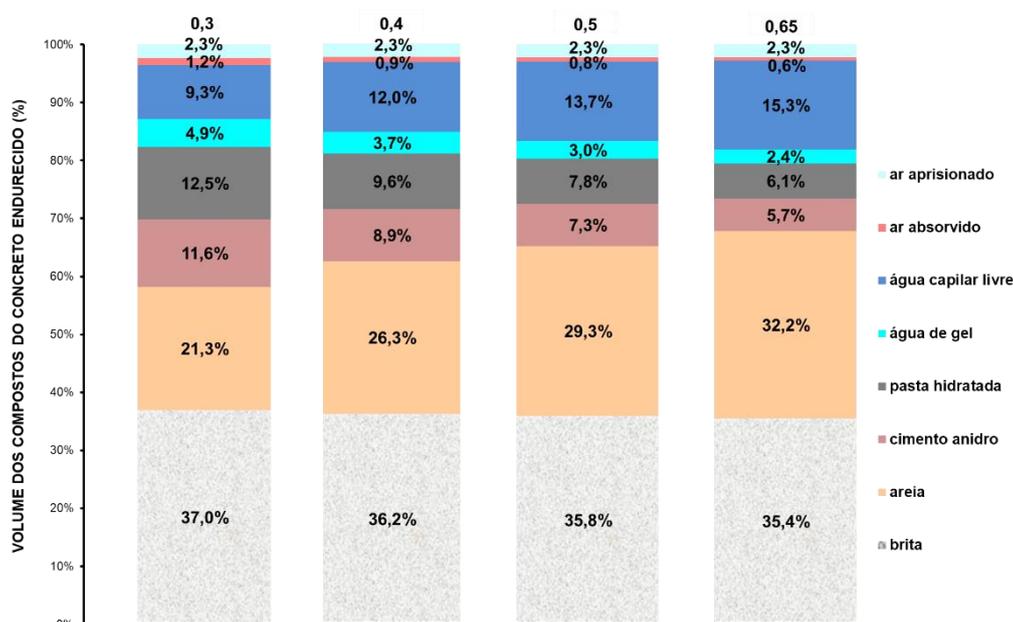
Idade de abertura de fissuras (dias)	Grau de hidratação dos concretos (%)
3	43
28	70
91	85
182	93

Fonte: própria da autora

Com a determinação do grau de hidratação dos concretos em cada idade de abertura de fissuras, foi possível estimar o volume das fases resistentes e não resistentes de cada traço, com o objetivo de quantificar a presença de cimento anidro. A quantificação completa encontra-se no Apêndice C.

A Figura 62 apresenta a quantificação estimada do volume das fases do concreto na idade de 3 dias para as relações água/cimento 0,3, 0,4, 0,5 e 0,65. Conforme era esperado, observa-se um aumento no volume de ar absorvido, água capilar livre, água de gel, pasta hidratada, cimento anidro e areia, todos influenciados pela diferença entre as relações a/c empregadas. Observa-se também a presença de grãos de cimento anidro para todas as relações a/c empregadas. Conforme esperado, para a/c menores, maior a disponibilidade de grãos de cimento anidro e para a/c maiores, menor a quantidade, o que pode impactar a autocicatrização dos concretos.

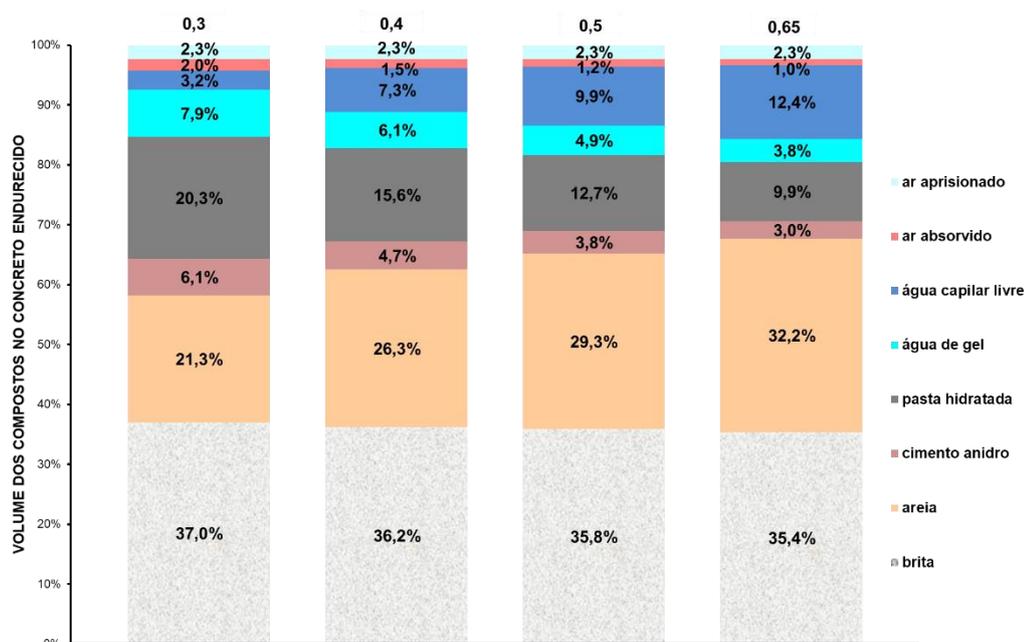
Figura 62: Grau de hidratação para as diferentes relações a/c na idade de 3 dias.



Fonte: própria da autora

A Figura 63 apresenta a quantificação estimada do volume das fases do concreto na idade de 28 dias para as relações água/cimento 0,3, 0,4, 0,5 e 0,65. Comparando o volume dos compostos no concreto endurecido aos 3 e aos 28 dias, é possível observar que a quantidade de grãos de cimento anidro sofre uma redução de aproximadamente 47% para todas as relações a/c.

Figura 63: Grau de hidratação para as diferentes relações a/c na idade de 28 dias.

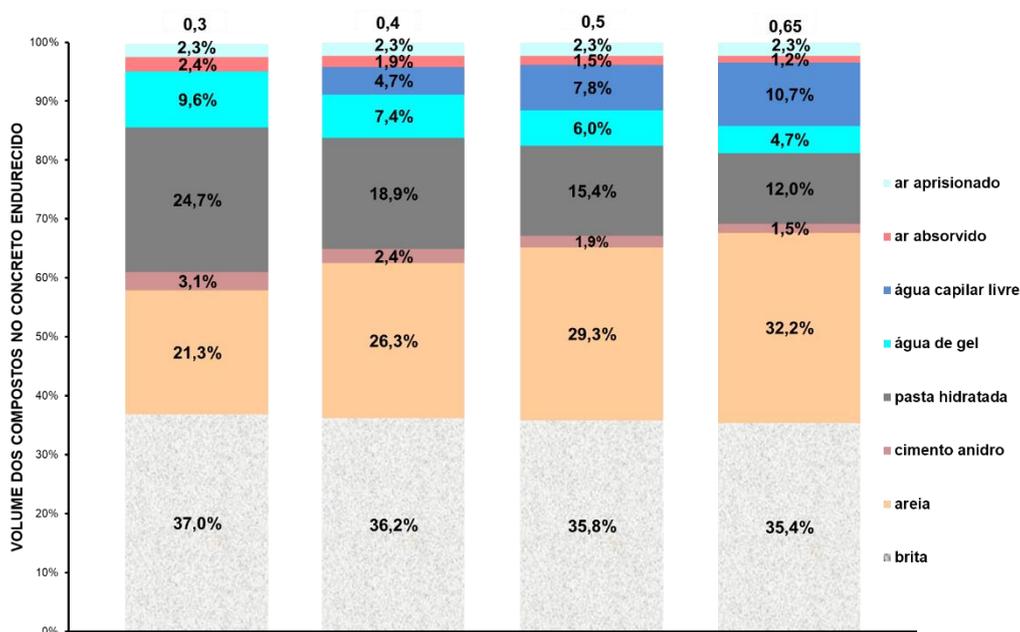


Fonte: própria da autora

A Figura 64 apresenta a quantificação estimada do volume das fases do concreto na idade de 91 dias para as relações água/cimento 0,3, 0,4, 0,5 e 0,65. É possível observar a redução de

grãos de cimento anidro da idade de 28 dias para a idade de 91 dias, esta redução de aproximadamente 49% para todas as relações a/c.

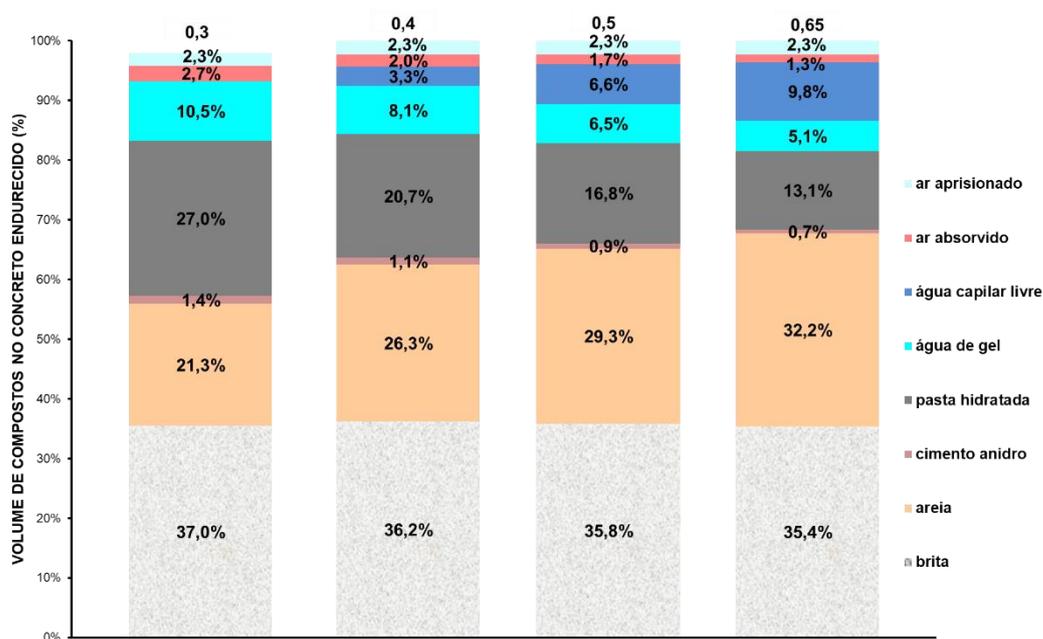
Figura 64: Grau de hidratação para as diferentes relações a/c na idade de 91 dias.



Fonte: própria da autora

A Figura 65 apresenta a quantificação estimada do volume das fases do concreto na idade de 182 dias para as relações água/cimento 0,3, 0,4, 0,5 e 0,65. É possível observar que a quantidade de grãos de cimento anidro para esta idade é baixa para todas as relações a/c.

Figura 65: Grau de hidratação para as diferentes relações a/c na idade de 182 dias.



Fonte: própria da autora.

De uma forma geral, observa-se que a quantidade de cimento anidro está atrelada fortemente à relação água/cimento e à idade de abertura da fissura, reduzindo sua disponibilidade para relações a/c maiores e idade mais avançadas da matriz cimentícia. Corroborando com Venquiaruto (2017), onde a pesquisadora observou que a relação água/cimento é um fator condicionante na autocicatrização autógena, sendo que uma baixa disponibilidade de água promove maiores quantidades de aglomerante anidro na matriz.

## 4.2 Acompanhamento da autocicatrização

Para realizar o acompanhamento do fenômeno da autocicatrização nos corpos de prova foram realizados os ensaios de velocidade de propagação de ondas e microscopia ótica. Para essas análises foi definida uma faixa de espessura de fissuras entre 50 e 400  $\mu\text{m}$ .

### 4.2.1 Espessura média das fissuras

Um dos pontos importantes para a avaliação da autocicatrização nas fissuras é conhecer a espessura média que elas apresentam logo após a sua indução.

Na Tabela 21, são apresentados os resultados obtidos com relação à espessura média das fissuras. Optou-se por descartar fissuras que apresentassem dimensões médias inferiores a 50 $\mu\text{m}$  e maiores que 400 $\mu\text{m}$ . Desta maneira, a menor fissura apresentou média de espessura de 75 $\mu\text{m}$  e a maior fissura de 385 $\mu\text{m}$ .

Observa-se na Tabela 21 e na Figura 66, que mesmo mantendo-se os parâmetros para a indução das fissuras, tais como: o aparato para a abertura da fissura e velocidade de aplicação da carga de compressão, a média das espessuras das fissuras apresentam um desvio padrão elevado, e também observa-se que o dano gerado (espessura da fissura) varia mesmo em prismas irmãos. Esta dificuldade é característica da heterogeneidade da distribuição dos agregados e/ou zona de transição dos concretos.

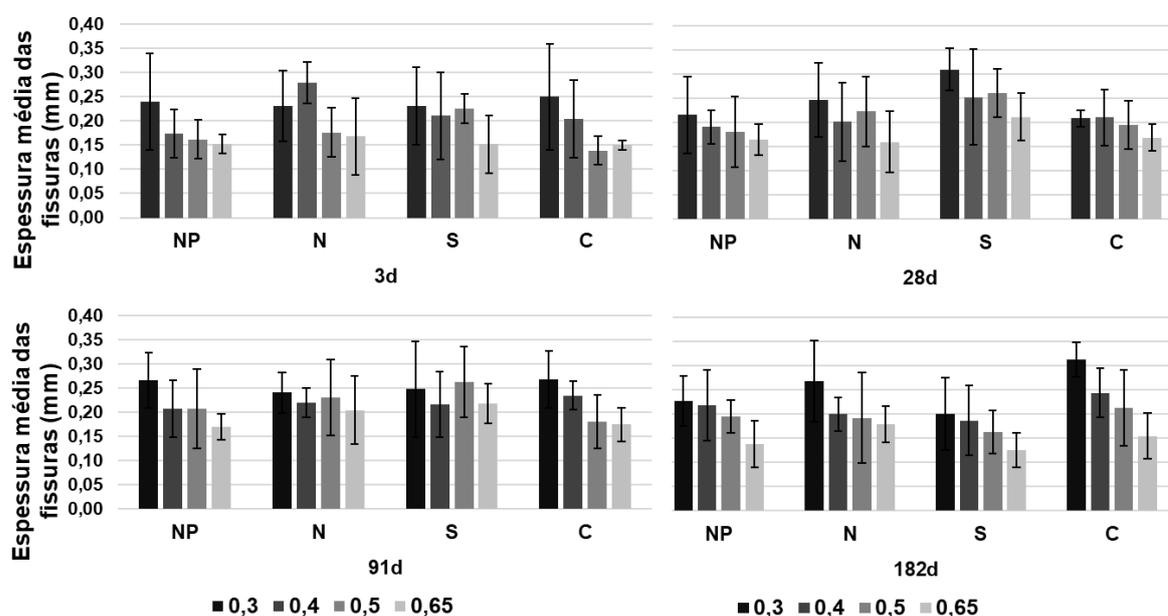
Tabela 21: Espessura média das fissuras na idade de abertura aos 3, 28, 91 e 182 dias

		0,3			0,4			0,5			0,65		
		Média (mm)	DP (mm)	CV (%)	Média (mm)	DP (mm)	CV (%)	Média (mm)	DP (mm)	CV (%)	Média (mm)	DP (mm)	CV (%)
3d	NP	0,240	0,10	41,44	0,174	0,05	30,11	0,162	0,04	27,12	0,152	0,11	69,50
	N	0,231	0,073	31,5	0,279	0,043	15,3	0,176	0,051	28,9	0,168	0,079	47,1
	S	0,231	0,08	36,6	0,211	0,09	43,4	0,225	0,03	14,6	0,152	0,06	40,3
	C	0,250	0,11	45,5	0,204	0,08	39,8	0,139	0,03	20,4	0,150	0,01	7,7
28d	NP	0,216	0,080	37,0	0,191	0,035	18,5	0,181	0,074	40,7	0,165	0,032	19,6
	N	0,247	0,076	30,7	0,202	0,041	20,5	0,223	0,072	32,2	0,160	0,063	39,4
	S	0,310	0,044	14,3	0,253	0,099	39,2	0,261	0,050	19,3	0,212	0,049	22,9
	C	0,209	0,017	8,3	0,211	0,058	27,7	0,195	0,050	25,5	0,169	0,028	16,7
91d	NP	0,267	0,057	21,2	0,207	0,059	28,4	0,208	0,082	39,4	0,170	0,027	15,8
	N	0,241	0,042	17,4	0,220	0,030	13,4	0,231	0,079	34,3	0,205	0,071	34,5
	S	0,248	0,099	39,9	0,217	0,068	31,5	0,263	0,073	27,9	0,218	0,041	18,8
	C	0,268	0,059	22,2	0,235	0,029	12,5	0,181	0,055	30,2	0,175	0,035	20,0
182d	NP	0,228	0,052	23,0	0,218	0,073	33,7	0,196	0,034	17,4	0,138	0,049	35,7
	N	0,268	0,084	31,4	0,200	0,035	17,4	0,192	0,094	48,9	0,179	0,037	20,7
	S	0,200	0,075	37,4	0,187	0,073	39,2	0,163	0,044	26,9	0,126	0,036	28,7
	C	0,313	0,036	11,6	0,244	0,051	20,7	0,213	0,079	37,2	0,155	0,048	31,1

\*DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; NP: Natural protegido; N: Natural; S: Submerso; C: Ciclo de molhagem e secagem

Fonte: própria da autora

Figura 66: Espessura média das fissuras em idades de abertura diferentes



Fonte: própria da autora

Foi realizada uma Análise de variância para verificar a influência dos diferentes fatores sobre a espessura média da fissura. A Tabela 22 mostra a influência de cada efeito sobre a variável.

Tabela 22: ANOVA espessura média das fissuras

Efeitos	SQ	GL	SQF	Teste F	p	Sig.
Idade de abertura da fissura	0,03212	3	0,01071	2,914	0,034675	S
Ambiente de exposição	0,02287	3	0,00762	2,075	0,103638	N
a/c	0,26534	3	0,08845	24,074	0,000000	S
Idade de abertura da fissura*Ambiente de exposição	0,10536	9	0,01171	3,186	0,001083	S
Idade de abertura da fissura*a/c	0,02331	9	0,00259	0,705	0,704234	N
Ambiente de exposição*a/c	0,02598	9	0,00289	0,786	0,629840	N
Idade de abertura da fissura*Ambiente de exposição*a/c	0,06376	27	0,00236	0,643	0,916018	N
Error	1,06174	289	0,00367			

SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade (n-1); SQF: média quadrática; Teste F(calc): valor calculado de F; p: nível de significância; Se  $p < 5\%$  = efeito significativo

Pode-se observar na Tabela 22 que a idade de abertura da fissura influencia diretamente na espessura média da fissura, bem como a relação a/c e a interação entre idade de abertura de fissura e ambiente de exposição.

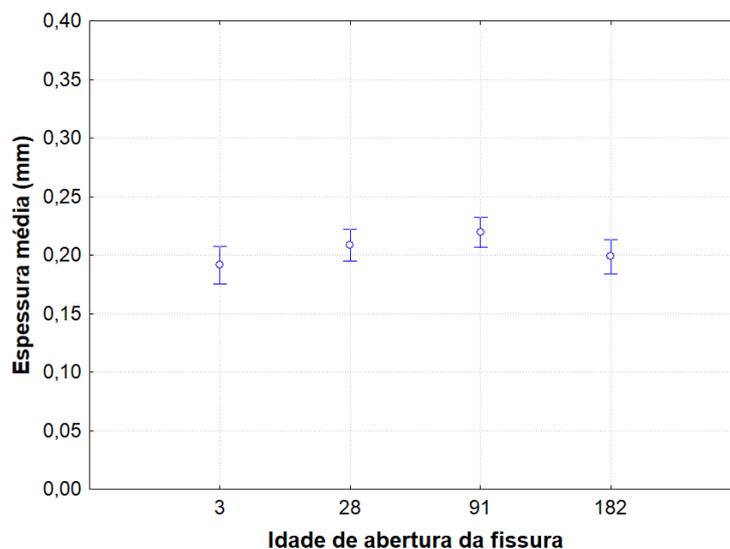
Nota-se também que o ambiente de exposição não exerce influência significativa quanto à espessura média, fato que era esperado, pois as fissuras tiveram sua estimativa de espessura média antes da exposição ao ambiente. Este efeito foi incluído na análise estatística pois era necessário garantir que a espessura das fissuras não apresentava significância antes dos cp's de serem expostos aos diferentes ambientes, sendo possível realizar comparações com os resultados obtidos.

A seguir são analisados os efeitos significativos das variáveis controláveis, bem como de suas interações, os quais tiveram uma influência expressiva na análise de variância (ANOVA) realizada.

#### 4.2.1.1 Efeito da idade de abertura da fissura sobre a espessura média das fissuras

A Figura 67 mostra a influência da idade de abertura da fissura sobre sua espessura média. Observa-se que entre a idade de 3, 28 e 91 dias de abertura, a espessura média aumenta, já para a idade de 182 dias observa-se uma redução na espessura, fato que não era esperado. Com base na literatura (JAROENRATANAPIROM E SAHAMITMONGKOL, 2011), esperava-se que fissuras geradas tardiamente apresentassem espessura média maior quando comparada com idades anteriores.

Figura 67: Efeito isolado da idade de abertura das fissuras nas espessuras médias



Fonte: própria da autora

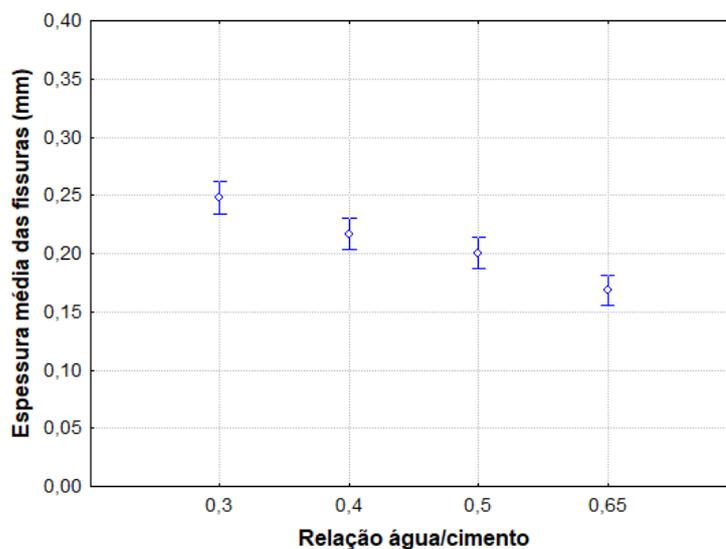
Jaroenratanapirom e Sahamitmongkol (2011) avaliaram fissuras geradas aos 3 e 28 dias, e observaram diferença significativa nas espessuras médias, já Cappellesso (2018) também avaliou fissuras induzidas aos 3 e 28 dias e não observou diferença significativa nas espessuras obtidas. Entretanto ambos observaram que a capacidade de autocicatrização ocorreu mais fortemente nas matrizes fissuradas aos 3 dias.

#### 4.2.1.2 Efeito da relação a/c sobre a espessura média das fissuras

A Figura 68 mostra a influência da relação a/c sobre a espessura média da fissura. Observa-se que o aumento da relação água/cimento provoca uma redução na espessura média da fissura, fato esperado uma vez que a resistência à compressão do concreto reduz com o aumento do a/c e suas as tensões internas acabam reduzindo, o que gera uma fissura com menor espessura.

Fato que corrobora com Cappellesso (2018), sendo que menores relações a/c apresentam maior grau de dano na matriz cimentícia no momento da fissuração, resultando em fissuras com maior dimensão.

Figura 68: Efeito isolado da relação a/c na espessura média das fissuras

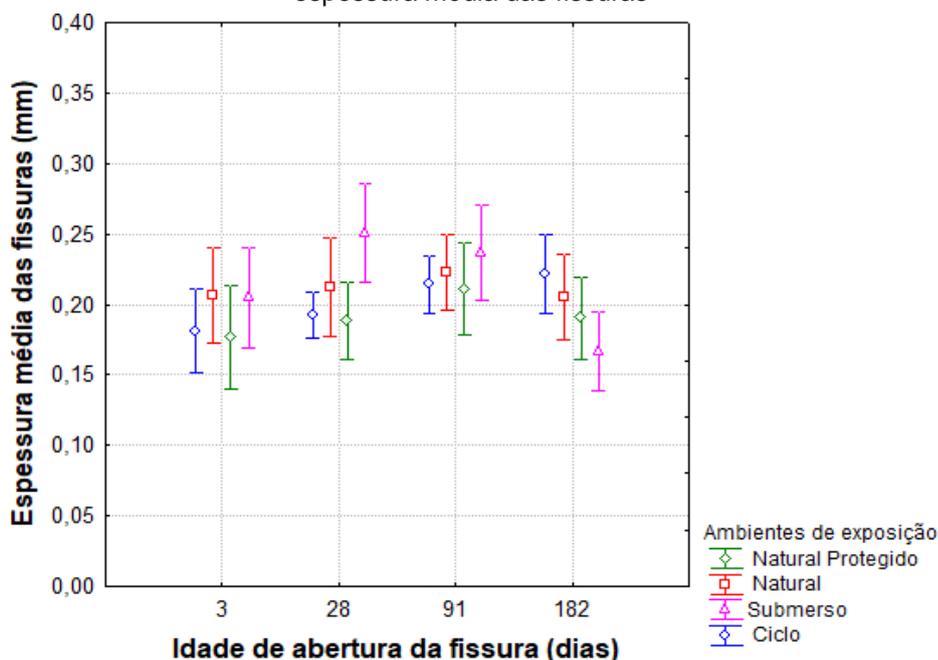


Fonte: própria da autora

#### 4.2.1.3 Efeito da interação de segunda ordem idade de abertura da fissura e ambiente de exposição sobre a espessura média das fissuras

Na Figura 69 está apresentada a influência da idade de abertura de fissura e do ambiente de exposição sobre a espessura média das fissuras. Observa-se que, de uma forma geral, fissuras geradas até a idade de 91 dias tendem a aumentar sua espessura.

Figura 69: Efeito da interação entre idade de abertura das fissuras e ambientes de exposição na espessura média das fissuras



Fonte: própria da autora

Realizando teste de Fisher, é possível verificar que para a idade de abertura de fissura aos 3 dias, todos os ambientes de exposição não são significativos. Comportamento também observado para a idade de 91 dias. Na idade de 28 dias, através desta análise estatística, verifica-se que as fissuras expostas no ambiente submerso são diferentes das demais. Já na idade de 182 dias, observa-se uma diferença significativa apenas para as fissuras expostas nos ambientes submerso e ciclo.

Observa-se também que as faixas de abertura de fissura que foram selecionadas para o estudo quanto à ocorrência do fenômeno da autocicatrização autógena estão de acordo com a literatura, De Belie *et al.* (2018) salientam que a autocicatrização autógena em matrizes cimentícias não deve ser limitada a fissuras com espessura de cerca de 100µm, uma vez que o surgimento de fissuras de até 300 µm é inevitável no concreto. Ahn e Kishi (2010) estudaram fissuras com espessuras entre 100 e 300µm e observaram o seu selamento. Sisomphon e Copuroglu (2011) estudaram fissuras com espessuras de até 400 µm e notaram o fechamento, mais rápido para fissuras menores que 200 µm e mais lento para fissuras entre 200-400 µm. Mesmo resultado obtido por Jaroenratanapirom e Sahamitmongkol (2011).

#### 4.2.2 Velocidade de propagação de onda ultrassônica

Inicialmente, a metodologia para a determinação da taxa de autocicatrização considerava a velocidade de propagação no corpo de prova antes da indução da fissura, sendo esta leitura considerada a referência (100% íntegra), comparada com a leitura da velocidade nas idades de acompanhamento. Neste período, pretendia-se realizar o ensaio a cada 14 dias até a idade de 56 dias, após a abertura da fissura, depois desta idade o ensaio seguiria sendo realizado a cada 28 dias. Para demonstrar os resultados obtidos com esta metodologia, optou-se por apresentar apenas os resultados para a a/c 0,3.

Para cada idade de leitura de acompanhamento foram obtidos 18 pontos, visto que foram realizadas três medições em cada amostra, no total de seis amostras para cada combinação. Sendo assim, cada ponto foi analisado individualmente. A Tabela 23 mostra a média, desvio padrão e coeficiente de variação para a abertura de fissura aos 3 dias, nas idades de acompanhamento de 0 (recém fissurada) e 84 dias (após a fissura), para os diferentes ambientes de exposição, na relação a/c 0,30. Optou-se por mostrar os dados da idade de 84 dias, pois a partir desta idade iniciou-se a realização do ensaio de velocidade de propagação de ondas na porção íntegra do corpo de prova, conforme será discutido a seguir.

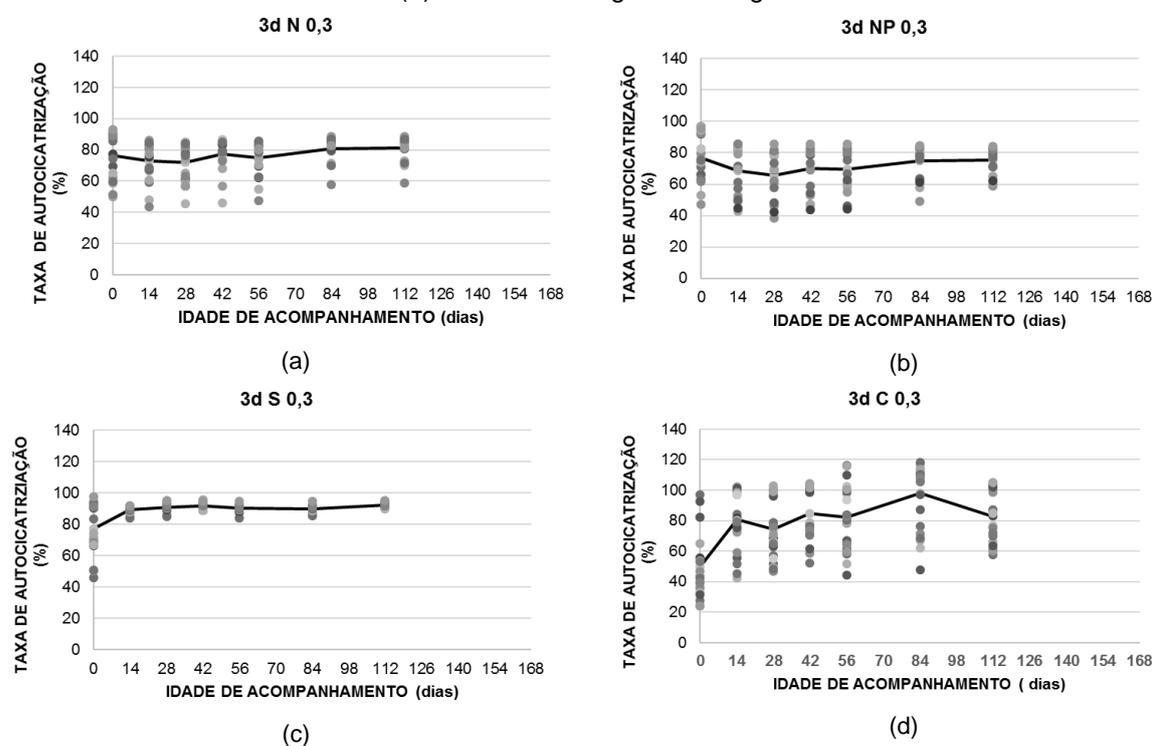
Tabela 23: Taxa média de autocicatrização realizada após abertura das fissuras com 3 dias de idade

		0 dias				84 dias			
		Natural	Natural Protegido	Submerso	Ciclos	Natural	Natural Protegido	Submerso	Ciclos
0,30	Média(%)	76,48	76,72	77,27	49,52	80,62	74,63	89,94	98,20
	DP (%)	15,23	15,59	16,87	20,62	7,86	10,65	1,31	20,80
	CV (%)	19,91	20,32	21,83	41,65	9,70	14,28	1,42	21,19

Méd. = Média; DP: Desvio Padrão; CV: Coeficiente de variação

Na Figura 70, está representada a taxa de autocicatrização para a relação a/c 0,30, em todos os ambientes de exposição. É possível observar que tanto o ambiente de exposição natural quanto o natural protegido apresentam redução com relação à taxa de autocicatrização, principalmente nas primeiras idades e, após os 56 dias, os valores praticamente se mantêm. Para o ambiente de exposição submerso, há um acréscimo logo nas primeiras idades e após 28 dias ocorre uma estabilização da taxa de autocicatrização. Já para o ambiente de exposição ciclo molhagem e secagem, observa-se uma variação muito grande nos resultados. Esta oscilação pode ter sido influenciada pelas condições de saturação interna dos corpos de prova, e outro fator que pode ter auxiliado nessa variação foi o fato de utilizar como parâmetro de referência a leitura inicial da velocidade de propagação de ondas, embora nos demais ambientes essa oscilação não foi tão marcante.

Figura 70: Taxa de autocicatrização calculada com base na velocidade de propagação de onda ultrassônica, a/c 0,30 – abertura de fissura aos 3 dias (a) natural; (b) natural protegido; (c) submerso; (d) ciclo de molhagem e secagem



Fonte: própria da autora

Outro fato importante que foi observado, estava relacionado com o ponto de partida para a taxa de autocicatrização. Neste modelo inicial proposto, os valores não estavam normalizados, logo cada fissura iniciava seu processo com um valor diferente de taxa de autocicatrização, o que poderia influenciar a análise dos dados.

Com o objetivo de eliminar possíveis variáveis que pudessem mascarar os resultados obtidos nos ensaios, optou-se por realizar leituras na lateral dos corpos de prova íntegros prismáticos para cada idade de acompanhamento e utilizá-las como referência, conforme tratado no item 3.6.1 deste trabalho.

A Tabela 24 mostra a média da taxa de autocicatrização, desvio padrão e coeficiente de variação para a abertura de fissura aos 3 dias, nas idades de acompanhamento de 0 e 168 dias, para os diferentes ambientes de exposição e relações a/c, para os valores recalculados, considerando a leitura lateral dos corpos de prova.

Tabela 24: Taxa de autocicatrização para abertura de fissura aos 3 dias, diferentes relações água/cimento e ambientes de exposição na idade final de 168 dias

<b>Ambiente de exposição</b>	<b>0,3</b>			<b>0,4</b>			<b>0,5</b>			<b>0,65</b>		
	<b>Média (%)</b>	<b>DP (%)</b>	<b>CV (%)</b>	<b>Média (%)</b>	<b>DP (%)</b>	<b>CV (%)</b>	<b>Média (%)</b>	<b>DP (%)</b>	<b>CV (%)</b>	<b>Média (%)</b>	<b>DP (%)</b>	<b>CV (%)</b>
<b>NP</b>	9,29	6,4	68,4	-0,16	6,3	40,5	10,60	8,0	73,3	6,13	13,0	212,4
<b>N</b>	18,12	11,9	65,9	3,50	9,4	268,7	23,96	18,7	78,2	8,85	8,9	100,6
<b>S</b>	24,49	17,1	70,0	16,26	12,3	75,7	32,46	8,2	25,4	14,05	5,5	39,4
<b>C</b>	28,86	13,6	47,1	2,86	3,7	129,7	5,91	3,8	64,9	5,21	3,4	66,1

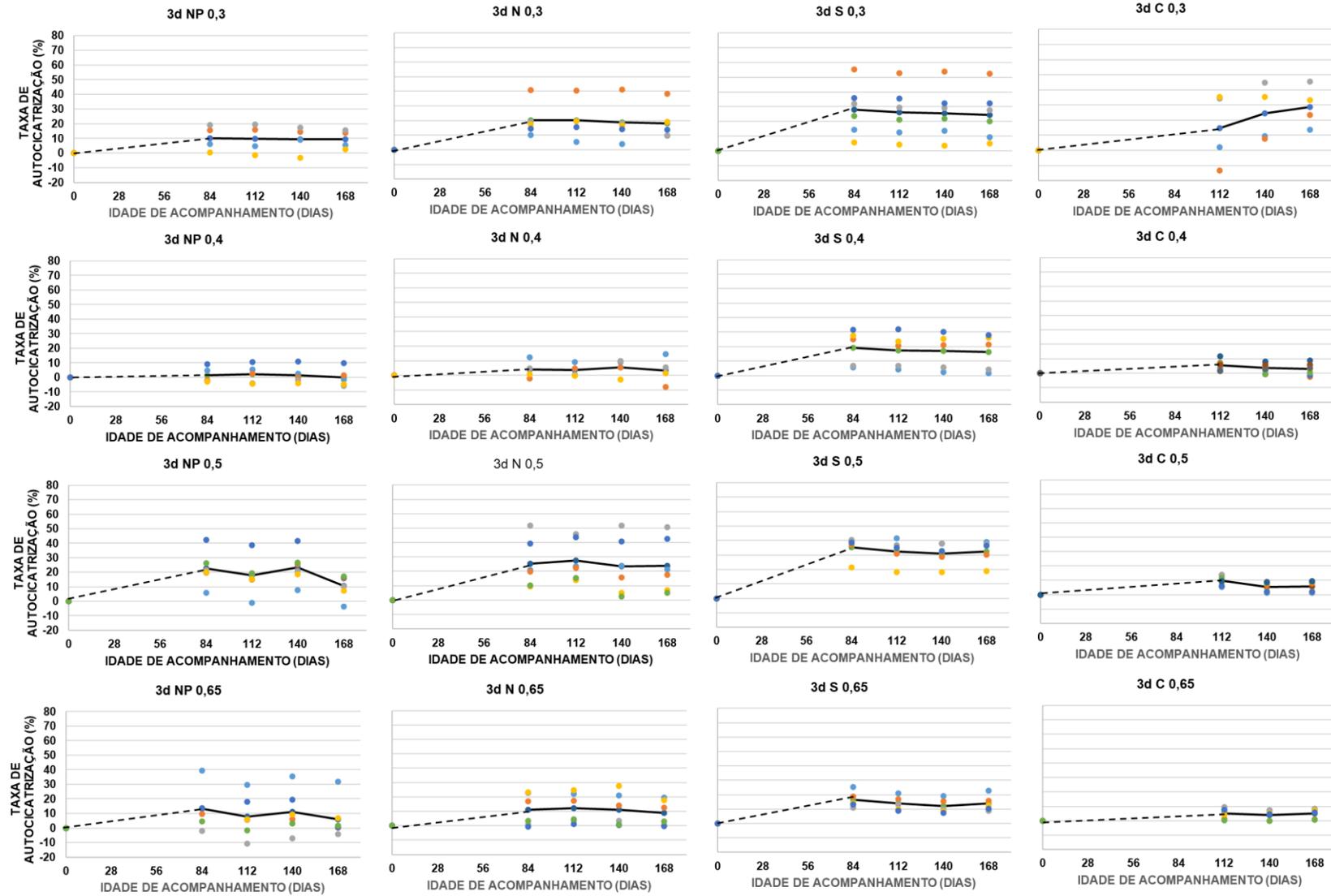
Méd.: média; DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; NP: Natural protegido; N: Natural; S: Submerso; C: Ciclo de molhagem e secagem.

A Figura 71 mostra a influência dos ambientes de exposição e das diferentes relações a/c quanto à taxa de autocicatrização. Como a metodologia do ensaio foi modificada ao longo do desenvolvimento da pesquisa, alguns dados poderão não ser apresentados, por isso estão representados com uma linha tracejada nos gráficos.

Analisando a Figura 71 é possível observar que para todas as relações a/c e em todos os ambientes de exposição há uma dispersão elevada na taxa de autocicatrização na idade inicial. Este fato pode estar atrelado à variação na espessura das fissuras geradas. Observa-se também que o ambiente de exposição ciclos de molhagem e secagem se mostrou mais eficiente que os demais para a relação a/c 0,30. Já para as relações a/c 0,40 e 0,50 o ambiente de exposição submerso foi o que apresentou maiores taxas de autocicatrização. Quanto à relação 0,65, os ambientes natural, submerso e ciclos foram mais eficientes quando comparados ao natural protegido.

Quanto à relação a/c, nota-se que não é um fator preponderante para o desenvolvimento da taxa de autocicatrização, quando comparado com o efeito do ambiente de exposição. Fato que não era esperado, uma vez que a possibilidade da ocorrência da autocicatrização autógena se dá pela contínua hidratação dos minerais que compõem o clínquer e carbonatação de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) (VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013) e de acordo com Jensen e Hansen (2001) a disponibilidade de grãos de cimento anidro aumenta com o redução da relação a/c. Entretanto, o resultado obtido nesta pesquisa vai ao encontro do observado por Gagné e Argouges (2012), os pesquisadores concluíram que relação a/c, não foi um fator chave à autocicatrização de argamassas expostas em ambiente com 100% de UR, não sendo possível detectar um efeito claro do a/c na cinética da autocicatrização.

Figura 71: Taxa de autocicatrização para abertura de fissura aos 3 dias, diferentes relações água/cimento e ambientes de exposição



NP: Natural protegido; N: Natural; S: Submerso; C: Ciclo de molhagem e secagem

Fonte: própria da autora

A Tabela 25 mostra a média da taxa de autocicatrização, desvio padrão e coeficiente de variação para a abertura de fissura aos 28 dias, na idade de acompanhamento de 168 dias, para os diferentes ambientes de exposição analisados. É possível notar que a variabilidade é alta, o que pode estar atrelado a faixa de espessuras muito ampla.

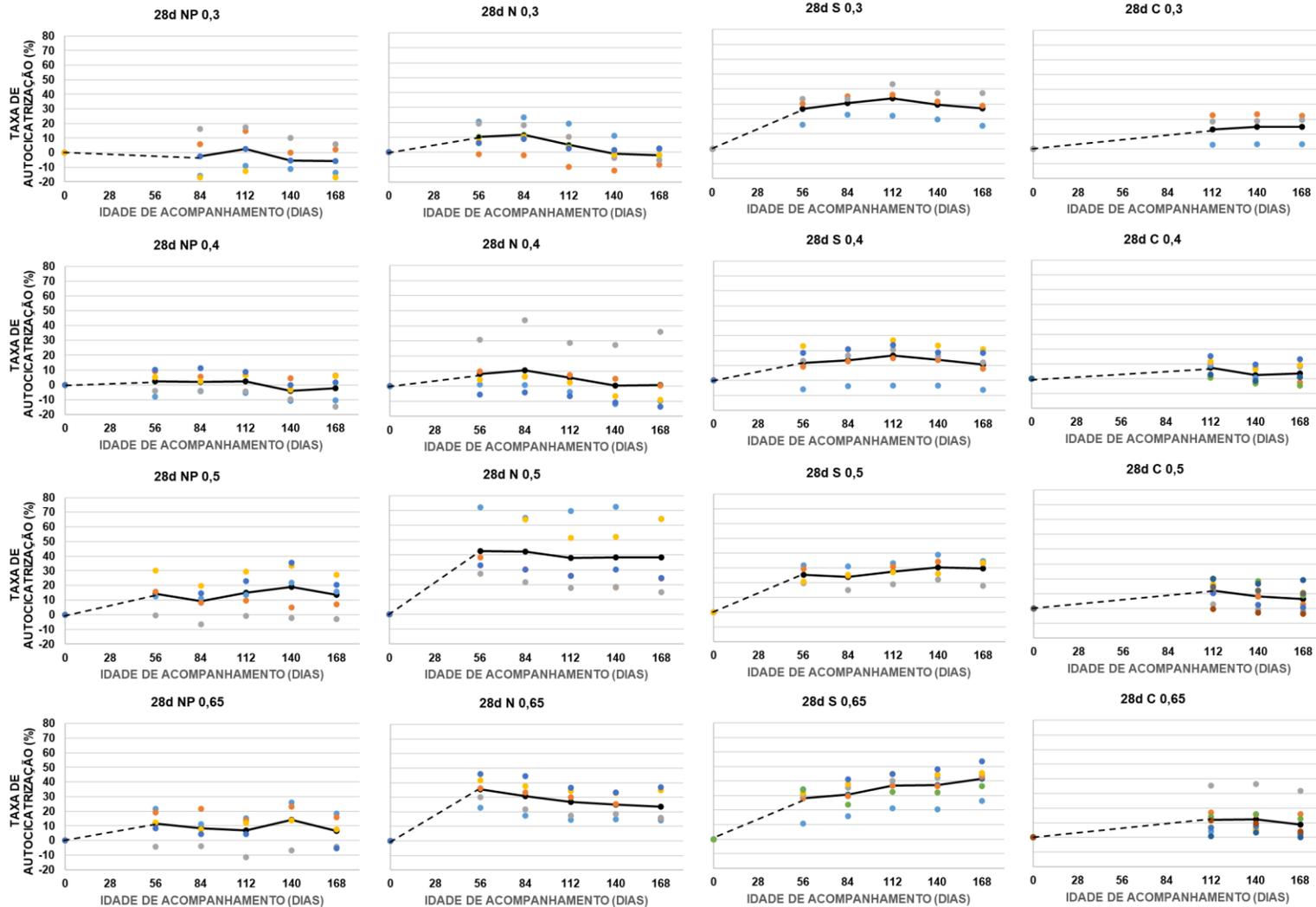
Tabela 25: Taxa de autocicatrização para abertura de fissura aos 28 dias, diferentes relações água/cimento e ambientes de exposição na idade final de 168 dias

Ambiente de exposição	0,3			0,4			0,5			0,65		
	Média (%)	DP (%)	CV (%)	Média (%)	DP (%)	CV (%)	Média (%)	DP (%)	CV (%)	Média (%)	DP (%)	CV (%)
<b>NP</b>	-5,60	11,4	203,1	-2,25	9,7	429,8	13,53	11,9	87,6	6,54	11,1	169,6
<b>N</b>	-2,17	4,6	213,7	0,83	20,3	245,9	38,38	23,9	62,2	23,45	11,4	48,7
<b>S</b>	27,26	11,0	40,5	10,71	10,7	99,8	29,85	7,9	26,6	41,54	9,3	22,4
<b>C</b>	14,85	8,5	57,2	3,61	6,7	184,7	6,12	7,2	117,6	8,93	10,9	121,8

Méd. = Média; DP: Desvio Padrão; CV: Coeficiente de variação; NP: Natural protegido; N: Natural; S: Submerso; C: Ciclo de molhagem e secagem

Observando a Figura 72, nota-se que o ambiente natural protegido, para todas as relações a/c estudadas, é o que apresenta menor incremento na taxa de autocicatrização ao longo do tempo. Esse fato pode estar atrelado à indisponibilidade direta de água, é unânime que a presença de água é fundamental para que o fenômeno ocorra, seja a autocicatrização autógena ou autonôma (VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013). Já o ambiente submerso mostra-se como o mais eficiente em todas as relações a/c apresentadas, tendo incrementos na taxa de autocicatrização que chega a mais de 40% para a relação a/c 0,65. Quanto ao ambiente de exposição ciclos não se esperaria uma redução na taxa de autocicatrização, conforme pode-se observar para a relação a/c 0,30, uma vez que este ambiente apresenta disponibilidade de água e ainda por ser uma relação a/c baixa, esperava-se que a incidência maior de grãos anidros auxiliasse no fenômeno da autocicatrização. Acredita-se que o período de submersão adotado no ciclo tenha impactado na taxa de autocicatrização, não sendo tempo suficiente para que a água penetrar nos poros do concreto, desencadeando a hidratação contínua dos grãos de cimento anidro, formação de C-S-H complementar e/ou a lixiviação de compostos para posterior carbonatação. Arndt (2019) em sua pesquisa conclui, também, que para o ambiente de exposição ciclo de molhagem e secagem, o período de imersão dos corpos de prova é importante para o desencadeamento da autocicatrização. O autor sugere que o tempo de submersão e de secagem sejam proporcionais, uma vez que a colmatação autógena é facilitada pela formação do carbonato de cálcio insolúvel, caso ocorra a carbonatação, sendo este formado a partir do hidróxido de cálcio do cimento solubilizado e lixiviado (NEVILLE, 2016)

Figura 72: Taxa de autocatrização para abertura de fissura aos 28 dias, diferentes relações água/cimento e ambientes de exposição



NP: Natural protegido; N: Natural; S: Submerso; C: Ciclo de molhagem e secagem

Fonte: própria da autora

A Tabela 26 mostra a média da taxa de autocicatrização, desvio padrão e coeficiente de variação para a abertura de fissura aos 91 dias, na idade de acompanhamento de 168 dias, para os diferentes ambientes de exposição analisados.

Tabela 26: Taxa de autocicatrização para abertura de fissura aos 91 dias, diferentes relações água/cimento e ambientes de exposição na idade de 168 dias.

<b>Ambiente de exposição</b>	<b>0,3</b>			<b>0,4</b>			<b>0,5</b>			<b>0,65</b>		
	<b>Média (%)</b>	<b>DP (%)</b>	<b>CV (%)</b>	<b>Média (%)</b>	<b>DP (%)</b>	<b>CV (%)</b>	<b>Média (%)</b>	<b>DP (%)</b>	<b>CV (%)</b>	<b>Média (%)</b>	<b>DP (%)</b>	<b>CV (%)</b>
<b>NP</b>	-3,86	2,2	57,5	-2,51	2,8	112,1	-2,35	5,4	231,6	-5,15	0,8	16,3
<b>N</b>	-1,10	5,1	460,8	5,23	4,5	85,9	10,00	11,2	112,4	9,51	2,2	22,7
<b>S</b>	7,58	6,4	84,4	20,53	13,4	65,2	9,00	5,0	55,4	9,24	7,8	84,9
<b>C</b>	22,84	27,1	118,5	17,76	12,9	72,8	19,31	11,2	58,1	-0,11	4,6	433,8

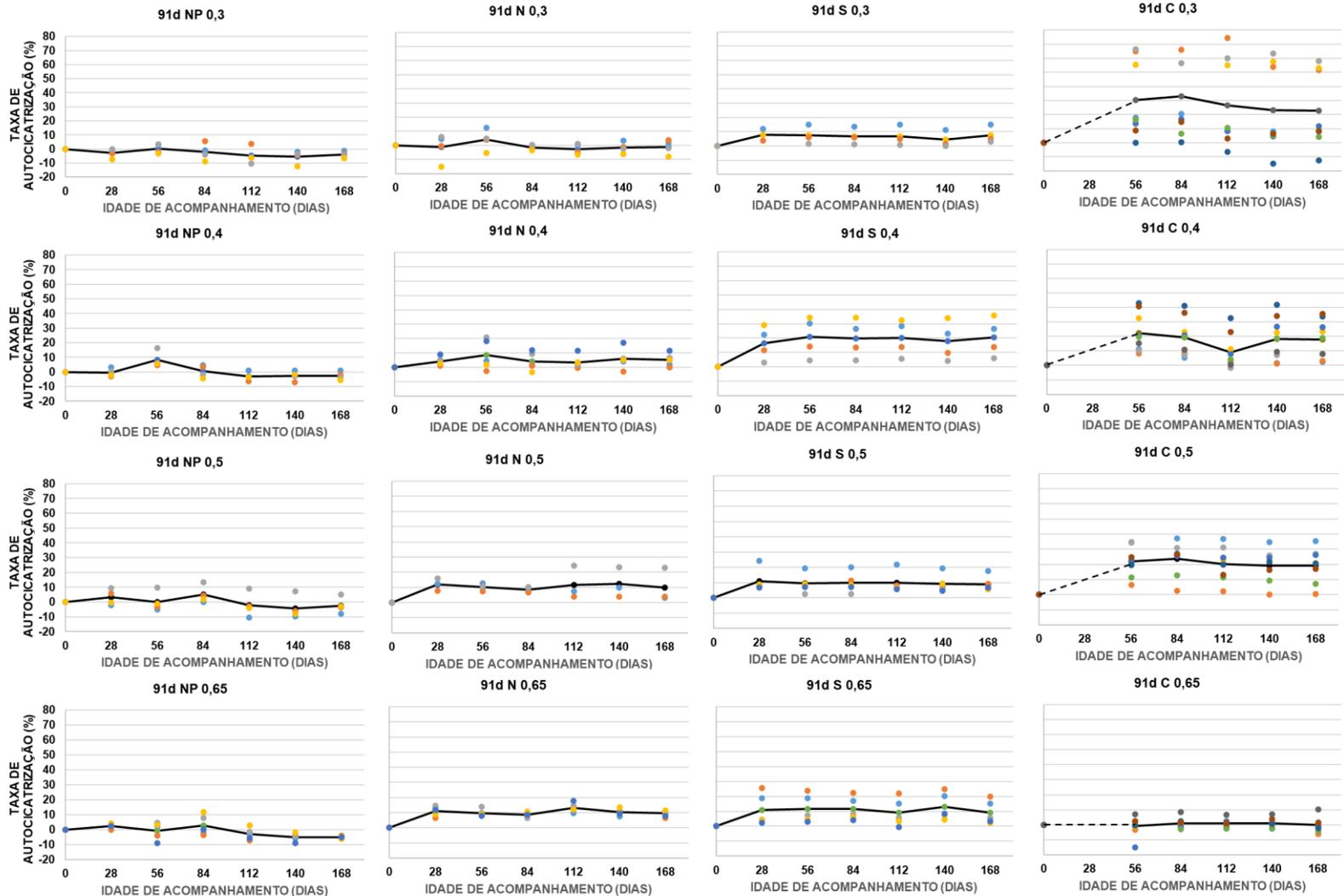
NP: Natural protegido; N: Natural; S: Submerso; C: Ciclo de molhagem e secagem; DP: desvio Padrão; CV: coeficiente de variação

Analisando a Figura 73, é possível verificar que para relação a/c 0,30, quanto aos ambientes natural e natural protegido, pequenas oscilações quanto à taxa de autocicatrização ao longo do tempo foram apresentadas, o que pode decorrer principalmente da umidade interna dos concretos variando em função do tipo de exposição. O ambiente submerso é o que apresenta uma maior linearidade, sendo possível notar incremento na taxa de autocicatrização já aos 28 dias após a abertura da fissura, se mantendo praticamente estável. Para a relação a/c 0,40, observa-se também o mesmo comportamento já citado para os ambientes de exposição natural e natural protegido. Em todos os ambientes de exposição, há um incremento na taxa de autocicatrização ao longo do tempo.

As relações a/c 0,50 e 0,65 apresentam praticamente o mesmo comportamento. Para o ambiente de exposição natural protegido observa-se um incremento inicial na taxa de autocicatrização pouco expressivo e oscilações ao longo do tempo. Para os ambientes natural e submerso, também se observa um aumento na taxa de autocicatrização nas primeiras idades de exposição e após 28 dias observa-se uma linearidade nos resultados.

O ambiente de exposição ciclo, apresenta os melhores resultados quanto a taxa de autocicatrização, em praticamente todos as relações a/c, comportamento que não se observou para as fissuras geradas aos 28 dias.

Figura 73: Taxa de autocatrização para abertura de fissura aos 91 dias, diferentes relações água/cimento e ambientes de exposição



NP: Natural protegido; N: Natural; S: Submerso; C: Ciclo de molhagem e secagem

Fonte: própria da autora

Nota-se que com o passar do tempo para a realização da abertura das fissuras, ocorre uma redução na variabilidade da taxa de autocicatrização aos 0 dias. Após 112 dias de idade do concreto, visualiza-se em praticamente todos os ambientes e relações a/c estudadas uma estabilização quanto à taxa de autocicatrização. Pagé e Spiratos (2000) salientam que a hidratação do cimento Portland pode ser finalizada em decorrência de três situações: a primeira se dá quando não há mais compostos de cimento anidro, a segunda quando a água já não consegue mais atingir os grãos de cimento não hidratados e a terceira quando não há mais água disponível. É possível notar que também que os ambientes que apresentam maior disponibilidade de água, ao longo do tempo de exposição, apresentam melhores resultados.

As fissuras geradas nas idades de 3 e 28 dias apresentaram uma maior taxa de autocicatrização quando comparadas com as geradas aos 91 dias, assim a idade na qual a fissura surge nas estruturas influencia a eficiência do fenômeno de autocicatrização. Os concretos com idades iniciais apresentam um teor relativamente alto de partículas de cimento anidro, que na presença de água favorece a hidratação, sendo considerado o principal mecanismo de cicatrização (NEVILLE, 2002). Segundo Huang (2016), matrizes cimentícias, quando submetidas à fissuração em idades iniciais, apresentam um maior potencial à autocicatrização. Ter Heide e Schlangen (2007) observaram que a capacidade de recuperação da resistência é menor em concretos onde a fissuração aconteceu em idades mais avançadas, quando estabelecida comparação com concretos fissurados nas primeiras idades. Entretanto, Qureshi *et al.* (2018) salientam que embora o potencial de cicatrização autógena reduza com o aumento da idade do concreto, não há estudos que relacionem quantitativamente o estado de hidratação do cimento com seu comportamento intrínseco.

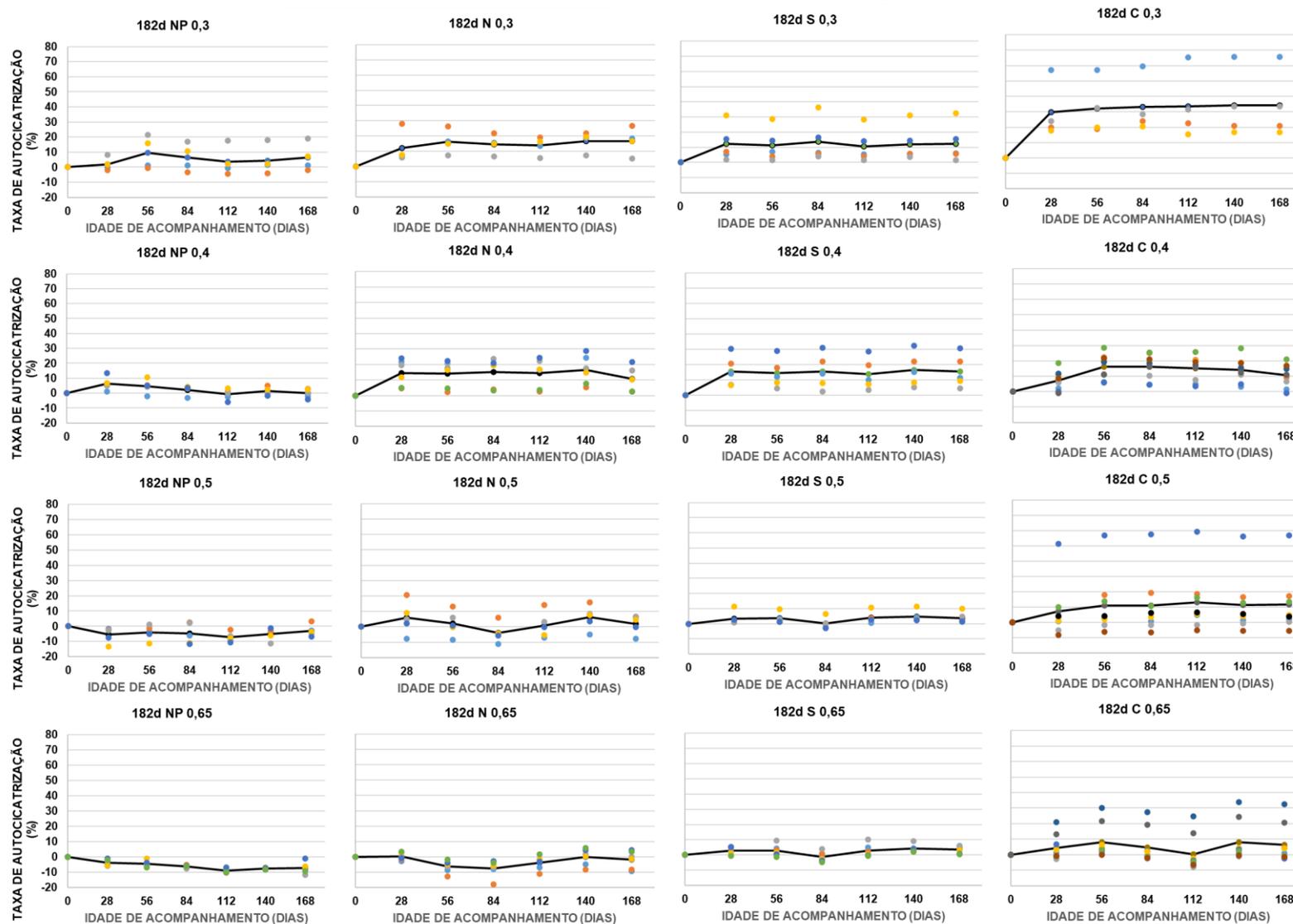
A Tabela 27 e a Figura 74 mostram a média da taxa de autocicatrização, desvio padrão e coeficiente de variação para a abertura de fissura aos 182 dias, na idade de acompanhamento de 168 dias, para os diferentes ambientes de exposição analisados.

Tabela 27: Taxa de autocicatrização para abertura de fissura aos 182 dias, diferentes relações água/cimento e ambientes de exposição na idade final de 168 dias.

Ambiente de exposição	0,3 dias			0,4 dias			0,5 dias			0,65 dias		
	Média (%)	DP (%)	CV (%)	Média (%)	DP (%)	CV (%)	Média (%)	DP (%)	CV (%)	Média (%)	DP (%)	CV (%)
NP	6,39	9,2	143,7	-0,13	3,1	234,9	-2,98	3,8	127,1	-7,35	3,6	49,3
N	16,67	8,9	53,1	10,57	7,5	70,6	1,92	6,1	317,4	-1,94	5,8	299,2
S	12,29	12,4	100,8	15,61	10,6	67,9	3,87	3,7	95,8	3,51	2,4	67,4
C	34,25	34,3	100,0	10,75	7,3	67,9	11,67	19,7	168,7	6,25	12,1	193,3

NP: Natural protegido; N: Natural; S: Submerso; C: Ciclo de molhagem e secagem; DP: desvio Padrão; CV: coeficiente de variação.

Figura 74: Taxa de autocicatrização para abertura de fissura aos 182 dias, diferentes relações água/cimento e ambientes de exposição



NP: Natural protegido; N: Natural; S: Submerso; C: Ciclo de molhagem e secagem

Fonte: própria da autora

Um fato que se observa em praticamente todas as combinações avaliadas, é uma maior taxa de autocicatrização nas primeiras idades e posteriormente uma estabilização ou até mesmo uma redução na propriedade. Gagnés e Argouges (2012) observaram que a cinética da autocicatrização autógena reduz com o passar o tempo, sendo que no primeiro mês após a abertura da fissura se obtém a maior velocidade na cinética de autocicatrização. Segundo os autores, alguns fatores podem contribuir para estes resultados, o primeiro se dá em função da progressão da autocicatrização, ocorrendo uma redução de íons de cálcio presentes na pasta perto da fissura. O segundo fator está atrelado à formação de uma camada mais densa de produtos de autocicatrização, sendo o carbonato de cálcio o principal, influenciando na porosidade da pasta e no volume interno da fissura. Acredita-se que a camada formada possa contribuir para um atraso no transporte por difusão entre pasta e volume interno da fissura. E o último fator observado é a obstrução progressiva da fissura pelos produtos de autocicatrização, o que diminui o transporte de CO<sub>2</sub> externo e água para o interior da fissura.

Para avaliar a significância de cada variável estudada, foi realizada uma análise estatística, que está na Tabela 28, para os resultados de taxa de autocicatrização obtida na idade 168 dias após a exposição das fissuras nos diferentes ambientes.

Tabela 28: ANOVA da taxa de autocicatrização na idade de 168 dias após exposição.

Efeitos	SQ	GL	SQF	Teste F	p	Sig.
Idade de abertura da fissura	2828,02	3	942,67	7,8844	0,000045	S
Ambiente de exposição	10344,81	3	3448,27	28,8408	0,000000	S
a/c	2604,47	3	868,16	7,2611	0,000104	S
Idade de abertura da fissura*Ambiente de exposição	5620,71	9	624,52	5,2234	0,000001	S
Idade de abertura da fissura*a/c	9555,06	9	1061,67	8,8797	0,000000	S
Ambiente de exposição*a/c	4648,30	9	516,48	4,3197	0,000027	S
Idade de abertura da fissura*Ambiente de exposição*a/c	5342,27	27	197,86	1,6549	0,024394	S
Error	34314,39	287	119,56			

SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade (n-1); SQF: média quadrática; Teste F(calculado): valor calculado de F; p: nível de significância; Se p < 5% = efeito significativo.

Na Tabela 28 pode-se verificar que todos os fatores e suas interações foram considerados significativos, logo influenciam na taxa de autocicatrização dos concretos. Frente a isso, a seguir serão avaliados cada um dos efeitos de forma individual.

#### 4.2.2.1 Efeito da idade de abertura da fissura sobre a taxa de autocicatrização

Na Figura 75 é apresentada a influência da idade de abertura da fissura, de forma isolada, sobre a taxa de autocicatrização.

Figura 75: Efeito isolado da idade de abertura da fissuras sobre a taxa de autocicatrização na idade de 168 dias após exposição.



Fonte: própria da autora

Pode-se observar que a taxa de autocicatrização está relacionada de forma direta com a idade de abertura da fissura. Fissuras em concretos mais novos tendem a cicatrizar mais quando comparados a concretos com idades mais avançadas, fato que pode estar correlacionado com o grau de hidratação do cimento. Conforme demonstrado no item 4.1.3 deste trabalho, a quantidade de grãos de cimento anidro reduz com o passar da idade de abertura da fissura, alcançando uma redução de aproximadamente 88%, se comparada a quantidade de anidro aos 3 e 182 dias de idade do concreto.

Realizando o teste de Fisher, é possível concluir que estatisticamente as fissuras geradas nas idades de 3 e 28 dias respondem da mesma forma a taxa de autocicatrização, comportamento também observado para as idades de 91 e 182 dias.

Este resultado corrobora com o apontado por Neville (2016), onde o autor correlaciona o fato à velocidade de precipitação dos produtos hidratados, que reduz de forma contínua ao longo do tempo. Ter Heide e Schlangen (2007) também observaram que a capacidade de recuperação é menor em concretos em que a fissuração aconteceu em idades mais avançadas, quando estabelecida comparação com concretos fissurados nas primeiras idades. Para Qureshi (2019), a capacidade de autocicatrização autógena dos materiais cimentícios está diretamente relacionada à idade da mistura quando da formação da fissura, sendo que o fator idade é quantitativamente correlacionado com o grau de hidratação de materiais cimentícios. Segundo Shim *et al.* (2015), o controle sobre a porosidade e o grau de hidratação do cimento pela água são os principais fatores para a incidência do fenômeno de autocicatrização nas matrizes cimentícias.

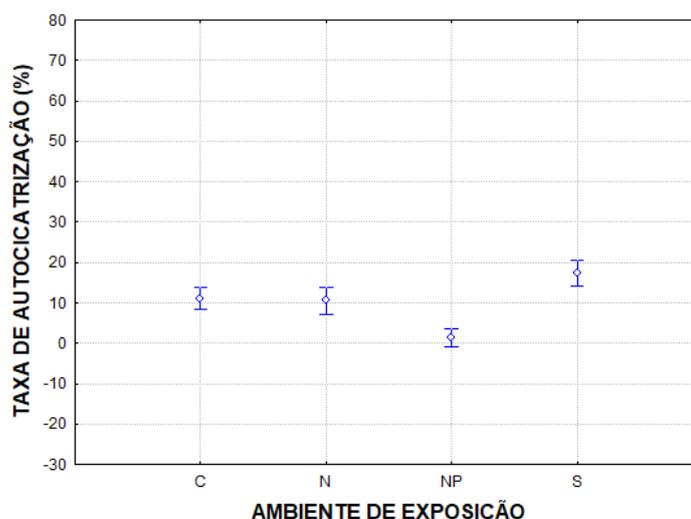
#### 4.2.2.2 Efeito do ambiente de exposição sobre a taxa de autocicatrização

Na Figura 76 é apresentada a influência do ambiente de exposição dos concretos, de forma isolada, sobre a taxa de autocicatrização.

Nota-se que entre os 4 ambientes de exposição avaliados, o que menos favoreceu o fenômeno da autocicatrização foi o natural protegido. Os ambientes natural e ciclos apresentaram praticamente a mesma capacidade de cicatrização. Já o ambiente submerso foi o que respondeu melhor.

Avaliando através do teste de Fisher é possível afirmar que o ambiente natural e o ciclo de molhagem e secagem são estatisticamente iguais, quanto à influência sobre a taxa de autocicatrização.

Figura 76: Efeito isolado do ambiente de exposição dos concretos sobre a taxa de autocicatrização na idade de 168 dias após exposição.



Fonte: própria da autora

Segundo Van Tittelboom e De Belie (2013), a presença de água é fundamental para que o fenômeno ocorra. Os resultados obtidos neste trabalho vão ao encontro com o estudo realizado Roig – Flores *et al.* (2015), cujos pesquisadores concluíram que concretos que foram mantidos em ambiente de exposição imersos em água tiveram uma taxa de cicatrização maior, seguido pelos concretos que ficaram em contato com a água, câmara úmida e a menor taxa foi apresentada pelo exemplar exposto ao ar. Corrobora também com os resultados encontrados por Cueva *et al.* (2018), onde os autores observaram que as fissuras que foram expostas a ambientes com presença constante ou parcial de água apresentaram maior capacidade de desenvolvimento da autocicatrização. Concordando também com os apontamentos realizados por Cuenca e Serne (2021) avaliaram a autocicatrização autógena

de concretos reforçados com fibra e observaram as taxas de autocicatrização foram melhores para a condição imersão em água do que a exposição em câmara úmida.

Estes apontamentos ajudam a compreender a incidência da cicatrização no ambiente natural, pois ele recebe água durante as precipitações. Herbert e Li (2012), Herbert e Li (2013) e Lauch *et al.* (2020) salientam que a realização da exposição de concretos em ambientes naturais, com a incidência de insolação e precipitação de forma direta, não impede a matriz de autocicatizar-se. Há pouca literatura que trata sobre a exposição das matrizes cimentícias em ambientes naturais.

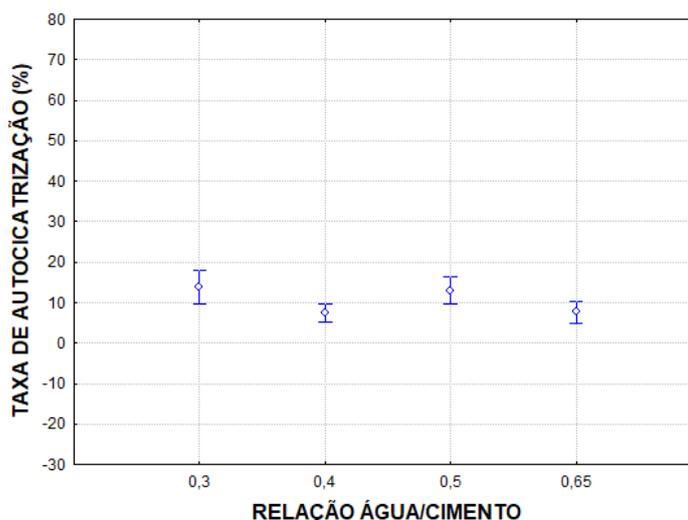
Entretanto, o estudo realizado por Sisomphon *et al.* (2013) observou que o ciclo úmido e seco (12h/12h) foi o que apresentou melhor resultado, quando comparado com as amostras que foram expostas ao ar.

#### 4.2.2.3 Efeito da relação água/cimento sobre a taxa de autocicatrização

Na Figura 77 é apresentada a influência da relação água/cimento dos concretos, de forma isolada, sobre a taxa de autocicatrização.

Esperava-se uma uniformidade da influência da relação a/c sobre o fenômeno da autocicatrização.

Figura 77: Efeito isolado da relação água/cimento dos concretos sobre a taxa de autocicatrização na idade de 168 dias após exposição.



Fonte: própria da autora

Van Tittelboom e De Belie (2013) descrevem que uma forma de incidência da autocicatrização autógena se dá a partir da hidratação contínua dos grãos de cimento anidro. Conforme apontado no item 4.1.3 deste trabalho, que aborda uma estimativa quanto ao grau de hidratação dos concretos, observa-se que em todas as relações a/c, avaliadas nesta

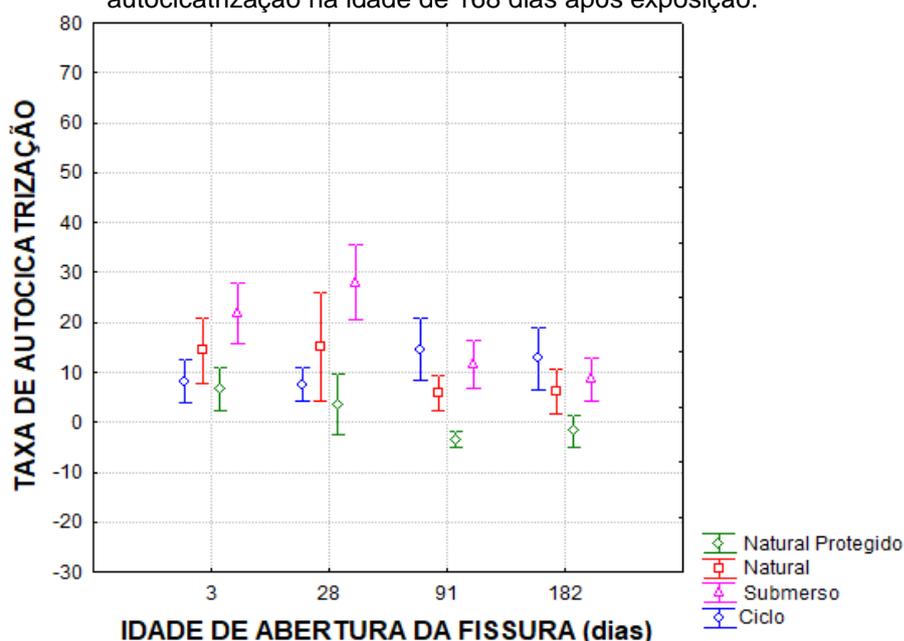
pesquisa, é possível encontrar cimento não hidratados o que poderia contribuir para a cicatrização. Também observou-se que o incremento da relação a/c contribui para a redução dos grãos anidros e, conseqüentemente a redução na taxa de autocicatrização. Segundo Shim *et al.* (2015), o controle sobre a porosidade e o grau de hidratação do cimento pela água são os principais fatores para a incidência do fenômeno de autocicatrização nas matrizes cimentícias.

Portanto, existe um balanço entre a quantidade de grãos anidros disponíveis para a autocicatrização (maior em relações a/c menores) e o acesso de água através da fissura e da porosidade capilar do concreto (maior em relações a/c menores), o que pode explicar o comportamento visualizado na Figura 77.

#### 4.2.2.4 Efeito da interação de segunda ordem entre Idade de abertura da fissura e ambiente de exposição sobre a taxa de autocicatrização

A Figura 78 mostra a influência exercida pela idade de abertura da fissura e do ambiente de exposição dos concretos frente à taxa de autocicatrização.

Figura 78: Influência da idade de abertura da fissura e ambiente de exposição sobre a taxa de autocicatrização na idade de 168 dias após exposição.



Fonte: própria da autora

Analisando os resultados da interação observa-se que não há um comportamento tão bem definido, fato que pode estar atrelado à alta variabilidade obtida. Pode-se afirmar que o ambiente natural protegido apresenta a menor possibilidade de desenvolvimento de

cicatrização e a capacidade reduz quando as fissuras são geradas em idades mais avançadas.

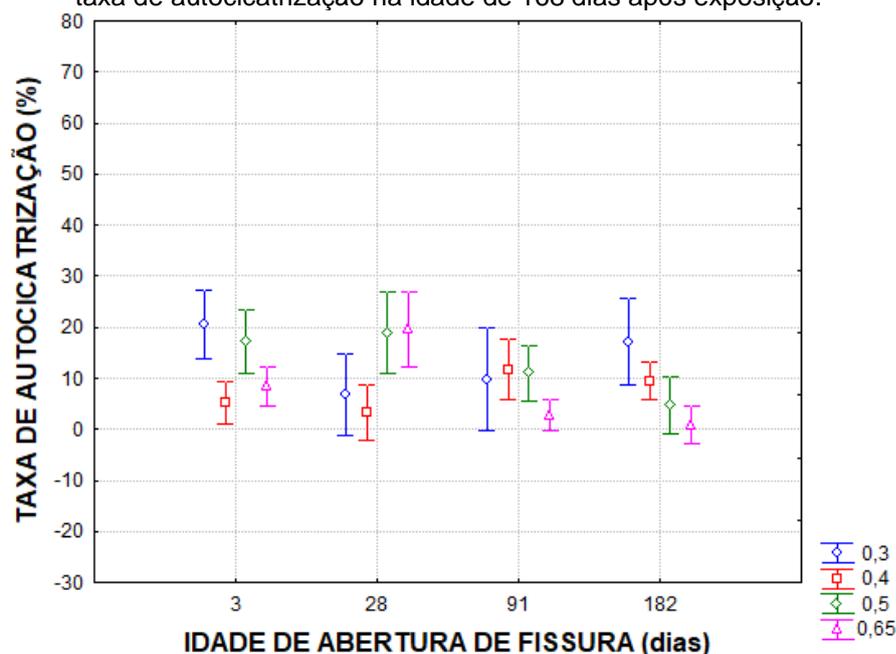
O ambiente natural também apresenta redução proporcional da autocicatrização para fissuras abertas tardiamente. Já os ambientes ciclo e submerso apresentam comportamento inverso aos demais.

Analisando através do teste de Fisher, é possível afirmar que nas idades de 3 e 28 dias, os ambientes de exposição ciclo de molhagem e secagem e natural protegidos são estatisticamente iguais, mas diferente dos ambientes natural e submerso, que são iguais entre si ( $S = N \neq C$  e NP). Assim, o mecanismo que predomina é a hidratação dos grãos anidros, pois ainda há água livre na estrutura interna do concreto e, proporcionalmente, tem pouca pasta hidratada e, conseqüentemente, pouco  $\text{Ca(OH)}_2$  para ser lixiviado e carbonatado. Portanto, a água do ambiente de exposição não é imprescindível. Para as idades de 91 e 182 dias, os ambientes de exposição submerso, natural e ciclo são estatisticamente iguais entre si e diferentes do ambiente natural protegido ( $S = N = C \neq \text{NP}$ ), assim o mecanismo que predomina é a formação de  $\text{CaCO}_3$ , proveniente da lixiviação do hidróxido de cálcio e para isso é necessária a presença de água do ambiente de exposição.

#### 4.2.2.5 Efeito da interação de segunda ordem entre Idade de abertura da fissura e relação água/cimento sobre a taxa de autocicatrização

Na Figura 79 está demonstrada a influência exercida pela idade de abertura da fissura e da relação água/cimento dos concretos frente à taxa de autocicatrização. Analisando, estatisticamente, através do teste de Fisher, é possível afirmar que para fissuras geradas na idade de 3 dias, o comportamento das relações 0,3 e 0,5 são iguais, assim como 0,4 e 0,65. Para a idade de 28 dias, observa-se uma igualdade entre as relações a/c 0,3 e 0,4, bem como 0,5 e 0,65. Na idade de 91 dias, as relações a/c avaliadas não apresentam diferenças significativas.

Figura 79: Efeito da interação entre a idade de abertura da fissura e relação água/cimento sobre a taxa de autocicatrização na idade de 168 dias após exposição.



Fonte: própria da autora

Observa-se que não há uma tendência nos resultados obtidos quanto à taxa de autocicatrização para as fissuras abertas nas idades de 3, 28 e 91 dias, mas para a idade de 182 dias nota-se que a relação água/cimento influencia mais claramente a capacidade de cicatrizar da matriz. Sabe-se que maiores as relações a/c, proporcionam menor cicatrização, uma vez que a quantidade de grãos anidros reduz, se obtém uma menor quantidade de pasta hidratada e a quantidade de  $\text{Ca(OH)}_2$  para lixiviar e carbonatar, também reduz, conforme demonstrado no item 4.1.3 deste trabalho.

Quanto à inconsistência nos resultados, para as idades de 3, 28 e 91 dias, demonstrados na Figura 79, uma hipótese que se levanta está atrelada a espessura das fissuras (ver Figura 66), uma vez que a faixa de espessura das fissuras analisadas é ampla (90 - 400  $\mu\text{m}$ ). De acordo com Yang *et al.* (2009), em fissuras com espessuras menores que 150  $\mu\text{m}$  é notável a ocorrência da autocicatrização. Reinhardt e Joss (2003) avaliaram a influência da espessura da fissura, analisando uma faixa entre 50 a 200  $\mu\text{m}$ , e concluíram que fissuras menores apresentam uma autocicatrização mais rápida do que fissuras mais largas. Sisomphon e Çopuroglu (2011) também concluíram que fissuras menores que 200  $\mu\text{m}$  cicatrizavam mais rápido quando comparadas as fissuras entre 200 e 400  $\mu\text{m}$ .

Entretanto, precisa-se analisar que a taxa de autocicatrização está sendo avaliada através do ensaio de velocidade de propagação de ondas, o que reflete a recuperação interna da matriz. Segundo Roig-Flores *et al.* (2015), a geometria interna da fissura, ao longo da sua profundidade, é um fator que deve ser verificado, uma vez que trechos mais estreitos da

fissura tendem a colmatar com produtos de autocicatrização mais rapidamente do que pontos com espessura maior. Desta forma, quando há uma fissura não selada, as ondas percorrem, resultando em um aumento do tempo de transmissão, entretanto, quando a fissura está fechada ou parcialmente obstruída, as ondas tendem a se propagar em tempos reduzidos (ÇOPUROĞLU *et al.*, 2013).

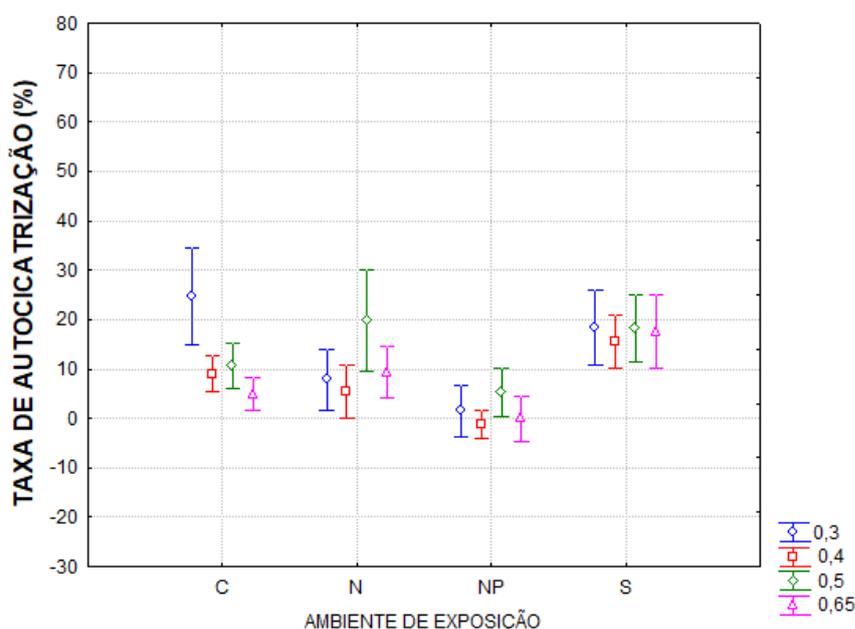
Outro fator que pode estar influenciando é o material resultante da autocicatrização, de acordo com Tomczak *et al.* (2020). Quando o preenchimento da fissura se der com C-S-H fibroso, a mudança resultante no ensaio de velocidade de propagação de ondas pode ser menos perceptível do que quando comparado com o selamento com carbonato de cálcio, logo identificar o componente deste fechamento é fundamental para avaliar o fenômeno.

#### 4.2.2.6 Efeito da interação de segunda ordem entre ambiente de exposição e relação água/cimento sobre a taxa de autocicatrização

Na Figura 80 observa-se a influência exercida pela interação entre ambiente de exposição e relação água/cimento dos concretos sobre a taxa de autocicatrização.

É possível observar que a influência do ambiente de exposição em função da relação a/c só foi significativa para os ambientes ciclo e natural, sendo que no ciclo a menor relação a/c resultou em maior cicatrização, enquanto no ambiente natural o concreto com relação a/c de 0,5 apresentou melhor desempenho, fato que não era esperado, mas que pode estar relacionado com a menor espessura média apresentada por esta combinação.

Figura 80: Efeito da interação entre ambiente de exposição e relação água/cimento sobre a taxa de autocicatrização na idade de 168 dias após exposição.



Fonte: própria da autora

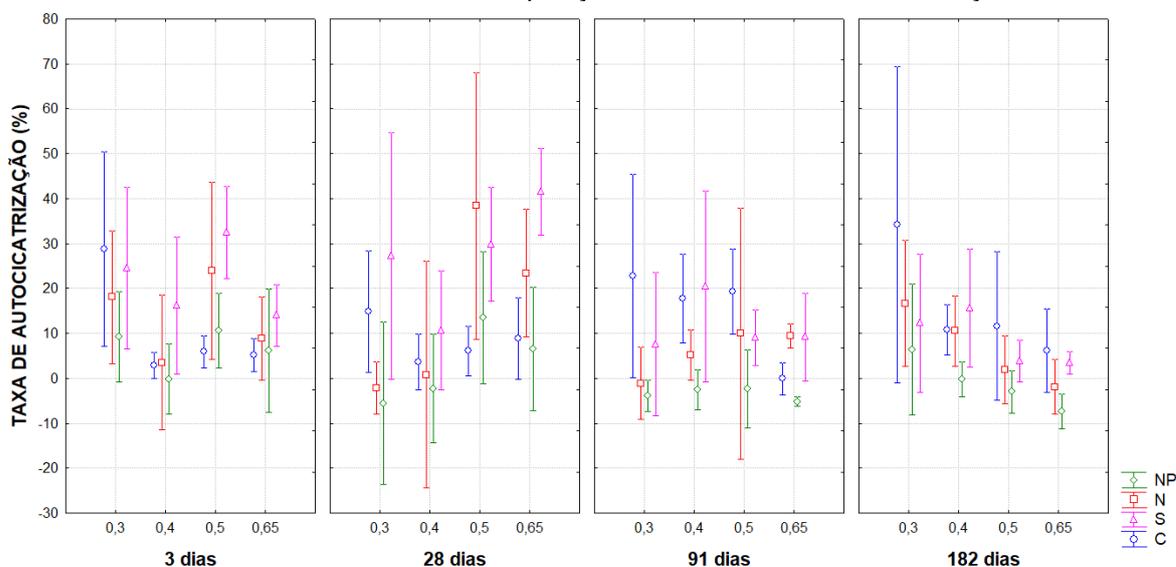
Pode-se observar que o ambiente natural protegido apresenta a menor taxa de autocicatrização para todas as a/c avaliadas, fato este que corrobora com os estudos realizados por Li e Yang (2007), Yang *et al.* (2009), Roig-Flores *et al.* (2015) e Cueca *et al.* (2018). O fenômeno da autocicatrização autógena é iniciado pela entrada da água nas fissuras, que pode ocorrer pelas condições de exposição à umidade, seja pela umidade relativa do ar, pela exposição às águas das chuvas, tipicamente observadas em estruturas desabrigadas, ou pela total saturação nas estruturas submersas em água, tendo influência sobre a resposta do material em se autocicatrizarem.

Entretanto apenas a umidade relativa do ar não se mostrou suficiente à ocorrência da cicatrização. Conforme apontado na Figura 47, que mostra a umidade relativa na cidade de Porto Alegre/RS durante o período de realização dos estudos, observa-se que a UR manteve-se entre 60 e 80%, chegando a valores abaixo de 40%.

#### 4.2.2.7 Efeito da interação de terceira ordem entre idade de abertura da fissura, ambiente de exposição e relação água/cimento sobre a taxa de autocicatrização

Na Figura 81, verifica-se a influência exercida pela interação entre idade de abertura da fissura, relação água/cimento e ambiente de exposição dos concretos sobre a taxa de autocicatrização.

Figura 81: Efeito da interação entre a idade de abertura da fissura, a relação água/cimento dos concretos e o ambiente de exposição sobre a taxa de autocicatrização



Fonte: própria da autora

Quando se avalia a interação entre todas as variáveis controladas, observa-se um desvio padrão elevado, que pode ser causado pela diferença da espessura média das fissuras, por

sua geometria e pelos produtos de autocicatrização, que irão influenciar toda a cadeia decorrente da autocicatrização.

Sabe-se que fissuras menores tendem a apresentar uma autocicatrização mais rápida (REINHARDT E JOSS, 2003; SISOMPHON E ÇOPUROGLU, 2011).

A geometria interna da fissura, ao longo da sua profundidade, é um fator que vai influenciar na verificação da taxa de autocicatrização, calculada através do ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, uma vez que trechos mais estreitos da fissura tendem a desenvolver produtos de autocicatrização mais rápidos do que pontos com espessura maior (ROIG-FLORES *et al.*, 2015).

De acordo com Tomczak *et al.* (2020), a densidade do produto de autocicatrização formado também irá impactar, se preenchimento da fissura ocorrer com C-S-H fibroso, a mudança resultante no ensaio de velocidade de propagação de ondas pode ser menos perceptível do que quando comparado com o selamento com carbonato de cálcio, logo identificar o componente deste fechamento é fundamental para avaliar o fenômeno.

Segundo Ahn *et al.* (2017), o ensaio de medição da velocidade de pulso é o mais empregado como técnica para avaliação, entretanto, o fechamento parcial da fissura e as condições de umidade podem influenciar nos resultados obtidos neste ensaio.

Ferrara *et al.* (2018) salientam que as técnicas ultrassônicas têm sido amplamente utilizadas ao longo do tempo para o mapeamento de falhas internas, fissuras e vazios nas matrizes cimentícias, ressalta ainda a eficiência da técnica na caracterização do selamento de fissuras e recuperação do desempenho oriundos da autocicatrização.

#### 4.2.3 Microscopia ótica – Avaliação qualitativa

A seguir serão apresentadas as imagens referentes ao acompanhamento das fissuras, cujas mesmas foram geradas a partir de microscopia ótica. Serão exibidas as imagens relacionadas às idades de 0, 28 e 168 dias após a abertura da fissura. Para que seja possível comparar o efeito dos ambientes de exposição, as imagens foram agrupadas em quadros em função da relação a/c e idade de abertura das fissuras. Cada imagem é composta por oito intervalos, conforme discutido na metodologia do ensaio.

O Quadro 4 mostra o acompanhamento realizado para a relação a/c 0,30 com abertura de fissuras aos 3 dias, para os diferentes ambientes de exposição, nas idades de 0, 28 e 168 dias, respectivamente. Pode-se observar que no ambiente de exposição natural protegido, na

idade de 168 dias, há a formação de um produto nos intervalos 2, 3 e 4, o qual contribuiu para o fechamento da fissura.

Quadro 4: Acompanhamento da fissura por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias do CPlI F, a/c 0,30 para 3 dias de idade de abertura de fissuras e diferentes ambientes de exposição

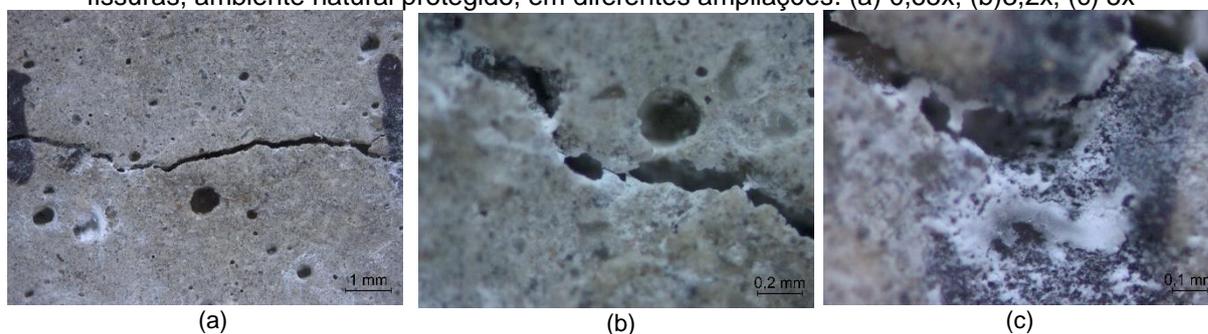
AMBIENTE DE EXPOSIÇÃO		1	2	3	4	5	6	7	8
NATURAL PROTEGIDO	0 dias								
	28 dias								
	168 dias								
NATURAL	0 dias								
	28 dias								
	168 dias								
SUBMERSO	0 dias								
	28 dias								
	168 dias								
CICLO DE SECAGEM E	0 dias								



Fonte: própria da autora

No ambiente natural protegido, visivelmente, é possível verificar a formação de produtos no intervalo 1, já na idade de 28 dias, e aos 168 dias, observa-se que esses produtos se intensificam, estendendo-se até o intervalo 4. No intervalo 7 e 8, é possível observar a formação de uma camada branca sobre a superfície da fissura. A Figura 82 mostra a ampliação do intervalo 7, sendo possível verificar a deposição de material.

Figura 82: Imagem de microscopia ótica do intervalo 7, a/c 0,30 para 3 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente natural protegido, em diferentes ampliações. (a) 0,65x; (b) 3,2x; (c) 5x

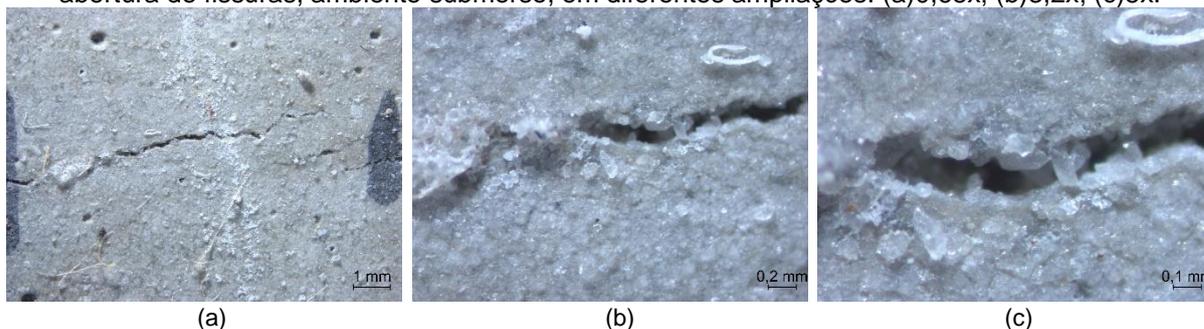


Fonte: própria da autora

Quanto ao ambiente natural nota-se um selamento na parte 1 da imagem, aos 28 dias, o qual fica mais evidente aos 168 dias. Vale ressaltar, que analisando qualitativamente a largura da fissura ao longo de todo o trecho, verifica-se que a mesma é muito variável, o que pode dificultar a ocorrência do fenômeno de autocatrização. Um fato que chama atenção é a degradação da superfície do corpo de prova ao longo do tempo, com alguns fragmentos soltos na superfície, que podem estar atrelados aos deslocamentos necessários para a realização dos ensaios. Podem também ter sido ocasionados pela ação direta das intempéries. No intervalo 7 e 8 essas observações ficam evidentes.

No ambiente de exposição submerso, observa-se principalmente nas partes de 1 à 4 a deposição de um material de cor clara, na idade de 28 dias, sendo intensificada aos 168 dias. Esse produto formado pode ser oriundo da lixiviação do hidróxido de cálcio e precipitação do  $\text{CaCO}_3$ . A Figura 83 mostra a ampliação de um dos intervalos, onde observa-se claramente a formação de cristais com formato mais alongado tanto na borda quanto no interior da fissura.

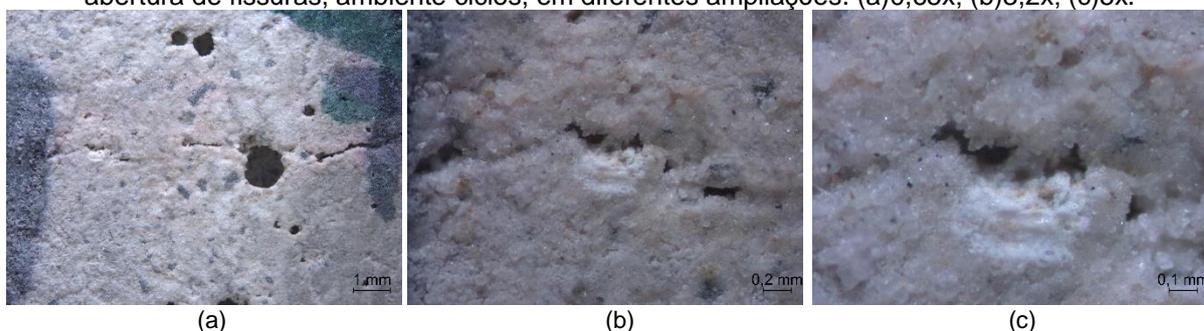
Figura 83: Imagem de microscopia ótica do intervalo 5, a/c 0,30, na idade de 3 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente submerso, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x; (c)5x.



Fonte: própria da autora

Para o ambiente de exposição ciclo de molhagem e secagem, nota-se principalmente nos intervalos de 1 à 3 a deposição de um material de cor clara, já na idade de 28 dias, sendo intensificada aos 168 dias. A Figura 84 mostra ampliações do intervalo 2, onde nota-se a formação de cristais. Diferentemente do observado para o ambiente submerso, não é possível verificar sua morfologia, uma vez que há uma grande quantidade de cristais aglomerados.

Figura 84: Imagem de microscopia ótica do intervalo 2 a/c 0,30, na idade de 3 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente ciclos, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x; (c)5x.



Fonte: própria da autora

Pode-se salientar que qualitativamente, para a relação a/c 0,30 e idade de abertura de fissura aos 3 dias, os ambientes de exposição submerso e ciclo de molhagem e secagem são os que apresentam uma maior concentração de deposição de materiais ao longo dos trechos com menor espessura da fissura.

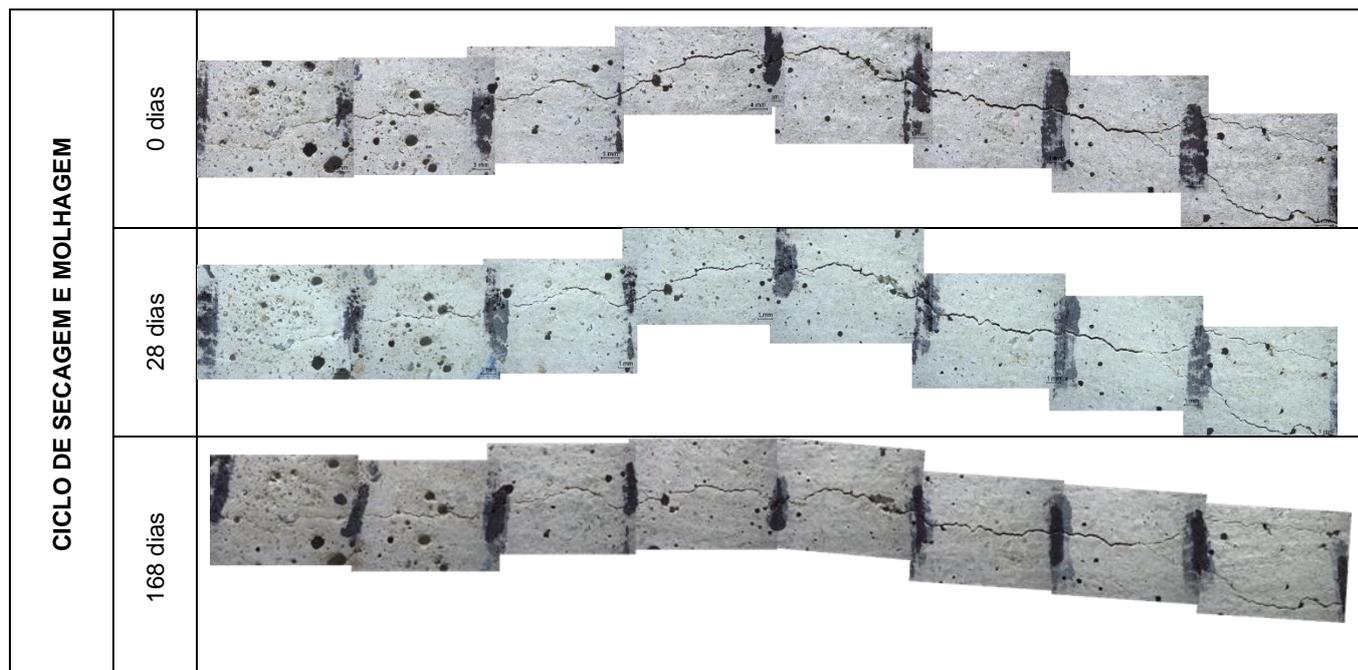
O Quadro 5 apresenta o acompanhamento realizado para a relação a/c 0,40, com abertura de fissuras aos 3 dias, para os diferentes tipos de ambientes de exposição, nas idades de 0, 28 e 168 dias, respectivamente.

Observa-se que para o ambiente de exposição natural protegido não é possível visualmente perceber selamento da fissura ao longo do tempo. Já para o ambiente natural, observa-se, aos 28 dias após a abertura da fissura, nas partes 1 e 2 das imagens, o selamento parcial da mesma. Visualmente não há alteração para a idade de 168 dias.

Para o ambiente de exposição submerso, a partir das imagens é observado, principalmente, nas partes de 1 à 5 e na 7, a formação de deposição de um material na idade de 28 dias e aos 168 dias fica evidente o selamento superficial da fissura.

Quadro 5: Acompanhamento da fissura por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias do CPlI F, a/c 0,40 para 3 dias de idade de abertura de fissuras e diferentes ambientes de exposição

AMBIENTE DE EXPOSIÇÃO		1	2	3	4	5	6	7	8
NATURAL PROTEGIDO	0 dias								
	28 dias								
	168 dias								
NATURAL	0 dias								
	28 dias								
	168 dias								
SUBMERSO	0 dias								
	28 dias								
	168 dias								



Fonte: própria da autora

Pode-se observar que para a relação  $a/c$  0,40, com abertura de fissura aos 3 dias, os ambientes de exposição submerso e ciclo de molhagem e secagem foram os que, visualmente, apresentaram maior possibilidade de selamento superficial da fissura. Fato observado também para a relação  $a/c$  0,30.

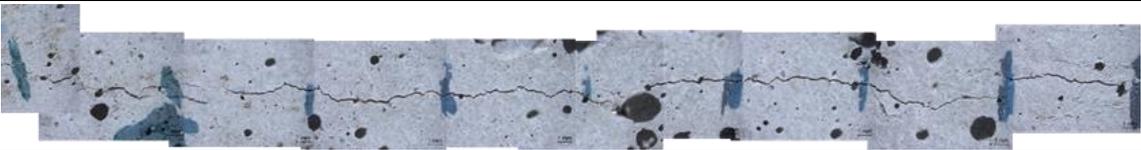
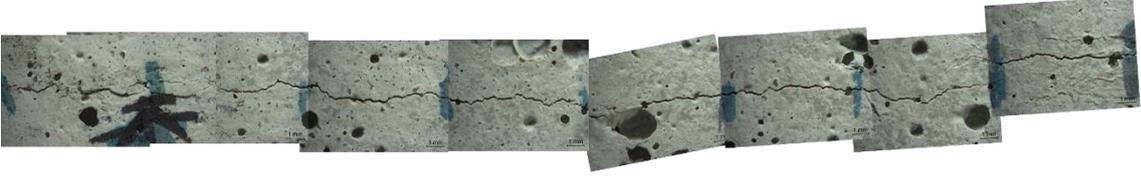
No Quadro 6, é demonstrado o acompanhamento realizado para a relação  $a/c$  0,50, com abertura de fissuras aos 3 dias, para os diferentes tipos de ambiente de exposição, nas idades de 0, 28 e 84 dias, respectivamente.

Os ambientes natural protegido e ciclos não apresentam, visivelmente, a formação de produto que contribua para o selamento da fissura. Entretanto, para o ambiente natural, observa-se o selamento superficial da fissura já aos 28 dias, o que fica evidenciado aos 84 dias.

Para o ambiente submerso observa-se, principalmente na parte 1, a deposição de um material de cor clara, já na idade de 28 dias. Na idade de 84 dias nota-se o selamento nas partes de 1 à 4. Esse produto formado pode ser oriundo da lixiviação do hidróxido de cálcio que está presente na matriz cimentícia.

Quadro 6: Acompanhamento da fissura por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias do CPlI F, a/c 0,50, para 3 dias de idade de abertura de fissuras para diferentes ambientes de exposição

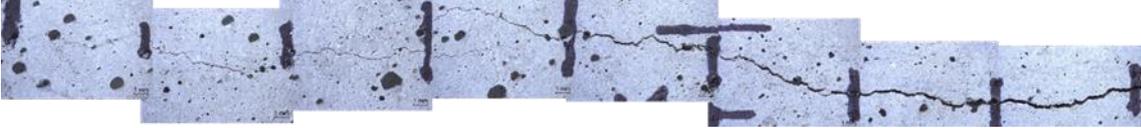
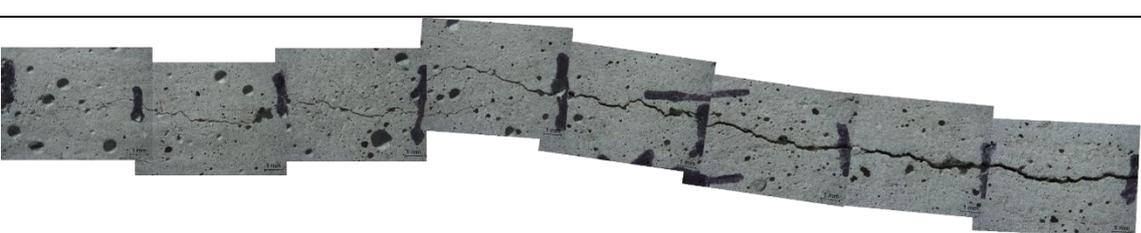
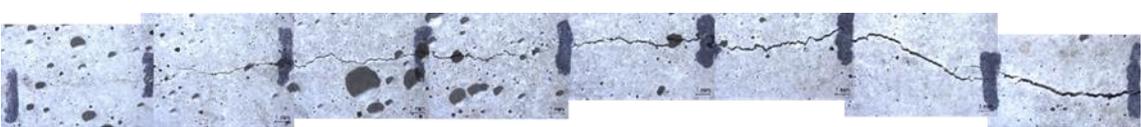
AMBIENTE DE EXPOSIÇÃO		1	2	3	4	5	6	7	8
NATURAL PROTEGIDO	0 dias								
	28 dias								
	168 dias								
NATURAL	0 dias								
	28 dias								
	168 dias								
SUBMERSO	0 dias								
	28 dias								
	168 dias								

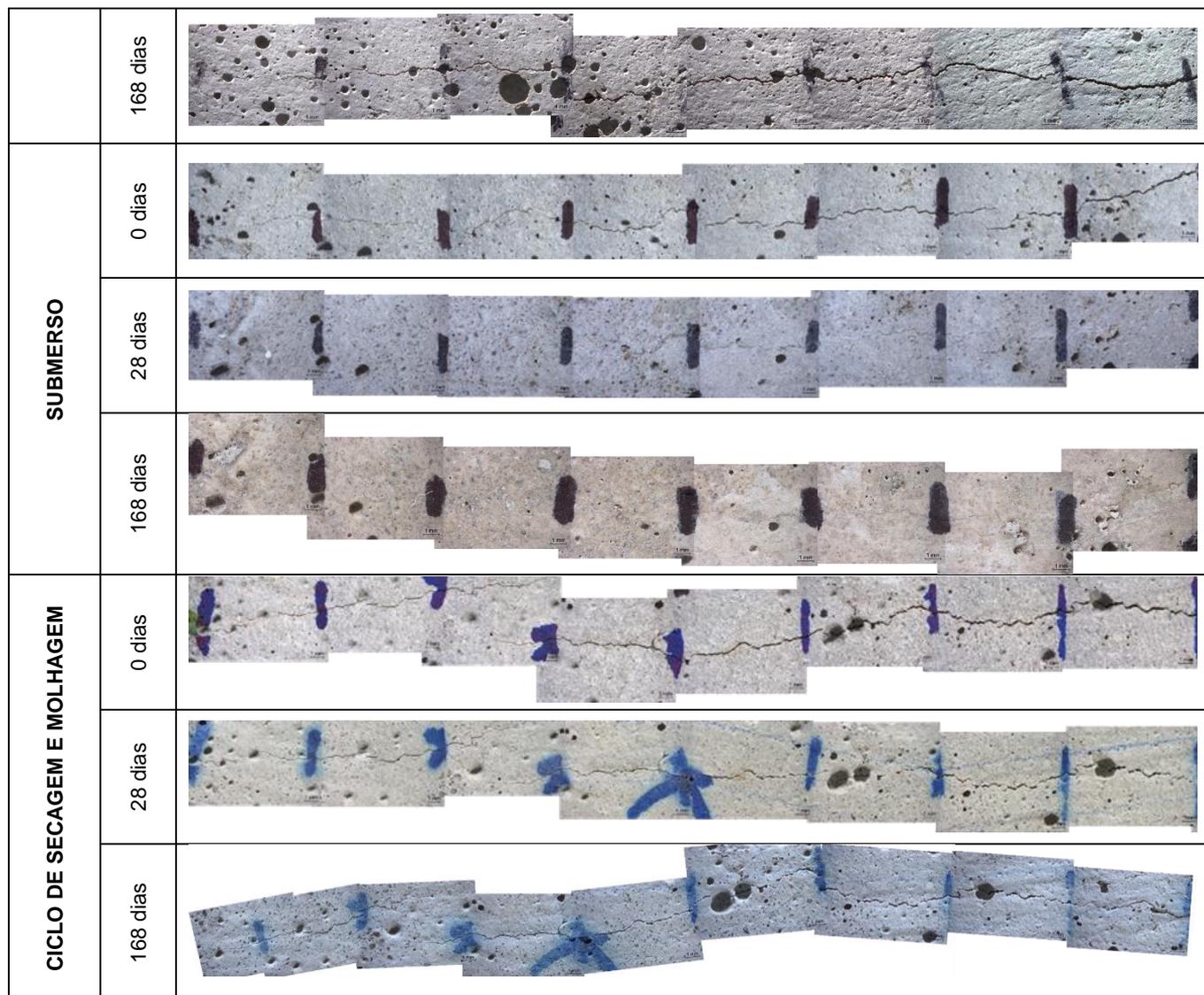
<b>CICLO DE SECAGEM E MOLHAGEM</b>	0 dias	
	28 dias	
	168 dias	

(fonte: própria da autora)

O Quadro 7 apresenta o acompanhamento realizado para a relação a/c 0,65, com abertura de fissuras aos 3 dias, para os diferentes ambientes de exposição, nas idades de 0, 28 e 168 dias, respectivamente, após a abertura da fissura.

Quadro 7: Acompanhamento da fissura por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias do CPlI F, a/c 0,65 para 3 dias de idade de abertura de fissuras para diferentes ambientes de exposição

AMBIENTE DE EXPOSIÇÃO		1	2	3	4	5	6	7	8
<b>NATURAL PROTEGIDO</b>	0 dias								
	28 dias								
	168 dias								
<b>NATURAL</b>	0 dias								
	28 dias								



Fonte: própria da autora

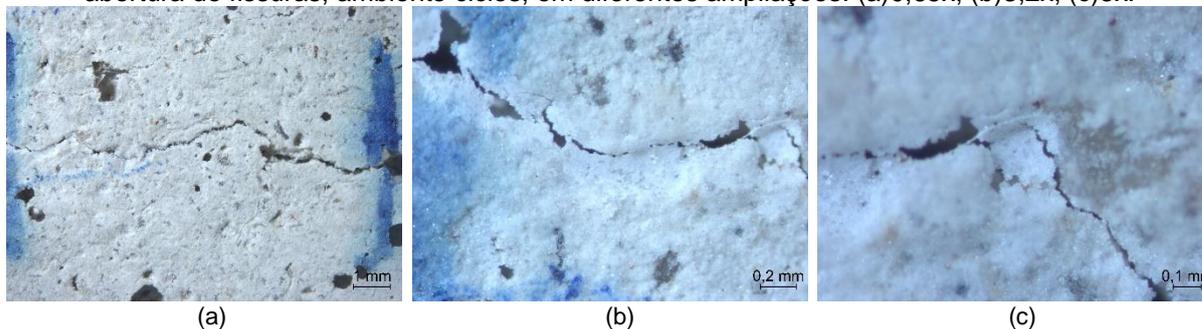
Pode-se observar que no ambiente de exposição natural protegido não há a formação de produtos ao longo da fissura com o decorrer do tempo. Já para o ambiente natural nota-se o selamento inicial da fissura no intervalo 1 aos 28 dias, e aos 168 dias fica evidente esse fechamento superficial.

Quanto ao ambiente submerso é possível verificar que, aos 28 dias, praticamente ao longo de toda a superfície da fissura há a formação de produtos. Aos 168 dias toda a fissura encontra-se selada.

Para ambiente de ciclos, aos 28 dias, nota-se a formação de cristais ao longo da fissura, sem conexão entre si. Já aos 168 dias, o intervalo de 1 à 3 apresenta-se com o selamento superficial e nos demais observa-se ainda a presença de materiais. A Figura 85 mostra as

ampliações do intervalo 7, onde nota-se o selamento de trechos da fissura por um maciço de cristais de cor clara.

Figura 85: Imagem de microscopia ótica do intervalo 7 a/c 0,65, na idade de 3 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente ciclos, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x; (c)5x.



Fonte: Grupo de autocicatrização NORIE/UFRGS

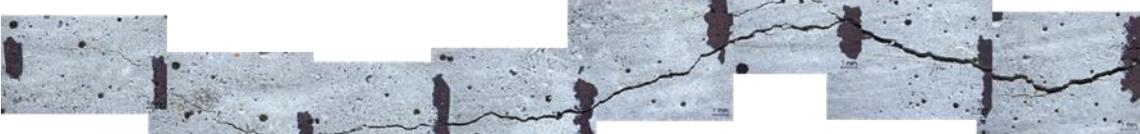
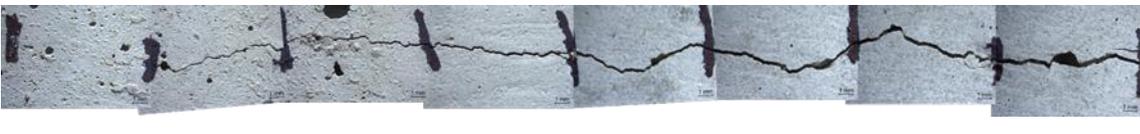
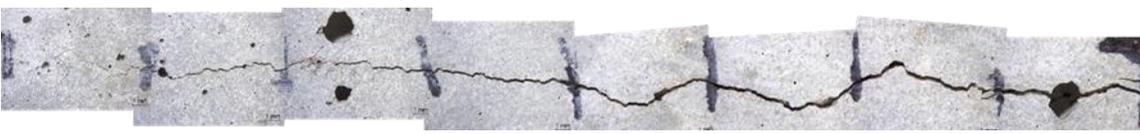
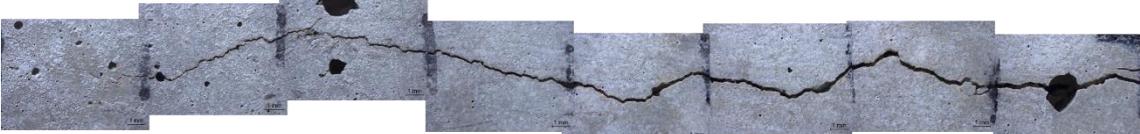
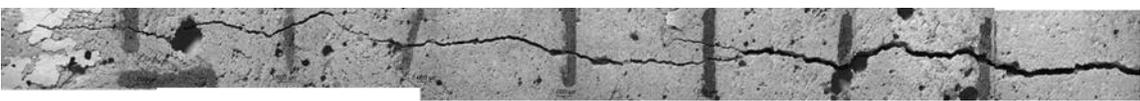
Para a idade de abertura de fissuras aos 3 dias e relação a/c 0,65, os ambientes que apresentaram a formação de produtos que podem contribuir com o fechamento superficial da fissura foram os que possuíam maior disponibilidade de água.

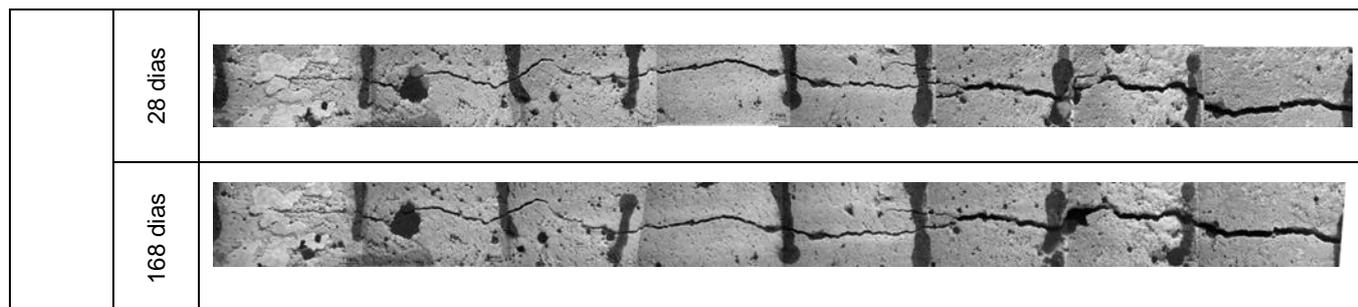
Avaliando a interação entre os ambientes de exposição e relações a/c estudadas, assim como o esperado, o ambiente natural protegido apresentou menor possibilidade de ocorrência de selamento da fissura, pois a umidade relativa do meio ambiente não é suficiente para realizar o fornecimento de água, uma vez que a presença desta é fundamental para que o fenômeno ocorra (VAN TITTELBOOM E DE BELIE, 2013).

Os ambientes submerso e ciclos se mostraram mais eficientes quanto ao selamento da fissura, quando analisados de forma qualitativa. Esses resultados corroboram com os encontrados por Cueva *et al.* (2018), que avaliaram três diferentes tipos de ambientes de exposição (imersos em água, exposto ao ar livre e ciclos úmidos e secos) e obtiveram como resultado que apenas as amostras que permaneceram expostas à água ou parcialmente, e apresentavam largura menor que 300µm, conseguiram um selamento completo.

No Quadro 8, está demonstrado o acompanhamento realizado para a relação a/c 0,30, com abertura de fissuras aos 28 dias, para os diferentes ambientes de exposição, nas idades de 0, 28 e 168 dias, respectivamente, após a abertura da fissura.

Quadro 8: Acompanhamento da fissura por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias do CPlI F, a/c 0,30 para 28 dias de idade de abertura de fissuras para diferentes ambientes de exposição

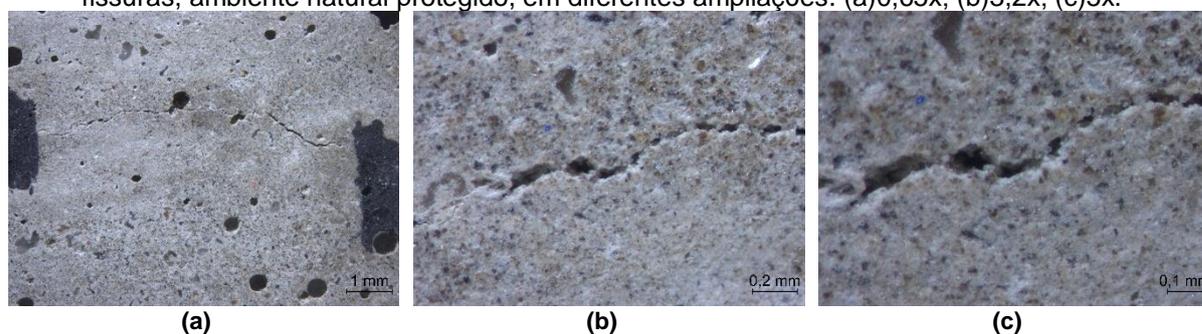
AMBIENTE DE EXPOSIÇÃO		1	2	3	4	5	6	7	8
NATURAL PROTEGIDO	0 dias								
	28 dias								
	168 dias								
NATURAL	0 dias								
	28 dias								
	168 dias								
SUBMERSO	0 dias								
	28 dias								
	168 dias								
CICLO DE SECAGEM	0 dias								



Fonte: própria da autora

Para essas condições, no ambiente natural protegido, pode-se notar a formação do selamento superficial da fissura, no intervalo 1 aos 28 dias, o que se estende a uma parte do intervalo 2 aos 168 dias, sendo que estes intervalos apresentam, visualmente, menor espessura da fissura, conforme observa-se visualmente. A Figura 86 mostra ampliações do intervalo 1, onde é possível verificar a formação de pequenos cristais nas bordas da fissura.

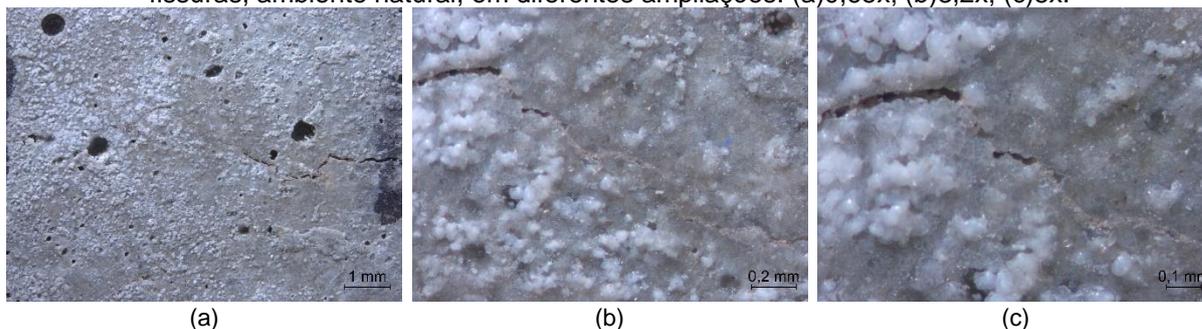
Figura 86: Imagem de microscopia ótica do intervalo 1, a/c 0,30, 28 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente natural protegido, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x; (c)5x.



Fonte: própria da autora

Quanto ao ambiente natural é possível verificar a formação de produtos sobre a superfície do corpo de prova e na fissura, no intervalo 1. Ao longo de toda a superfície do corpo de prova, na idade de 168 dias, nota-se a presença de um material na cor branca. Na Figura 87 são apresentadas ampliações do intervalo 1, evidenciando a presença de cristais aglutinados, tanto na superfície do concreto quanto nas bordas da fissura, o que pode evidenciar a presença de carbonato de cálcio. Em trechos mais estreitos observa-se o selamento completo.

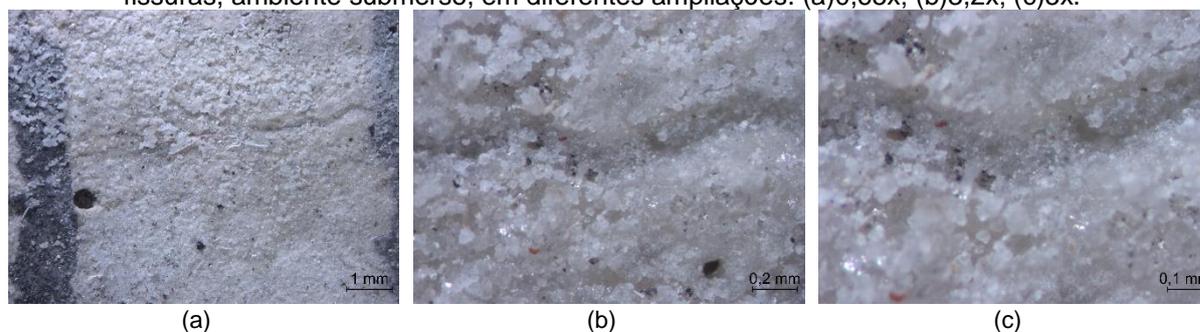
Figura 87: Imagem de microscopia ótica do intervalo 1, a/c 0,30, 28 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente natural, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x; (c)5x.



Fonte: própria da autora

Quanto ao ambiente submerso, é possível visualizar, aos 28 dias, o fechamento da fissura entre os intervalos 1 e 3. Já no intervalo 4 nota-se que também há o processo de fechamento. Aos 168 dias, o intervalo de 1 a 4 encontra-se praticamente todo selado, e na parte 5 nota-se a formação de produtos que podem auxiliar no selamento da fissura. Avaliando as ampliações apresentadas na Figura 88 é possível verificar, visualmente, a formação de cristais com morfologia cúbica.

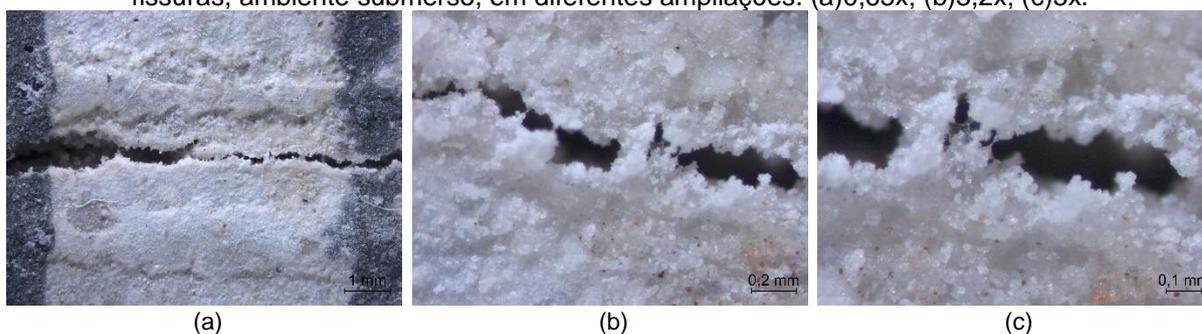
Figura 88: Imagem de microscopia ótica do intervalo 3, a/c 0,30, 28 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente submerso, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x; (c)5x.



Fonte: própria da autora

A Figura 89 mostra ampliações no intervalo 8, onde observa-se uma fissura com espessura maior, e a formação de cristais junto as suas bordas.

Figura 89: Imagem de microscopia ótica do intervalo 8, a/c 0,30, 28 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente submerso, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x; (c)5x.



Fonte: própria da autora

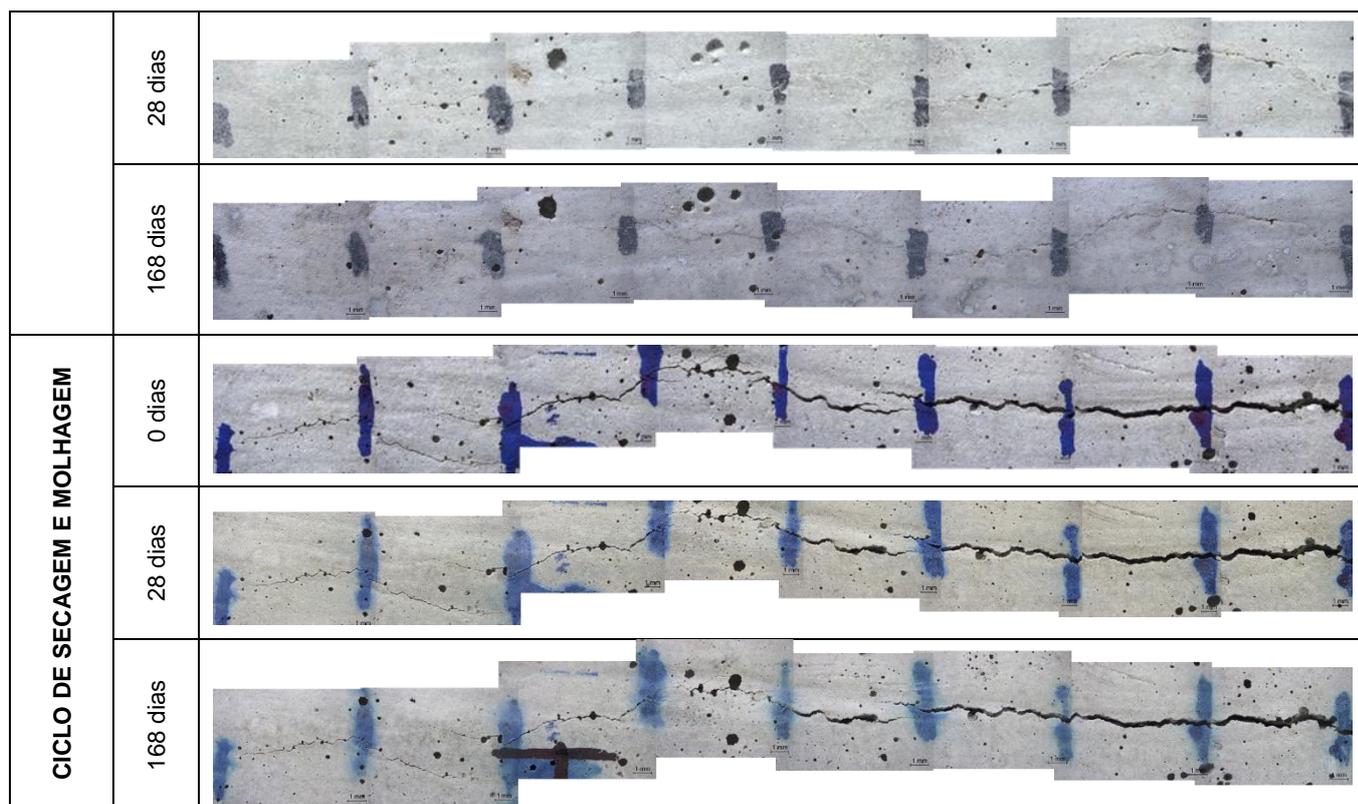
No ambiente ciclo não apresenta, visualmente, a formação de produtos de cristalização que auxiliem no fechamento superficial da fissura, fato que não era esperado.

De uma forma geral, o ambiente submerso é o que apresenta melhores indicativos de selamento superficial da fissura. Outro fato observado está atrelado ao fechamento da fissura sempre da parte menos espessa para a mais larga, com formação de cristais ao longo da borda nos trechos mais largos.

O Quadro 9 mostra o acompanhamento realizado para a relação a/c 0,40, com abertura de fissuras aos 28 dias, para os diferentes ambientes de exposição, nas idades de 0, 28 e 168 dias, respectivamente, após a abertura da fissura.

Quadro 9: Acompanhamento da fissura por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias do CPlI F, a/c 0,40 para 28 dias de idade de abertura de fissuras para diferentes ambientes de exposição

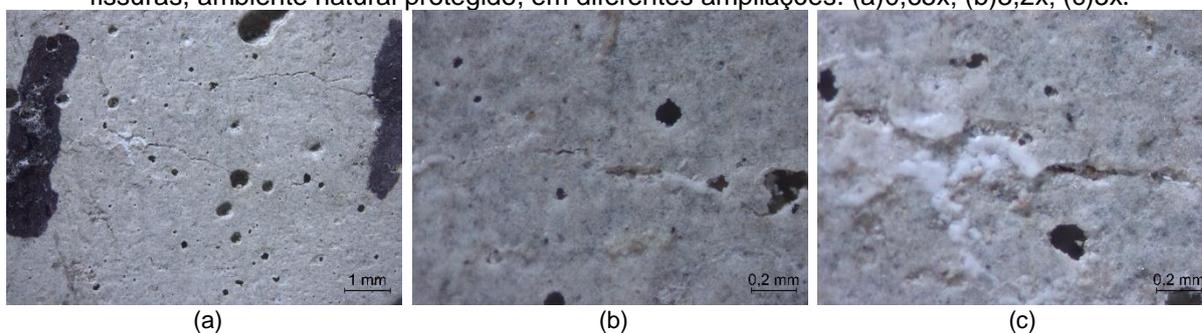
AMBIENTE DE EXPOSIÇÃO		1	2	3	4	5	6	7	8
NATURAL PROTEGIDO	0 dias								
	28 dias								
	168 dias								
NATURAL	0 dias								
	28 dias								
	168 dias								
SUBMERSO	0 dias								



Fonte: própria da autora

O ambiente natural protegido, tanto na idade de 28 como de 168 dias após a abertura da fissura, mostra uma redução na largura da fissura nos intervalos 1-2 e 8. A Figura 90 demonstra ampliações do intervalo 1, onde nota-se a presença de produtos de cor branca, provavelmente oriundos da autocicatrização, em alguns trechos da fissura. Não é possível avaliar visualmente a morfologia dos cristais formados.

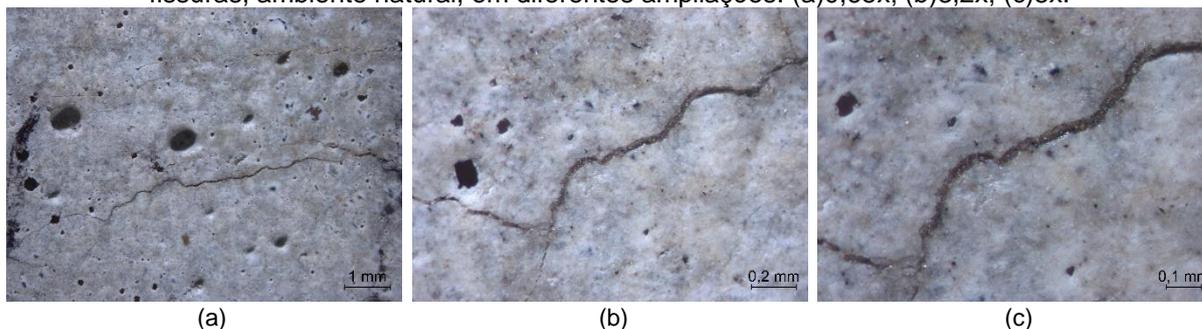
Figura 90: Imagem de microscopia ótica do intervalo 1, a/c 0,40, 28 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente natural protegido, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x; (c)5x.



Fonte: própria da autora

Quanto ao ambiente natural, observa-se que aos 28 dias, na parte 1 da imagem, há formação de deposição na superfície da fissura, fato que aos 168 dias se estende para a parte 2. É possível notar na Figura 91 que o material de selamento formado é vítreo, se diferenciando dos anteriores apresentados.

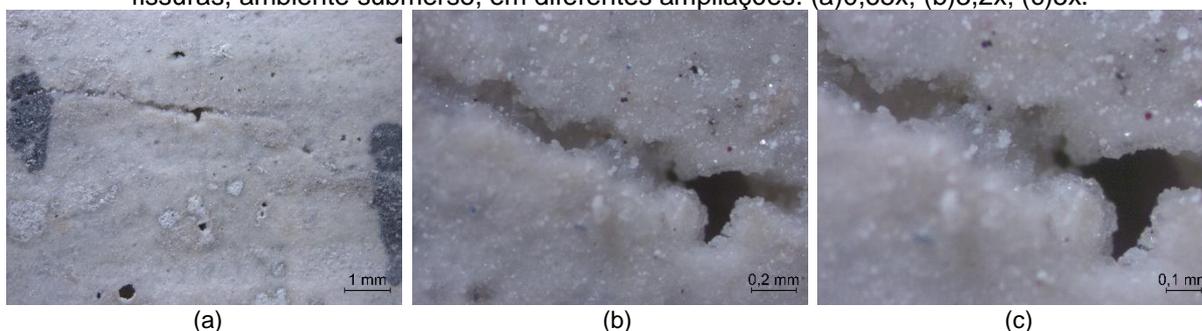
Figura 91: Imagem de microscopia ótica do intervalo 1, a/c 0,40, 28 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente natural, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x; (c)5x.



Fonte: própria da autora

O ambiente submerso na idade de 28 dias se mostra o mais eficiente, quando comparado com os demais, sendo possível observar, ao longo de toda a fissura, a formação de produtos que contribuem para o seu selamento, independente da variação da largura da fissura. A Figura 92 mostra ampliações no intervalo 8, onde observa-se a formação de cristais ao longo das bordas da fissura.

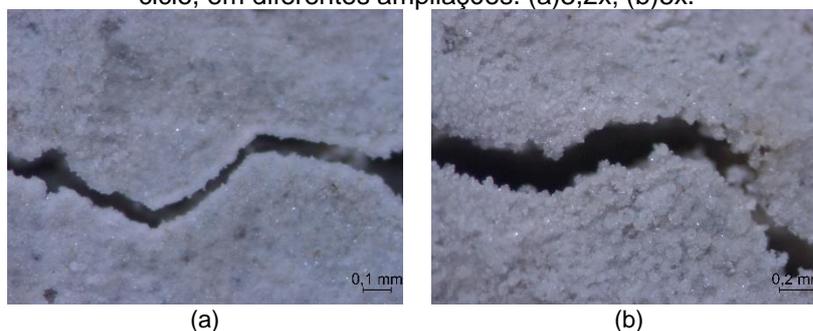
Figura 92: Imagem de microscopia ótica do intervalo 8, a/c 0,40, 28 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente submerso, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x; (c)5x.



Fonte: própria da autora

O ambiente ciclos apresenta visualmente, aos 28 e aos 168 dias, um fechamento das porções mais estreitas da fissura, que ocorrem nas partes 1 e 2. A Figura 93 mostra ampliações ao longo da fissura, onde nota-se a presença de material na superfície do concreto e na borda da fissura, que pode ser oriundo da autocicatrização.

Figura 93: Imagem de microscopia ótica, a/c 0,40, 28 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente ciclo, em diferentes ampliações. (a)3,2x; (b)5x.

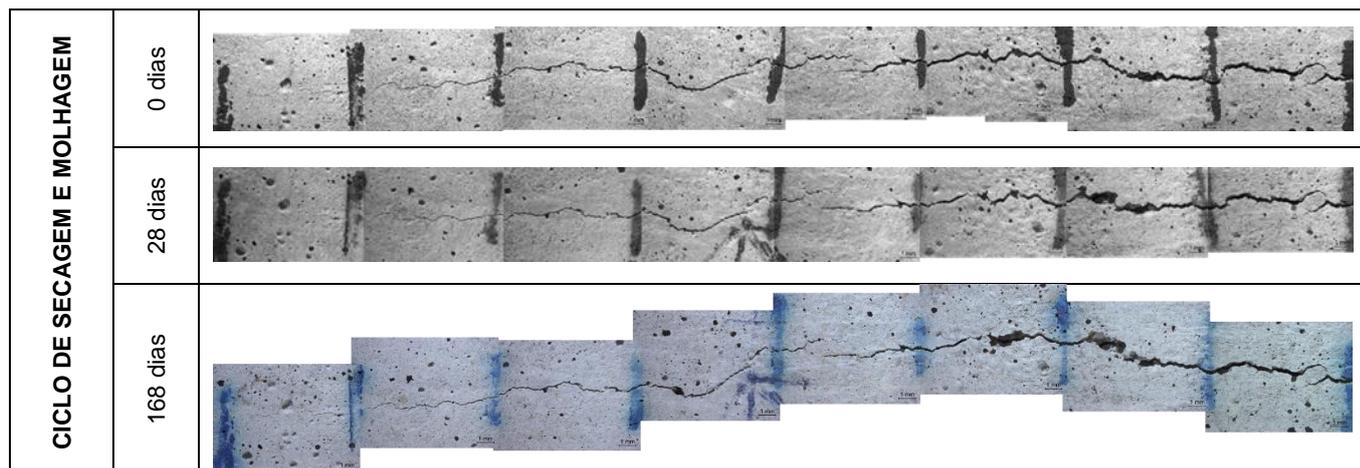


Fonte: própria da autora

O Quadro 10 apresenta o acompanhamento realizado para a relação a/c 0,50, com abertura de fissuras aos 28 dias, para os diferentes ambientes de exposição, nas idades de 0, 28 e 168 dias, respectivamente, após a abertura da fissura.

Quadro 10: Acompanhamento da fissura por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias do CPlI F, a/c 0,50 para 28 dias de idade de abertura de fissuras para diferentes ambientes de exposição

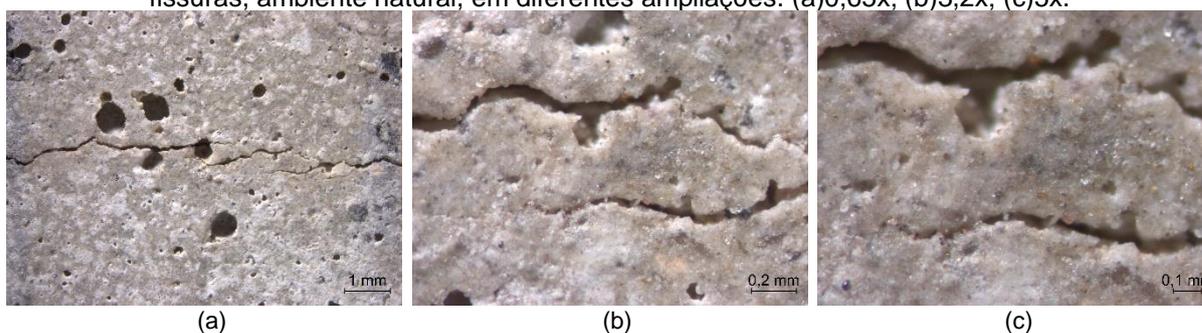
AMBIENTE DE EXPOSIÇÃO		1	2	3	4	5	6	7	8
NATURAL PROTEGIDO	0 dias								
	28 dias								
	168 dias								
NATURAL	0 dias								
	28 dias								
	168 dias								
SUBMERSO	0 dias								
	28 dias								
	168 dias								



Fonte: própria da autora

Analisando o Quadro 10, tanto o ambiente natural protegido quanto o natural, não apresentam, visualmente, a formação material que possa auxiliar na autocicatrização das fissuras, fato que pode estar atrelado à insuficiência de água e/ou à falta de grãos anidros para desencadear o fenômeno. Entretanto, avaliando as ampliações apresentadas na Figura 94, é possível verificar a presença de cristais espalhados tanto na superfície do concreto quanto na borda da fissura.

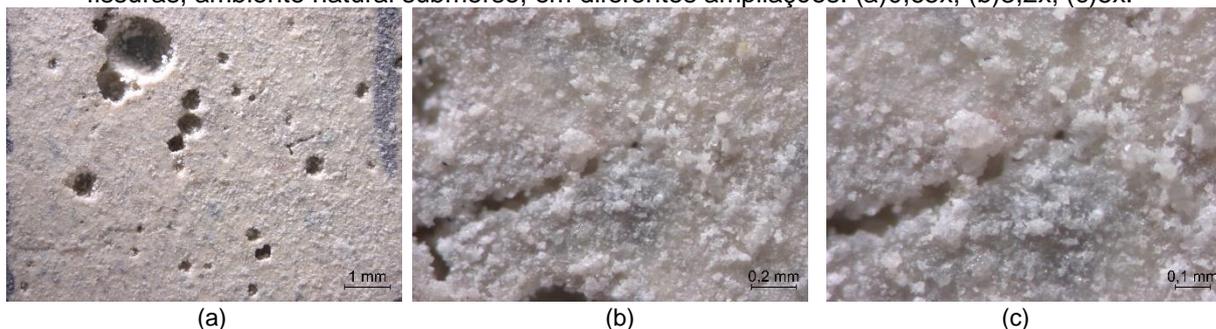
Figura 94: Imagem de microscopia ótica do intervalo 1, a/c 0,50, 28 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente natural, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x; (c)5x.



Fonte: própria da autora

Para o ambiente submerso, há selamento superficial das fissuras nas partes entre 1-3, visivelmente onde a fissura apresenta menor largura. Nos demais intervalos é possível ver a formação de produtos. A Figura 98 mostra ampliações do segundo intervalo, onde se verifica o fechamento da fissura, bem como o desenvolvimento de material de cor clara, possivelmente oriundo do fenômeno da autocicatrização autógena.

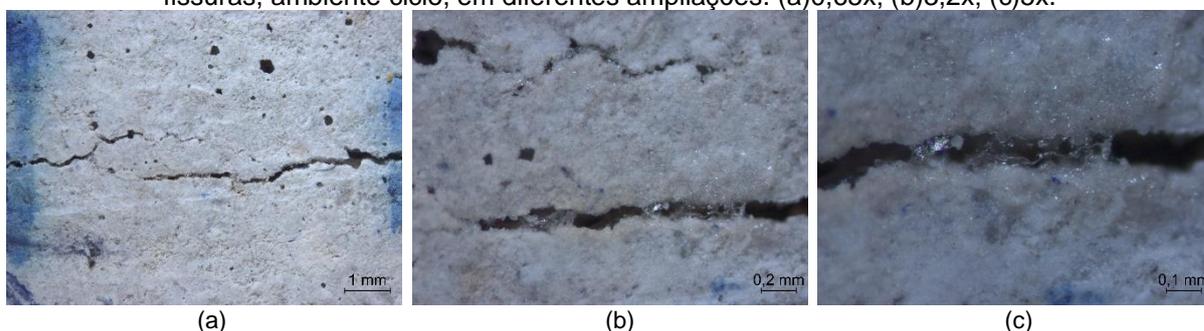
Figura 95: Imagem de microscopia ótica do intervalo 2, a/c 0,50, 28 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente natural submerso, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x; (c)5x.



Fonte: própria da autora

O ambiente de ciclos de molhagem e secagem proporciona também selamento superficial das fissuras na parte 1, onde nota-se a presença de material de cor clara. Entretanto, observa-se na Figura 96 o desenvolvimento de um composto vítreo como fechamento da fissura.

Figura 96: Imagem de microscopia ótica para o intervalo 5, a/c 0,50, 28 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente ciclo, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x; (c)5x.

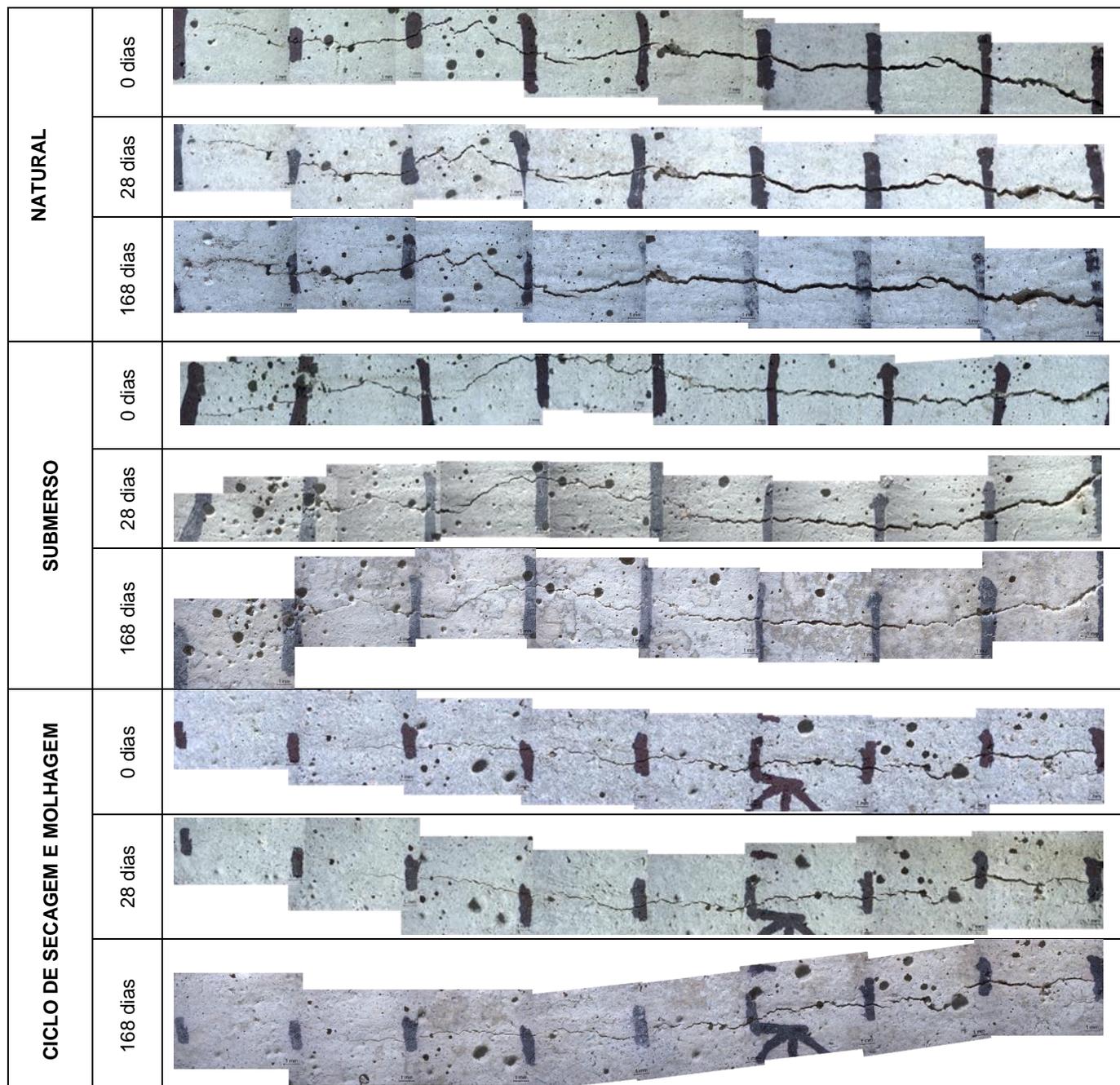


Fonte: própria da autora

No Quadro 11 visualiza-se o acompanhamento realizado para a relação a/c 0,65, com abertura de fissuras aos 28 dias, para os diferentes ambientes de exposição, nas idades de 0, 28 e 168 dias, respectivamente, após a abertura da fissura.

Quadro 11: Acompanhamento da fissura por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias do CPlI F, a/c 0,65 para 28 dias de idade de abertura de fissuras para diferentes ambientes de exposição

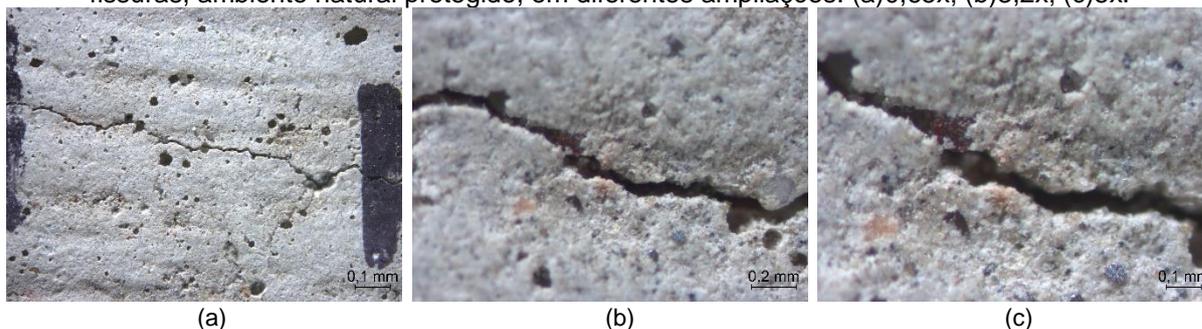
AMBIENTE DE EXPOSIÇÃO		1	2	3	4	5	6	7	8
NATURAL PROTEGIDO	0 dias								
	28 dias								
	168 dias								



Fonte: própria da autora

Analisando visualmente a fissura ao longo do tempo no ambiente natural protegido, não é possível observar a formação de produtos que possam auxiliar na autocicatrização das fissuras. Fato que se confirma através das ampliações do intervalo 1, apresentado na Figura 97.

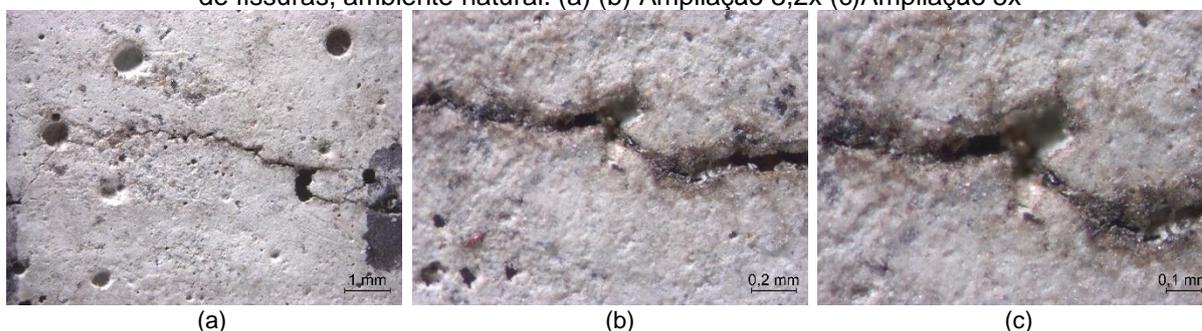
Figura 97: Imagem de microscopia ótica para o intervalo 1, a/c 0,65, 28 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente natural protegido, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x; (c)5x.



Fonte: própria da autora

Para o ambiente natural, não é possível observar, visualmente, a formação de produtos que possa auxiliar na autocicatrização das fissuras. Porém, avaliando as ampliações demonstradas na Figura 98, é possível ver a formação de um material vítreo nas bordas internas da fissura.

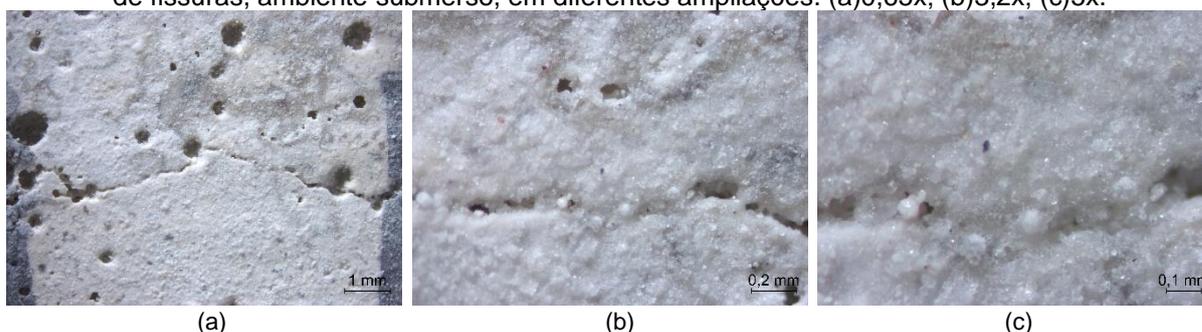
Figura 98: Imagem de microscopia ótica para o intervalo 1 a/c 0,65 para 28 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente natural. (a) (b) Ampliação 3,2x (c)Ampliação 5x



Fonte: própria da autora

O ambiente submerso apresenta um selamento superficial da fissura aos 28 dias na parte 1, e aos 168 dias nota-se a deposição de um material ao longo de toda a fissura, auxiliando o fechamento no intervalo compreendido de 1 à 5. A Figura 99 mostra ampliações do intervalo 2, onde se verifica o desenvolvimento de produtos de cor clara ao longo da superfície do concreto, bem como na fissura.

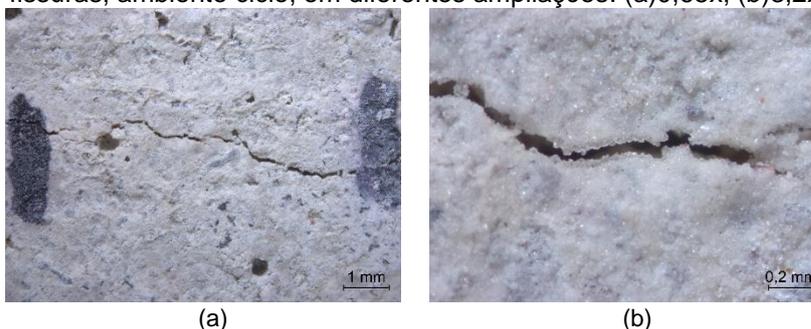
Figura 99: Imagem de microscopia ótica para o intervalo 2 a/c 0,65 para 28 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente submerso, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x; (c)5x.



Fonte: própria da autora

Quanto ao ambiente de ciclos, nota-se, aos 28 dias, a formação de material nas partes 1 e 2 que podem contribuir para o selamento da superfície. Fato que se evidencia aos 168 dias e fica demonstrado na Figura 100.

Figura 100: Imagem de microscopia ótica para o intervalo 4, a/c 0,65, 28 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente ciclo, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x



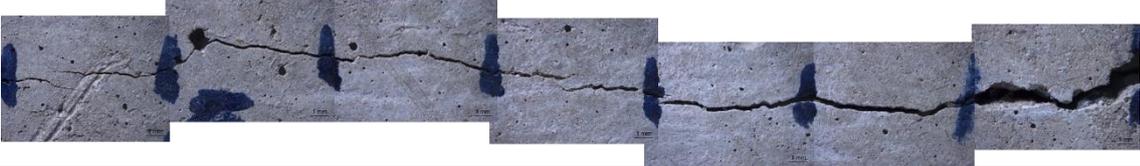
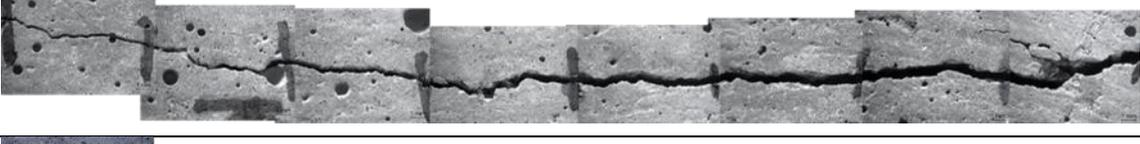
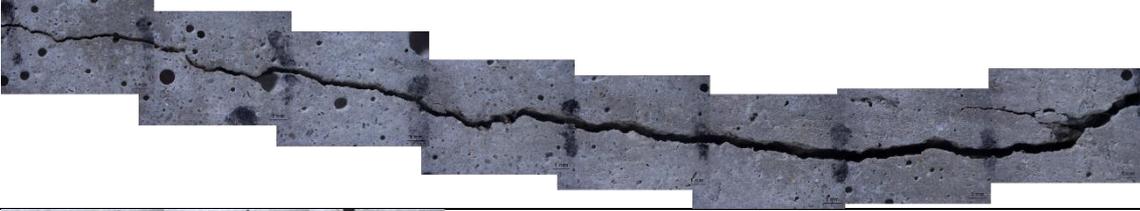
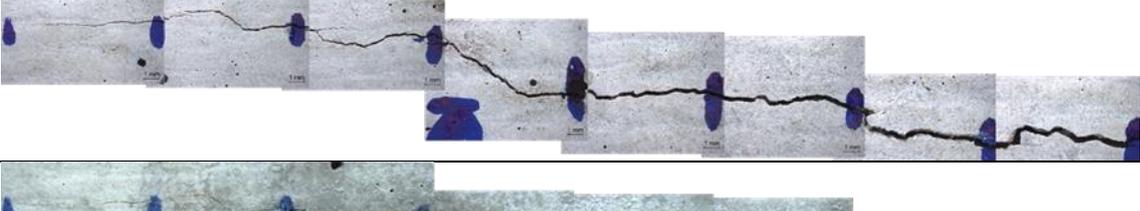
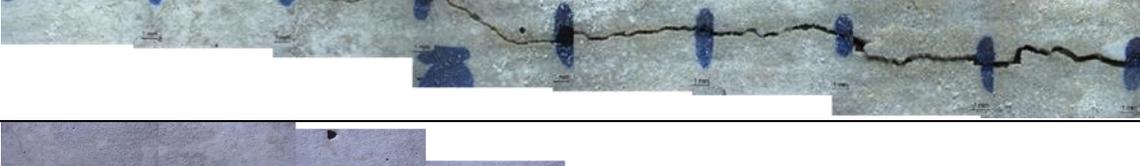
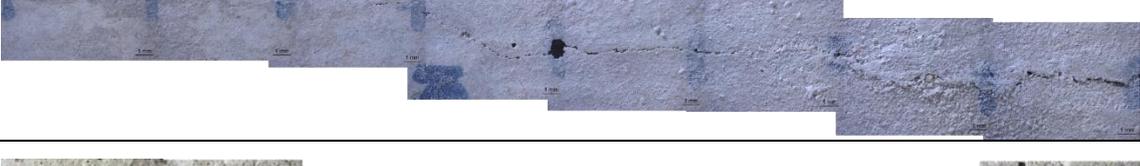
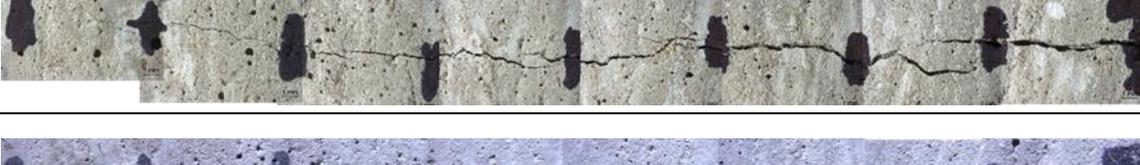
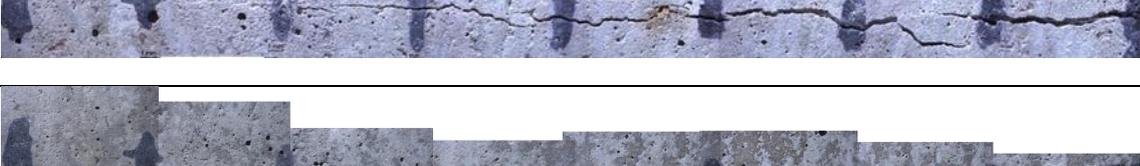
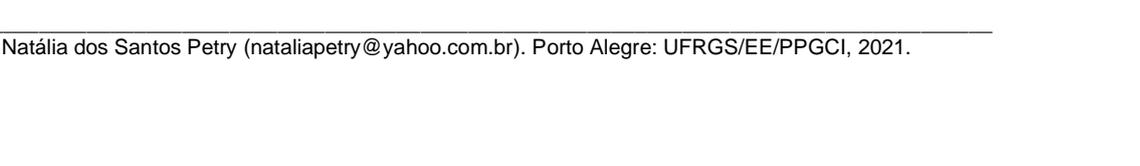
Fonte: própria da autora

De maneira geral, para a idade de abertura de fissuras aos 28 dias, o ambiente submerso é o que apresenta melhores indicativos de fechamento das fissuras, o que pode ser decorrente da autocicatrização autógena, seguido pelo ambiente ciclos. A autocicatrização autógena tem como característica a formação de produtos de fechamento nas fissuras, tais como o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) proveniente da lixiviação do hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) (SNOECK *et al.*, 2016) e hidratos de silicato de cálcio (C-S-H) (KAN, 2012). Logo, o fechamento demonstrado através de imagens de microscopia ótica está relacionado, principalmente, à formação de carbonato de cálcio em função da ocorrência da lixiviação do hidróxido de cálcio para a superfície da fissura (WU *et al.*, 2012).

O Quadro 12 apresenta o acompanhamento realizado para a relação a/c 0,30, com abertura de fissuras aos 91 dias, para os diferentes ambientes de exposição, nas idades de 0, 28 e 168 dias, respectivamente, após a abertura da fissura.

Quadro 12: Acompanhamento da fissura por microscopia ótica aos 0, 28 e 84 dias do CPlI F, a/c 0,30 para 91 dias de idade de abertura de fissuras para diferentes ambientes de exposição

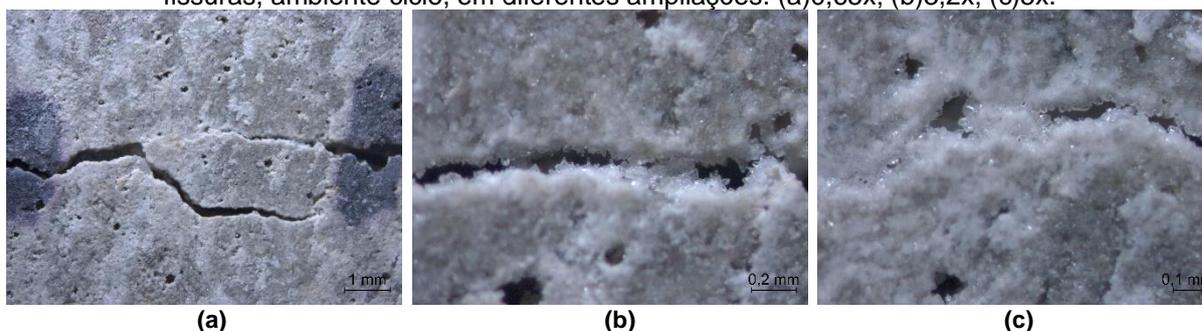
AMBIENTE DE EXPOSIÇÃO		1	2	3	4	5	6	7	8
NATURAL PROTEGIDO	0 dias								
	28 dias								

	168 dias	
<b>NATURAL</b>	0 dias	
	28 dias	
	168 dias	
	168 dias	
<b>SUBMERSO</b>	0 dias	
	28 dias	
	168 dias	
	168 dias	
<b>CICLO DE SECAGEM E MOLHAGEM</b>	0 dias	
	28 dias	
	168 dias	

Fonte: própria da autora

Para os ambientes natural protegido e natural não é possível observar, de forma visual, o fechamento da fissura. No ambiente submerso, aos 28 dias, observa-se nas partes 1 e 2 a formação de materiais de cor clara que se depositam sobre a superfície do concreto e nas bordas da fissura. Já aos 168 dias nota-se o aumento dos produtos depositados, selando grande parte da fissura. Quanto ao ambiente de ciclos, tanto aos 28 dias quanto aos 168 dias, observa-se o fechamento superficial completa da fissura nas partes 1 e 2 e parcial ao longo de toda fissura, conforme Figura 101.

Figura 101: Imagem de microscopia ótica para o intervalo 7 a/c 0,3, 91 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente ciclo, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x; (c)5x.

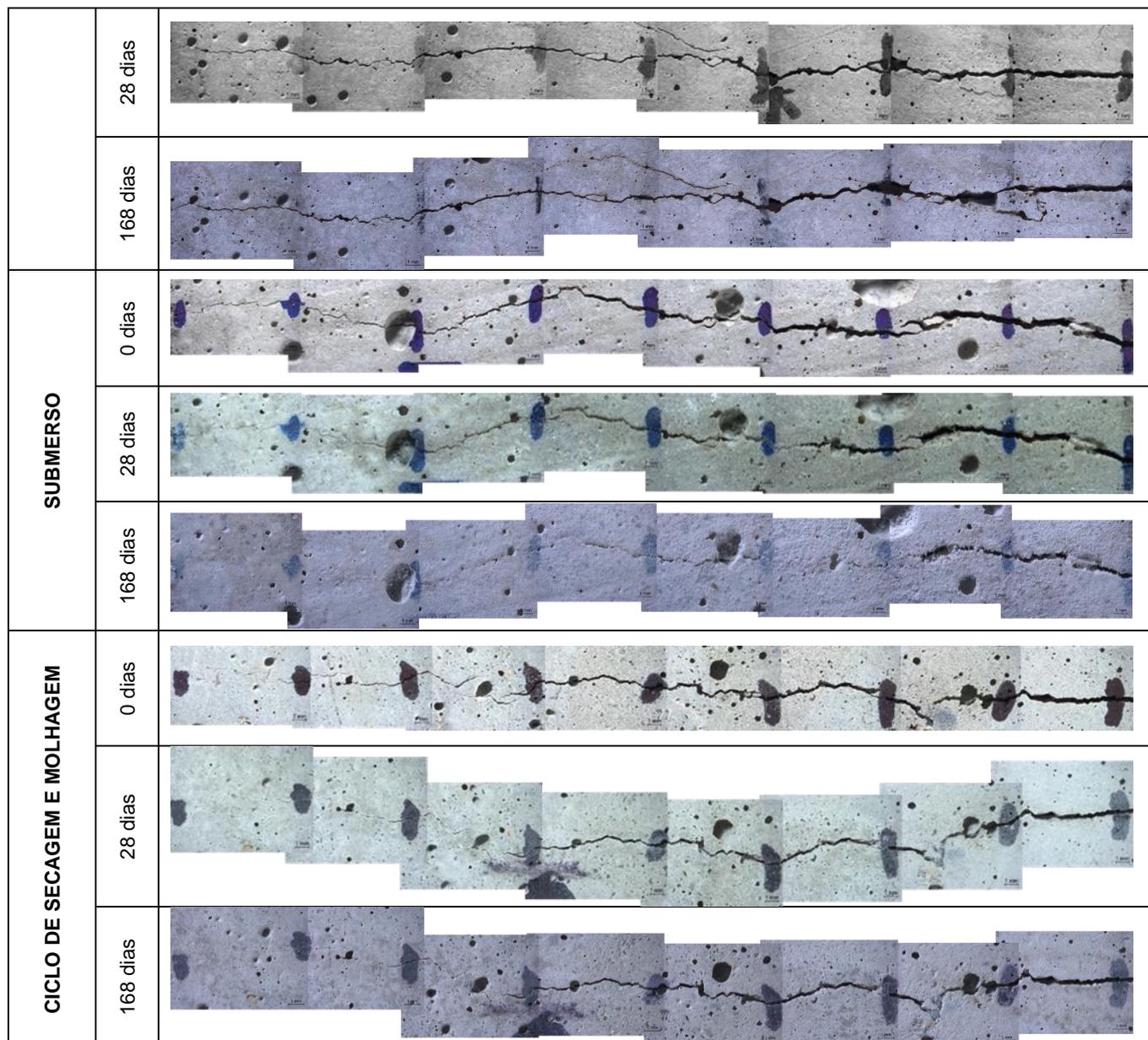


Fonte: Grupo autocatrização NORIE/UFRGS.

No Quadro 13 é possível verificar o acompanhamento realizado para a relação a/c 0,40, com abertura de fissuras aos 91 dias, para os diferentes ambientes de exposição, nas idades de 0, 28 e 168 dias, respectivamente, após a abertura da fissura.

Quadro 13: Acompanhamento por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias do CII F, a/c 0,40 para 91 dias de idade de abertura de fissuras para diferentes ambientes de exposição

AMBIENTE DE EXPOSIÇÃO		1	2	3	4	5	6	7	8
NATURAL PROTEGIDO	0 dias								
	28 dias								
	168 dias								
NATURAL	0 dias								

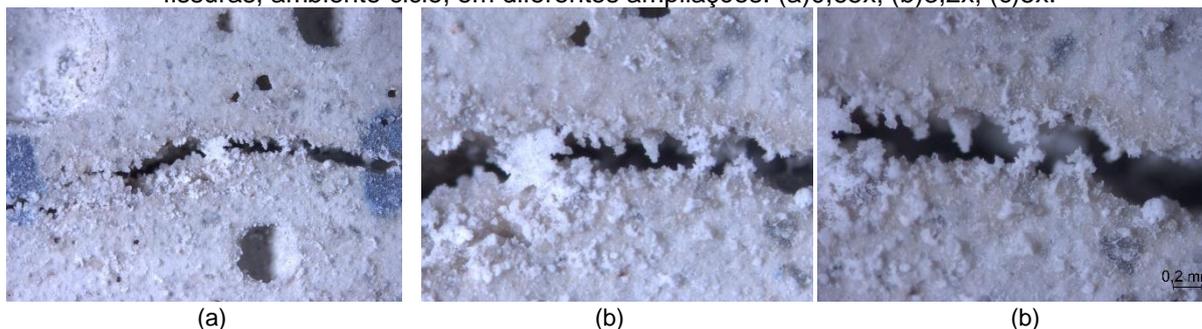


Fonte: própria da autora

Assim como já observado em outras situações, os ambientes natural protegido e natural não exteriorizam produtos que contribuam para a vedação da fissura, fato que pode estar atrelado à baixa quantidade de cimento anidro, mas principalmente pela ausência permanente de água nestes dois ambientes de exposição, sendo que estes ambientes dependem da incidência de chuva e umidade relativa.

O ambiente submerso, aos 28 dias, apresenta, nos intervalos 1 e 2, material que pode contribuir para o fechamento da fissura. Já na idade de 168 dias, nota-se a formação de produtos ao longo de toda a fissura, apenas nas partes 7 e 8 essa deposição é menor, conforme pode ser observado na Figura 102.

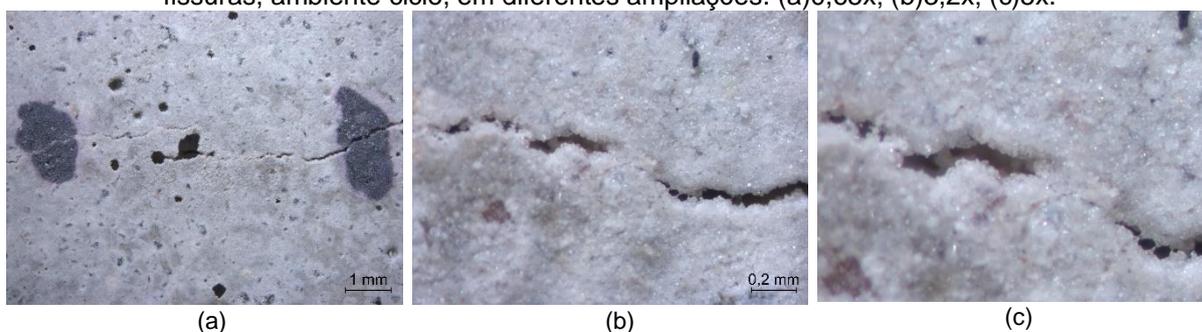
Figura 102: Imagem de microscopia ótica para o intervalo 7 a/c 0,4, 91 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente ciclo, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x; (c)5x.



Fonte: Grupo autocicatrização NORIE/UFRGS.

O ambiente de ciclos mostra, aos 28 dias, fechamento total no intervalo 1 e parcial nos intervalos 2 e 3. Na idade de 168 dias observa-se evolução no fechamento da 2ª parte, que pode ser observado nas ampliações retratadas na Figura 103. Nota-se a formação de material de cor clara junto às bordas da fissura e na superfície do concreto. Acredita-se que essa formação seja oriunda dos produtos de autocicatrização autógena, uma vez que apresentam características semelhantes ao  $\text{CaCO}_3$ .

Figura 103: Imagem de microscopia ótica para o intervalo 7 a/c 0,4, 91 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente ciclo, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x; (c)5x.



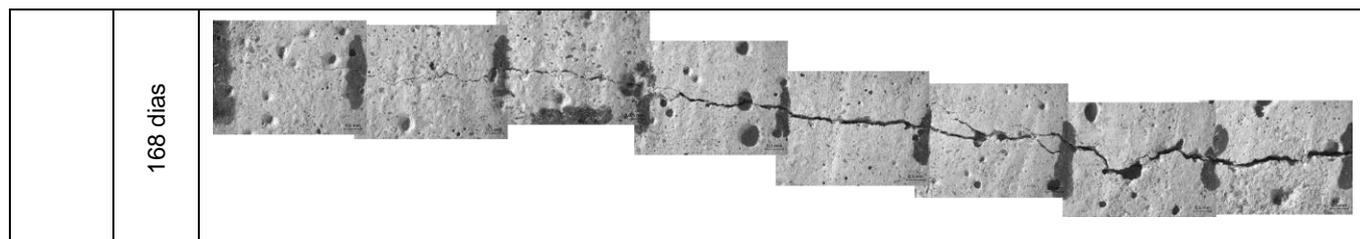
Fonte: própria da autora

No Quadro 14 pode-se verificar o acompanhamento realizado para a relação a/c 0,50, com abertura de fissuras aos 91 dias, para os diferentes ambientes de exposição, nas idades de 0, 28 e 168 dias, respectivamente, após a abertura da fissura.

Os ambientes natural protegido e natural seguem o mesmo comportamento anterior, no qual não se nota a formação superficial de materiais que auxiliem na autocicatrização. No ambiente submerso, é possível observar, aos 28 dias, a deposição ao longo de trechos de toda a fissura de produtos que podem contribuir para o selamento da mesma. Aos 168 dias, fica evidente esta contribuição, visto que praticamente toda a fissura encontra-se superficialmente selada. Já para o ambiente de ciclos, tanto aos 28 quanto aos 168 dias, nota-se o selamento da fissura nas partes 1 e 2.

Quadro 14: Acompanhamento da fissura por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias do CPlI F, a/c 0,50 para 91 dias de idade de abertura de fissuras para diferentes ambientes de exposição

AMBIENTE DE EXPOSIÇÃO		1	2	3	4	5	6	7	8
NATURAL PROTEGIDO	0 dias								
	28 dias								
	168 dias								
NATURAL	0 dias								
	28 dias								
	168 dias								
SUBMERSO	0 dias								
	28 dias								
	168 dias								
CICLO DE SECAGEM E MOLHAGEM	0 dias								
	28 dias								



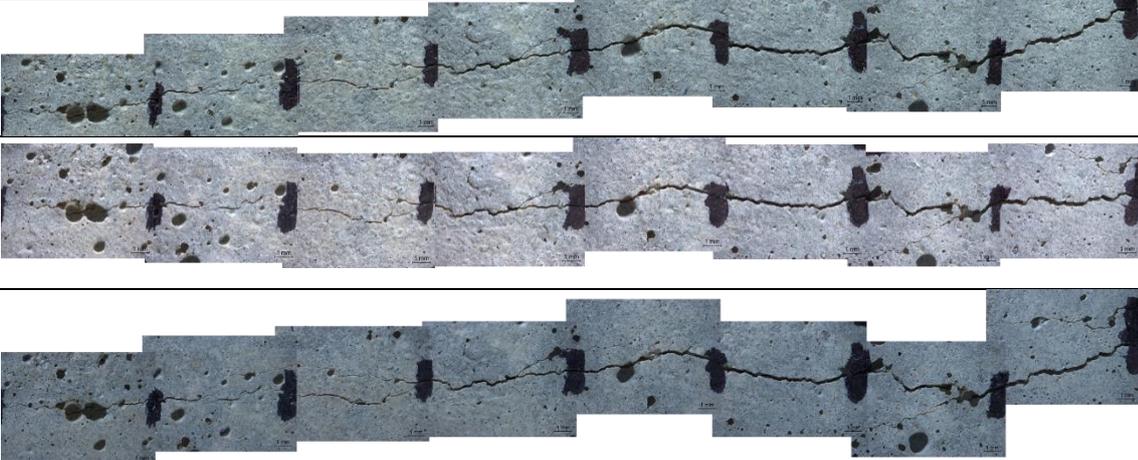
Fonte: própria da autora

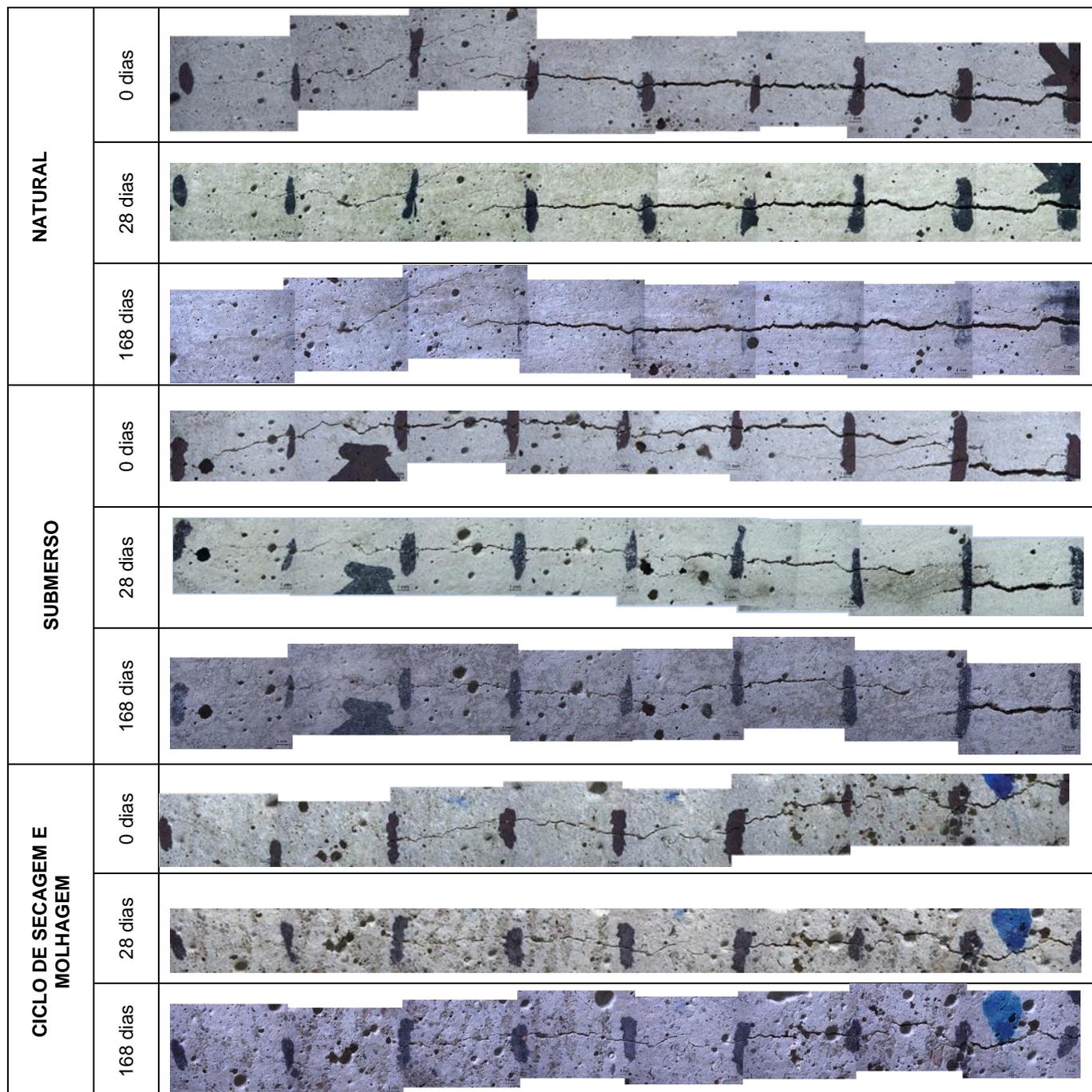
No Quadro 15 pode-se verificar o acompanhamento realizado para a relação a/c 0,65, com abertura de fissuras aos 91 dias, para os diferentes ambientes de exposição, nas idades de 0, 28 e 168 dias, respectivamente, após a abertura da fissura.

O ambiente natural protegido mantém o mesmo comportamento anterior mencionado, no qual não é possível visualizar a formação superficial de materiais que auxiliem na autocicatrização. Entretanto, o ambiente natural mostra o fechamento das fissuras mais estreitas presentes nos intervalos 1 e 3, aos 28 dias. Já para a idade de 168 dias o selamento superficial inclui também a parte 2.

No ambiente submerso, aos 28 dias, para os trechos com as menores espessuras de fissura, analisadas de forma visual, observa-se o fechamento (partes 1, 2, 5 e 7). Quanto aos 168 dias, esse selamento se estende a quase toda a fissura, com exceção dos intervalos 6 e 8, visto que são os que apresentam as maiores espessuras de fissura. O ambiente de ciclos, aos 28 dias, apresenta um selamento superficial nas partes 1, 2 e 3, já aos 168 dias este se estende também nos intervalos 4 e 5.

Quadro 15: Acompanhamento da fissura por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias do CPII F, a/c 0,65 para 91 dias de idade de abertura de fissuras para diferentes ambientes de exposição

AMBIENTE DE EXPOSIÇÃO		1	2	3	4	5	6	7	8
<b>NATURAL PROTEGIDO</b>	0 dias								
	28 dias								
	168 dias								



Fonte: própria da autora

Analisando todos os ambientes de exposição e as relações água/cimento, para a idade de abertura de fissuras aos 91 dias, o ambiente natural, apenas para a relação 0,65, mostrou-se eficiente, mas atrelado a fissuras menores, visualmente. Já o ambiente natural protegido não externou em nenhuma das relações a/c a formação de produtos que podem ser decorrentes da autocicatrização. O ambiente de ciclo de molhagem e secagem mostra-se um pouco mais promissor quando comparado aos anteriores, visto que em todas as relações a/c demonstrou a formação de compostos que contribuíram para o fechamento da fissura. E o ambiente

submerso é que o apresenta melhores indicativos de selamento das fissuras em todos as relações a/c analisadas.

Dos fatores que podem ter auxiliado o fechamento de trechos ou da totalidade da fissura pode-se ressaltar a ocorrência da autocicatrização autógena, a qual apresenta como principal característica a formação de produtos no fechamento das fissuras, tais como: o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), proveniente da lixiviação do hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) (QIAN *et al.*, 2010; HUANG, 2014) e hidratos de silicato de cálcio (C-S-H) (SNOECK *et al.*, 2016). Conforme citado por Wu *et al.* (2012), o selamento superficial das fissuras, quando observado por microscopia ótica, está relacionado, principalmente, à formação de carbonato de cálcio devido ao processo de lixiviação do hidróxido de cálcio.

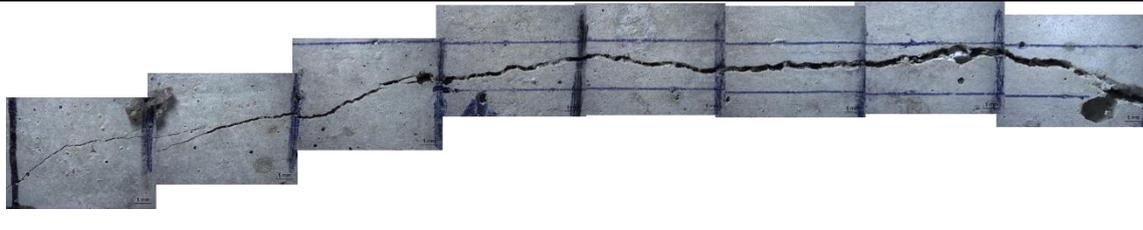
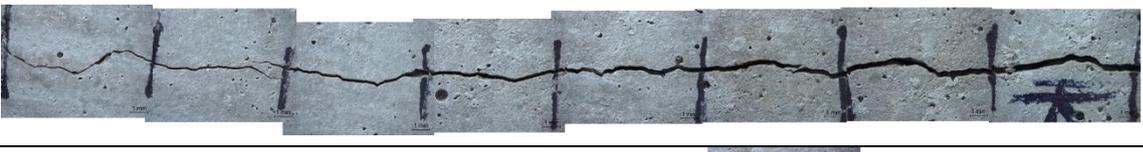
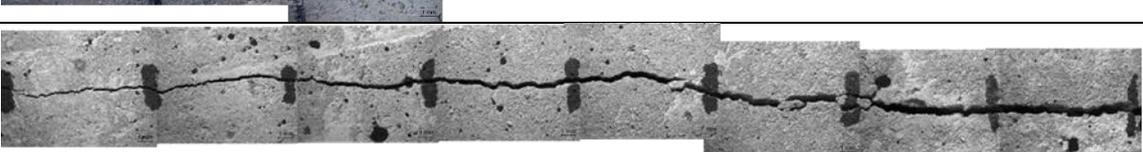
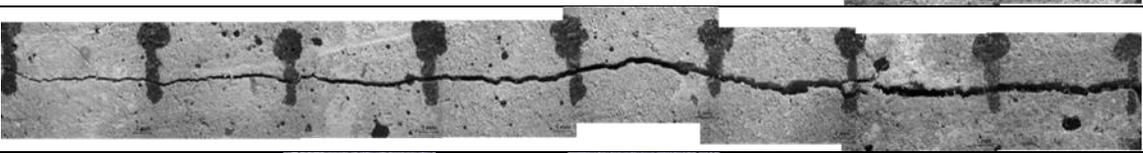
Segundo Huang (2014), que pesquisou pastas de cimento Portland expostas em água com ou sem solução de hidróxido de cálcio, os produtos formados nas fissuras, mesmo em condições submersas, não se devem somente à hidratação contínua dos grãos anidros presentes na matriz, mas também à recristalização da portlandita como produto de reação.

Segundo Qureshi (2019), a capacidade de autocicatrização autógena dos materiais cimentícios está diretamente relacionada à idade da mistura de pasta de cimento na formação de fissuras, sendo que o fator idade é quantitativamente correlacionado com o grau de hidratação de materiais cimentícios.

No Quadro 16, pode-se verificar o acompanhamento realizado para a relação a/c 0,30, com abertura de fissuras aos 182 dias, para os diferentes ambientes de exposição, nas idades de 0, 28 e 168 dias, respectivamente, após a abertura da fissura.

Quadro 16: Acompanhamento da fissura por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias do CPII F, a/c 0,30 para 182 dias de idade de abertura de fissuras para diferentes ambientes de exposição

AMBIENTE DE EXPOSIÇÃO		1	2	3	4	5	6	7	8
NATURAL PROTEGIDO	0 dias								
	28 dias								

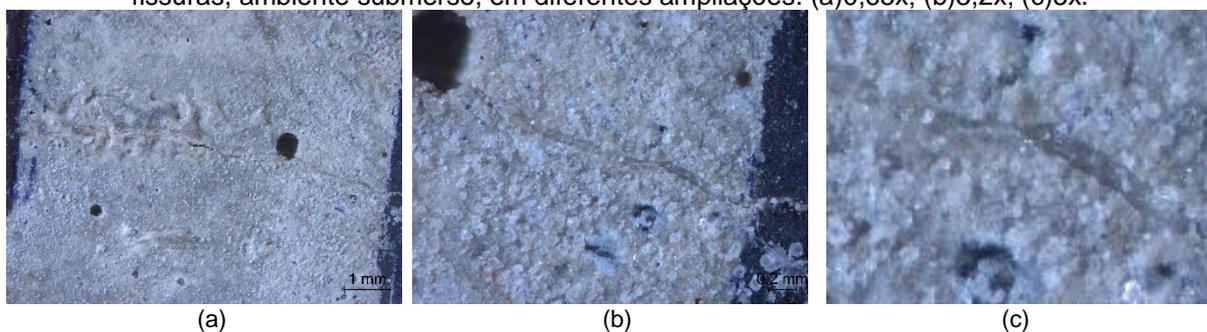
	168 dias	
<b>NATURAL</b>	0 dias	
	28 dias	
	168 dias	
<b>SUBMERSO</b>	0 dias	
	28 dias	
	168 dias	
<b>CICLO DE SECAGEM E MOLHAGEM</b>	0 dias	
	28 dias	
	168 dias	

Fonte: própria da autora

Nos ambientes ciclo de molhagem e secagem, natural protegido e natural não é possível observar a formação de material oriundo da autocicatrização na superfície da fissura.

Para o ambiente submerso, é possível notar os produtos já na idade de 28 dias após a indução da fissura, principalmente nos intervalos 1 e 2, onde há um selamento completo da fissura. Nos intervalos 3 e 4 observa-se um tamponamento parcial. Na idade de 168 dias o fechamento é observado no intervalo entre 1-5, que representa a parte mais estreita da fissura, conforme pode ser observado nas ampliações da Figura 104.

Figura 104: Imagem de microscopia ótica do intervalo 1, a/c 0,30, 168 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente submerso, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x; (c)5x.

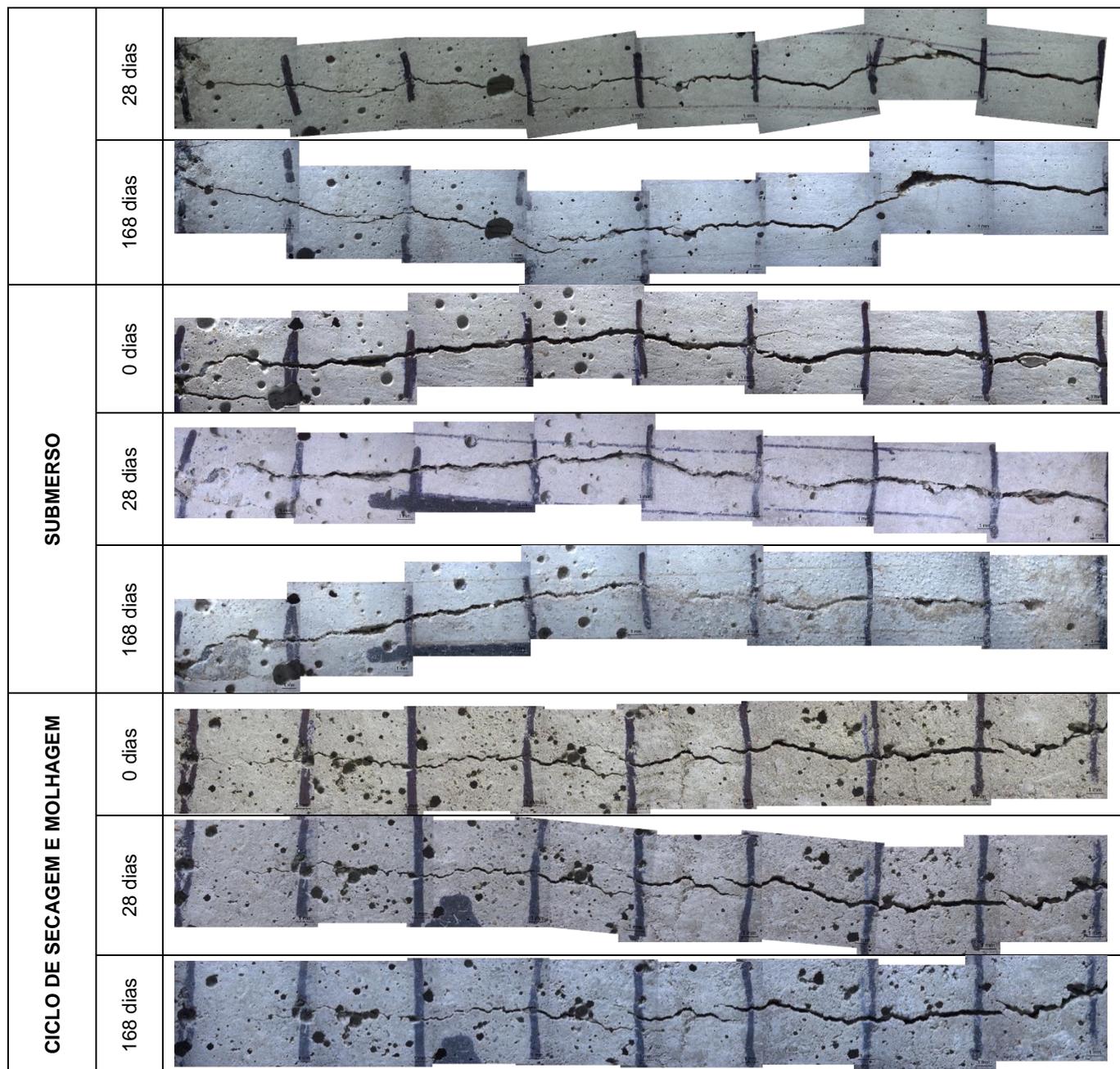


Fonte: própria da autora

No Quadro 17, pode-se verificar o acompanhamento realizado para a relação a/c 0,40, com abertura de fissuras aos 182 dias, para os diferentes ambientes de exposição, nas idades de 0, 28 e 168 dias, respectivamente, após a abertura da fissura.

Quadro 17: Acompanhamento da fissura por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias do CPII F, a/c 0,40 para 182 dias de idade de abertura de fissuras para diferentes ambientes de exposição

AMBIENTE DE EXPOSIÇÃO		1	2	3	4	5	6	7	8
NATURAL PROTEGIDO	0 dias								
	28 dias								
	168 dias								
NATURAL	0 dias								

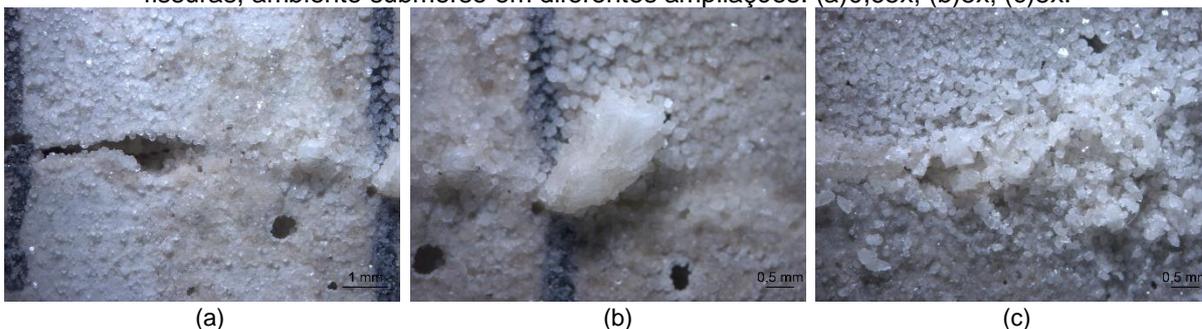


Fonte: própria da autora

É possível notar que em todos os ambientes avaliados há uma maior degradação superficial dos corpos de prova. Nos ambientes natural protegido e natural não é possível observar a formação de produtos de autocatrização.

No ambiente submerso, após 28 dias de exposição, observa-se fechamento parcial nos intervalos 1, 5 e 6. Já na idade de 168 dias observa-se uma maior precipitação de compostos na superfície do corpo de prova e na borda da fissura, principalmente nos intervalos entre 5-8. Conforme pode ser observado na Figura 105, nota-se a formação de produto de cor branca com morfologia cúbica, acredita-se que seja originário do fenômeno da autocatrização autógena.

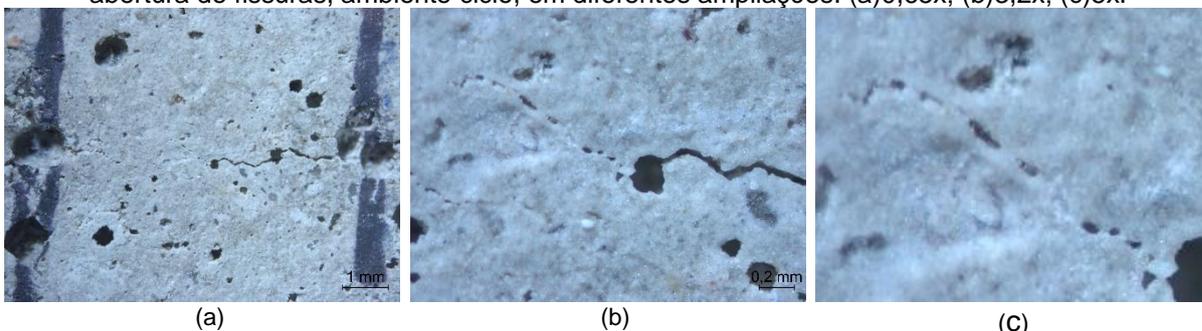
Figura 105: Imagem de microscopia ótica do intervalo 8, a/c 0,40, 168 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente submerso em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)5x; (c)5x.



Fonte: própria da autora

No ambiente ciclo de molhagem e secagem, visualmente, observa-se o fechamento parcial da fissura na parte 1, já na idade de 28 dias, o que fica mais claro aos 168 dias, conforme pode ser observado nas ampliações retratadas na Figura 106. Nota-se a formação de uma densa camada de produtos na cor branca tanto na borda da fissura como na superfície do concreto.

Figura 106: Imagem de microscopia ótica para o intervalo 1 a/c 0,40 para 168 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente ciclo, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x; (c)5x.

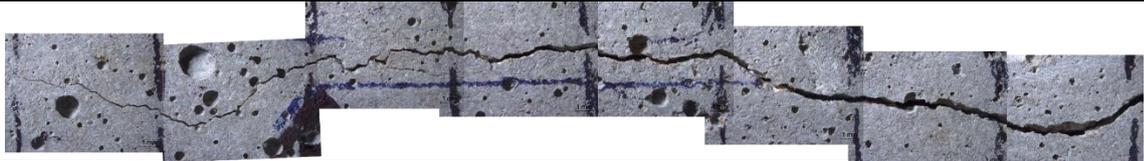
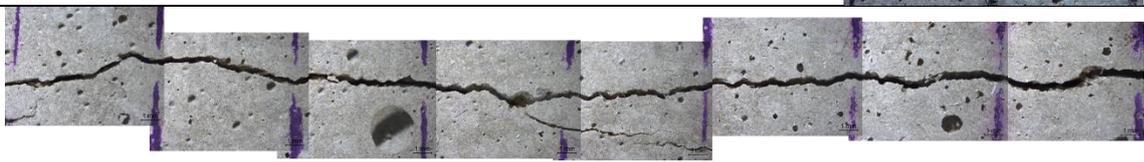
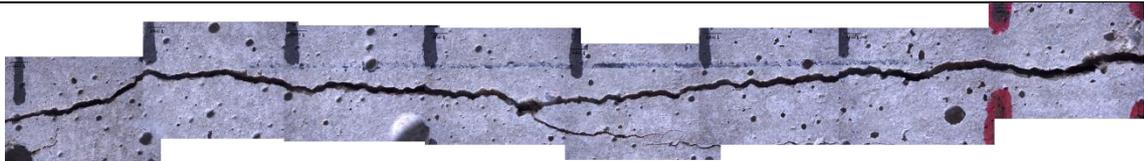
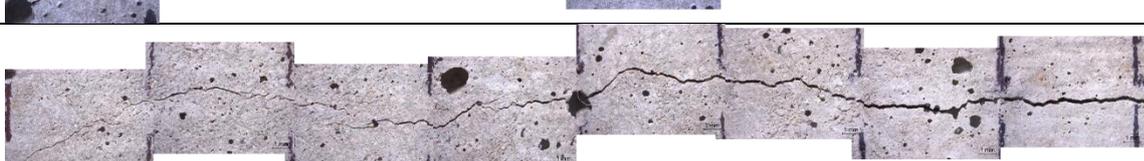
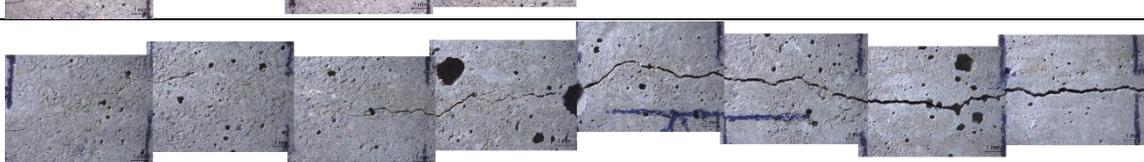
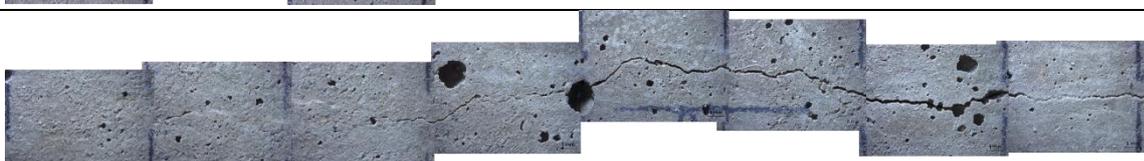
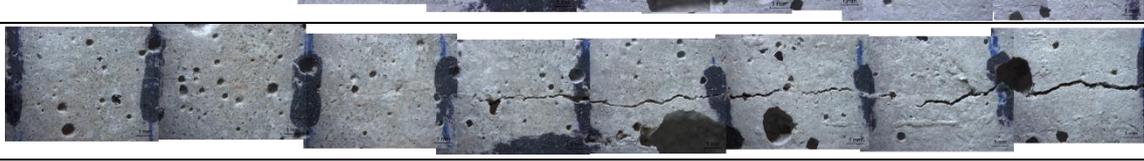


Fonte: Grupo autocatização NORIE/UFRGS.

No Quadro 18, pode-se verificar o acompanhamento realizado para a relação a/c 0,50, com abertura de fissuras aos 182 dias, para os diferentes ambientes de exposição, nas idades de 0, 28 e 168 dias, respectivamente, após a abertura da fissura.

Quadro 18: Acompanhamento da fissura por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias do CPII F, a/c 0,50 para 182 dias de idade de abertura de fissuras para diferentes ambientes de exposição

AMBIENTE DE EXPOSIÇÃO		1	2	3	4	5	6	7	8
NATURAL PROTEGIDO	0 dias								

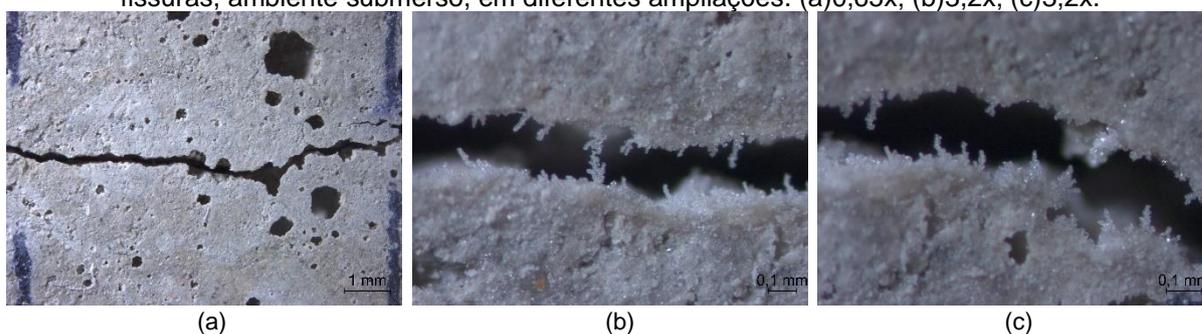
	28 dias	
	168 dias	
NATURAL	0 dias	
	28 dias	
	168 dias	
SUBMERSO	0 dias	
	28 dias	
	168 dias	
CICLO DE SECAGEM E MOLHAGEM	0 dias	
	28 dias	
	168 dias	

Fonte: própria da autora

Para os ambientes natural protegido e natural não é possível observar a formação de produtos de autocicatrização, fato que pode estar atrelado à espessura média da fissura. Nota-se que estas duas apresentam um espessura maior, quando comparada com as fissuras dos demais ambientes.

No ambiente submerso, após 28 dias observa-se selamento na superfície da fissura nos intervalos 1-2. Para a idade de 168 dias entre 1-3 o fechamento é total, no recorte 4 e 8 observa-se um selamento parcial. A Figura 107 demonstra ampliações no intervalo 7, onde pode-se observar o desenvolvimento de produtos junto às bordas da fissura. Acredita-se que possam ser oriundos da autocicatrização autógena, uma vez que há uma pequena quantidade de cimento anidro neste concreto.

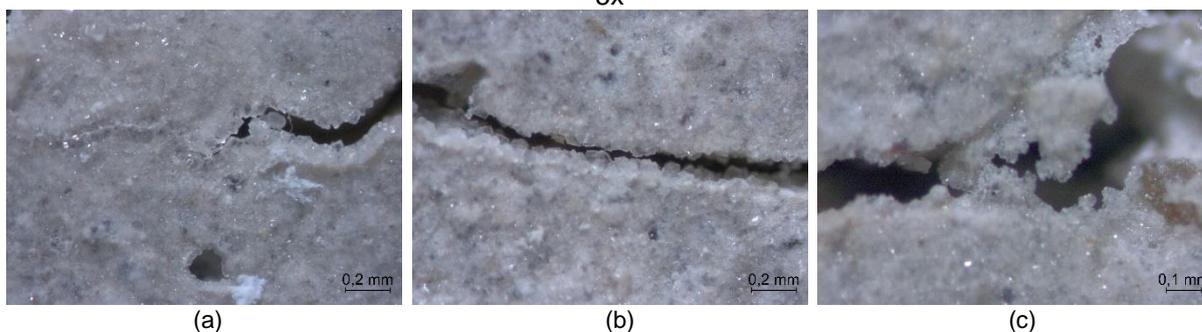
Figura 107: Imagem de microscopia ótica do intervalo 7, a/c 0,50, 168 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente submerso, em diferentes ampliações. (a)0,65x; (b)3,2x; (c)3,2x.



Fonte: própria da autora

No ambiente ciclo, observa-se fechamento entre os intervalos 1-3 tanto na idade de 28 dias quanto aos 168 dias, conforme pode ser observado nas ampliações ao longo da fissura, retratadas na Figura 108.

Figura 108: Imagem de microscopia ótica, a/c 0,50, 168 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente ciclo. (a)Intervalo 7 ampliação 3,2x (b) Intervalo 5 Ampliação 3,2x (c)Intervalo 6 Ampliação 5x

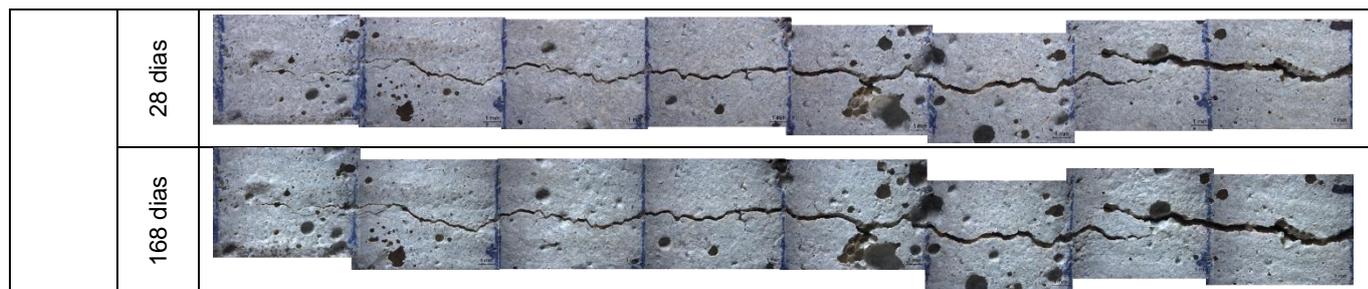


Fonte: Grupo autocicatrização NORIE/UFRGS.

No Quadro 19, pode-se verificar o acompanhamento realizado para a relação a/c 0,65, com abertura de fissuras aos 182 dias, para os diferentes ambientes de exposição, nas idades de 0, 28 e 168 dias, respectivamente, após a abertura da fissura.

Quadro 19: Acompanhamento da fissura por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias do CPlI F, a/c 0,65 para 182 dias de idade de abertura de fissuras para diferentes ambientes de exposição

AMBIENTE DE EXPOSIÇÃO		1	2	3	4	5	6	7	8
NATURAL PROTEGIDO	0 dias								
	28 dias								
	168 dias								
NATURAL	0 dias								
	28 dias								
	168 dias								
SUBMERSO	0 dias								
	28 dias								
	168 dias								
CICLO DE SECAGEM E	0 dias								

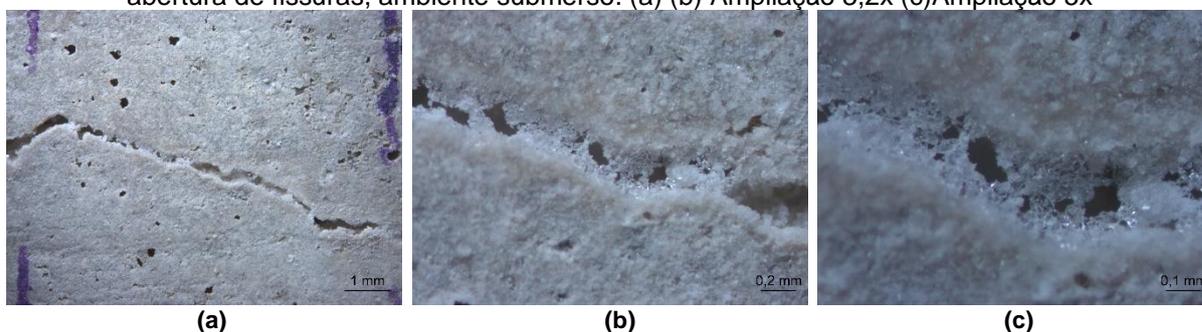


Fonte: própria da autora

Visivelmente não se observa a formação de produtos ao longo da fissura nos ambientes natural protegido e natural, o que pode ser justificado pela ausência e/ou pouca de água nestes ambientes.

No submerso observa-se a geração de produtos, que podem ser de autocatrização, no intervalo 8, onde a fissura apresenta a maior espessura, conforme se observa nas ampliações demonstradas na Figura 109.

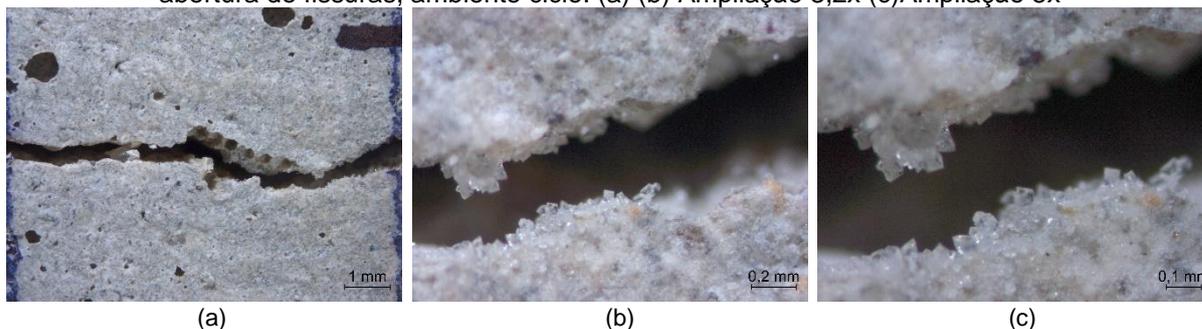
Figura 109: Imagem de microscopia ótica para o intervalo 8 a/c 0,65 para 168 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente submerso. (a) (b) Ampliação 3,2x (c) Ampliação 5x



Fonte: própria da autora

Quanto às fissuras expostas no ciclo, visivelmente não se observa a formação de produtos, entretanto nas ampliações apresentadas na Figura 110, é possível notar o crescimento lento de cristais junto às bordas da fissura, o que a longo prazo podem contribuir para o fechamento da fissura. De acordo com Cappellesso (2018), mesmo a lixiviação sendo um fator importante na autocatrização para selagem da fissura por carbonatação do hidróxido de cálcio, se a espessura da mesma for grande e o tempo para o fechamento acontecer será longo, o que pode impactar na perda dos produtos por lixiviação, desta forma sendo prejudicial por ser em maior escala do que o ganho referente ao selamento da fissura por precipitação de carbonato de cálcio.

Figura 110: Imagem de microscopia ótica para o intervalo 8 a/c 0,65 para 168 dias de idade de abertura de fissuras, ambiente ciclo. (a) (b) Ampliação 3,2x (c) Ampliação 5x



Fonte: Grupo autocicatrização NORIE/UFRGS.

De forma qualitativa, observa-se que as fissuras geradas aos 168 dias apresentam espessuras maiores, principalmente nos intervalos entre 6-8, o que não se reflete na quantificação da espessura média das fissuras, conforme foi discutido no item 4.2.1 deste trabalho.

Notou-se que mesmo para as fissuras submetidas ao ambiente de exposição submerso, o material depositado na fissura é semelhante, visualmente, ao que ocorre nas demais fissuras. Segundo Liu *et al.* (2019) é possível encontrar como produto de autocicatrização em fissuras expostas em ambiente submerso,  $\text{CaCO}_3$  uma vez que nestas condições, há a reação entre  $\text{CO}_3^{2-}$  e  $\text{Ca}^{2+}$ . Para Edvardsen, (1999), quando o  $\text{CO}_2$  presente no ar se dissolve na água, os íons  $\text{CO}_3^{2-}$  se difundem na borda da fissura, ocorrendo a precipitação do  $\text{CaCO}_3$  na fissura quando a concentração de íons  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{CO}_3^{2-}$  atinge um nível de supersaturação. O que vai ao encontro com o levantado por Van Tittelboom *et al.* (2012), que observaram o acumulado de material branco sobre a superfície das fissuras, levantando a possibilidade de formação de  $\text{CaCO}_3$ , uma vez que as amostras também foram retiradas da imersão e expostas ao ambiente de laboratório, desta forma sugerindo a reação do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , que é lixiviado das fissuras, com o  $\text{CO}_2$  presente no ambiente, resultando assim na formação de partículas de  $\text{CaCO}_3$ , o que será discutido no item 4.3.5 desta pesquisa.

De forma geral, não se pode correlacionar de forma direta os resultados obtidos na taxa de autocicatrização (através do ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas) com os resultados do ensaio de microscopia ótica de forma qualitativa, embora os dois ensaios sejam utilizados para avaliar a autocicatrização ao longo do tempo, uma vez que o VPU avalia a cicatrização interna do cp's e através da microscopia é possível avaliar a superfície da fissura. Segundo Gagne e Argouges (2012), a autocicatrização autógena é mais rápida na superfície exposta do concreto, logo é possível observar a formação dos produtos de autocicatrização nas bordas da fissura, com o auxílio da microscopia ótica. Entretanto, essa barreira acaba impedindo a difusão do  $\text{CO}_2$  e da água para o interior da fissura, desta

forma não ocorrendo a cicatrização interna, o que se observa em muitos casos com o auxílio dos equipamentos de ultrassom, gerando baixas taxas de autocicatrização.

#### 4.2.4 Grau de hidratação x Espessura média das fissuras x taxa de autocicatrização

Buscando compreender melhor os resultados obtidos, para o grau de hidratação dos concretos, espessura média das fissuras e taxa de autocicatrização, e tentando estabelecer uma relação entre eles, estes foram condensados na Tabela 29.

Tabela 29: Compilação dos dados da etapa de acompanhamento da autocicatrização

		0,3			0,4			0,5			0,65		
		Esp. (mm)	TA (%)	CA (%)									
3d	NP	0,240	9,29	11,6	0,174	-0,16	8,9	0,162	10,60	7,3	0,152	6,13	5,7
	N	0,231	18,12		0,279	3,50		0,176	23,96		0,168	8,85	
	S	0,231	24,49		0,211	16,26		0,225	32,46		0,152	14,05	
	C	0,250	28,86		0,204	2,86		0,139	5,91		0,150	5,21	
28d	NP	0,216	-5,60	6,1	0,191	-2,25	4,7	0,181	13,53	3,8	0,165	6,54	3,0
	N	0,247	-2,17		0,202	0,83		0,223	38,38		0,160	23,45	
	S	0,310	27,26		0,253	10,71		0,261	29,85		0,212	41,54	
	C	0,209	14,85		0,211	3,61		0,195	6,12		0,169	8,93	
91d	NP	0,267	-3,86	3,1	0,207	-2,51	2,4	0,208	-2,35	1,9	0,170	-5,15	1,5
	N	0,241	-1,10		0,220	5,23		0,231	10,00		0,205	9,51	
	S	0,248	7,58		0,217	20,53		0,263	9,00		0,218	9,24	
	C	0,268	22,84		0,235	17,76		0,181	19,31		0,175	-0,11	
182d	NP	0,228	6,39	1,4	0,218	-0,13	1,1	0,196	-2,98	0,9	0,138	-7,35	0,7
	N	0,268	16,67		0,200	10,57		0,192	1,92		0,179	-1,94	
	S	0,200	12,29		0,187	15,61		0,163	3,87		0,126	3,51	
	C	0,313	34,25		0,244	10,75		0,213	11,67		0,155	6,25	

Esp. = espessura; TA = Taxa de autocicatrização; CA = Estimativa da quantidade de grãos de cimento anidro

Avaliando os resultados obtidos para a relação a/c 0,3, observa-se que para os ambientes ciclo e submerso, a quantidade de cimento anidro não se reflete de forma clara sobre a taxa de autocicatrização. Entretanto, a espessura da fissura sim. Nota-se que espessuras maiores resultam em taxa de autocicatrização maior, fato que vai de encontro com parte das pesquisas realizadas. Yang *et al.* (2009), salienta que fissuras com espessura menores que 50µm apresentam o desempenho mais satisfatório quanto à autocicatrização, quando comparadas as fissuras de 150µm. Sisomphon e Copuroglu (2011) concluíram que fissuras menores que 200µm apresentaram formação de compostos de autocicatrização já com 14 dias de idade, e fissuras com espessura entre 200-400 µm, precisaram de um pouco mais de tempo.

Entretanto, esse comportamento pode estar relacionado a dois fatores: o primeiro está ligado com o espaço para o crescimento dos cristais, quanto maior a largura da fissura mais espaço

disponível para a ocupação dos produtos de autocicatrização. Gagnés e Argouges (2012) observaram que fissuras mais estreitas apresentam cinética de autocicatrização mais lentas, pois o espaço para a formação dos produtos é reduzido, logo a difusão do CO<sub>2</sub> e de água é mais lenta. Outro fator pode estar atrelado é à geometria interna da fissura, segundo Roig-Flores *et al.* (2015), quando a profundidade apresenta trechos mais estreitos da fissura tendem a desenvolver produtos de autocicatrização mais rápidos do que pontos com espessura maior.

O mesmo comportamento é observado para a relação a/c 0,65, fissuras maiores geram taxas de autocicatrização maiores para os ambientes ciclo e submerso. Também se observa este comportamento para as fissuras geradas na idade de 3 e 28 dias, nos mesmos ambientes e para todas as relações a/c estudadas.

Comparando os resultados de taxa de autocicatrização entre os ambientes natural e natural protegido, nota-se que para todas as combinações o natural se mostra mais eficiente quando comparado com o protegido, este comportamento pode estar alinhado ao fato de que os corpos de prova expostos ao natural apresentam com a água (chuva), diferente do natural protegido que tem apenas contato com a umidade relativa do ar. Cuenca e Serne (2021) observaram comportamento semelhante fissuras exposta em câmara úmida apresentaram taxa de autocicatrização menor quando comparada com ambientes em contato com água.

Fato que reforça a ideia de Von Greve-Dierfeldt (2020), uma vez que o mecanismo de carbonação e a cinética dependem do grau de saturação do concreto e da pressão parcial de CO<sub>2</sub> que, por sua vez, depende das condições de exposição (por exemplo, umidade relativa, volume e duração do contato da água com a superfície do concreto e as condições de temperatura).

### 4.3 AUTOCICATRIZAÇÃO

A partir dos resultados e discussões realizadas no item 4.2, deste trabalho, sentiu-se a necessidade de separar melhor os resultados, principalmente a influência exercida pela espessura das fissuras.

Logo, para compreender melhor o universo de espessuras das fissuras trabalhadas, optou-se por organizar todos os dados na Tabela 30, onde as mesmas foram divididas em 3 faixas, fissuras menores que 200µm, entre 200 e 300 µm e maiores que 300µm. Também se realizou a separação por idade de abertura da fissura, ambiente de exposição a qual o concreto seria posteriormente exposto e relação a/c.

Conforme pode-se observar na Tabela 30, mesmo utilizando dispositivo para controlar a abertura da fissura, há um espectro bem amplo nas espessuras.

De uma forma geral, para concretos com relação a/c mais baixas, observa-se que as fissuras apresentam maior abertura, e para relação a/c maior, nota-se que as fissuras são mais estreitas, conforme comprovado estatisticamente no item 4.2.1.2 (Figura 68).

Tabela 30: Distribuição dos cp's em função da faixa de abertura da fissura das fissuras em função da idade de geração da fissura, relação a/c e ambiente de exposição.

		0,3			0,4			0,5			0,65		
		< 200 $\mu\text{m}$	200 – 300 $\mu\text{m}$	> 300 $\mu\text{m}$	<200 $\mu\text{m}$	200 – 300 $\mu\text{m}$	> 300 $\mu\text{m}$	<200 $\mu\text{m}$	200 – 300 $\mu\text{m}$	> 300 $\mu\text{m}$	< 200 $\mu\text{m}$	200 – 300 $\mu\text{m}$	> 300 $\mu\text{m}$
3 dias	NP	●	☒ ●	☒ ●●	☒☒ ●	●●		☒☒ ●●●	●		☒ ●●● ●		☒
	N	☒ ●●	●	☒		☒ ●●	☒ ●●	☒ ●●	☒ ●●		☒ ●●	☒ ●●	
	S	☒ ●	☒ ●	●●	☒ ●●	●	☒ ●	☒	☒ ●●●	●	☒☒ ●	●●	
	C	☒☒ ●		●●●	☒☒ ●●	●●●		☒☒ ●●●●			☒☒ ●●	●●	
28 dias	NP	☒☒ ●		●●●	☒☒ ●	●●		☒☒ ●●	●		☒☒ ●●●		
	N	☒	☒ ●●	●	●●●	●		☒	●●	☒	☒ ●●●	☒	
	S		☒	☒ ●●●	☒ ●●	☒	●●	●	☒☒ ●	●●	☒ ●	☒ ●●●	
	C	●	☒☒ ●	●●●	☒ ●●	●●●	☒	☒☒ ●●	●●●		☒ ●●● ●	☒ ●	
91 dias	NP		☒☒ ●●		☒☒	●●		☒ ●●●		☒	☒☒ ●●	●	
	N		☒ ●●● ●	☒	●	☒☒ ●●		☒	☒ ●	●●	☒ ●●●	☒	●
	S	●	☒	☒ ●●	●●	☒☒		☒	●●	☒●	☒ ●	☒ ●●	
	C	☒	☒ ●●●	●●	●	☒☒ ●●●		☒ ●●●●	☒ ●		☒ ●●● ●	☒ ●	
182 dias	NP	●	☒ ●●		●	☒☒ ●		☒ ●●	☒ ●●		☒ ●●● ●	☒	
	N	☒	☒ ●●	●●	☒ ●	☒ ●●●		☒ ●●●●		☒	☒ ●●	☒ ●●	
	S	☒ ●●	☒	●	●●●	●	☒	☒ ●●●	☒	●	☒☒ ●●● ●		
	C		●	☒☒ ●●	☒ ●	☒ ●●●	●●	☒ ●●	☒ ●●	●●	☒ ●●● ●●	☒ ●●	

☒ Cp's com imagens de microscopia ótica + velocidade de propagação de ondas ultrassônicas; ● demais cp's apenas com propagação de ondas ultrassônicas; NP: Natural protegido; N: Natural; S: Submerso; C: Ciclo de molhagem e secagem

Fonte: própria da autora

Para a relação água/cimento 0,3, apenas 23% das fissuras analisadas apresentam espessura menor que 200µm, 38% estão na faixa entre 200-300µm e 39% são maiores que 300µm.

Na relação a/c 0,4, já se observa uma maior concentração de fissuras na faixa entre 200-300µm, o que corresponde a 49% das fissuras analisadas para esta relação, 39% são menores que 200µm e apenas 11% são maiores que 300µm.

Para a relação a/c 0,5 observa-se uma maior quantidade de fissuras com espessura menor que 200µm, o que representa aproximadamente 54% das fissuras analisadas para esta combinação. Na faixa entre 200-300 µm encontram-se 32% e fissuras com espessura maior que 300µm são 14%.

Já para a relação a/c 0,65, observa-se o mesmo comportamento de distribuição das espessuras das fissuras que os apresentados pela relação a/c 0,5, 69% das fissuras são menores que 200µm, 30% estão na faixa entre 200-300µm e apenas 1% apresentam espessura superior a 300µm.

Desta forma, fica claro que a relação água/cimento é o fator que mais contribui para a espessura das fissuras. Já a idade de abertura das fissuras não tem a mesma imponência que a observada para a relação a/c, embora os dois efeitos tenham sido considerados significativos na análise estatística apresentada na Tabela 22.

As faixas de espessuras de fissuras apresentadas na Tabela 30, e empregadas neste trabalho, vão ao encontro dos valores utilizados por outros pesquisadores na literatura em estudos de autocicatrização, conforme pode ser observado na Tabela 31.

Tabela 31: Distribuição das fissuras em função da faixa de abertura.

<b>Autores</b>	<b>Espessura (µm)</b>	<b>Autores</b>	<b>Espessura (µm)</b>
Reinhardt e Joss (2003)	50 - 200 µm	Suleiman e Nehdi (2018)	50 - 500µm
Ahn e Kishi (2010)	100 - 300µm	Cappellesso (2018)	< 400 µm
Sisomphon e Copuroglu (2011)	< 400 µm	Ardnt (2019)	< 400 µm
Jaroenratanapirom e Sahamitmongkol (2011)	100 - 300µm	Ziegler (2020)	< 400 µm
Maes <i>et al.</i> (2016)	100 - 300µm	Hollmann (2020)	< 400 µm

Fonte: própria da autora

Embora os resultados encontrados para as espessuras das fissuras estejam de acordo com os da literatura, sentiu-se a necessidade de realizar uma delimitação da faixa de espessura das fissuras. Uma vez que o programa experimental proposto é muito amplo. Optou-se por limitar a análise de autocicatrização autógena apenas para uma relação água/cimento (0,65),

bem como avaliar uma a faixa de espessura, entre 100 a 200 $\mu\text{m} \pm 5\mu\text{m}$ , uma vez que esta é a combinação com os dados mais completos e maior repetibilidade (ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e microscopia ótica).

#### 4.3.1 Espessura média inicial das fissuras

Na Tabela 32 observa-se a espessura média inicial das fissuras abertas aos 3, 28, 91 e 182 dias de idade dos concretos, para os quatro ambientes de exposição analisados, bem como desvio padrão e o coeficiente de variação. É possível notar que, para algumas combinações, embora tenha se utilizado um aparato para a limitação da espessura da fissura, há um alto coeficiente de variação.

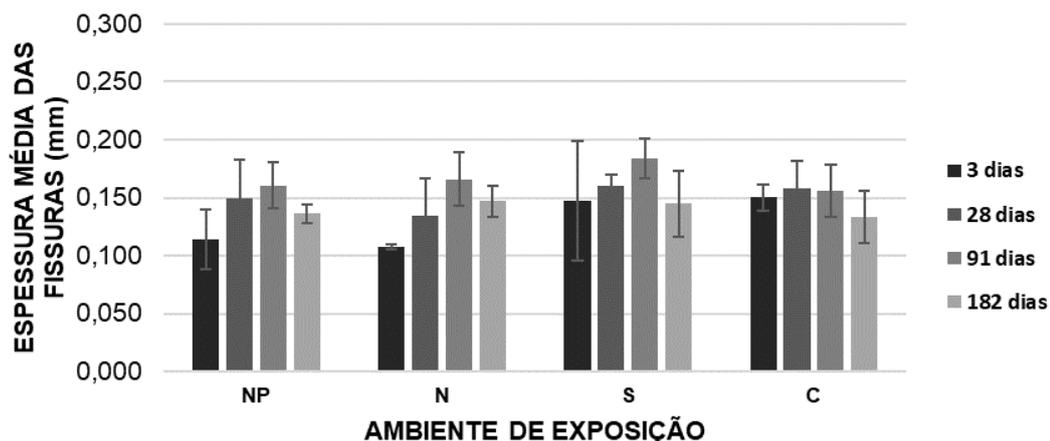
Tabela 32: Espessura média inicial das fissuras na idade de abertura aos 3, 28, 91 e 182 dias para a relação a/c 0,65.

Ambiente de exposição	3 dias			28 dias			91 dias			182 dias		
	Média (mm)	DP (mm)	CV (%)	Média (mm)	DP (mm)	CV (%)	Média (mm)	DP (mm)	CF (%)	Média (mm)	DP (mm)	CV (%)
<b>NP</b>	0,114	0,03	22,8	0,149	0,03	22,5	0,161	0,02	12,1	0,136	0,01	5,7
<b>N</b>	0,108	0,00	2,1	0,134	0,03	24,2	0,166	0,02	14,0	0,147	0,01	9,1
<b>S</b>	0,148	0,05	34,9	0,160	0,01	6,4	0,184	0,02	9,46	0,145	0,03	19,4
<b>C</b>	0,150	0,01	7,7	0,158	0,02	14,9	0,155	0,02	14,5	0,134	0,02	16,9

NP: Natural protegido; N: Natural; S: Submerso; C: Ciclo de molhagem e secagem; DP: desvio Padrão; CV: coeficiente de variação

A Figura 111 apresenta a espessura média das fissuras nas idades de 3, 28, 91 e 182 dias para cada ambiente de exposição analisado. Observa-se uma tendência no aumento da espessura média das fissuras até a idade de 91 dias, o que se explica pelo crescimento da resistência com a idade, tornando a ruptura mais frágil. Já para a idade de 182 dias, observa-se uma redução na espessura da fissura gerada, resultado este não esperado, uma vez que há crescimento na resistência à compressão dos concretos de aproximadamente 7,3%, quando comparada com a idade de 91 dias (Tabela 16 e Figura 58).

Figura 111: Espessura média inicial das fissuras na idade de abertura aos 3, 28, 91 e 182 dias para a relação a/c 0,65.



Fonte: própria da autora.

Para a análise da significância das variáveis controláveis, idade de abertura de fissura e ambiente de exposição exercem sobre a espessura das fissuras geradas, foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA) com fatorial cruzado na ferramenta *Statistica 8*, onde se obtiveram os resultados apresentados na Tabela 33.

Tabela 33: ANOVA da espessura média inicial das fissuras na idade de abertura aos 3, 28, 91 e 182 dias para a relação a/c 0,65.

Efeitos	SQ	GL	SQF	Teste F	p	Sig.
Idade de abertura da fissura (dias)	0,009197	3	0,003066	5,111	0,004106	S
Ambiente de exposição	0,003001	3	0,001000	1,668	0,188091	N
Idade de abertura da fissura (dias)*Ambiente de exposição	0,005277	9	0,000586	0,978	0,471819	N
Error	0,025793	43	0,000600			

SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade (n-1); SQF: média quadrática; Teste F(calc): valor calculado de F; p: nível de significância; Se  $p < 5\%$  = efeito significativo

Fonte: própria da autora.

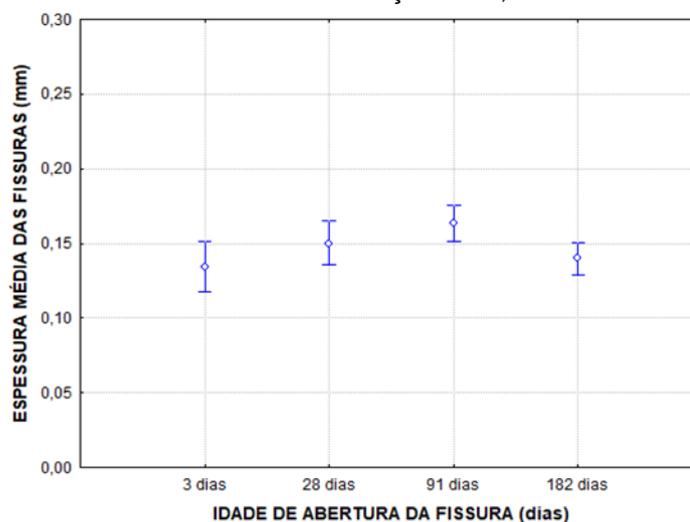
Observa-se que dos efeitos elencados, apenas a idade de abertura da fissura exerce influência significativa sobre a espessura média das fissuras geradas, fato que era esperado para que se pudesse realizar uma comparação dos efeitos do fenômeno da autocicatrização sobre as demais variáveis. Este resultado é oriundo da limitação da faixa de espessura avaliada. Para que se obtivesse o efeito real da autocicatrização autógena, as fissuras dispostas em ambiente diferentes precisavam estar na em condições de igualdade, logo não poderia resultar em significância para o ambiente de exposição e para a interação entre a idade x ambiente.

A Figura 112 mostra a influência exercida pela idade de abertura da fissura sobre a espessura média. Conforme era esperado a espessura das fissuras aumentam com o acréscimo da idade

do concreto, até 91 dias. Não se esperava que fissuras geradas na idade de 182 dias apresentassem espessura menor que nas idades anteriores.

Se comparar a espessura média com os resultados obtidos para o ensaio de resistência à compressão do concreto, até a idade de 91 dias os dois dados são coerentes. Nota-se que a resistência aumenta em 18,63% quando comparados os resultados de 3 e 28 dias, o que causa um aumento de 15,58% na espessura da fissura. Confrontando a resistência entre 28 e 91 dias, verifica-se um incremento 7,30%, já na espessura a elevação foi de 10,81%. Comparando a resistência entre 91 e 182 dias, nota-se o aumento de 7,31%, o que não se reflete na espessura média, onde há uma redução de 15,61% quando comparadas essas duas idades.

Figura 112: Efeito isolado da idade de abertura da fissura na espessura média das fissuras, para concretos com relação a/c 0,65.



Fonte: própria da autora.

Os resultados obtidos vão ao encontro do observado no estudo realizado por Jaroenratanapirom e Sahamitmongkol (2011), que analisaram argamassas com diferentes aditivos quanto à autocicatrização de fissuras geradas nas idades de 3 e 28 dias com espessura de até 300 $\mu$ m. Os pesquisadores observaram que fissuras geradas na idade de 3 dias apresentavam espessuras menores quando comparadas às fissuras geradas aos 28 dias. Já Cappellesso (2018) não observou esta tendência, sendo indiferente à idade de abertura frente a espessura da fissura.

Alguns autores salientam que a espessura da fissura é fator que influencia de forma direta na autocicatrização autógena, sendo que fissuras mais estreitas respondem de forma mais rápida à formação dos compostos e cicatrização das fissuras (REINHARDT E JOSS, 2003; YANG *et al.*, 2009; AHN E KISHI, 2010; SISOMPHON E COPUROGLU, 2011 e MAES *et al.*, 2016). Entretanto Gagnés e Argouges (2012) citam que fissuras mais finas apresentam

cinética de autocicatrização mais lentas, pois o espaço para a formação dos produtos é reduzido, logo a difusão do CO<sub>2</sub> e de água é mais lenta.

A capacidade da autocicatrização autógena nos materiais cimentícios está diretamente relacionada à idade da pasta de cimento no momento da abertura da fissura, estando correlacionado com o grau de hidratação dos materiais, logo há maior possibilidade de ocorrência da autocicatrização autógena em matrizes cimentícias mais jovens, uma vez que há uma maior quantidade de cimento anidro presente (TER HEIDE E SCHLANGEN, 2007; GRUYAERT *et al.*, 2010, SNOECK 2015, NEVILLE, 2016 e QURESHI *et al.*, 2019).

#### 4.3.2 Velocidade de propagação de onda ultrassônica

Na Tabela 34 observa-se a taxa de autocicatrização aos 168 dias, para concretos com a/c 0,65, após a abertura das fissuras aos 3, 28, 91 e 182 dias. É possível notar uma redução no coeficiente de variação, quando comparado aos dados apresentados no item 4.2.2, demonstrando a necessidade de avaliar a taxa de autocicatrização em faixas delimitadas de espessura.

Tabela 34: Taxa de autocicatrização média das fissuras nas idades de abertura aos 3, 28, 91 e 182 dias aos 168 dias, para concretos com relação a/c 0,65.

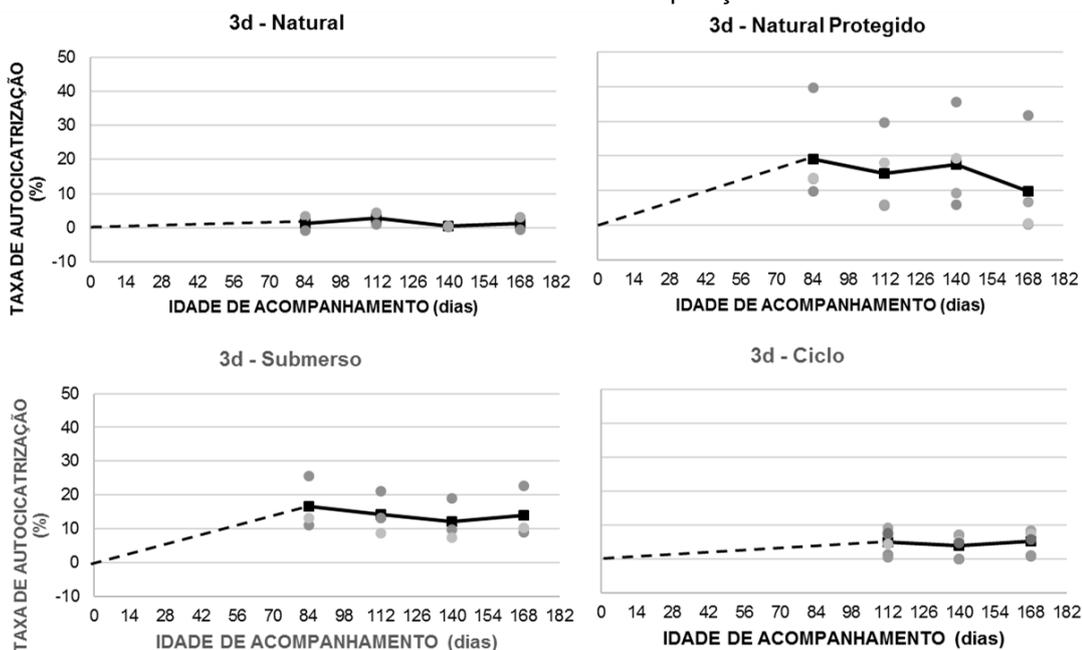
Ambiente de exposição	3 dias			28 dias			91 dias			182 dias		
	Média (%)	DP (%)	CV (%)	Média (%)	DP (%)	CV (%)	Média (%)	DP (%)	CV (%)	Média (%)	DP (%)	CV (%)
<b>NP</b>	9,8	14,9	151,9	14,1	5,7	40,4	-5,2	1,0	18,1	-6,3	5,3	84,4
<b>N</b>	1,3	2,5	185,4	25,3	12,3	48,4	10,0	1,8	18,0	2,6	2,2	87,9
<b>S</b>	14,0	7,7	54,7	35,8	13,6	38,0	11,2	12,4	110,7	3,94	2,4	61,2
<b>C</b>	5,2	3,4	66,1	11,4	11,6	101,4	1,6	5,0	30,5	5,8	14,9	25,75

DP: Desvio Padrão; CV: Coeficiente de variação; NP: Natural protegido; N: Natural; S: Submerso; C: Ciclo de molhagem e secagem

Fonte: própria da autora.

Na Figura 113, pode-se visualizar as taxas de autocicatrização para as fissuras geradas aos 3 dias, nos diferentes ambientes avaliados. Foram plotados a taxa de autocicatrização para cada amostra de concreto avaliada, representada nos gráficos por pontos.

Figura 113: Taxa de autocicatrização para abertura de fissura aos 3 dias, relação água/cimento 0,65 e diferentes ambientes de exposição



Fonte: própria da autora.

Observa-se que o ambiente Natural Protegido apresentou melhores resultados, chegando a uma taxa de autocicatrização média de 20% na idade de 84 dias, após o início da exposição, fato que não era esperado, pela indisponibilidade de água neste ambiente, após essa idade nota-se uma redução na variável analisada.

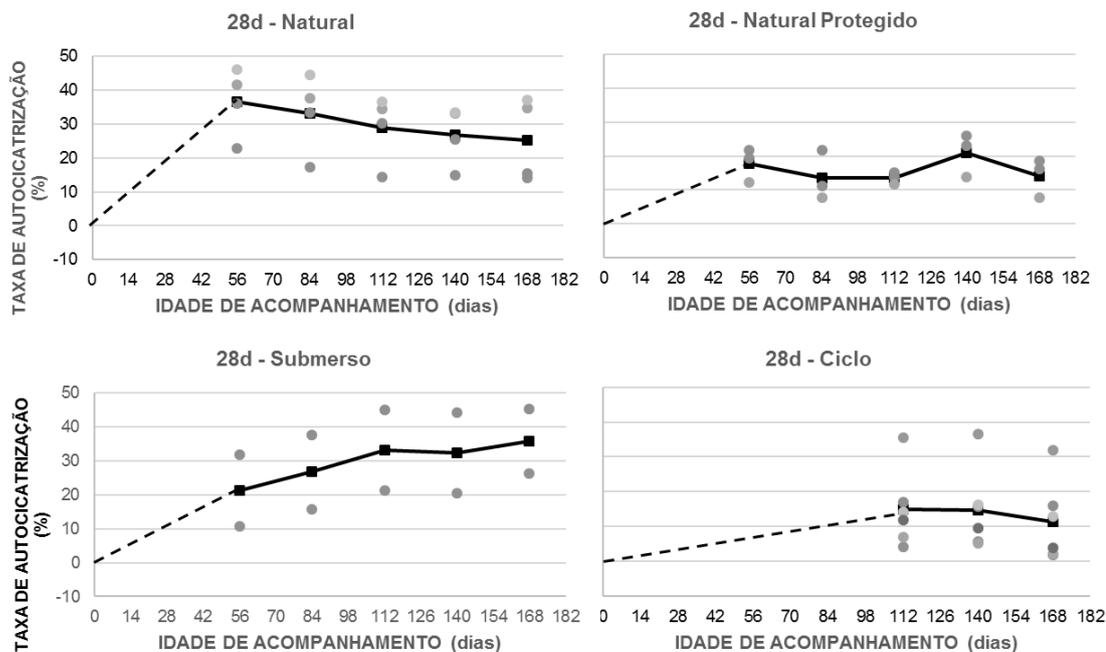
O ambiente submerso apresentou uma taxa de autocicatrização média máxima de 16,58%, também aos 84 dias, após este período ocorreu uma redução gradual na taxa analisada, o que pode estar atrelada à lixiviação dos compostos.

O ciclo de secagem e molhagem chegou a uma taxa de autocicatrização média de 5,21% aos 168 dias, esperava-se taxas mais elevadas, visto que segundo a literatura, é um dos ambientes que favorece a autocicatrização autógena.

Com relação ao ambiente Natural, foi baixa a sua contribuição, alcançando uma taxa de autocicatrização máxima de 2,78% na idade de 112 dias, após essa idade apresentou um declínio na taxa avaliada.

Na Figura 114 estão demonstrados os valores obtidos para as taxas de autocicatrização, para concretos fissurados aos 28 dias de idade.

Figura 114: Taxa de autocatrização para abertura de fissura aos 28 dias, relação água/cimento 0,65 e diferentes ambientes de exposição.



Fonte: própria da autora.

Comparado com a idade de 3 dias, observa-se que há um aumento na taxa de autocatrização, para todos os ambientes de exposição analisados. Fato que não era esperado, uma vez que o concreto com 28 dias de idade apresenta uma quantidade menor de cimento anidro e fissuras com espessuras médias maiores, sendo estes dois fatores, segundo a literatura, as principais influências da autocatrização autógena.

Analisando individualmente cada ambiente, verifica-se que o submerso apresentou as taxas mais elevadas, alcançando 35,77% aos 168 dias, com aumento gradual ao longo de todo o período analisado.

O ambiente Natural chegou a taxa de autocatrização média de 36,65% aos 56 dias de idade de exposição, entretanto apresentou redução com o passar o tempo, finalizando com uma taxa de 25,32%, aos 168 dias. Um fator que auxilia na compreensão desta elevação rápida na taxa de autocatrização pode estar alinhado com a umidade relativa mais elevada neste período inicial de exposição.

O ambiente natural protegido alcançou uma taxa de autocatrização média de 20,93% aos 140 dias de exposição, entretanto apresentou variação ao longo do tempo, tendo períodos com aumento da taxa e outros períodos com redução. Esta variação pode ser atribuída às condições de exposição, uma vez que os concretos recebem influência indireta das

intemperes. Neste período, observam-se temperaturas mais baixas e oscilação na umidade relativa do ar (Figura 47 e Figura 48).

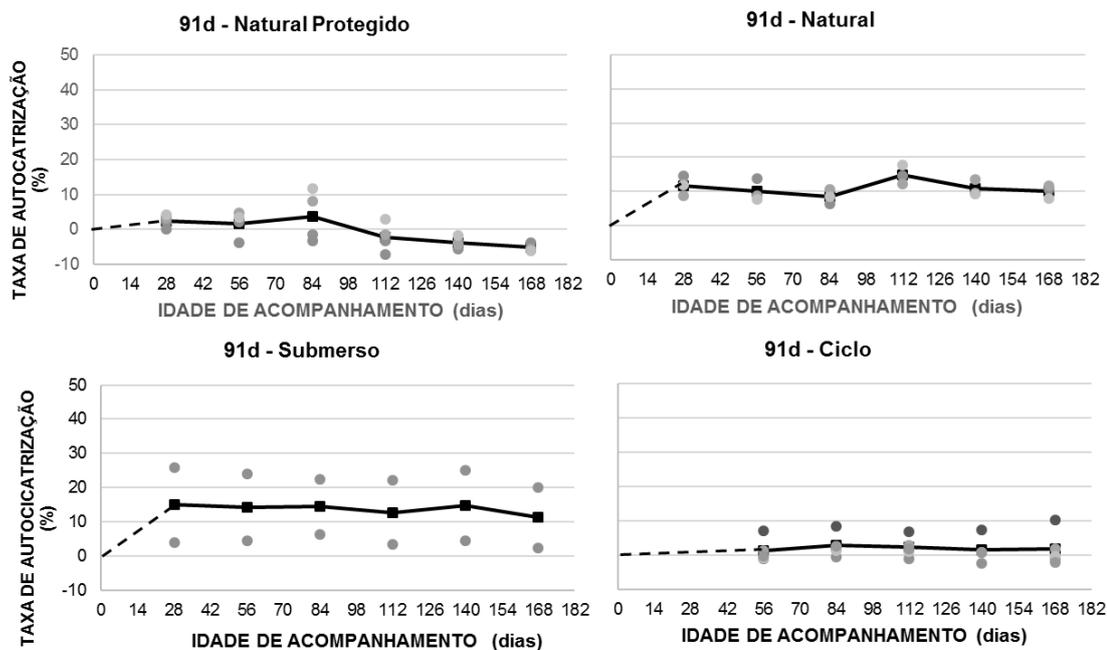
Já o ambiente de ciclo de secagem e molhagem também se mostrou benéfico quando ao incremento da taxa de autocicatrização autógena, entretanto, de todos os ambientes avaliados, foi o que apresentou as menores taxas, chegando a 14,90% aos 112 dias, após esta idade observa-se uma redução gradual.

Na Figura 115 são apresentados os resultados obtidos de taxa de autocicatrização para fissuras abertas aos 91 dias. Comparando aos resultados obtidos para fissuras geradas aos 3 e 28 dias de abertura, observa-se que as que foram induzidas aos 91 dias de idade da matriz cimentícia apresentam redução na capacidade de autocicatrização.

O ambiente submerso mostrou-se mais benéfico quanto à taxa de autocicatrização, apresentando valores de 14,91% para a idade de 28 dias. Entretanto, com o passar o tempo observa-se uma redução na taxa, chegando a 11,22% na idade de 168 dias após o início da exposição. Esta estabilização pode estar ligada às condições do ambiente.

O ambiente Natural foi o segundo a apresentar resultados positivos, alcançando taxa de autocicatrização de 14,82% aos 112 dias de exposição, entretanto, observa-se ao longo de todo o período analisado uma oscilação, fator que pode estar sendo influenciado pelo ambiente de exposição. Nos primeiro 28 dias de exposição, observa-se que a temperatura média ficou entre 10 e 20°C e a UR era de pelo menos 60%, entretanto, com o passar do tempo, nota-se um aumento gradual na temperatura e uma redução na UR (Figura 47 e Figura 48).

Figura 115: Taxa de autocatrização para abertura de fissura aos 91 dias, relação água/cimento 0,65 e ambientes de exposição



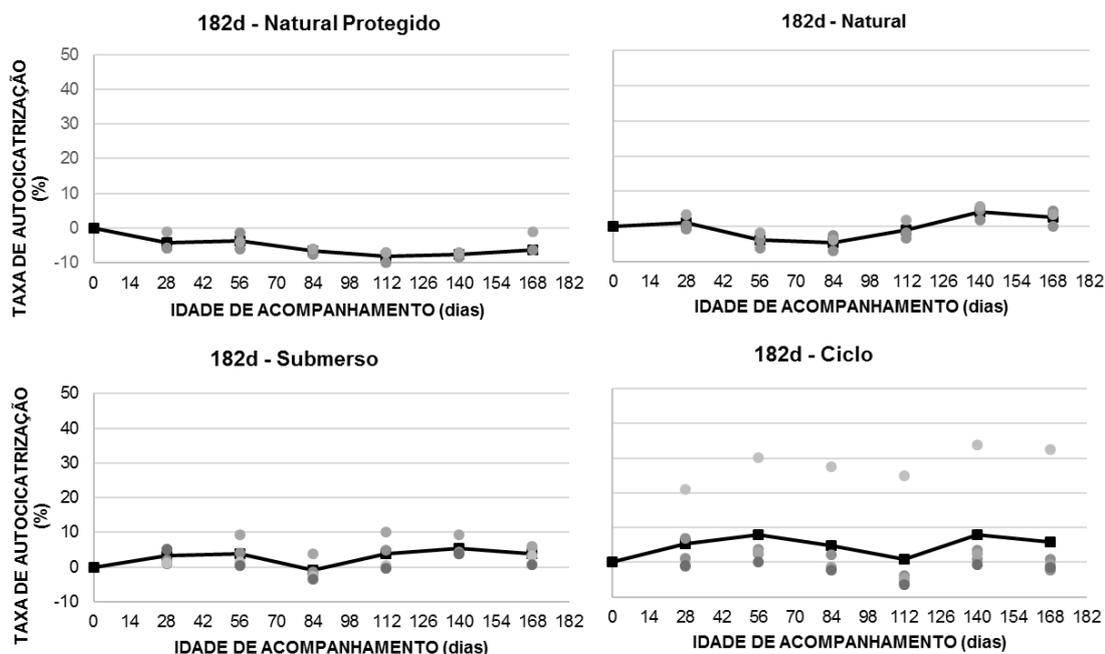
Fonte: própria da autora.

O ambiente ciclo de secagem e molhagem apresentou taxas de autocatrização relativamente baixas, chegando ao valor de 2,73% na idade de 84 dias, e mantendo-se constante até o final do estudo.

O ambiente Natural Protegido chegou a alcançar uma taxa de 3,7% na idade de 84 dias, após esta idade observa-se uma redução gradual, chegando a valores de -5,23%. Após a idade de 84 dias de exposição, as condições climáticas não foram favoráveis, a temperatura começa a aumentar e a UR reduz (Figura 47 e Figura 48).

Na Figura 116 são retratadas as taxas de autocatrização para concretos fissurados aos 182 dias de idade. Comparando com as idades de abertura de 3, 28 e 91 dias, nota-se claramente a redução na capacidade de autocatrização da matriz cimentícia.

Figura 116: Taxa de autocicatrização para abertura de fissura aos 182 dias, relação água/cimento 0,65 e ambientes de exposição



Fonte: própria da autora.

O ambiente de exposição ciclo de secagem e molhagem apresentou taxa de autocicatrização de 7,99% para a idade de 140 dias após o início da exposição. Ao longo de todo o tempo de exposição, observa-se uma variação na taxa, o que pode estar atrelado a uma possível lixiviação e carbonatação do hidróxido de cálcio.

O ambiente submerso também mostrou incremento na taxa de autocicatrização, chegando a valores de 5,3%% na idade de 140 dias de exposição. Esta mesma tendência, é observada para o ambiente ciclo.

O ambiente natural, nos primeiros 28 dias, não apresentou resultado benéfico. Entre 28 e 84 dias observa-se uma taxa negativa, o que pode ser influência das condições climáticas, pois foi um período de aumento da temperatura e UR baixa, ficando em alguns períodos inferior a 60%. A partir dos 84 dias de exposição nota-se uma pequena recuperação, chegando a uma taxa de 4% na idade de 140 dias.

O ambiente natural protegido não apresentou variação positiva quanto à taxa de autocicatrização. As condições climáticas do período não foram benéficas uma vez que durante sua exposição as temperaturas foram as mais altas e a umidade relativa foi a mais baixa.

Diante dos pontos elencados acima, para a análise da significância das variáveis controladas como idade de abertura da fissura e ambiente de exposição, foi realizada uma Análise de variância (ANOVA), com fatorial cruzado, na ferramenta *Statistica 8*, onde se obtiveram os resultados apresentados na Tabela 35.

Tabela 35: ANOVA taxa de autocicatrização média das fissuras para a idade de 168 dias após a abertura da fissura, para concretos com relação a/c 0,65.

Efeitos	SQ	GL	SQF	Teste F	p	Sig.
Idade de abertura da fissura (dias)	3137,348	3	1045,783	12,98563	0,000004	S
Ambiente de exposição	1137,885	3	379,295	4,70976	0,006263	S
Idade de abertura da fissura (dias)*Ambiente de exposição	1208,161	9	134,240	1,66688	0,127042	N
Error	3462,954	43	80,534			

SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade (n-1); SQF: média quadrática; Teste F(calc): valor calculado de F; p: nível de significância; Se  $p < 5\%$  = efeito significativo

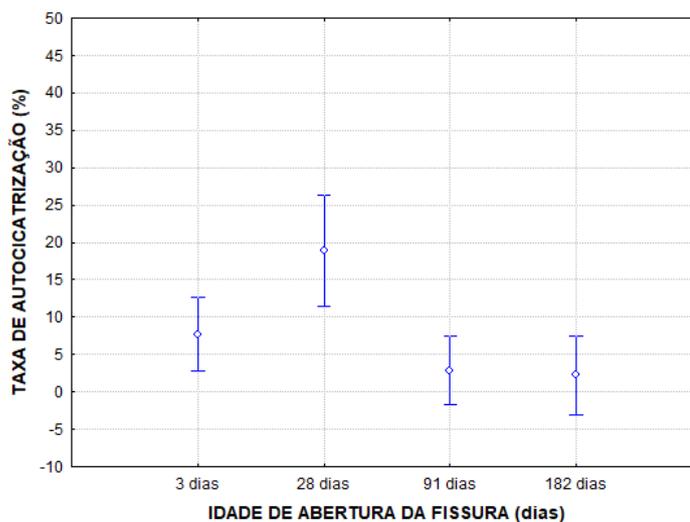
Analisando a Tabela 35, a idade de abertura da fissura e o ambiente de exposição são fatores significativos, logo influenciam diretamente na taxa de autocicatrização das matrizes cimentícias.

Na Figura 117 é apresentada a influência da idade de abertura da fissura, de forma isolada, frente à taxa de autocicatrização. Através desta análise, pode-se afirmar que as fissuras que foram geradas na idade de 28 dias apresentaram uma maior taxa de autocicatrização, o que reflete a melhor capacidade de cicatrização das matrizes cimentícias nesta idade. Fato que não era esperado, uma vez que a literatura (TER HEIDE e SCHLANGEN, 2007; SNOECK, 2015; HUNG, 2016, QURESHI *et al.*, 2018; CAPPELLESSO, 2018; QURESHI *et al.*, 2019), trata que idades mais precoces tendem a se regenerar de forma mais expressiva. Nas primeiras idades de abertura das fissuras o mecanismo predominante na autocicatrização é a hidratação dos grãos anidros de cimento (LI e YANG, 2007; YANG *et al.*, 2009, SHIM *et al.*, 2015); NEVILLE, 2016). Em idades mais avançadas o mecanismo predominante na autocicatrização é a lixiviação e carbonatação do  $\text{Ca(OH)}_2$  (NEVILLE, 2002; VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013).

O que pode explicar esta inversão no comportamento, está atrelado a espessura das fissuras, que aos 28 dias é maior quando comparada a idade de 3 dias. Esta maior espessura permite a entrada de água e  $\text{CO}_2$  com maior facilidade e possibilita também espaço para o crescimento dos produtos decorrentes do processo de autocicatrização, desta forma contribuindo para a taxa de autocicatrização. Fato que corrobora com os estudos realizados por Gagné e Argouges (2012), que observaram que fissuras maiores apresentavam taxa de

autocicatrização maiores, uma vez que o espaço disponível para o crescimento dos produtos não é limitado e por permitir a entrada de CO<sub>2</sub> e água com maior facilidade.

Figura 117: Efeito isolado da idade de abertura da fissura na taxa de autocicatrização para concretos com relação a/c 0,65.

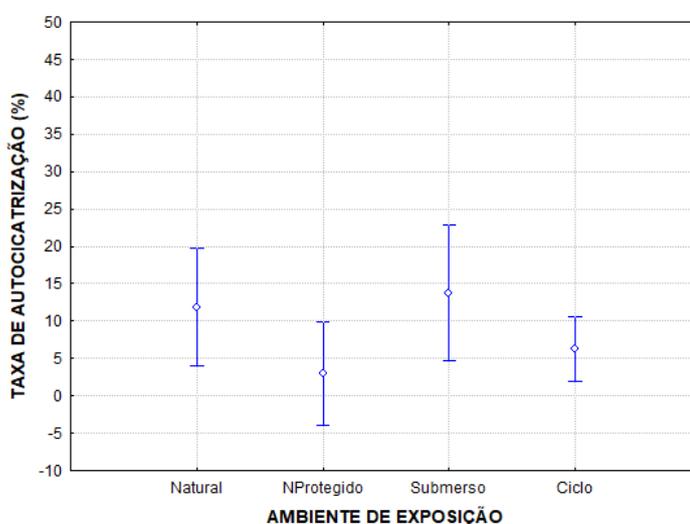


Fonte: própria da autora.

Estatisticamente, a partir do teste de Fisher, pode-se concluir que não há diferença significativa entre as idades de abertura de fissura aos 91 e 182 dias.

Na Figura 118, é apresentada a influência do ambiente de exposição, de forma isolada, sobre a taxa de autocicatrização.

Figura 118: Efeito isolado do ambiente de exposição na taxa de autocicatrização para concretos com relação a/c 0,65.



Fonte: própria da autora.

Observa-se que o ambiente de exposição submerso responde melhor quanto ao potencial de autocicatrização, seguido pelo ambiente Natural e Ciclos, destes resultados corroboram em

parte com os observados por Roig – Flores *et al.* (2015), cujos autores citam que a autocicatrização de concretos quando expostos em quatro diferentes tipos de ambiente: imerso em água sem renovação, em contato com uma camada de água sob pressão, câmara úmida e exposto ao ar sem influência externa, conclui que os concretos que ficaram imersos em água tiveram uma taxa de cicatrização maior que os demais, seguido pelos concretos que ficaram em contato com a água, câmara úmida e a menor taxa foi apresentada pelo exemplar exposto ao ar. Analisando a partir do teste de Fisher é possível afirmar que estatisticamente, os ambientes natural, submerso e ciclo são iguais.

Já o ambiente Natural Protegido foi o que menos influenciou na taxa de autocicatrização, fato que se justifica pela indisponibilidade frequente de água neste ambiente, uma vez que a presença dela é essencial para que o fenômeno da autocicatrização autógena ocorra (VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013).

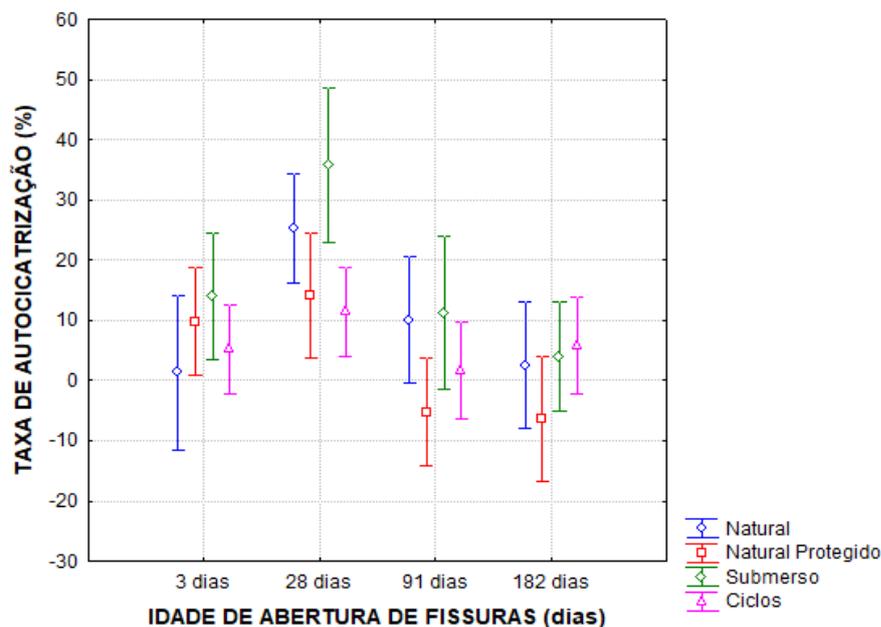
Embora a interação entre idade de abertura de fissura e ambiente de exposição não tenha sido considerada significativa quanto a sua influência na taxa de autocicatrização das matrizes cimentícias, optou-se por mostrá-la na Figura 119, uma vez que pode auxiliar na compreensão do comportamento apontado nas análises já elencadas.

Analisando estatisticamente através do teste de Fisher, observou-se que para fissuras abertas na idade de 3 dias, o ambiente de exposição não exerceu influência significativa sobre a taxa de autocicatrização, comportamento observado para as fissuras geradas na idade de 182 dias. Quando avaliada a influência exercida pelo ambiente de exposição sobre a taxa de autocicatrização para a idade de 28 dias, o ambiente ciclo se diferencia do natural e submerso e o ambiente submerso se diferencia do natural protegido, as demais comparações são consideradas iguais, logo não significativas. Para a idade de 91 dias, apenas os ambientes natural protegido e submerso diferenciam-se, os demais não.

Para a idade de 3 dias, esperava-se a melhor condição para o desenvolvimento da autocicatrização dos concretos analisados, uma vez que de acordo com Gruyaert *et al.* (2010), Jaroenratanapirom e Sahamitmongkol (2011), Hung e SU (2016), Qureshi *et al.* (2018), concretos jovens apresentam melhores condições para o desenvolvimento da cicatrização autógena. Snoeck (2015) ressalta que concretos jovens apresentam maior quantidade de grãos de cimento não hidratado, para precipitar C-S-H no interior de fissuras, abertas nas primeiras idades, decorrente da hidratação contínua, e posterior precipitação de carbonato. Um fator que pode auxiliar na compreensão dos resultados, conforme tratado por Roig-Flores *et al.* (2015), está atrelado à geometria interna da fissura, ao longo da sua profundidade, já

que a taxa de autocicatrização foi calculada através do ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas.

Figura 119: Efeito da interação entre a idade de abertura da fissura e ambiente de exposição na taxa de autocicatrização, para concretos com relação a/c 0,65.



Fonte: própria da autora.

Para as idades de 91 e 182 dias, observou-se uma redução na capacidade da matriz cimentícia autocicatrizar, o que corrobora os estudos desenvolvidos por Ter Heide e Schlangen (2007), que avaliaram a capacidade de recuperação da resistência e concluíram que concretos nos quais a fissuração aconteceu em idades mais avançadas a recuperação é menor, quando se compara a de concretos fissurados nas primeiras idades. De acordo com Neville (2002), em concretos com idades mais avançadas, a carbonatação é o mecanismo que favorece a autocicatrização autógena.

Quanto ao ambiente de exposição, em todas as idades avaliadas, o ambiente submerso apresentou as melhores taxas, fato também observado por Lauch *et al.* (2020), que avaliaram a autocicatrização em concretos reforçados com fibra de aço com o uso de agente expansivo, através do ensaio de permeabilidade. Para as amostras de referência (sem o uso do agente expansivo) observaram que os corpos de prova que foram expostos no ambiente submerso (imerso em água) apresentaram menor variabilidade na taxa de autocicatrização quando comparado com as amostras submetidas ao ciclo úmido e seco e ao ar livre, fato que corrobora com o observado nesta pesquisa.

Quanto ao ambiente natural, notou-se que há uma possibilidade de desenvolvimento de autocicatrização em todas as idades avaliadas, o que corrobora com os trabalhos Herbert e

Li (2012), Herbert e Li (2013) e Lauch *et al.* (2020). Os autores salientam que fatores climáticos, tais como: insolação, precipitação, entre outros, não impedem a matriz de apresentar autocicatrização. Entretanto, os pesquisadores ressaltam a importância da realização de outros trabalhos avaliando ambientes naturais de exposição.

Esperava-se que o ambiente ciclo de secagem e molhagem responderia melhor à taxa de autocicatrização, uma vez que neste ambiente é possível dispor de água e CO<sub>2</sub> de forma alternada, o que, segundo a literatura, é o dos fatores necessários para o desenvolvimento da autocicatrização autógena. De acordo com Van Tittelboom e De Belie (2013), a presença de água é fundamental para que o fenômeno ocorra. Segundo De Rooij *et al.* (2013), a autocicatrização autógena nas matrizes cimentícias está baseada nas causas químicas com a hidratação contínua e a formação de CaCO<sub>3</sub>. Homma *et al.* (2009) defendem que o dióxido de carbono no ar é dissolvido em água e o íon cálcio Ca<sup>2+</sup> é derivado do concreto. Desta maneira a combinação entre o CO<sub>2</sub> e o Ca<sup>2+</sup> resultaria na produção de cristais de carbonato de cálcio, sendo considerada uma das causas químicas para a incidência da autocicatrização autógena (REINHARDT *et al.*, 2013).

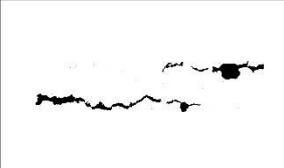
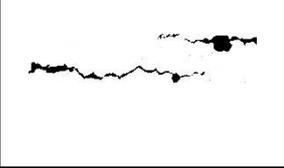
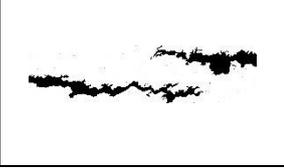
#### 4.3.3 Microscopia ótica

A partir da realização do ensaio de microscopia ótica, foi possível avaliar, também, a área da fissura e a sua evolução ao longo do tempo, quanto ao fechamento superficial. A área foi calculada para 3 idades: no dia da abertura da fissura, 28 dias após e no final da realização dos ensaios, aos 168 dias.

Cabe lembrar que o ensaio de velocidade de propagação de ondas foi empregado para avaliar a taxa de autocicatrização, o que reflete a influência da autocicatrização dentro da fissura, já o ensaio de microscopia ótica reflete as características de tamponamento externo da fissura. A sequência completa do processamento de imagens está no Apêndice F.

Analisando o Quadro 20, é possível verificar que as fissuras geradas na idade de 3 dias, quando expostas ao ambiente natural, superficialmente não apresentam uma redução da espessura da fissura, pelo contrário, devido à degradação do corpo de prova, nota-se que a área aumenta com o passar do tempo, principalmente para a idade de 168 dias.

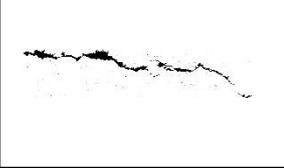
Quadro 20: Acompanhamento por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias, 3 dias de idade de abertura de fissuras no ambiente de exposição natural.

	Intervalo 4 (I4)	Intervalo 5 (I5)	Área detectada da fissura (mm <sup>2</sup> ) – I4	Área detectada da fissura (mm <sup>2</sup> ) – I5
0 dias				
28 dias				
168 dias				

Fonte: própria da autora.

No Quadro 21 é apresentada a evolução da área das fissuras ao longo do tempo, induzidas na idade de 3 dias e expostas no ambiente natural protegido. Nota-se que não há redução no parâmetro avaliado, externamente não se observa a formação de produtos de aut cicatrização na fissura. Entretanto, nota-se uma degradação sobre a superfície do concreto, oriunda do desprendimento de algumas partes da fissura nas idades mais avançadas, contribuindo para um aumento da área da fissura ao longo do tempo.

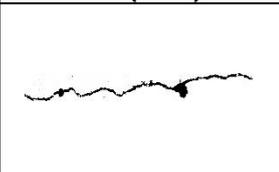
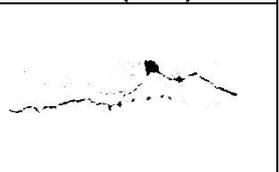
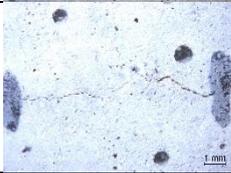
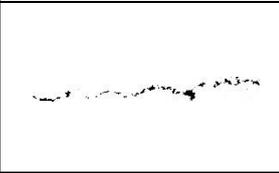
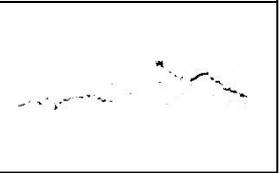
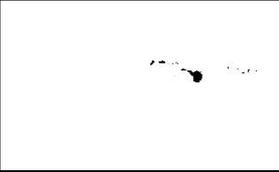
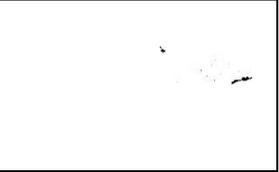
Quadro 21: Acompanhamento por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias, para 3 dias de idade de abertura de fissuras no ambiente de exposição natural protegido.

	Intervalo 4	Intervalo 5	Área detectada da fissura (mm <sup>2</sup> ) – I4	Área detectada da fissura (mm <sup>2</sup> ) – I5
0 dias				
28 dias				
168 dias				

Fonte: própria da autora.

Avaliando as informações contidas no Quadro 22, observa-se que o ambiente submerso contribuiu para o selamento superficial da fissura. Provavelmente o material de fechamento seja resultante da lixiviação do hidróxido de cálcio, induzido pelo ambiente de exposição, contribuindo para a deposição de  $\text{CaCO}_3$  nas fissuras (WU *et al.* 2012; REDDY *et al.*, 2019). De acordo com Edvardsen (1999), quando o  $\text{CO}_2$  presente no ar se dissolve na água, os íons  $\text{CO}_3^{2-}$  se difundem na borda da fissura, quando a concentração de íons  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{CO}_3^{2-}$  atinge um nível de supersaturação, ocorre a precipitação do  $\text{CaCO}_3$  na fissura.

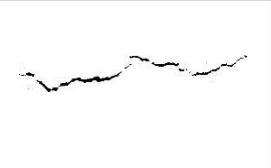
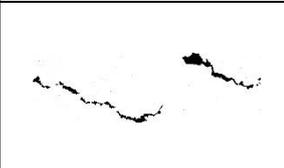
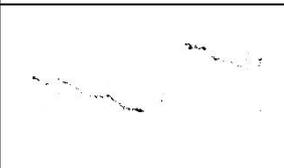
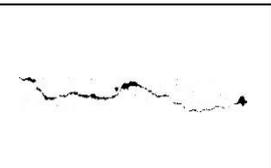
Quadro 22: Acompanhamento por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias, para 3 dias de idade de abertura de fissuras no ambiente de exposição submerso.

	Intervalo 4	Intervalo 5	Área detectada da fissura ( $\text{mm}^2$ ) – I4	Área detectada da fissura ( $\text{mm}^2$ ) – I5
0 dias				
28 dias				
168 dias				

Fonte: própria da autora.

No Quadro 23 é apresentada a evolução da área das fissuras ao longo do tempo, induzidas na idade de 3 dias e expostas no ambiente ciclo. Nota-se que há uma redução da área da fissura, entretanto, é menor que o observado para o ambiente submerso. Sisomphon *et al.* (2013) avaliaram a autocicatrização de compósitos cimentícios expostos em quatro ambientes, sendo que o ciclo úmido/seco de 12/12h foi o que apresentou melhores resultados. Roig-Flores *et al.* (2016), também avaliaram a autocicatrização de matrizes cimentícias com ciclos de 12/12h e obtiveram os mesmos resultados. Entretanto, Arndt (2019) e Ziegler (2020) analisaram concretos com adição de cristalizante submetidos a ciclos de molhagem e secagem de 14 dias (2 dias imersos e 12 dias ao ar) e os dois pesquisadores não obtiveram os resultados esperados quanto à autocicatrização. Arndt (2019) aponta que o ciclo utilizado 2/12 dias não foi eficiente, uma vez que os concretos ficavam apenas 2 dias submerso e 12 dias expostos ao ar, permanecendo maior período sem contato com a água. Sisomphon *et al.* (2013) e Roig-Flores *et al.* (2016) empregaram tempos de exposição iguais e menores para as duas etapas.

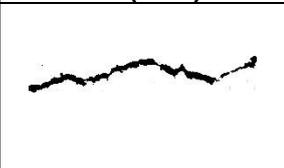
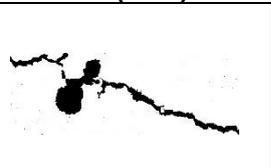
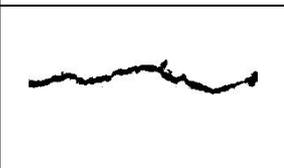
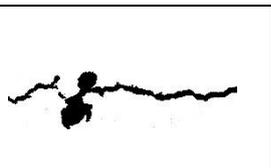
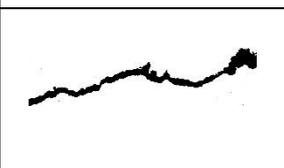
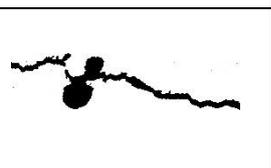
Quadro 23: Acompanhamento por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias, para 3 dias de idade de abertura de fissuras no ambiente de exposição ciclo.

	Intervalo 4	Intervalo 5	Área detectada da fissura (mm <sup>2</sup> ) – I4	Área detectada da fissura (mm <sup>2</sup> ) – I5
0 dias				
28 dias				
168 dias				

Fonte: própria da autora.

Avaliando o Quadro 24, é possível observar uma leve redução na área da fissura, principalmente onde ela apresenta espessura reduzida. Entretanto, observando o resultado no final dos 168 dias, há uma degradação da superfície do concreto e das bordas da fissura, o que contribui para o aumento da sua área. A falta de água constante neste ambiente não auxiliou na formação de compostos para o selamento da fissura.

Quadro 24: Acompanhamento por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias, para 28 dias de idade de abertura de fissuras no ambiente de exposição natural.

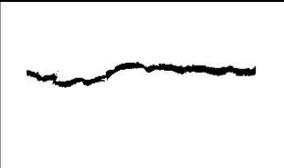
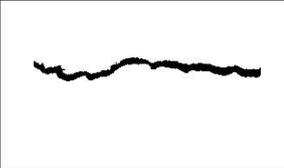
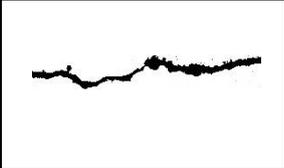
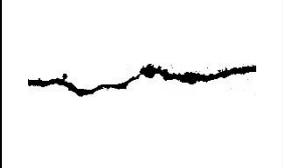
	Intervalo 4	Intervalo 5	Área detectada da fissura (mm <sup>2</sup> ) – I4	Área detectada da fissura (mm <sup>2</sup> ) – I5
0 dias				
28 dias				
168 dias				

Fonte: própria da autora.

O Quadro 25 mostra a evolução da área da fissura, quando gerada na idade de 28 dias e exposta ao ambiente natural protegido. Não é possível verificar a formação de produtos de

fechamento da fissura, apenas observa-se a degradação sofrida pelo concreto, principalmente nas bordas da fissura, contribuindo para o aumento da área.

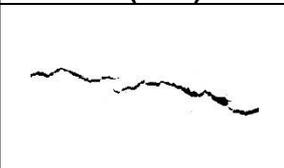
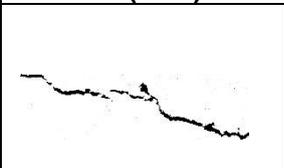
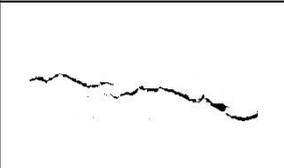
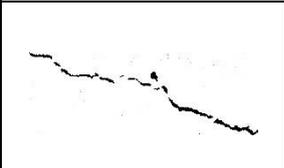
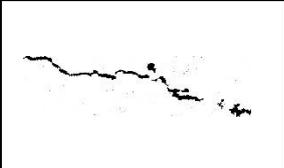
Quadro 25: Acompanhamento por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias, para 28 dias de idade de abertura de fissuras no ambiente de exposição natural protegido.

	Intervalo 4	Intervalo 5	Área detectada da fissura (mm <sup>2</sup> ) – I4	Área detectada da fissura (mm <sup>2</sup> ) – I5
0 dias				
28 dias				
168 dias				

Fonte: própria da autora.

No Quadro 26, pode-se observar a resposta obtida para fissuras induzidas na idade de 28 dias e expostas no ambiente ciclo, onde há uma redução da área ao longo de todo o tempo, embora não uniforme.

Quadro 26: Acompanhamento por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias, 28 dias de idade de abertura de fissuras no ambiente de exposição ciclo.

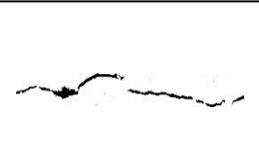
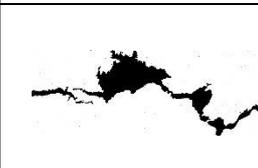
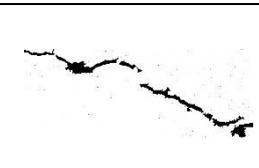
	Intervalo 4	Intervalo 5	Área detectada da fissura (mm <sup>2</sup> ) – I4	Área detectada da fissura (mm <sup>2</sup> ) – I5
0 dias				
28 dias				
168 dias				

Fonte: própria da autora.

O Quadro 27 apresenta os resultados obtidos para as fissuras geradas na idade de 91 dias e expostas no ambiente natural, avaliando a área detectada no intervalo 4. Na idade de 28 dias

há um aumento da área da fissura, que pode estar correlacionada com os parâmetros adotados na captura da imagem, causando um sombreamento, o que mascara a fissura durante o processamento da imagem.

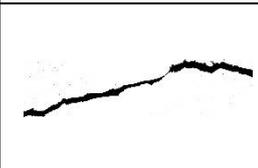
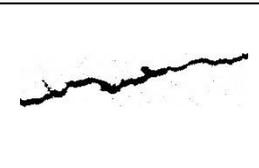
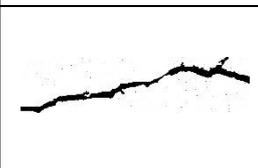
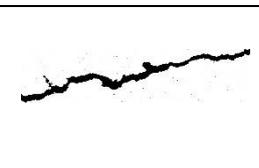
Quadro 27: Acompanhamento por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias, 91 dias de idade de abertura de fissuras no ambiente de exposição natural.

	Intervalo 4	Intervalo 5	Área detectada da fissura (mm <sup>2</sup> ) – I4	Área detectada da fissura (mm <sup>2</sup> ) – I5
0 dias				
28 dias				
168 dias				

Fonte: própria da autora.

Os resultados obtidos para as fissuras abertas na idade de 91 dias e exposta no ambiente natural protegido são apresentadas no Quadro 28, onde não é possível verificar redução significativa na área da fissura.

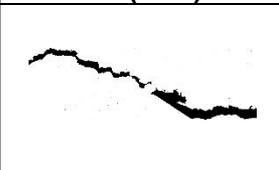
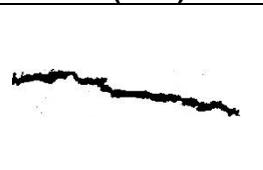
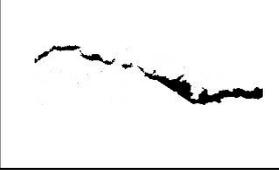
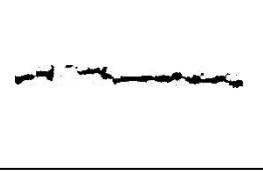
Quadro 28: Acompanhamento por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias, 91 dias de idade de abertura de fissuras no ambiente de exposição natural protegido.

	Intervalo 4	Intervalo 5	Área detectada da fissura (mm <sup>2</sup> ) – I4	Área detectada da fissura (mm <sup>2</sup> ) – I5
0 dias				
28 dias				
168 dias				

Fonte: própria da autora.

O Quadro 29 demonstra a evolução da área da fissura, quando gerada na idade de 91 dias e exposta no ambiente submerso. Nota-se que há redução na variável analisada, embora com menos intensidade do que verificado para fissuras abertas em idades mais jovens. Acredita-se que este fato esteja ligado à redução na disponibilidade de cimento anidro (idade da fissura e relação  $a/c$ ). De acordo com Shim *et al.* (2015), os principais fatores para a incidência do fenômeno de autocatrização dos compostos cimentícios, são o controle sobre a porosidade e o grau de hidratação do cimento. Desta forma, as matrizes cimentícias, quando submetidas à fissuração em idades iniciais, apresentam um melhor potencial para a autocatrização (JAROENRATANAPIROM E SAHAMITMONGKOL, 2011; HUNG, 2016; QURESHI *et al.*, 2018).

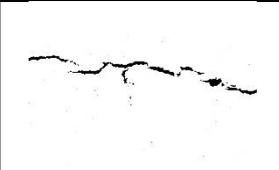
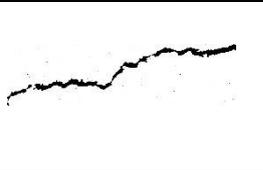
Quadro 29: Acompanhamento por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias, 91 dias de idade de abertura de fissuras no ambiente de exposição submerso.

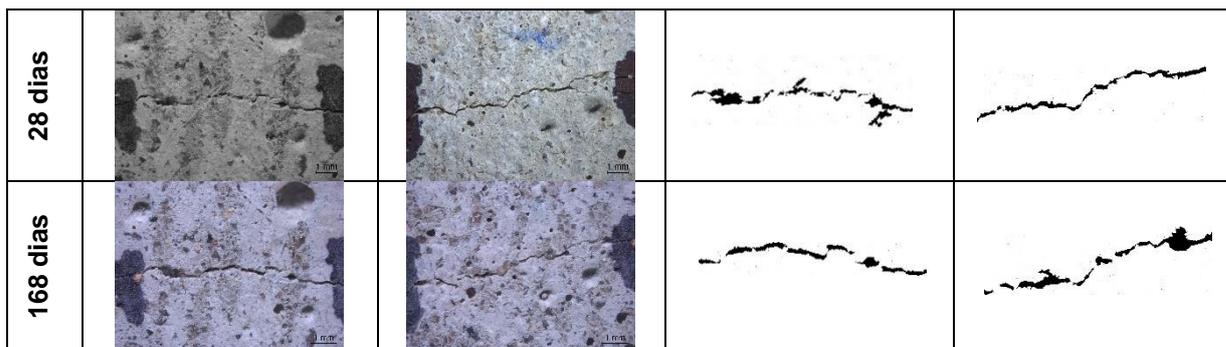
	Intervalo 4	Intervalo 5	Área detectada da fissura (mm <sup>2</sup> ) – I4	Área detectada da fissura (mm <sup>2</sup> ) – I5
0 dias				
28 dias				
168 dias				

Fonte: própria da autora.

A evolução da área da fissura gerada na idade de 91 dias e exposta no ambiente ciclo é apresentada no Quadro 30. De uma forma geral, observa-se uma redução na área da fissura, principalmente no intervalo 4.

Quadro 30: Acompanhamento por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias, 91 dias de idade de abertura de fissuras no ambiente de exposição ciclo.

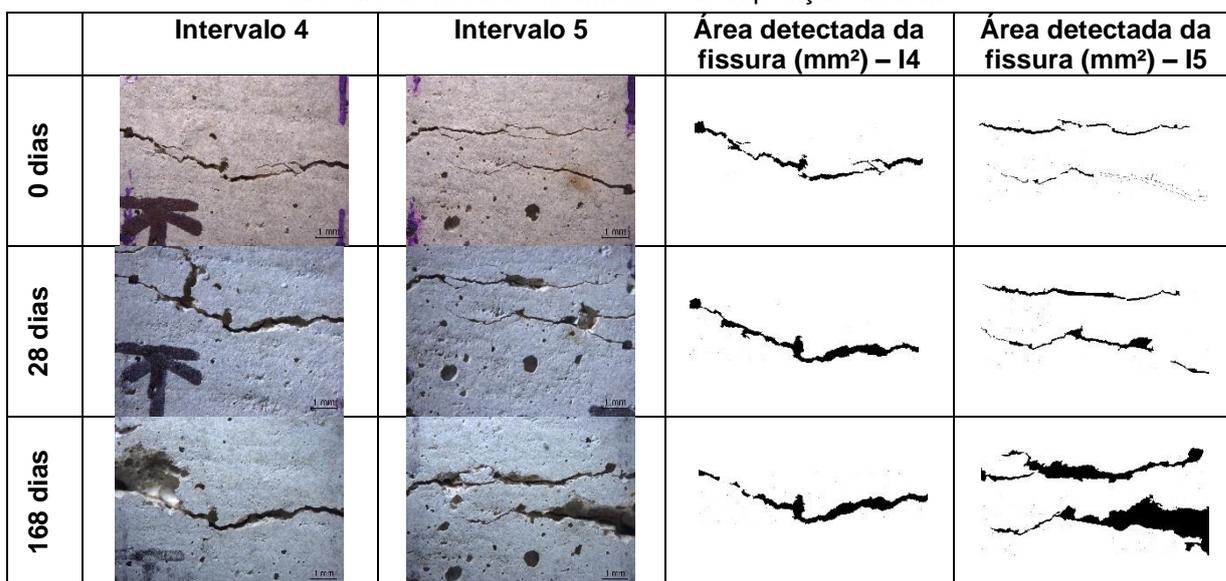
	Intervalo 4	Intervalo 5	Área detectada da fissura (mm <sup>2</sup> ) – I4	Área detectada da fissura (mm <sup>2</sup> ) – I5
0 dias				



Fonte: própria da autora.

O Quadro 31 mostra a área detectada da fissura, quando induzida na idade de 182 dias e exposta no ambiente natural. É possível verificar uma grande degradação na superfície do concreto e, junto às bordas da fissura, observa-se também os desprendimentos de parte do concreto. O ambiente de exposição contribui para parte destas constatações, uma vez que o concreto sofreu incidência direta das intempéries, durante o período do verão, onde a umidade relativa é menor e a amplitude térmica é maior. Desta forma, contribuindo para o aumento da área da fissura.

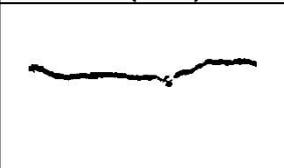
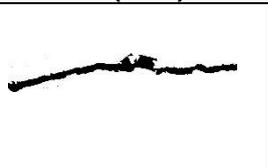
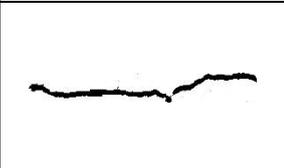
Quadro 31: Acompanhamento por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias, 182 dias de idade de abertura de fissuras no ambiente de exposição natural.



Fonte: própria da autora.

Analisando o Quadro 32, que apresenta a área da fissura gerada na idade de 182 dias e ambiente de exposição natural protegido, não é possível verificar redução na área das fissuras.

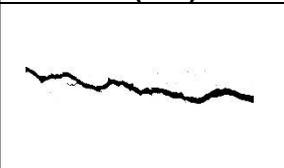
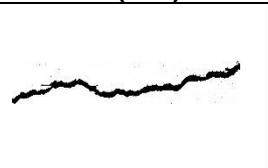
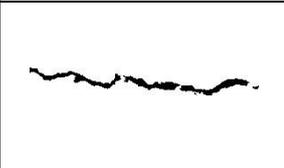
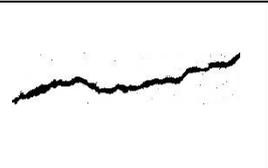
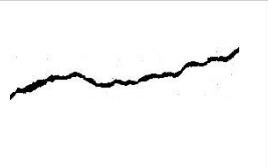
Quadro 32: Acompanhamento por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias, 182 dias de idade de abertura de fissuras no ambiente de exposição natural protegido.

	Intervalo 4	Intervalo 5	Área detectada da fissura (mm <sup>2</sup> ) – I4	Área detectada da fissura (mm <sup>2</sup> ) – I5
0 dias				
28 dias				
168 dias				

Fonte: própria da autora.

No Quadro 33 observam-se os resultados obtidos para as fissuras geradas com 182 dias e expostas ao ambiente submerso. Nota-se uma redução na área da fissura, principalmente na idade de 28 dias, após a redução é sutil. Comparando com as fissuras geradas nas idades anteriores, observa-se a redução significativa na capacidade de aut cicatrização da matriz cimentícia.

Quadro 33: Acompanhamento por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias, 182 dias de idade de abertura de fissuras no ambiente de exposição submerso.

	Intervalo 4	Intervalo 5	Área detectada da fissura (mm) – I4	Área detectada da fissura (mm) – I5
0 dias				
28 dias				
168 dias				

Fonte: própria da autora.

O Quadro 34 apresenta a evolução da área da fissura ao longo do tempo, quando induzida na idade de 182 dias e exposta no ambiente ciclo. Nota-se uma redução maior na idade de 28 dias. Diferente do observado para o ambiente submerso, neste o fechamento ocorre

através da redução das espessuras, os produtos de autocicatrização se acumulam mais próximos às bordas da fissura. De acordo com Sisomphon e Çopuroğlu (2012), próximo à borda da fissura há uma concentração maior de  $\text{CO}_2$  do que internamente, logo o  $\text{CaCO}_3$  tende a se precipitar perto da borda da fissura, provocando essa redução na área da fissura, das bordas para o meio.

Quadro 34: Acompanhamento por microscopia ótica aos 0, 28 e 168 dias, 182 dias de idade de abertura de fissuras no ambiente de exposição ciclo.

	Intervalo 4	Intervalo 5	Área detectada da fissura ( $\text{mm}^2$ ) – I4	Área detectada da fissura ( $\text{mm}^2$ ) – I5
0 dias				
28 dias				
168 dias				

Fonte: própria da autora.

Através do processamento das imagens apresentadas nos quadros anteriores, foi possível calcular a área de cada fissura ao longo do tempo, sendo possível verificar ou não a redução deste parâmetro, frente ao fenômeno da autocicatrização, apresentados na Tabela 36 e na Figura 120.

Tabela 36: Evolução da área média (%) das fissuras nas idades de abertura avaliadas aos 3, 28, 91 e 182 dias aos 28 e 168 dias.

Ambiente de exposição	3 dias		28 dias		91 dias		182 dias	
	28 dias	168 dias	28 dias	168 dias	28 dias	168 dias	28 dias	168 dias
NP	22,67	19,97	13,32	1,37	31,98	-6,30	3,22	8,92
N	-15,02	43,32	8,96	-10,23	4,00	-6,27	40,91	27,47
S	-46,80	-93,41	----	----	-19,34	-45,15	-8,84	-12,98
C	-44,79	-51,29	-22,91	-39,70	-33,50	-27,52	-31,84	-8,65

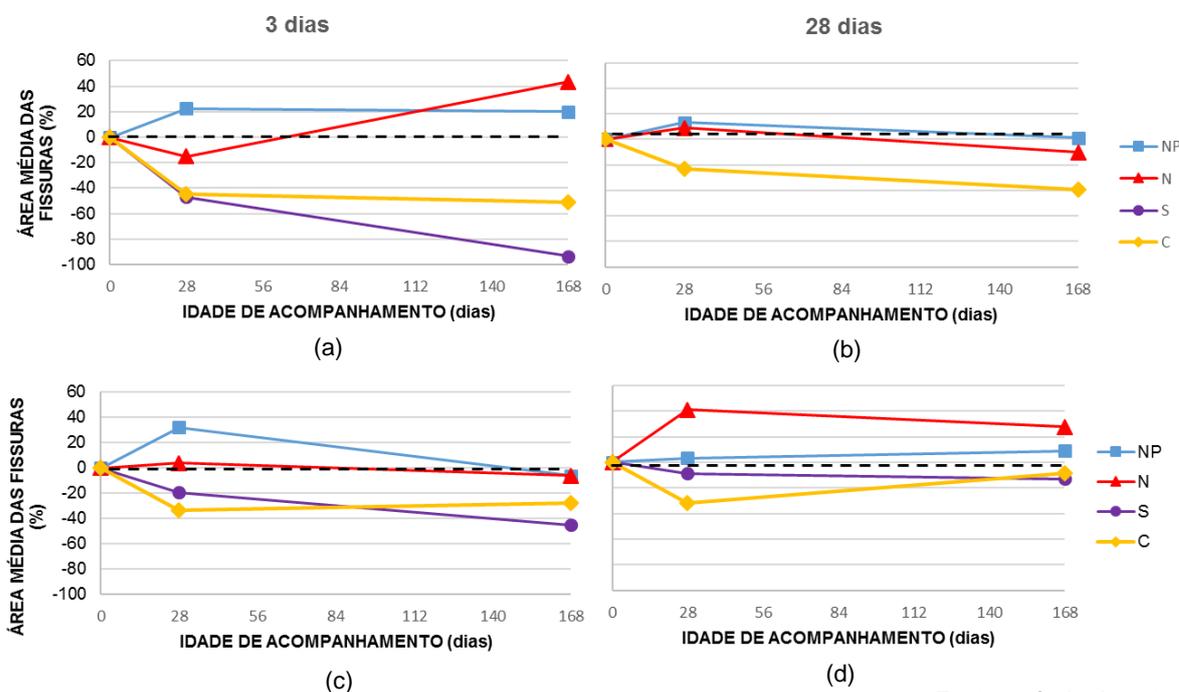
NP: Natural protegido; N: Natural; S: Submerso; C: Ciclo de molhagem e secagem; O sinal negativo junto aos valores sinaliza o percentual de redução na área da fissura.

Observa-se que a redução na área média é maior para fissuras geradas nas idades mais jovens, o que se justifica pelo mecanismo predominante de cicatrização nestas idades estar ligada a hidratação dos grãos anidros de cimento (LI e YANG, 2007; YANG *et al.*, 2009, SHIM *et al.*, 2015); NEVILLE, 2016).

Observa-se uma redução na área da fissura, com o passar o tempo (de 3 para 168 dias), principalmente para os ambientes submerso e ciclo. Nota-se também que os ambientes que apresentam melhores respostas são o ciclo de molhagem e secagem e o submerso, sendo o último o que apresenta maiores ganhos quanto ao tamponamento superficial. De acordo com a literatura ((TER HEIDE e SCHLANGEN, 2007; LI e YANG, 2007; YANG *et al.*, 2009; ROIG-FLORES *et al.*, 2015; HUNG, 2016; CUECA *et al.*, 2018), a autocicatrização é desencadeada apenas com a entrada de água pelas fissuras, as condições de exposição à umidade, seja pela umidade relativa do ar, pela exposição às águas das chuvas, tipicamente observadas em estruturas desabrigadas, ou pela total saturação nas estruturas submersas em água.

Quanto mais tarde a fissura é gerada menor é a capacidade de formação de produtos de autocicatrização na superfície externa à fissura, o que pode estar ligado a redução na disponibilidade de grãos de cimento anidro, mas também ao mecanismo predominante de autocicatrização em idades mais avançadas, que se dá pela lixiviação e carbonatação do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (NEVILLE, 2002; VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013).

Figura 120: Acompanhamento da área superficial da fissura ao longo do tempo. (a) abertura aos 3 dias; (b) abertura aos 28 dias; (c) abertura aos 91 dias; (d) abertura aos 182 dias.

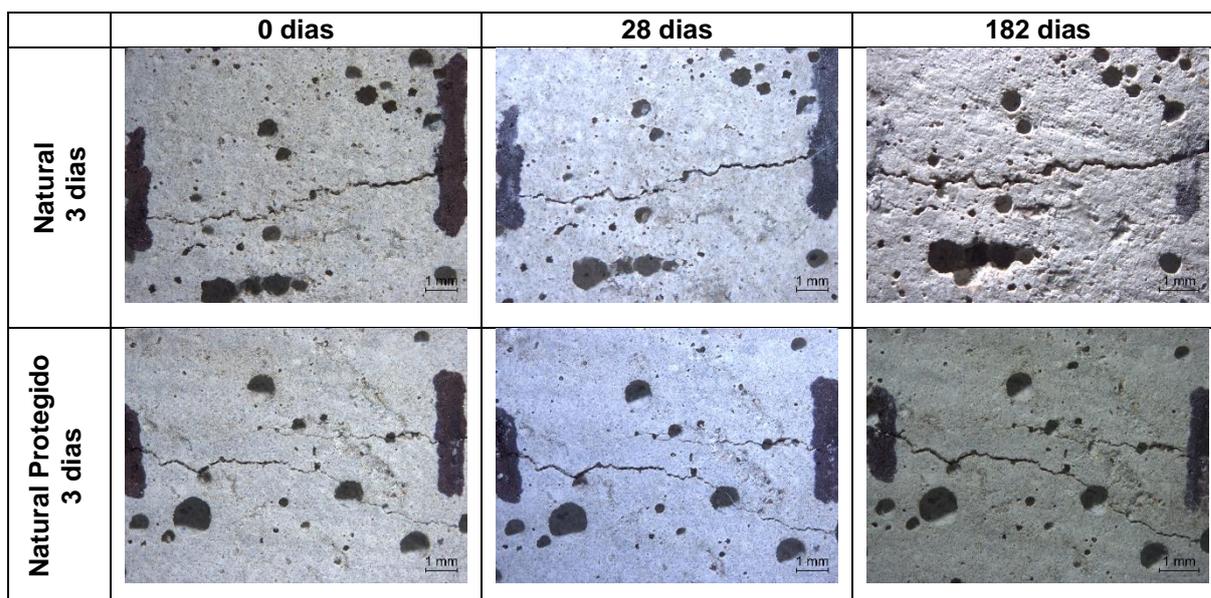


Fonte: própria da autora.

Um fator importante a ser ressaltado é a inversão no comportamento de algumas áreas de fissura, principalmente aos 3, 91 e 182 dias de idade de abertura de fissura, para os ambientes Natural e Natural Protegido. Este aumento de área, retratado na Figura 120, é resultado de dois aspectos: primeiro para o ambiente Natural pode-se observar a influência intempéries ambientais, tais como: gradiente de temperatura e variação da umidade relativa o que pode estar contribuindo para o aumento da área da fissura. Outro aspecto que deve ser ressaltado é a presença de pequenas partículas, de concreto, no interior da fissura na idade de abertura. Essas partículas, com o passar do tempo, são removidas do interior, contribuindo desta forma para o aumento da área da fissura. Para eliminar esta variável recomenda-se que os próximos trabalhos, seja realizada a limpeza da fenda com o auxílio de pistola de ar comprimido, eliminando desta maneira possíveis interferência nos resultados decorrentes de partículas soltas ou sujidades sobre o corpo de prova.

No Quadro 35 é possível verificar a influência das intempéries na superfície do concreto, bem como a presença de particular no interior da fissura na idade de 0 dias e seu desprendimento ao longo do tempo.

Quadro 35: Acompanhamento por microscopia ótica



Fonte: própria da autora.

Diante dos pontos elencados, para a análise da significância das variáveis controladas como idade de abertura da fissura e ambiente de exposição, foi realizada uma Análise de variância (ANOVA), com fatorial cruzado na ferramenta *Statistica 8*, para a redução da área das fissuras na idade de 168 dias (data final dos ensaios), onde se obtiveram os resultados apresentados na Tabela 37.

Tabela 37: Redução da área da espessura da fissura na idade de 168 dias após exposição.

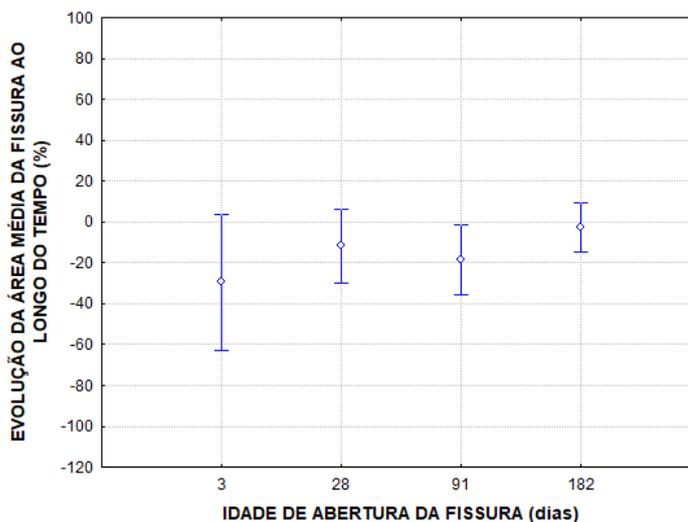
Efeitos	SQ	GL	SQF	Teste F	p	Sig.
Idade de abertura da fissura (dias)	3213,41	2	1606,704	4,95802	0,014993	S
Ambiente de exposição	10306,33	2	5153,167	15,90182	0,000031	S
Idade de abertura da fissura (dias)*Ambiente de exposição	12745,07	8	1593,134	4,91615	0,000887	S
Error	8425,60	26	324,061			

SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade (n-1); SQF: média quadrática; Teste F(calc): valor calculado de F; p: nível de significância; Se  $p < 5\%$  = efeito significativo

A partir da Tabela 37 pode-se observar que a idade de abertura da fissura, o ambiente de exposição e a interação entre as duas variáveis são fatores significativos, logo apresentam influência sobre a área final da fissura ao final dos 168 dias de exposição nos diferentes ambientes.

Na Figura 121 é apresentada a influência da idade de abertura da fissura, de forma isolada, frente à evolução da área média da fissura ao final dos 168 dias de exposição.

Figura 121: Efeito isolado da idade de abertura da fissura na evolução da área média da fissura ao longo do tempo



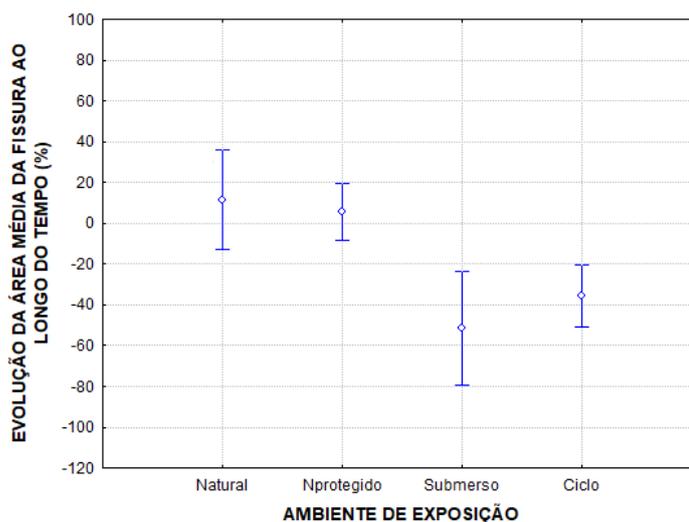
Fonte: própria da autora.

Através desta análise, pode-se afirmar que as fissuras que foram geradas na idade de 3 dias apresentaram redução na área da fissura maior quando comparada com as demais idades analisadas, o que reflete uma boa capacidade de autocicatrização das matrizes cimentícias nesta idade. Fato que era esperado, uma vez que a literatura trata que fissuras originadas em idades precoces tendem a se regenerar de forma mais expressiva (VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013). De acordo com Neville (2002), Li e Yang (2007), Yang *et al.* (2009), concretos nas idades iniciais apresentam um teor relativamente alto de partículas de cimento anidro, que

na presença de água favorece a hidratação contínua, sendo o principal mecanismo de autocicatrização autógena (item 4.1.3).

Na Figura 122 é apresentada a influência do ambiente de exposição na área média das fissuras após 168 dias de exposição. Observa-se que os ambientes Submerso e ciclo de molhagem e secagem são os que apresentam maiores reduções na área da fissura, já os ambientes Natural e Natural protegido apresentam resultados mais tímidos. Este fator, em parte, era esperado uma vez que a presença de água é imprescindível à promoção da autocicatrização autógena (TER HEIDE e SCHLANGEN, 2007; LI e YANG, 2007; YANG *et al.*, 2009; ROIG-FLORES *et al.*, 2015; HUNG, 2016; CUECA *et al.*, 2018). Esperava-se melhores resultados para o ambiente natural uma vez que Herbert e Li (2012), Herbert e Li (2013) e Lauch *et al.* (2020) apontam que expor os concretos em ambientes naturais, com a incidência de insolação, precipitação e outros fatores ambientais de forma direta, não impede a matriz de autocicatrizarem-se. Entretanto, Von Greve-Dierfeld (2020) afirma que o mecanismo de carbonatação e a cinética dependem do grau de saturação do concreto e da pressão parcial de CO<sub>2</sub> que, por sua vez, depende das condições de exposição, tais como: umidade relativa, volume e duração do contato da água com a superfície do concreto e as condições de temperatura.

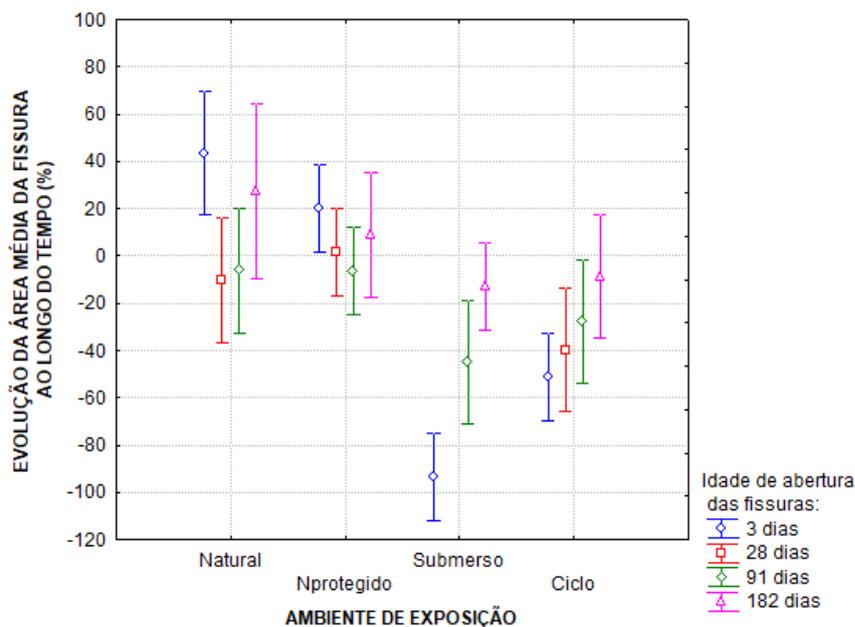
Figura 122: Efeito isolado do ambiente de exposição na evolução da área média da fissura ao longo do tempo



Fonte: própria da autora.

A Figura 123 retrata a interação entre idade de abertura de fissura e ambiente de exposição sobre a evolução da área média da fissura ao longo do tempo.

Figura 123: Interação entre a idade de abertura de fissura e ambiente de exposição na evolução da área média ao longo do tempo



Fonte: própria da autora.

Para os ambientes natural e natural protegido a área média apresenta redução para as fissuras abertas nas idades de 28 e 91 dias, para 3 e 182 dias nota-se um aumento da área, que pode estar relacionado com a degradação das superfícies do concreto e das bordas da fissura.

Já para os ambientes submerso e ciclo de molhagem e secagem, pode-se observar que em todas as idades de indução a autocicatrização ocorreu, reduzindo desta forma a área da fissura. Nota-se também que as maiores reduções de área ocorrem para fissuras geradas aos 3 dias, seguida pelas fissuras abertas aos 28 dias, depois 91 dias e por último para a idade de 182 dias. Este resultado é corroborado com o trabalho de Jaroenratanapirom e Sahamitmongkol (2011), que observaram que as fissuras geradas na idade de 3 dias apresentaram melhor desempenho quando comparados com as induzidas aos 28 dias, uma vez que os concretos com idades mais jovens apresentam maiores quantidades de grãos de cimento anidro, mecanismo importante para a ocorrência do fenômeno da autocicatrização autógena.

#### 4.3.4 Taxa de autocicatrização x Microscopia ótica

Uma comparação importante a ser realizada é a taxa de autocicatrização das fissuras e a evolução da área média da fissura. Embora sejam formas diferentes de avaliar a autocicatrização autógena, são metodologias difundidas na literatura. A taxa de autocicatrização, calculada a partir do ensaio de velocidade de propagação de ondas, visa compreender o comportamento interno da fissura e a área média da fissura, determinada pelo

ensaio de microscopia ótica, avalia há a formação de material de preenchimento superficial na fissura.

Na Tabela 38 consta o resumo dos resultados obtidos, para a taxa de autocatrização e evolução média das fissuras. Os dados estão apresentados, em colunas, na seguinte ordem: do menos favorável para o mais favorável.

Tabela 38: Comparação entre taxa de autocatrização e evolução média das fissuras, para os resultados obtidos na idade de 168 dias.

Taxa de autocatrização				Evolução média da área das fissuras			
3 dias	28 dias	91 dias	182 dias	3 dias	28 dias	91 dias	182 dias
N	C	NP	NP	N	NP	N	N
C	NP	C	N	NP	N	NP	NP
NP	N	N	S	C	C	C	C
S	S	S	C	S	-----	S	S

Fonte: própria da autora.

Não é possível observar um comportamento padrão para os dois ensaios, mas quanto à evolução média da área das fissuras observa-se que os melhores resultados foram obtidos para os ambientes submerso e ciclo de molhagem e secagem, as fissuras expostas nestas condições apresentam maior contato com a água, o que pode auxiliar a lixiviação dos compostos e sua cristalização na superfície do concreto. Segundo apontado por Wu *et al.* (2012) e Huang (2016), o fechamento demonstrado por imagens de microscopia ótica está relacionado, principalmente, à formação de carbonato de cálcio devido ao processo de lixiviação do hidróxido de cálcio.

Para Parks *et al.* (2010) a formação de  $\text{CaCO}_3$  pode ocorrer apenas na superfície e não na profundidade da amostra, desta forma não influenciando na taxa de autocatrização das misturas. Cuenca e Serne (2021) avaliaram os produtos de autocatrização autógena, de concretos reforçados com fibra, internos e externos à fissura e observaram na superfície da fissura uma quantidade grande de pequenos cubos de  $\text{CaCO}_3$ , o que não se refletiu internamente.

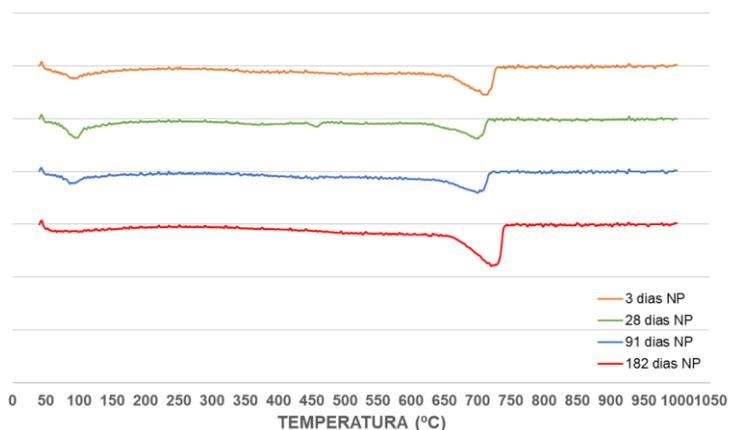
Gagnés e Argouges (2012) observaram que durante a autocatrização autógena há a formação de uma camada mais densa de produtos, sendo o carbonato de cálcio o principal, na porosidade da pasta e no volume interno da fissura. Acredita-se que a camada formada possa contribuir para um atraso no transporte de difusão entre pasta e volume interno da fissura. Os autores observaram também a obstrução progressiva da fissura pelos produtos de autocatrização, o que diminui o transporte de  $\text{CO}_2$  externo e água para o interior da fissura.

O ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônica avalia a homogeneidade dos concretos. De acordo com Çopuroğlu *et al.* (2013). Quando há uma fissura que não apresenta preenchimento com produtos oriundos da autocicatrização, as ondas percorrem, resultando em um aumento do tempo de transmissão, quando a fissura está selada, as ondas tendem a se propagar em tempos reduzidos. Entretanto, dependendo da densidade do material formado internamente à fissura, o resultado do ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas será impactando, positiva ou negativamente. Para Tomczak *et al.* (2020), quando o material de fechamento da fissura for formado por C-S-H fibroso, a mudança resultante no UPV pode ser menos perceptível quando comparado com o fechamento com carbonato de cálcio.

#### 4.3.5 Termogravimetria (TGA)

A Figura 124 mostra a termogravimetria derivada dos materiais coletado junto à superfície das fissuras para as idades de indução de 3, 28, 91 e 182 dias, quando expostas no ambiente natural protegido.

Figura 124: Termogravimetria derivada dos compostos formados na superfície fissuras para diferentes idades de abertura e expostas no ambiente natural protegido, para concretos a/c 0,65



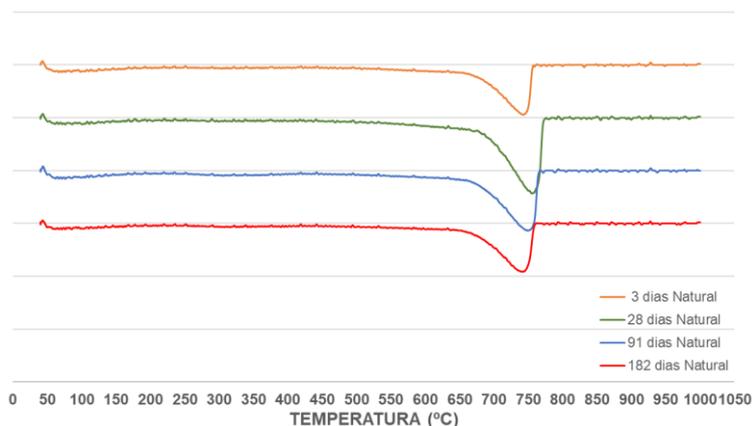
Fonte: própria da autora.

É possível observar uma pequena decomposição próxima da temperatura de 100°C, nas idades de 3, 28 e 91 dias, segundo a literatura (TAYLOR, 1997; LOTHENBACH *et al.*, 2016), picos nesta faixa sinalizam a decomposição do C-S-H. Nota-se também a formação de outros picos de decomposição de materiais entre 650-750°C (TAYLOR, 1997; JOHN e CINCOTTO, 2010, SNOECK *et al.*, 2014), caracterizado pela liberação do dióxido de carbono pela decomposição do carbonato de cálcio. Através das imagens de microscopia ótica apresentadas no item 4.2.3, dos dados demonstrados na Figura 120 e dos resultados elencados na Figura 124, ambos deste trabalho, é possível afirmar que não ocorreu a formação de produtos de autocicatrização nestas condições de exposição, a umidade relativa do ar não é suficiente para desencadear as reações de cicatrização. Os picos encontrados

refletem o processo natural de hidratação das matrizes (picos próximos às 100°C) e a carbonatação devido ao contato do CO<sub>2</sub> com a superfície do concreto.

Na Figura 125 é apresentada a termogravimetria derivada dos materiais coletado junto à superfície das fissuras para as idades de indução de 3, 28, 91 e 182 dias, quando expostas no ambiente natural. Assim como observado para o ambiente natural protegido, observa-se picos de decomposição de produtos de autocicatrização na faixa de temperatura entre 650° e 800°C(TAYLOR, 1997; JOHN e CINCOTTO, 2010, SNOECK *et al.*, 2014). Pode-se ressaltar que os picos formados pela liberação do dióxido de carbono a partir da decomposição do carbonato de cálcio são mais intensos no ambiente de exposição natural do que no natural protegido, o que reflete a maior quantidade de CaCO<sub>3</sub> presente na superfície da fissura.

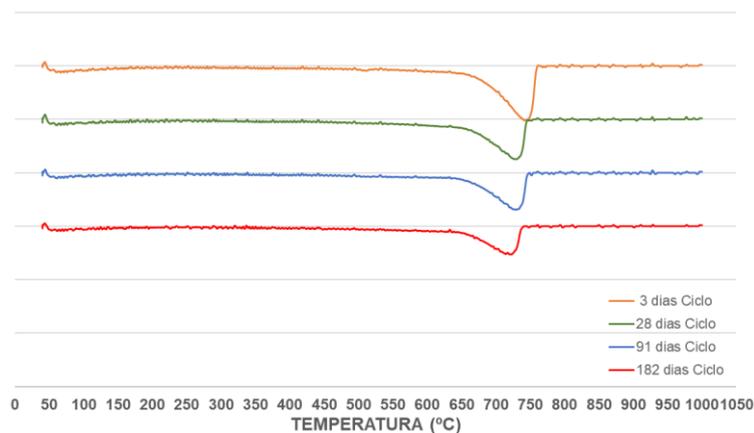
Figura 125:Termogravimetria derivada dos compostos formados na superfície fissuras para diferentes idades de abertura e expostas no ambiente natural, para concretos a/c 0,65.



Fonte: própria da autora.

Na Figura 125 é apresentada a termogravimetria derivada dos materiais coletado junto à superfície das fissuras para as idades de indução de 3, 28, 91 e 182 dias, quando expostas no ambiente ciclo de molhagem e secagem. Nota-se que para as quatro idades de abertura de fissura há um pico predominante de decomposição de materiais entre 650-800°C, o que pode ser atribuído a liberação do dióxido de carbono pela decomposição do carbonato de cálcio (TAYLOR, 1997; JOHN e CINCOTTO, 2010, SNOECK *et al.*, 2014). Segundo Sisomphon e Çopuroğlu (2012) e Suleiman e Nehdi (2018), a formação de CaCO<sub>3</sub> como um produto de cura se deve à lixiviação, à re-deposição de íons cálcio Ca<sup>2+</sup> da matriz cimentícia e à difusão de carbonatos nas fissuras.

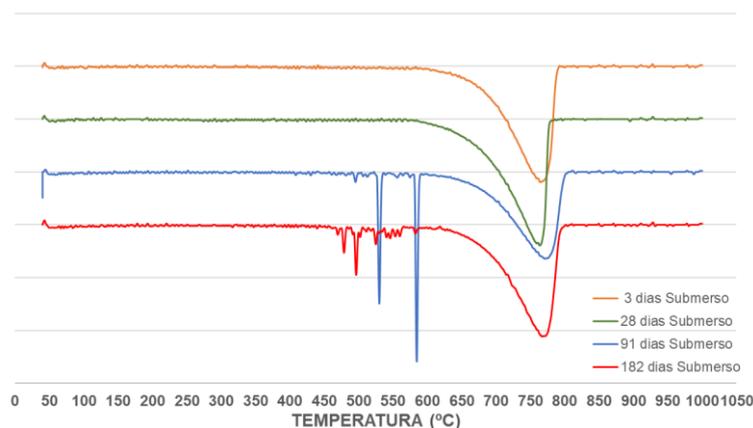
Figura 126: Termogravimetria derivada dos compostos formados na superfície fissuras para diferentes idades de abertura e expostas no ambiente ciclo de molhagem e secagem, para concretos a/c 0,65



Fonte: própria da autora.

Na Figura 127 é demonstrada a termogravimetria derivada dos compostos formados junto à superfície das fissuras, para as idades de indução de 3, 28, 91 e 182 dias, quando expostas no ambiente submerso.

Figura 127: Termogravimetria derivada dos compostos formados na superfície fissuras para diferentes idades de abertura e expostas no ambiente submerso, para concretos a/c 0,65



Fonte: própria da autora.

É possível observar para as quatro idades de abertura de fissura há um pico predominante de decomposição de materiais entre 650-800°C, o que pode ser atribuído a liberação do dióxido de carbono pela decomposição do carbonato de cálcio. Fato que corrobora com o estudo realizado por Luo et al. (2021), que avaliaram argamassas com e sem agregados artificiais funcionais, e concluíram que nas bordas da fissura, através da realização do ensaio de difração de raio-x, a presença de picos de calcita e a partir da realização da TG/DTG observou-se a decomposição de compostos na faixa entre 600 à 800°C, atribuída a liberação do dióxido de carbono pela decomposição do carbonato de cálcio. Qian *et al.* (2010), Huang

(2014) e Snoeck *et al.* (2016) afirmam que o fechamento de trechos ou da totalidade da fissura, quando observado por microscopia ótica, está atrelada a ocorrência da autocicatrização autógena, apresentando como principal característica a formação de produtos proveniente da lixiviação do hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) e posterior formação do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ),

Para as idades de 91 e 182 dias, além dos picos de decomposição no intervalo entre 650-800°, observam-se picos de decomposição entre 450-600°C, faixa característica da decomposição do  $\text{Ca(OH)}_2$  (TAYLOR, 1997; JOHN E CINCOTTO, 2010).

Segundo Liu *et al.* (2019) em ambiente submerso a quantidade de  $\text{CaCO}_3$  pode ser menor quando comparado com outros ambientes de exposição. Para se obter o carbonato de cálcio, nesta condição, é necessário a reação entre  $\text{CO}_3^{2-}$  e  $\text{Ca}^{2+}$ , entretanto a quantidade disponível de  $\text{CO}_3^{2-}$  que poderia difundir na fissura, depende de vários fatores. Fato que também já foi estudado e explicado por Edvardsen, (1999), conforme ilustrado na Figura 9. Segundo Huang (2014), que pesquisou pastas de cimento Portland expostas em água com ou sem solução de hidróxido de cálcio, os produtos formados nas fissuras, mesmo em condições submersas, não se devem somente à hidratação contínua dos grãos anidros presentes na matriz, mas também à recristalização da portlandita como produto de reação.

Frente aos resultados apresentados, através das imagens de microscopia ótica no item 4.2.3, dos dados demonstrados na Figura 120 e dos resultados elencados na Figura 127 é possível afirmar que os produtos de fechamento encontrados na superfície da fissura são decorrentes da autocicatrização autógena, onde nas primeiras idades o mecanismo predominantes é a hidratação dos grãos de cimento anidro e em idades mais avançadas a autocicatrização é decorrente da lixiviação, solubilização e em algumas situações carbonatação do hidróxido de cálcio.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo serão apresentadas as principais conclusões desta pesquisa, aprendizados obtidos com a realização do programa experimental que podem contribuir com outros pesquisadores e sugestões para trabalhos futuros.

### 5.1 CONCLUSÕES

Quanto aos ensaios aplicados é possível concluir que:

- o ensaio não destrutivo de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas é uma forma eficaz de avaliar o fenômeno da autocicatrização interna da fissura;
- o ensaio de microscopia ótica se mostrou eficiente na avaliação da superfície da fissura, sendo uma forma de análise qualitativa e quantitativa;
- é possível verificar a formação de produtos de autocicatrização através do ensaio de microscopia ótica e verificar a morfologia dos cristais;
- em algumas situações não há como relacionar diretamente os resultados obtidos na velocidade de propagação de ondas com o ensaio de microscopia ótica, tanto qualitativa quanto quantitativamente.

Quanto às variáveis de resposta avaliadas:

- o processo de geração da fissura auxilia na restrição da espessura. Entretanto não há como se controlar a geometria da fissura, a incidência nas duas faces e a variação da espessura da fissura ao longo do comprimento;
- a relação água/cimento influencia na espessura da fissura. Verificou-se que relações menores, tais como 0,3, geram fissuras com maiores aberturas;
- a idade de abertura de fissuras influencia tanto no dano gerado (espessura) quanto na possibilidade de ocorrência da autocicatrização;
- a capacidade de autocicatrização das fissuras é menor quando geradas em idades mais avançadas (91 e 182 dias);
- o grau de hidratação estimado está diretamente ligado à relação a/c e a idade de abertura da fissura, a/c menor e concretos em idades iniciais apresentam potencial de hidratação maior;

- o ambiente de exposição submerso apresenta maior capacidade de autocicatrização para todas as relações água/cimento e idades de abertura de fissuras. O ambiente de exposição de ciclos também se mostrou benéfico, entretanto, na taxa de autocicatrização observou-se uma variação elevada nos resultados obtidos, podendo ser decorrentes das variações internas de umidade dos corpos de prova e do local onde foram acondicionados. O ambiente natural apresentou benefícios para fissuras geradas nas idades iniciais e com espessura reduzida. Já o ambiente de exposição natural protegido foi o que menos contribuiu para a autocicatrização;
- a taxa de autocicatrização reduz com o incremento da relação a/c;
- os ambientes submerso e ciclo de secagem e molhagem se mostram mais eficientes quanto ao selamento das fissuras. Para todas as relações a/c e idades de abertura de fissura, foi possível verificar através de microscopia ótica a formação de cristais de autocicatrização junto à superfície da fissura.

Quanto aos objetivos propostos:

- é possível afirmar que a relação a/c influencia diretamente na espessura da fissura, bem como na disponibilidade de cimento anidro e conseqüentemente na capacidade de autocicatrização das matrizes;
- a idade de abertura de fissura influencia na espessura para as geradas nas idades de 3, 28 e 91 dias, uma vez que com o aumento da idade do concreto, as fissuras apresentaram maior espessura. Isso se reflete na possibilidade de autocicatrização autógena das matrizes, que reduz com o passar da idade de geração das fissuras;
- é possível concluir que em todos os ambientes de exposição avaliados o produto de autocicatrização predominante é o carbonato de cálcio. No ambiente natural protegido observou-se também a decomposição de C-S-H e no ambiente submerso encontrou-se a formação de portlandita.

## 5.2 APRENDIZADOS

Ao longo do desenvolvimento do presente trabalho o conhecimento foi sendo construído e aperfeiçoado o que forçou alinhamento das decisões ao longo do processo, que serão compartilhadas a seguir com o objetivo de auxiliar outros pesquisadores, salientando cuidados

que se fazem necessários, mas que pelo próprio processo de aprendizagem ao longo da pesquisa só foram observados tardiamente:

- escolher um aditivo químico com uma manutenção maior e com baixa incorporação de ar;
- optar por cimento que não contenha adição de filler calcário, pois pode influenciar na quantidade de carbonatos e no fenômeno da autocicatrização;
- definir faixas de espessura das fissuras, no início do programa experimental, pois é fator decisivo no fenômeno de autocicatrização;
- adotar corpos de prova não fissurados como referência no ensaio de velocidade de propagação de onda, para avaliar a evolução dos concretos quanto ao processo de hidratação e verificar a autocicatrização;
- posicionar igualmente todos os corpos de prova no ambiente natural, utilizar ferramentas de simulação de incidência solar para planejar a exposição;
- avaliar a autocicatrização dos concretos fissurados expostos no ambiente natural e natural protegido por período maior;
- avaliar a composição química da água empregada tanto no ambiente submerso quanto no ambiente de ciclo de molhagem e secagem pode contribuir com a conclusão dos trabalhos;
- monitorar a temperatura da câmara e da água, tanto do ambiente submerso quanto do ambiente ciclo de molhagem e secagem, uma vez que a temperatura pode influenciar na cinética da hidratação dos compostos e na carbonatação;
- proceder com uma limpeza da fissura, com pistola de ar comprimido, antes da obtenção das primeiras imagens de microscopia ótica, para evitar o desprendimento de partículas ao longo do tempo e desta forma impossibilitar a quantificação do fechamento superficial da fissura;
- cuidar com a padronização da luz na obtenção das imagens de microscopia ótica, pois pode ocorrer a geração de sombreamento, o que dificulta na realização do processamento da imagem;
- no ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas para os corpos de prova submersos, definir um padrão para que as leituras ocorram sempre da mesma forma. Definir se a leitura será realizada imediatamente após a retirada das amostras da água, algumas horas após ou adotar constância de massa para iniciar o ensaio;
- aumentar o número de corpos de prova empregados em todos os ensaios para reduzir a variabilidade dos mesmo.

### 5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Quando se fala em autocicatrização autógena, ainda há várias lagunas que precisam ser preenchidas. Como sugestão para trabalhos futuros ficam:

- avaliar a eficiência dos produtos formados junto à superfície da fissura, através de ensaios de permeabilidade;
- avaliar a eficiência da autocicatrização interna da fissura, através de ensaios de desempenho mecânico;
- empregar técnicas não destrutivas que permitam avaliar a evolução do fechamento interno da fissura, como tomografia, escaneamento, entre outras;
- quanto ao ensaio de microscopia ótica, empregar faixas de análises menores e com ampliação maior;
- avaliar ambientes de exposição agressivos, simulando, por exemplo água do mar, ambientes com temperatura elevada (cura térmica);
- avaliar ciclos de molhagem e secagem com períodos mais curtos e mais parecidos.

## REFERÊNCIAS

- ABOU-ZEID, Mohamed et al. Control of cracking in concrete structures. **Report, ACI Committee**, v. 224, p. 12-16, 2001
- AHN, T.-H.; KISHI, T. Crack Self-healing Behavior of Cementitious Composites Incorporating Various Mineral Admixtures. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 8, n. 2, p. 171–186, 2010.
- AHN, E., KIM, H., SIM, S. H., SHIN, S. W., E SHIN, M. Principles and applications of ultrasonic-based nondestructive methods for self-healing in cementitious materials. **Materials**, v. 10, n. 3, p. 278, 2017.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318**: building code requirements for structural concrete. ACI Committee 318. Detroit, Michigan, 2008.
- ARNDT, J. A. **Avaliação de aditivos cristalizantes na autocatrização de concretos de cimento Portland**. 2019. 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, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: concreto - procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.
- \_\_\_\_\_. **NBR 5739**: concreto - ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- \_\_\_\_\_. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7211**: agregados para concreto - especificação. Rio de Janeiro, 2009.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7215**: cimento Portland - determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.
- \_\_\_\_\_. **NBR 8802**: concreto endurecido — determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2013.
- \_\_\_\_\_. **NBR 9779**: argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.
- \_\_\_\_\_. **NBR 10908**: aditivos para argamassa e concreto - ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2009.
- \_\_\_\_\_. **NBR 11578**: Cimento Portland composto - Especificação. Rio de Janeiro, 1991.
- \_\_\_\_\_. **NBR 16605**: cimento Portland e outros materiais em pó - determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.
- \_\_\_\_\_. **NBR 16372**: cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015.
- \_\_\_\_\_. **NBR 16697**: cimento Portland – requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 18:** cimento Portland – Análise química – Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 30:** agregado miúdo – determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001b.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 45:** agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 46:** agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52:** agregado miúdo - determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53:** agregado graúdo - determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 65:** Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 67:** concreto - determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248:** agregados - determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

BANCO DE DADOS. **INMET**, 2019. Disponível em < <https://bdmep.inmet.gov.br/>>. Acessado em: 02 de junho de 2019.

BERNARDINO DA SILVA, L. M. S. **Influência do carregamento precoce na retração por secagem do concreto**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2016.

BROUWERS, H. J. H. D. The work of Powers and Brownyard revisited: Part 1. **Cement and Concrete Research**. Oxford. v. 34, p. 1697 – 1716, 2004.

CAPPELLESSO, Vanessa Giaretton. **Uso de impermeabilizante por cristalização para redução da permeabilidade do concreto**. Trabalho de conclusão de curso (TCC). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2016.

CAPPELLESSO, V. G. **Influência do tipo de cimento na autocicatrização de fissuras em concreto**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2018.

CAPPELLESSO, V. G.; PETRY, N. S.; DAL MOLIN, D. C. C.; MASUERO, A. B. Use of crystalline waterproofing to reduce capillary porosity in concrete. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**. 1:9, p. 12. 2016.

CAPPELLESSO, V., SILVA, D., PETRY, N., ARNDT, J., MASUERO, A., & DAL MOLIN, D. Self-healing approach on early age cracked concretes with smart admixture. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 1, p. 89-92, 2016.

CERVO, A. L.; BERVIAN, P. A. **Metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2002. 242 p.

ÇOPUROĞLU, O., SCHLANGEN, E., NISHIWAKI, T., VAN TITTELBOOM, K., SNOECK, D., DE BELIE, N., E DE ROOIJ, M. R. Experimental techniques used to verify healing. In **Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials** (pp. 19-63). Springer, Dordrecht, 2013.

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

CUENCA, Estefania; SERNA, Pedro. Autogenous Self-Healing Capacity of Early-Age Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete. **Sustainability**, v. 13, n. 6, p. 3061, 2021.

DAL MOLIN, Denise Carpena Coitinho. **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) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1988.

DE BELIE, Nele et al. A review of self-healing concrete for damage management of structures. **Advanced materials interfaces**, v. 5, n. 17, p. 1800074, 2018.

EDVARDBSEN, Carola. Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete. In: **Innovation in concrete structures: Design and construction**. Thomas Telford Publishing, 1999. p. 473-487.

FERRARA, Liberato et al. Effects of autogenous healing on the recovery of mechanical performance of High Performance Fibre Reinforced Cementitious Composites (HPFRCCs): Part 1. **Cement and Concrete Composites**, v. 83, p. 76-100, 2017.

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.

GAGNÉ, R.; ARGOUGES, M. A study of the natural self-healing of mortars using air-flow measurements. **Materials and structures**, v. 45, n. 11, p. 1625-1638, 2012.

GARAY, Thaís Machado et al. Self-healing evaluation by optical microscope: An Approach to image acquisition, processing and analysis. In: **XVII Congresso Internacional sobre Patologia e Recuperação das Construções**, 2021, Fortaleza.

GOMES, Augusto; PINTO, Ana Paula Ferreira; PINTO, João Bessa. Materiais de construção. **Cimento Portland e adições**, 2013.

GRUYAERT, E.; ROBEYST, N.; DE BELIE, N. Study of the hydration of Portland cement blended with blast-furnace slag by calorimetry and thermogravimetry. In: **Journal of thermal analysis and calorimetry**. v. 102. no. 3. pp. 941-951. 2010.

HANNAT, D. J.; KEER, J. G. Autogenous healing of thin cement based sheets. **Cement and Concrete Research**, v. 13, p. 357-365, 1983.

HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo: PINI, 1992. 349 p.

- HELENE, P. et al. Evaluation of the chloride penetration and service life of self-healing concretes activated by crystalline catalyst. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 11, n. 3, p. 544-563, 2018.
- HERBERT, E.N; LI, V.C. Self-healing of Engineered Cementitious Composites in the Natural Environment. *High Perform. Fiber Reinf. Cem. Compos.* 2012, 2, 155–162.
- HERBERT, E., LI, V.: Self-healing of microcracks in Engineered Cementitious Composites (ECC) under a natural environment. **Materials** 6, 2831–2845, 2013
- HIRATA, F. B. **Avaliação da autocicatrização em concretos produzidos com aditivo cristalizante e fissurados nas primeiras idades**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2018.
- HOLLMANN, C. F. **Avaliação da influência de aditivos cristalizantes na resistência à penetração de íons cloreto em concretos fissurados**. 2020. 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, 2020.
- HOMMA, Daisuke; MIHASHI, Hirozo; NISHIWAKI, Tomoya. Self-healing capability of fibre reinforced cementitious composites. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 7, n. 2, p. 217-228, 2009.
- HOPPE FILHO, J.; GOBBI, A.; PEREIRA, E.; QUARCIONI, V. A.; MEDEIROS, M. H. F. Atividade Pozolânica de Adições Minerais para Cimento Portland (Parte I): Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com Cal, Difração de Raios-X (DRX), Termogravimetria (TG/DTG) e Chapelle Modificado. *Matéria*, v.22, n. 3, 2017.
- 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.
- HUANG, H. **Thermodynamics of Autogenous Self-Healing in Cementitious Materials**, TU Delft, Delft, 2014.
- HUANG, Haoliang; YE, Guang. Self-healing of cracks in cement paste affected by additional  $\text{Ca}^{2+}$  ions in the healing agent. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 26, n. 3, p. 309-320, 2015
- HUNG, C.; SU, Y. Medium-term self-healing evaluation of Engineered Cementitious Composites with varying amounts of fly ash and exposure durations. **Construction and Building Materials**, v. 118, p. 194–203, 2016.
- IGARASHI, Shin-ichi; KUNIEDA, Minoru; NISHIWAKI, Tomoya. Technical committee on autogenous healing in cementitious materials. **Japan: JCI. TC075B**, 2009.
- JAROENRATANAPIROM, Dechkachorn; SAHAMITMONGKOL, Raktipong. Self-crack closing ability of mortar with different additives. **Journal of Metals, Materials and Minerals**, v. 21, n. 1, 2011.
- JENSEN, O.M. e HANSEN, P.F. Water-entrained cement-based materials. Principles and theoretical background. **Cement and Concrete Research**, Oxford. v.31, p. 647–654, 2001.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A. Gesso de construção civil. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2010. Cap. 23. p. 727-759.

KAN, L.; SHI, H. Investigation of self-healing behavior of engineered cementitious composites (ECC) materials. **Construction and Building Materials**. v.29, pp. 348-356. 2012.

KISHI, T. Self healing behaviour by cementitious recrystallization of cracked concrete incorporating expansive agent. In: **First International Conference on Self Healing Materials, Noordwijk, The Netherlands, 2007. 4.** 2007.

LAUCH, K.-S.; DESMETTRE, C.; CHARRON, J.-P. Self-healing of Fibre Reinforced Concrete Containing an Expansive Agent in Different Exposure Conditions. In: **RILEM-fib International Symposium on Fibre Reinforced Concrete**. Springer, Cham, 2020. p. 453-465.

LI, V. C.; YANG, E. H. **Self-healing in concrete materials**. In: VAN DER ZWAAG, S. (ed.) **Self-healing Materials: An Alternative Approach to 20 Centuries of Materials Science**, p. 161-193. Dordrecht: Springer, 2007.

LI, V. C., SAKULICH, A. R., REINHARDT, H. W., SCHLANGEN, E., VAN TITTELBOOM, K., SNOECK, D., E MIHASHI, H. (2013). Recovery against Mechanical Actions. In **Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials** (pp. 119-215). Springer, Dordrecht.

LIU, H., HUANG, H., WU, X., PENG, H., LI, Z., HU, J., YU, Q. Effects of external multi-ions and wet-dry cycles in a marine environment on autogenous self-healing of cracks in cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 120, p. 198-206, 2019.

LOTENBACH, B.; DURDZINSKI, P.; WEERDT, K. Thermogravimetric analysis. In: Scrivener, K., Snellings, R., Lothenbach, B., (eds) **A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials**, 1 ed, chapter 5, Boca Raton, FL, USA, Taylor & Francis Group, 2016.

LUO, M., BAI, J., JING, K., DING, Z., YANG, D., QIAN, C. Self-healing of early-age cracks in cement mortars with artificial functional aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 272, p. 121846, 2021.

MAURENTE, D. G. S. **Avaliação do comportamento de polímeros superabsorventes com distintos níveis de pré-saturação em matrizes cimentícias**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2018.

MAES, M.; SNOECK, D.; DE BELIE, N. Chloride penetration in cracked mortar and the influence of autogenous crack healing. **Construction and Building Materials**, v. 115, p. 114–124, jul. 2016.

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

MOREIRA, M. M. **Efeito do aditivo redutor de permeabilidade em concretos com diferentes tipos de cimento Portland: contribuição aos processos de autocicatrização**. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) Universidade de Brasília. Brasília, 2016.

- MOREIRA, T. N. C. **Investigação do fenômeno de autocicatrização de fissuras em microconcreto de alta performance reforçado com fibras de aço e sisal**. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.
- MUHAMMAD, N. Z., SHAFAGHAT, A., KEYVANFAR, A., MAJID, M. Z. A., GHOSHAL, S. K., YASOUJ, S. E. M., ... & MCCAFFER, R.. Tests and methods of evaluating the self-healing efficiency of concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 1123-1132, 2016.
- NAIK, Tarun R.; MALHOTRA, V. Mohan; POPOVICS, John S. The ultrasonic pulse velocity method. In: **Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, Second Edition**. CRC Press, 2003. p. 8-1-8-19.
- NEVILLE, 2002 - Neville, A. **Autogenous healing—A concrete miracle?** *Concr. Int.* **2002**, 24, 76–82.
- NEVILLE, Adam M. **Tecnologia do concreto**. Bookman Editora, 2013
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. In: CREMONINI, R. A. (Tradução) 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.
- PACHECO, Fernanda. **Análise da eficácia dos mecanismos de autocicatrização do concreto**. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo, 2020.
- PAGÉ, M.; SPIRATOS, N. **The Role of Superplasticizers in the Development of Environmentally-Friendly Concrete**. CANMET/ACI International Symposium on Concrete Technology for Sustainable Development. Vancouver, BC, Canada. 2000
- PARKS, J. et al. Effects of bulk water chemistry on autogenous healing of concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 22, n. 5, p. 515–524, 2010.
- POSSAN, Edna. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre 2010.
- POWERS, Treval Clifford; BROWNYARD, Theodore Lucius. Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste. In: **Journal Proceedings**. 1946. p. 101-132.
- QURESHI, Tanvir; KANELLOPOULOS, Antonios; AL-TABBAA, Abir. Autogenous self-healing of cement with expansive minerals-I: Impact in early age crack healing. **Construction and Building Materials**, v. 192, p. 768-784, 2018.
- QURESHI, Tanvir; KANELLOPOULOS, Antonios; AL-TABBAA, Abir. Autogenous self-healing 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.
- QIAN, S.Z.; ZHOU, J.; SCHLANGEN, E. Influence of curing condition and precracking time on the self-healing behavior of engineered cementitious composites. **Cement and Concrete Composites**. v. 32, pp. 686-693. 2010.
- REINHARDT, H. W.; JOOSS, M. Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 7, p. 981–985, 2003.

REINHARDT, H. W. et al. Recovery against environmental action. In: **Self-healing phenomena in cement-based materials**. Springer, Dordrecht, 2013. p. 65-117.

ROIG-FLORES, M.; MOSCATO, S.; SERNA, P.; FERRARA, L. Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments. **Construction and Building Materials**. v. 86 pp. 1–11. 2015.

ROIG-FLORES, M., PIRRITANO, F., SERNA, P., & FERRARA, L. (2016). Effect of crystalline admixtures on the self-healing capability of early-age concrete studied by means of permeability and crack closing tests. **Construction and Building Materials**, 114, 447-457.

ROOJI, M. R. et al. Self-Healing Phenomena. In: **RILEM Technical Committee 221-SHC**, [S.1] Springer, 266 p., 2013.

ROOIJ, M.; TITTELBOOM, K. V.; DE BELIE; N. SCHLANGEN, E. **Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013. v.11

SAN MARTIN, Jéssica Ferreira de Freitas. **Avaliação da autocicatrização de concretos com adição de cristalizantes: análise em obra e em laboratório**. Trabalho de conclusão de curso (TCC). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2021.

SCRIVENER, K. et al. Advances in understanding hydration of Portland cement  
Advances in understanding hydration of Portland cement. **Cement and Concrete Research**. Oxford. v.78, p. 38–56, 2015.

SCOPUS, <https://www.scopus.com/term/analyzer.uri?sid=1b3b6e8ad3821140da5dc27b3899f37a&origin=resultslist&src=s&s=TITLE-ABS-KEY%28concrete+healing%29&sort=cp-f&sdt=b&sot=b&sl=31&count=1077&analyzeResults=Analyze+results&txGid=1fb74182c9d05c3809222f714d3fda1a> ... acessado em 16/06/2021

SHIM, K. B. Cementitious materials for crack self-healing concrete, **Journal of Ceramic Processing Research**. [S.I.] v. 16, Special. 1, p. 1-13, 2015.

SIDIQ, A.; GRAVINA, R.; GIUSTOZZI, F. Is concrete healing really efficient? A review. **Construction and Building Materials**, v. 205, p. 257–273, 2019.

SILVA, D. M. G. **Avaliação do comportamento de polímeros superabsorventes com distintos níveis de pré-saturação em matrizes cimentícias**, 2018. 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.

SISOMPHON, K.; COPUROGLU, O. Some characteristics of a self healing mortar incorporating calcium sulfo-aluminate based agent. In: **Proceedings of the 2nd international conference on durability of concrete structures**, Sapporo, Japan; 2010. p. 157–64.

SISOMPHON, K.; COPUROGLU, O. Self healing mortars by using different cementitious materials. In: **International Conference on Advances in Construction Materials through Science and Engineering**. 2011. p. 5-7.

SISOMPHON, K.; COPUROGLU, O.; KOENDERS, E.A.B. Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive. **Cement and Concrete Composites**. v. 34. pp. 566-574. 2012.

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. In: **Construction and Building Materials** v. 42, pp. 217-224. 2013.

Snoeck, D.; *Ph.D. Thesis*, Ghent University 2015.

SNOECK, Didier et al. Self-healing cementitious materials by the combination of microfibres and superabsorbent polymers. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 25, n. 1, p. 13-24, 2014.

SNOECK, D., DEWANCKELE, J., CNUUDE, V., & De BELIE, N. (2016). X-ray computed microtomography to study autogenous healing of cementitious materials promoted by superabsorbent polymers. **Cement and Concrete Composites**, 65, 83-93.

STEFANIDOU, M., TSAMPALI, E., KARAGIANNIS, G., AMANATIADIS, S., IOAKIM, A., & Kassavetis, S.. Techniques for recording self-healing efficiency and characterizing the healing products in cementitious materials. **Material Design & Processing Communications**, v. 3, n. 3, p. 166, 2021.

SULEIMAN, A. R.; NEHDI, M. L. Effect of environmental exposure on autogenous self-healing of cracked cement-based materials. **Cement and Concrete Research**, 2018.

SULEIMAN, Ahmed R.; NELSON, Andrew J.; NEHDI, Moncef L. Visualization and quantification of crack self-healing in cement-based materials incorporating different minerals. **Cement and Concrete Composites**, v. 103, p. 49-58, 2019.

TAKAGI, E. M. **Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória de alto-forno ativados por catalisador cristalino**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Infraestrutura Aeroportuária) Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, 2013.

TAYLOR, H. F. W. **The chemistry of cement**, Ed. Thomas Telford, Londres, 2a. ed., 1997, 459 p.

TER HEIDE, N. **Crack healing in hydrating concrete**. 2005. Thesis (Master of Applied Science) - Delft University of Technology. Faculty of Civil Engineering and Geosciences. Microlab. Delft, 2005.

TER HEIDE, N. e SCHLANGEN, E. Self-healing of early age in concrete. THE FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON SELF-HEALING MATERIALS. 1., 2007, Noordwijka an Zee. **Proceedings...** 2007, The Netherlands, 2007.

THOMAZ, E. **Trincas em Edifícios: causas, prevenção e recuperação**. 16. ed. São Paulo: Editora PINI, 2014.

TOMCZAK, K., JAKUBOWSKI, J., & KOTWICA, Ł. (2020). Self-Sealing Process Evaluation Method Using Ultrasound Technique in Cement Composites with Mineral Additives. **Materials**, 13(15), 3336.

VAN TITTELBOOM, K., Gruyaert, E., Rahier, H., & De Belie, N. Influence of mix composition on the extent of autogenous crack healing by continued hydration or calcium carbonate formation. **Construction and Building Materials**, v. 37, p. 349-359, 2012

VAN TITTELBOOM, K.; DE BELIE, N. Self-healing in cementitious materials - A review. In: **Materials**, no. 6, p. 2182-2217. 2013.

VENQUIARUTO, S. D. **Influência da microfissuração causada nas primeiras idades na durabilidade de concretos ao longo do tempo (Self-Healing)**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2017.

VIEIRA, C. M. F.; PINHEIRO, R. M.; RODRIGUEZ, R. J. S.; CANDIDO, V. S.; MONTEIRO, S. N. Clay bricks added with effluent sludge from paper industry: Technical, economical and environmental benefits. **Applied Clay Science**, v. 132-133, pp. 753-759, 2016.

VIEIRA, Geilma Lima. **Influência da microfissuração causada por carregamento precoce nas propriedades mecânicas de concretos produzidos com diferentes tipos de cimento**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.

VIJAY, Kunamineni; MURMU, Meena; DEO, Shirish V. Bacteria based self healing concrete—A review. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 1008-1014, 2017.

VON GREVE-DIERFELD, Stefanie et al. Understanding the carbonation of concrete with supplementary cementitious materials: a critical review by RILEM TC 281-CCC. **Materials and Structures**, v. 53, n. 6, p. 1-34, 2020.

YANG, Y.; LEPECH, M.D.; YANG, E.-H.; LI, V.C. Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet-dry cycles, **Cement and Concrete Research**. v. 39, pp. 382-390. 2009.

WANG, Jianyun et al. Application of modified-alginate encapsulated carbonate producing bacteria in concrete: a promising strategy for crack self-healing. **Frontiers in microbiology**, v. 6, p. 1088, 2015.

WHITE, S. R. et al. Autonomic healing of polymer composites. **Nature**, v. 409, n. 6822, p. 794–797, 2001.

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.

ZIEGLER, F. **Avaliação da autocicatrização de fissuras em concretos com aditivos cristalizantes**. 2020. 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, 2020.

**APÊNDICE A – Resultados obtidos no ensaio de Resistência à  
compressão**

		Média diâmetro (cm)	Média altura (cm)	Área (cm²)	kN	Rfc calc. (MPa)	h/d	Rfc corrigida (MPa)	Rfc Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coef. Var. (%)
3 dias	0,3	100,2	190,9	78,9	329,3	41,8	1,90	41,4	43,00	1,36	3,15
		100,5	191,0	79,4	350,4	44,2	1,90	43,8			
		100,4	194,5	79,2	347,9	43,9	1,94	43,7			
	0,4	100,3	194,0	79,0	246,1	31,1	1,93	31,0	29,14	1,63	5,59
		100,1	192,7	78,7	220,5	28,0	1,93	27,9			
		100,3	195,8	79,1	226,8	28,7	1,95	28,6			
	0,5	99,8	193,6	78,2	212,7	27,2	1,94	27,1	25,94	1,02	3,94
		100,9	185,5	79,9	207,9	26,0	1,84	25,7			
		99,5	196,4	77,8	195,5	25,1	1,97	25,1			
	0,65	100,1	195,4	78,7	164,4	20,9	1,95	20,8	20,18	0,65	3,20
		100,3	195,5	79,0	172,4	21,8	1,95	21,7			
		99,8	190,9	78,3	142,0	18,1	1,91	18,0			
28 dias	0,3	99,9	195,7	78,3	316,8	40,5	1,96	40,3	46,07	5,78	12,55
		99,8	194,7	78,2	407,0	52,1	1,95	51,9			
		100,2	193,7	78,8	364,2	46,2	1,93	46,0			
	0,4	100,9	198,1	80,0	250,9	31,4	1,96	31,3	30,67	2,56	8,34
		99,9	195,3	78,3	218,8	28,0	1,96	27,9			
		100,1	196,3	78,7	259,3	33,0	1,96	32,9			
	0,5	100,4	196,3	79,1	230,8	29,2	1,96	29,1	27,85	2,94	10,55
		100,0	195,8	78,5	192,9	24,6	1,96	24,5			
		100,5	197,4	79,4	238,7	30,1	1,96	30,0			
	0,65	100,0	195,6	78,5	178,4	22,7	1,96	22,6	23,94	1,38	5,76
		100,8	195,9	79,8	203,7	25,5	1,94	25,4			
		100,0	197,6	78,6	187,2	23,8	1,98	23,8			
91 dias	0,3	100,3	197,3	79,0	436,8	55,3	1,97	55,2	50,67	4,04	7,97
		100,2	195,4	78,9	391,6	49,7	1,95	49,5			
		100,6	197,7	79,5	377,7	47,5	1,96	47,4			
	0,4	101,3	197,4	80,6	260,0	32,2	1,95	32,1	32,30	0,17	0,52
		99,5	195,3	77,8	252,8	32,5	1,96	32,4			
		99,5	195,3	77,8	252,8	32,5	1,96	32,4			
	0,5	100,4	197,5	79,2	244,1	30,8	1,97	30,8	30,30	1,73	5,72
		99,9	196,9	78,3	222,9	28,5	1,97	28,4			
		99,9	196,7	78,4	249,6	31,8	1,97	31,8			
	0,65	100,6	193,1	79,5	209,8	26,4	1,92	26,2	25,69	0,93	3,60
		100,0	198,8	78,5	193,3	24,6	1,99	24,6			
		100,6	193,1	79,5	209,8	26,4	1,92	26,2			
182 dias	0,5	100,0	197,3	78,5	265,2	33,8	1,97	33,7	32,28	1,49	4,60
		100,3	195,1	79,0	257,1	32,6	1,95	32,4			
		100,2	196,7	78,8	242,9	30,8	1,96	30,7			
	0,65	99,6	197,8	77,9	224,7	28,8	1,99	28,8	27,57	1,14	4,12
		100,1	196,5	78,6	209,8	26,7	1,96	26,6			
		99,6	198,0	77,9	212,7	27,3	1,99	27,3			

**APÊNDICE B – Resultados obtidos no ensaio de Absorção de água por capilaridade**

Absorção de água por capilaridade (g/cm <sup>2</sup> )													
		3h	6h	24h	48h	72h	Média 3h	Média 6h	Média 24h	Média 48h	Média 72h	Desvio Padrão	Coef. Varia. (%)
3 dias	0,3	0,04	0,07	0,12	0,18	0,21	0,05	0,08	0,15	0,21	0,25	0,05	21,27
		0,07	0,09	0,18	0,24	0,29							
	0,4	0,02	0,04	0,10	0,16	0,20	0,05	0,08	0,17	0,26	0,30	0,11	34,77
		0,06	0,08	0,16	0,25	0,30							
		0,08	0,12	0,25	0,35	0,41							
	0,5	0,06	0,09	0,21	0,31	0,37	0,05	0,08	0,19	0,28	0,34	0,03	9,37
		0,04	0,07	0,18	0,28	0,33							
		0,05	0,08	0,18	0,26	0,31							
	0,65	0,07	0,11	0,26	0,38	0,46	0,06	0,11	0,26	0,36	0,42	0,04	9,77
		0,07	0,11	0,25	0,35	0,43							
		0,05	0,09	0,21	0,30	0,38							
	28 dias	0,3	0,02	0,03	0,07	0,12	0,15	0,02	0,03	0,08	0,12	0,16	0,02
0,03			0,04	0,09	0,12	0,18							
0,4		0,04	0,06	0,13	0,19	0,25	0,04	0,06	0,13	0,19	0,24	0,01	3,98
		0,05	0,06	0,13	0,20	0,24							
0,5		0,04	0,07	0,14	0,21	0,27	0,05	0,07	0,14	0,21	0,26	0,01	3,56
		0,06	0,11	0,17	0,23	0,26							
0,65		0,06	0,11	0,23	0,35	0,42	0,05	0,09	0,22	0,33	0,38	0,04	11,20
		0,04	0,06	0,17	0,26	0,34							
		0,05	0,08	0,20	0,31	0,39							

**APÊNDICE C – Resultados obtidos para o grau de hidratação dos concretos em diferentes idades**

## C1. Volume dos constituintes do concreto para relação a/c 0,3

Traço utilizado para concreto com a/c = 0,3 e as massas específicas dos materiais

a/c = 0,3	Cimento	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Água
<b>Traço unitário</b>	1	0,850	1,710	0,300
<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	3,11	2,54	2,94	1,00

Volume dos constituintes do concreto para a/c 0,3 no estado fresco

Volume concreto fresco	Absoluto	%
Volume ocupado pelo cimento: $V_c =$	0,322	20,4%
Volume ocupado pelo ag. miúdo $V_a =$	0,335	21,3%
Volume ocupado pelo ag. graúdo $V_b =$	0,582	37,0%
Volume ocupado pela água $V_h =$	0,300	19,1%
Volume de ar aprisionado no concreto fresco $V_{ar} =$	0,036	2,3%
Volume total adensado $V_t = (V_c + V_a + V_b) / (1 - V_{ar})$	1,5740	100,00%

Volume dos constituintes do concreto para a/c 0,3 na idade de 3 dias no estado endurecido

Volume concreto fresco	Absoluto	%
Volume cimento anidro	0,183	11,6%
Volume parte sólida pasta total/parcial hidratada $V_{pt} = V_c + V_{hh} (1 - c_q)$	0,196	12,5%
Volume água adsorvida pelos produtos sólidos (água de gel) $V_{hg} =$	0,076	4,9%
Volume água capilar ou livre $V_{hc} = V_h - V_{hh} - V_{hg}$	0,146	9,3%
Volume vazios devido à $c_q$ da água de hidratação (ar absorvido) $V_{vz} =$	0,019	1,2%

Volume dos compostos resistentes e não resistentes dos concretos para a relação a/c 0,3 na idade de 3 dias, para grau de hidratação de 43%

Concreto endurecido		Volume absoluto (dm <sup>3</sup> )	Volume (%)		
<b>compostos resistentes</b>	vol cimento anidro	0,183	11,64	87,2	
	volume de pasta hidratada	sólido	0,196		12,47
		água de gel	0,076		4,85
	volume de areia	0,335	21,26		
	volume de brita	0,582	36,95		
<b>compostos não resistentes (porosidade)</b>	volume de ar aprisionado	0,036	2,30	12,8	
	volume de ar absorvido	0,019	1,23		
	volume de água capilar	0,146	9,29		
Total		1,5740	100	100	

Volume dos constituintes do concreto para a/c 0,3 na idade de 28 dias no estado endurecido

Volume concreto fresco	Absoluto	%
Volume cimento anidro	0,096	6,1%
Volume parte sólida pasta total/parcial hidratada $V_{pt} = V_c + V_{hh} (1 - c_q)$	0,320	20,3%
Volume água adsorvida pelos produtos sólidos (água de gel) $V_{hg} =$	0,124	7,9%
Volume água capilar ou livre $V_{hc} = V_h - V_{hh} - V_{hg}$	0,050	3,2%
Volume vazios devido à $c_q$ da água de hidratação (ar absorvido) $V_{vz} =$	0,032	2,0%

Volume dos compostos resistentes e não resistentes dos concretos para a relação a/c 0,3 na idade de 28 dias, para grau de hidratação de 70%

Concreto endurecido			Volume absoluto (dm <sup>3</sup> )	Volume (%)	
compostos resistentes	Volume de cimento anidro		0,096	6,13%	92,5%
	volume de pasta hidratada	sólido	0,320	20,30%	
		água de gel	0,124	7,90%	
	volume de areia		0,335	21,26%	
	volume de brita		0,582	36,95%	
compostos não resistentes (porosidade)	volume de ar aprisionado		0,036	2,30%	7,5%
	volume de ar absorvido		0,032	2,00%	
	volume de água capilar		0,050	3,16%	
Total			1,5740	100	100

Volume dos constituintes do concreto para a/c 0,3na idade de 91 dias no estado endurecido

Volume concreto fresco	Absoluto	%
Volume cimento anidro	0,048	3,1%
Volume parte sólida pasta total/parcial hidratada $V_{pt} = V_c + V_{hh} (1 - c_q)$	0,388	24,7%
Volume água adsorvida pelos produtos sólidos (água de gel) $V_{hg} =$	0,151	9,6%
Volume água capilar ou livre $V_{hc} = V_h - V_{hh} - V_{hg}$	-0,004	-0,2%
Volume vazios devido à $c_q$ da água de hidratação (ar absorvido) $V_{vz} =$	0,038	2,4%

Volume dos compostos resistentes e não resistentes dos concretos para a relação a/c 0,3 na idade de 91 dias, para grau de hidratação de 85%

Concreto endurecido			Volume absoluto (dm <sup>3</sup> )	Volume (%)	
compostos resistentes	vol cimento anidro		0,048	3,06%	95,5%
	volume de pasta hidratada		0,388	24,65%	
			0,151	9,59%	
	volume de areia		0,335	21,26%	
	volume de brita		0,582	36,95%	
compostos não resistentes (porosidade)	volume de ar aprisionado		0,036	2,30%	4,5%
	volume de ar absorvido		0,038	2,43%	
	volume de água capilar		-0,004	-0,25%	
Total			1,5740	100,00%	100,00%

Volume dos constituintes do concreto para a/c 0,3 na idade de 182 dias no estado endurecido

Volume concreto fresco	Absoluto	%
Volume cimento anidro	0,023	1,4%
Volume parte sólida pasta total/parcial hidratada $V_{pt} = V_c + V_{hh} (1 - c_q)$	0,425	27,0%
Volume água adsorvida pelos produtos sólidos (água de gel) $V_{hg} =$	0,165	10,5%
Volume água capilar ou livre $V_{hc} = V_h - V_{hh} - V_{hg}$	-0,033	-2,1%
Volume vazios devido à $c_q$ da água de hidratação (ar absorvido) $V_{vz} =$	0,042	2,7%

Volume dos compostos resistentes e não resistentes dos concretos para a relação a/c 0,3 na idade de 182 dias, para grau de hidratação de 93%

Concreto endurecido		Volume absoluto (dm <sup>3</sup> )	Volume (%)		
compostos resistentes	vol cimento anidro	0,023	1,43%	97,1%	
	volume de pasta hidratada	sólido	0,425		26,97%
		água de gel	0,165		10,49%
	volume de areia	0,335	21,26%		
	volume de brita	0,582	36,95%		
compostos não resistentes (porosidade)	volume de ar aprisionado	0,036	2,30%	2,9%	
	volume de ar absorvido	0,042	2,66%		
	volume de água capilar	-0,033	-2,07%		
Total		1,5740	100,00%	100,00%	

## C2. Volume dos constituintes do concreto para relação a/c 0,4

Traço utilizado para concreto com a/c =0,3 e as massas específicas dos materiais

a/c = 0,4	Cimento	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Água
Traço unitário	1	1,370	2,180	0,400
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,11	2,54	2,94	1,00

Volume dos constituintes do concreto para a/c 0,4 no estado fresco

Volume concreto fresco	Absoluto	%
Volume ocupado pelo cimento: $V_c =$	0,322	15,7%
Volume ocupado pelo ag. miúdo $V_a =$	0,539	26,3%
Volume ocupado pelo ag. graúdo $V_b =$	0,741	36,2%
Volume ocupado pela água $V_h =$	0,400	19,5%
Volume de ar aprisionado no concreto fresco $V_{ar} =$	0,047	2,3%
Volume total adensado $V_t = (V_c + V_a + V_b) / (1 - V_{ar})$	2,0495	100,00%

Volume dos constituintes do concreto para a/c 0,4 na idade de 3 dias no estado endurecido

Volume concreto fresco	Absoluto	%
Volume cimento anidro	0,183	8,9%
Volume parte sólida pasta total/parcial hidratada $V_{pt} = V_c + V_{hh} (1 - c_q)$	0,196	9,6%
Volume água adsorvida pelos produtos sólidos (água de gel) $V_{hg} =$	0,076	3,7%
Volume água capilar ou livre $V_{hc} = V_h - V_{hh} - V_{hg}$	0,246	12,0%
Volume vazios devido à $c_q$ da água de hidratação (ar absorvido) $V_{vz} =$	0,019	0,9%

Volume dos compostos resistentes e não resistentes dos concretos para a relação a/c 0,4 na idade de 3 dias, para grau de hidratação de 43%

Concreto endurecido		Volume absoluto (dm <sup>3</sup> )	Volume (%)		
compostos resistentes	vol cimento anidro	0,183	8,94%	84,7%	
	volume de pasta hidratada	sólido	0,196		9,58%
		água de gel	0,076		3,72%
	volume de areia	0,539	26,32%		
	volume de brita	0,741	36,18%		
compostos não resistentes (porosidade)	volume de ar aprisionado	0,047	2,30%	15,3%	
	volume de ar absorvido	0,019	0,94%		
	volume de água capilar	0,246	12,02%		
Total		2,0495	100,00%	100,00%	

Volume dos constituintes do concreto para a/c 0,4 na idade de 28 dias no estado endurecido

Volume concreto fresco	Absoluto	%
Volume cimento anidro	0,096	4,7%
Volume parte sólida pasta total/parcial hidratada $V_{pt} = V_c + V_{hh} (1 - c_q)$	0,320	15,6%
Volume água adsorvida pelos produtos sólidos (água de gel) $V_{hg} =$	0,124	6,1%
Volume água capilar ou livre $V_{hc} = V_h - V_{hh} - V_{hg}$	0,150	7,3%
Volume vazios devido à $c_q$ da água de hidratação (ar absorvido) $V_{vz} =$	0,032	1,5%

Volume dos compostos resistentes e não resistentes dos concretos para a relação a/c 0,4 na idade de 28 dias, para grau de hidratação de 70%

Concreto endurecido		Volume absoluto (dm <sup>3</sup> )	Volume (%)		
compostos resistentes	vol cimento anidro	0,096	4,71%	88,9%	
	volume de pasta hidratada	sólido	0,320		15,59%
		água de gel	0,124		6,06%
	volume de areia	0,539	26,32%		
	volume de brita	0,741	36,18%		
compostos não resistentes (porosidade)	volume de ar aprisionado	0,047	2,30%	11,1%	
	volume de ar absorvido	0,032	1,54%		
	volume de água capilar	0,150	7,30%		
Total		2,0495	100,00%	100,00%	

Volume dos constituintes do concreto para a/c 0,4 na idade de 91 dias no estado endurecido

Volume concreto fresco	Absoluto	%
Volume cimento anidro	0,048	2,4%
Volume parte sólida pasta total/parcial hidratada $V_{pt} = V_c + V_{hh} (1 - c_q)$	0,388	18,9%
Volume água adsorvida pelos produtos sólidos (água de gel) $V_{hg} =$	0,151	7,4%
Volume água capilar ou livre $V_{hc} = V_h - V_{hh} - V_{hg}$	0,096	4,7%
Volume vazios devido à $c_q$ da água de hidratação (ar absorvido) $V_{vz} =$	0,038	1,9%

Volume dos compostos resistentes e não resistentes dos concretos para a relação a/c 0,4 na idade de 91 dias, para grau de hidratação de 85%

Concreto endurecido			Volume absoluto (dm <sup>3</sup> )	Volume (%)	
compostos resistentes	Volume de cimento anidro		0,048	2,35%	91,1%
	volume de pasta hidratada	sólido	0,388	18,93%	
		água de gel	0,151	7,36%	
	volume de areia		0,539	26,32%	
	volume de brita		0,741	36,18%	
compostos não resistentes (porosidade)	volume de ar aprisionado		0,047	2,30%	8,9%
	volume de ar absorvido		0,038	1,87%	
	volume de água capilar		0,096	4,69%	
Total			2,0495	100,00%	100,00%

Volume dos constituintes do concreto para a/c 0,4 na idade de 182 dias no estado endurecido

Volume concreto fresco	Absoluto	%
Volume cimento anidro	0,023	1,1%
Volume parte sólida pasta total/parcial hidratada $V_{pt} = V_c + V_{hh} (1 - c_q)$	0,425	20,7%
Volume água adsorvida pelos produtos sólidos (água de gel) $V_{hg} =$	0,165	8,1%
Volume água capilar ou livre $V_{hc} = V_h - V_{hh} - V_{hg}$	0,067	3,3%
Volume vazios devido à $c_q$ da água de hidratação (ar absorvido) $V_{vz} =$	0,042	2,0%

Volume dos compostos resistentes e não resistentes dos concretos para a relação a/c 0,4 na idade de 182 dias, para grau de hidratação de 93%

Concreto endurecido			Volume absoluto (dm <sup>3</sup> )	Volume (%)	
compostos resistentes	Volume de cimento anidro		0,023	1,10%	92,4%
	volume de pasta hidratada	sólido	0,425	20,72%	
		água de gel	0,165	8,06%	
	volume de areia		0,539	26,32%	
	volume de brita		0,741	36,18%	
compostos não resistentes (porosidade)	volume de ar aprisionado		0,047	2,30%	7,6%
	volume de ar absorvido		0,042	2,04%	
	volume de água capilar		0,067	3,29%	
Total			2,0495	100,00%	100,00%

### C3. Volume dos constituintes do concreto para relação a/c 0,5

Traço utilizado para concreto com a/c =0,5 e as massas específicas dos materiais

a/c = 0,5	Cimento	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Água
Traço unitário	1	1,880	2,660	0,500
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,11	2,54	2,94	1,00

Volume dos constituintes do concreto para a/c 0,5 no estado fresco

<b>Volume concreto fresco</b>	<b>Absoluto</b>	<b>%</b>
Volume ocupado pelo cimento: $V_c =$	0,322	12,7%
Volume ocupado pelo ag. miúdo $V_a =$	0,740	29,3%
Volume ocupado pelo ag. graúdo $V_b =$	0,905	35,8%
Volume ocupado pela água $V_h =$	0,500	19,8%
Volume de ar aprisionado no concreto fresco $V_{ar} =$	0,058	2,3%
Volume total adensado $V_t = (V_c + V_a + V_b) / (1 - V_{ar})$	2,5245	100,00%

Volume dos constituintes do concreto para a/c 0,5 na idade de 3 dias no estado endurecido

<b>Volume concreto fresco</b>	<b>Absoluto</b>	<b>%</b>
Volume cimento anidro	0,183	7,3%
Volume parte sólida pasta total/parcial hidratada $V_{pt} = V_c + V_{hh} (1 - c_q)$	0,196	7,8%
Volume água adsorvida pelos produtos sólidos (água de gel) $V_{hg} =$	0,076	3,0%
Volume água capilar ou livre $V_{hc} = V_h - V_{hh} - V_{hg}$	0,346	13,7%
Volume vazios devido à $c_q$ da água de hidratação (ar absorvido) $V_{vz} =$	0,019	0,8%

Volume dos compostos resistentes e não resistentes dos concretos para a relação a/c 0,5 na idade de 3 dias, para grau de hidratação de 43%

<b>Concreto endurecido</b>		<b>Volume absoluto (dm³)</b>	<b>Volume (%)</b>		
<b>compostos resistentes</b>	Volume de cimento anidro	0,183	7,26%	83,2%	
	volume de pasta hidratada	sólido	0,196		7,78%
		água de gel	0,076		3,02%
	volume de areia	0,740	29,32%		
	volume de brita	0,905	35,84%		
<b>compostos não resistentes (porosidade)</b>	volume de ar aprisionado	0,058	2,30%	16,8%	
	volume de ar absorvido	0,019	0,77%		
	volume de água capilar	0,346	13,72%		
Total		2,5245	100,00%	100,00%	

Volume dos constituintes do concreto para a/c 0,5 na idade de 28 dias no estado endurecido

<b>Volume concreto fresco</b>	<b>Absoluto</b>	<b>%</b>
Volume cimento anidro	0,096	3,8%
Volume parte sólida pasta total/parcial hidratada $V_{pt} = V_c + V_{hh} (1 - c_q)$	0,320	12,7%
Volume água adsorvida pelos produtos sólidos (água de gel) $V_{hg} =$	0,124	4,9%
Volume água capilar ou livre $V_{hc} = V_h - V_{hh} - V_{hg}$	0,250	9,9%
Volume vazios devido à $c_q$ da água de hidratação (ar absorvido) $V_{vz} =$	0,032	1,2%

Volume dos compostos resistentes e não resistentes dos concretos para a relação a/c 0,5 na idade de 28 dias, para grau de hidratação de 70%

<b>Concreto endurecido</b>		<b>Volume absoluto (dm³)</b>	<b>Volume (%)</b>		
<b>compostos resistentes</b>	vol cimento anidro	0,096	3,82%	86,6%	
	volume de pasta hidratada	sólido	0,320		12,66%
		água de gel	0,124		4,92%
	volume de areia	0,740	29,32%		
	volume de brita	0,905	35,84%		
<b>compostos não resistentes (porosidade)</b>	volume de ar aprisionado	0,058	2,30%	13,4%	
	volume de ar absorvido	0,032	1,25%		
	volume de água capilar	0,250	9,89%		
Total		2,5245	100,00%	100,00%	

Volume dos constituintes do concreto para a/c 0,5 na idade de 91 dias no estado endurecido

<b>Volume concreto fresco</b>	<b>Absoluto</b>	<b>%</b>
Volume cimento anidro	0,048	1,9%
Volume parte sólida pasta total/parcial hidratada $V_{pt} = V_c + V_{hh} (1 - c_q)$	0,388	15,4%
Volume água adsorvida pelos produtos sólidos (água de gel) $V_{hg} =$	0,151	6,0%
Volume água capilar ou livre $V_{hc} = V_h - V_{hh} - V_{hg}$	0,196	7,8%
Volume vazios devido à $c_q$ da água de hidratação (ar absorvido) $V_{vz} =$	0,038	1,5%

Volume dos compostos resistentes e não resistentes dos concretos para a relação a/c 0,5 na idade de 91 dias, para grau de hidratação de 85%

<b>Concreto endurecido</b>		<b>Volume absoluto (dm³)</b>	<b>Volume (%)</b>		
<b>compostos resistentes</b>	Volume de cimento anidro	0,048	1,91%	88,4%	
	volume de pasta hidratada	sólido	0,388		15,37%
		água de gel	0,151		5,98%
	volume de areia	0,740	29,32%		
	volume de brita	0,905	35,84%		
<b>compostos não resistentes (porosidade)</b>	volume de ar aprisionado	0,058	2,30%	11,6%	
	volume de ar absorvido	0,038	1,52%		
	volume de água capilar	0,196	7,77%		
Total		2,5245	100,00%	100,00%	

Volume dos constituintes do concreto para a/c 0,5 na idade de 182 dias no estado endurecido

<b>Volume concreto fresco</b>	<b>Absoluto</b>	<b>%</b>
Volume cimento anidro	0,023	0,9%
Volume parte sólida pasta total/parcial hidratada $V_{pt} = V_c + V_{hh} (1 - c_q)$	0,425	16,8%
Volume água adsorvida pelos produtos sólidos (água de gel) $V_{hg} =$	0,165	6,5%
Volume água capilar ou livre $V_{hc} = V_h - V_{hh} - V_{hg}$	0,167	6,6%
Volume vazios devido à $c_q$ da água de hidratação (ar absorvido) $V_{vz} =$	0,042	1,7%

Volume dos compostos resistentes e não resistentes dos concretos para a relação a/c 0,5 na idade de 182 dias, para grau de hidratação de 93%

<b>Concreto endurecido</b>		<b>Volume absoluto (dm³)</b>	<b>Volume (%)</b>		
<b>compostos resistentes</b>	vol cimento anidro	0,023	0,89%	89,4%	
	volume de pasta hidratada	sólido	0,425		16,82%
		água de gel	0,165		6,54%
	volume de areia	0,740	29,32%		
	volume de brita	0,905	35,84%		
<b>compostos não resistentes (porosidade)</b>	volume de ar aprisionado	0,058	2,30%	10,6%	
	volume de ar absorvido	0,042	1,66%		
	volume de água capilar	0,167	6,63%		
Total		2,5245	100,00%	100,00%	

### C4. Volume dos constituintes do concreto para relação a/c 0,65

Traço utilizado para concreto com a/c =0,65 e as massas específicas dos materiais

a/c = 0,65	Cimento	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Água
Traço unitário	1	2,650	3,370	0,650
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,11	2,54	2,94	1,00

Volume dos constituintes do concreto para a/c 0,65 no estado fresco

Volume concreto fresco	Absoluto	%
Volume ocupado pelo cimento: $V_c =$	0,322	9,9%
Volume ocupado pelo ag. miúdo $V_a =$	1,043	32,2%
Volume ocupado pelo ag. graúdo $V_b =$	1,146	35,4%
Volume ocupado pela água $V_h =$	0,650	20,1%
Volume de ar aprisionado no concreto fresco $V_{ar} =$	0,074	2,3%
Volume total adensado $V_t = (V_c + V_a + V_b) / (1 - V_{ar})$	3,2355	100,00%

Volume dos constituintes do concreto para a/c 0,65 na idade de 3 dias no estado endurecido

Volume concreto fresco	Absoluto	%
Volume cimento anidro	0,183	5,7%
Volume parte sólida pasta total/parcial hidratada $V_{pt} = V_c + V_{hh} (1 - c_q)$	0,196	6,1%
Volume água adsorvida pelos produtos sólidos (água de gel) $V_{hg} =$	0,076	2,4%
Volume água capilar ou livre $V_{hc} = V_h - V_{hh} - V_{hg}$	0,496	15,3%
Volume vazios devido à $c_q$ da água de hidratação (ar absorvido) $V_{vz} =$	0,019	0,6%

Volume dos compostos resistentes e não resistentes dos concretos para a relação a/c 0,65 na idade de 3 dias, para grau de hidratação de 43%

Concreto endurecido		Volume absoluto (dm <sup>3</sup> )	Volume (%)		
compostos resistentes	vol cimento anidro	0,183	5,66%	81,8%	
	volume de pasta hidratada	sólido	0,196		6,07%
		água de gel	0,076		2,36%
	volume de areia	1,043	32,25%		
	volume de brita	1,146	35,43%		
compostos não resistentes (porosidade)	volume de ar aprisionado	0,074	2,30%	18,2%	
	volume de ar absorvido	0,019	0,60%		
	volume de água capilar	0,496	15,34%		
Total		3,2355	100,00%	100,00%	

Volume dos constituintes do concreto para a/c 0,65 na idade de 28 dias no estado endurecido

Volume concreto fresco	Absoluto	%
Volume cimento anidro	0,096	3,0%
Volume parte sólida pasta total/parcial hidratada $V_{pt} = V_c + V_{hh} (1 - c_q)$	0,320	9,9%
Volume água adsorvida pelos produtos sólidos (água de gel) $V_{hg} =$	0,124	3,8%
Volume água capilar ou livre $V_{hc} = V_h - V_{hh} - V_{hg}$	0,400	12,4%
Volume vazios devido à $c_q$ da água de hidratação (ar absorvido) $V_{vz} =$	0,032	1,0%

Volume dos compostos resistentes e não resistentes dos concretos para a relação a/c 0,65 na idade de 28 dias, para grau de hidratação de 70%

Concreto endurecido		Volume absoluto (dm <sup>3</sup> )	Volume (%)		
compostos resistentes	vol cimento anidro	0,096	2,98%	84,4%	
	volume de pasta hidratada	sólido	0,320		9,88%
		água de gel	0,124		3,84%
	volume de areia	1,043	32,25%		
	volume de brita	1,146	35,43%		
compostos não resistentes (porosidade)	volume de ar aprisionado	0,074	2,30%	15,6%	
	volume de ar absorvido	0,032	0,97%		
	volume de água capilar	0,400	12,35%		
Total		3,2355	100,00%	100,00%	

Volume dos constituintes do concreto para a/c 0,65 na idade de 91 dias no estado endurecido

Volume concreto fresco	Absoluto	%
Volume cimento anidro	0,048	1,5%
Volume parte sólida pasta total/parcial hidratada $V_{pt} = V_c + V_{hh} (1 - c_q)$	0,388	12,0%
Volume água adsorvida pelos produtos sólidos (água de gel) $V_{hg} =$	0,151	4,7%
Volume água capilar ou livre $V_{hc} = V_h - V_{hh} - V_{hg}$	0,346	10,7%
Volume vazios devido à $c_q$ da água de hidratação (ar absorvido) $V_{vz} =$	0,038	1,2%

Volume dos compostos resistentes e não resistentes dos concretos para a relação a/c 0,65 na idade de 91 dias, para grau de hidratação de 85%

Concreto endurecido		Volume absoluto (dm <sup>3</sup> )	Volume (%)		
compostos resistentes	vol cimento anidro	0,048	1,49%	85,8%	
	volume de pasta hidratada	sólido	0,388		11,99%
		água de gel	0,151		4,66%
	volume de areia	1,043	32,25%		
	volume de brita	1,146	35,43%		
compostos não resistentes (porosidade)	volume de ar aprisionado	0,074	2,30%	14,2%	
	volume de ar absorvido	0,038	1,18%		
	volume de água capilar	0,346	10,70%		
Total		3,2355	100,00%	100,00%	

Volume dos constituintes do concreto para a/c 0,65 na idade de 182 dias no estado endurecido

Volume concreto fresco	Absoluto	%
Volume cimento anidro	0,023	0,7%
Volume parte sólida pasta total/parcial hidratada $V_{pt} = V_c + V_{hh} (1 - c_q)$	0,425	13,1%
Volume água adsorvida pelos produtos sólidos (água de gel) $V_{hg} =$	0,165	5,1%
Volume água capilar ou livre $V_{hc} = V_h - V_{hh} - V_{hg}$	0,317	9,8%
Volume vazios devido à $c_q$ da água de hidratação (ar absorvido) $V_{vz} =$	0,042	1,3%

Volume dos compostos resistentes e não resistentes dos concretos para a relação a/c 0,65 na idade de 182 dias, para grau de hidratação de 93%

Concreto endurecido		Volume absoluto (dm <sup>3</sup> )	Volume (%)	
<b>compostos resistentes</b>	vol cimento anidro	0,023	0,70%	86,6%
	volume de pasta hidratada	0,425	13,12%	
		0,165	5,10%	
	volume de areia	1,043	32,25%	
	volume de brita	1,146	35,43%	
<b>compostos não resistentes (porosidade)</b>	volume de ar aprisionado	0,074	2,30%	13,4%
	volume de ar absorvido	0,042	1,29%	
	volume de água capilar	0,317	9,81%	
Total		3,2355	100,00%	100,00%

**APÊNDICE E – Resultados obtidos para ensaio de velocidade  
propagação de onda e taxa de autocicatrização**

			Esp. (mm)	0 dias		28 dias		56 dias		84 dias		112 dias		140 dias		168 dias		0 dias	28 dias	56 dias	84 dias	112 dias	140 dias	168 dias	28 dias	56 dias	84 dias	112 dias	140 dias	168 dias		
				Integro	Fissur.	Integro	Fissur.	Integro	Fissur.	Integro	Fissur.	Integro	Fissur.	Integro	Fissur.	Integro	Fissur.														Integro	Fissur.
0,3	3 dias	N	0,323	5454,1	4377,4			3351,4		3951,5	4859,6	4293,1	5088,0	4301,8	5039,0	4201,1	5105,1	4491,9	0,803			0,883	0,845	0,834	0,880			10,1	5,3	3,9	9,6	
			0,175	5426,5	3650,4			3965,5		4016,4	4966,6	4705,9	4983,5	4705,9	4983,5	4735,4	5154,4	4794,4	0,673			0,948	0,944	0,950	0,930			40,9	40,4	41,3	38,3	
			0,165	5525,4	4063,1			4406,2		3958,7	4914,1	4301,8	4930,0	4343,1	4996,8	4334,5	5162,3	4164,4	0,735			0,875	0,881	0,867	0,807			19,0	19,8	18,0	9,7	
			0,294	5407,1	3587,2			3780,1		3621,5	4932,5	3842,8	4932,5	3910,6	5153,5	3991,2	5172,0	4093,1	0,663			0,779	0,793	0,774	0,791			17,4	19,5	16,7	19,3	
			0,197	5520,0	4538,3			3610,9		4523,1	4969,9	4679,3	4904,5	4653,6	4968,6	4653,0	5075,0	4743,2	0,822			0,942	0,949	0,936	0,935			14,5	15,4	13,9	13,7	
		0,332	5514,3	4493,4			3837,9		3874,2	4994,6	4321,4	4932,9	4207,2	4918,2	4364,5	5078,6	4358,2	0,815			0,865	0,853	0,887	0,858			6,2	4,7	8,9	5,3		
		0,098	5559,7	4412,9			4046,7		4010,4	4884,3	4472,8	4839,8	4455,1	5064,6	4601,4	5048,7	4558,5	0,794			0,916	0,921	0,909	0,903			15,4	16,0	14,5	13,8		
		0,264	5395,5	4169,6			4389,1		4385,5	4846,8	4467,2	4787,0	4421,6	5010,0	4546,6	5091,6	4547,8	0,773			0,922	0,924	0,908	0,893			19,3	19,5	17,4	15,6		
		0,265	5416,6	4661,2			3634,3		3987,8	4796,5	4140,8	4827,5	4090,3	5038,7	4201,5	5038,7	4445,6	0,861			0,863	0,847	0,834	0,882			0,3	-1,5	-3,1	2,5		
		0,304	5434,7	4592,5			4993,7		4916,1	5045,8	4886,1	5276,9	5025,0	5258,2	5049,0	5413,7	5009,5	0,845			0,968	0,952	0,960	0,925			14,6	12,7	13,6	9,5		
		0,148	5490,8	3433,9			4958,4		4894,4	5030,2	4886,6	5205,8	4974,3	5259,6	5056,9	5333,3	5082,1	0,625			0,971	0,956	0,961	0,953			55,3	52,8	53,7	52,4		
		0,113	5499,7	4051,9			4883,0		4859,8	5013,9	4875,0	5298,2	5059,4	5298,2	5034,6	5397,4	5075,6	0,737			0,972	0,955	0,950	0,940			32,0	29,6	29,0	27,6		
		0,221	5360,3	4912,8			4929,2		4881,3	5003,1	4850,3	5195,0	4977,0	5337,6	5067,8	5266,2	5068,5	0,917			0,969	0,958	0,949	0,962			5,8	4,5	3,6	5,0		
		0,294	5398,2	3800,7			4836,7		4791,4	5025,3	4812,4	5203,5	4964,9	5373,1	5006,9	5490,8	5113,4	0,704			0,958	0,954	0,932	0,931			36,0	35,5	32,4	32,3		
		0,304	5366,4	4317,3			5006,9		4966,2	4983,7	4958,1	5087,2	4966,3	5247,0	5142,1	5283,7	5107,5	0,805			0,995	0,976	0,980	0,967			23,7	21,3	21,8	20,2		
		0,329	4728,4	3694,1			3875,4		4168,9		5305,4	5054,8	4038,6	5071,7	4340,3	5071,7	4497,3	0,781						0,799	0,856	0,887				2,3	9,5	13,5
		0,115	4627,4	3138,2			2849,6		3506,0		4350,2	5118,0	3012,6	5118,0	3743,7	5118,0	4285,4	0,678						0,589	0,731	0,837				-13,2	7,9	23,5
		0,358	4802,7	3236,4			4124,0		5039,8		5442,7	5041,2	4565,0	4909,4	4790,6	4909,4	4808,7	0,674						0,906	0,976	0,979				34,4	44,8	45,4
	0,198	4848,7	2886,1			3705,3		3616,7		3587,5	5016,3	4046,9	4967,6	4006,8	4967,6	3936,1	0,595						0,807	0,807	0,792				35,5	35,5	33,1	
	0,232	4757,9	3817,6			4481,9	4866,3	4711,8	4805,3	4763,9	4821,9	4611,3	5061,7	4513,7	5216,3	4269,8	0,802		0,968	0,991	0,956	0,892	0,819		20,7	23,6	19,2	11,1	2,0			
	0,151	4809,2	4835,9			4299,1	4869,8	4822,5	4808,9	4728,3	5001,4	4539,9	5172,9	4561,2	5189,1	4782,4	1,006		0,990	0,983	0,908	0,882	0,922				-1,5	-2,2	-9,7	-12,3	-8,3	
	0,347	4683,3	3495,3			3577,8	4941,5	4392,5	4889,6	4311,6	4842,6	3983,0	5267,6	3777,9	5284,9	3739,5	0,746		0,889	0,882	0,822	0,717	0,708			19,1	18,1	10,2	-3,9	-5,2		
	0,210	4820,5	4371,7			4051,4	4973,1	4824,5	4844,4	4840,2	5017,0	4699,1	5129,8	4568,8	5355,6	4771,6	0,907		0,970	0,999	0,937	0,891	0,891			7,0	10,2	3,3	-1,8	-1,8		
	0,294	4794,6	3956,4			3755,7	4852,4	4246,9	4791,1	4304,8	4805,8	4069,7	5138,0	4308,8	5057,1	4274,2	0,825		0,875	0,899	0,847	0,839	0,845			6,1	8,9	2,6	1,6	2,4		
	0,145	4854,1	5183,3			4584,6		4745,6	5209,0	4687,4	4804,3	4673,9	4869,4	4625,7	5119,8	4715,0	1,068			0,900	0,973	0,950	0,921				-15,7	-8,9	-11,0	-13,8		
	0,302	4812,9	3646,1			3799,9		4521,2	5264,8	4219,5	4871,4	4238,8	4840,1	3671,6	5101,8	3952,8	0,758			0,801	0,870	0,759	0,775				5,8	14,9	0,1	2,3		
	0,302	4786,2	3284,6			3709,4		4303,8	5201,4	4153,1	4962,7	3995,4	4947,0	3738,0	5110,8	3715,4	0,686			0,798	0,805	0,756	0,727				16,3	17,3	10,1	5,9		
	0,173	4776,0	5138,1			4465,3		4716,3	5076,8	4525,3	4879,6	4579,9	4914,1	4181,5	5166,8	4622,0	1,076			0,891	0,939	0,851	0,895				-17,1	-12,8	-20,9	-16,8		
	0,353	4818,7	3890,7			4766,4	5195,2	4870,3	4877,4	4833,4	5005,9	4931,4	5122,1	4947,4	5376,2	5013,2	0,807		0,937	0,991	0,985	0,966	0,932		16,1	22,7	22,0	19,6	15,5			
	0,265	4794,9	3513,4			4752,1	5137,5	4910,2	4825,0	4781,3	4871,1	4870,3	5066,7	4886,0	5318,1	5023,9	0,733		0,956	0,991	1,000	0,964	0,945			30,4	35,2	36,5	31,6	28,9		
	0,314	4768,6	3322,7			4760,3	5181,2	4629,6	4975,2	4629,6	4878,6	4874,5	5074,8	4858,4	5201,4	4978,2	0,697		0,930	0,931	0,999	0,957	0,957			33,5	33,5	43,4	37,4	37,4		
	0,185	5074,7	4303,2			4376,7		4131,1		4369,2	5013,1	4378,2	5011,5	4392,0	5028,8	4394,1	0,848						0,873	0,876	0,874				3,0	3,4	3,0	
	0,225	4991,8	3488,2			4274,6		4206,7		4008,1	5026,4	4307,5	5043,8	4345,6	5043,8	4307,2	0,699						0,857	0,862	0,854				22,6	23,3	22,2	
	0,212	4903,9	3228,2			3838,7		3517,1		3893,6	5001,0	3901,6	5001,0	3908,4	5001,0	3938,2	0,658						0,780	0,782	0,787				18,5	18,7	19,6	
	0,216	4956,7	3629,2			4605,5		3881,6		3962,2	5038,0	4003,6	5038,0	4207,7	5038,0	4223,9	0,732						0,795	0,835	0,838				8,5	14,1	14,5	
	0,210	4907,6	3926,8	5021,6	4192,1	4842,6	4356,8	5284,3	4207,3	5112,1	4098,2	5021,6	4160,8	5103,4	4162,1	0,800	0,835	0,900	0,796	0,802	0,829	0,816	4,3	12,4	-0,5	0,2	3,6	1,9				
0,293	4908,3	3927,6	4818,4	3836,0	5256,1	4371,9	5065,4	3968,2	5065,4	3855,5	5065,4	4000,9	5018,0	4158,3	0,800	0,796	0,832	0,783	0,761	0,790	0,829	-0,5	3,9	-2,1	-4,9	-1,3	3,6					
0,256	4966,6	4103,3	4679,5	4103,2	5023,3	4353,9	5006,0	4155,5	5006,0	4174,6	5177,7	4178,3	5037,7	4077,2	0,826	0,877	0,867	0,830	0,834	0,807	0,809	6,1	4,9	0,5	0,9	-2,3	-2,0					
0,204	4912,0	4682,5	4942,3	3991,9	5209,6	4707,1	5108,7	4707,1	5108,7	4564,0	5025,5	4497,6	5141,0	4515,5	0,953	0,808	0,904	0,921	0,893	0,895	0,878	-15,3	-5,2	-3,3	-6,3	-6,1	-7,9					
0,340	4997,7	4063,1	5179,6	4185,6	4993,8	4192,4	5126,9	4129,2	5126,9	3927,4	5127,3	4086,1	4880,4	3922,3	0,813	0,808	0,840	0,805	0,766	0,797	0,804	-0,6	3,3	-0,9	-5,8	-2,0	-1,1					
0,262	5037,9	4605,4	5284,7	4669,4	5230,3	4661,6	4800,0	4633,9	4646,1	4411,4	5158,2	4510,7	4904,6	4329,5	0,914	0,884	0,891	0,965	0,950	0,874	0,883	-3,3	-2,5	5,6	3,9	-4,3	-3,4					
0,202	5013,9	4500,7	5058,5	4542,8	4901,7	4549,9	5189,4	4482,9	5361,3	4311,0	5009,3	4340,0	4947,5	4248,3	0,898	0,898	0,928	0,864	0,804	0,866	0,859	0,0	3,4	-3,8	-10,4	-3,5	-4,3					
0,264	4840,8	4321,2	5301,9	4390,9	5038,1	4352,7	5227,2	4253,7	4967,2	4165,6	5246,2	4114,2	4805,4	4010,9	0,893	0,828	0,864	0,814	0,839	0,784	0,835	-7,2	-3,2	-8,8	-6,1	-12,1	-6,5					
0,224	4917,5	4081,3	5137,8	4772,8	5244,5	5008,8	5300,5	4992,4	5192,6	4951,3</																						

0,4	3 dias	NP	0,376	4905,7	3312,9	5123,2	3723,4	5339,3	4143,8	5123,2	3970,4	5303,4	4166,5	5337,8	4300,8	5301,9	4177,0	0,675	0,727	0,776	0,775	0,786	0,806	0,788	7,6	14,9	14,8	16,3	19,3	16,7		
			0,154	4898,5	4361,2	5005,3	4449,5	4988,4	4499,0	4923,8	4442,9	5086,9	4503,1	5053,3	4567,2	5086,9	4585,0	0,890	0,889	0,902	0,902	0,885	0,904	0,901	-0,2	1,3	1,4	-0,6	1,5	1,2		
			0,231	4810,8	4035,5	5046,5	4154,7	5153,1	4301,7	5117,3	4144,4	5259,3	4216,0	5188,1	4169,2	5259,3	4331,3	0,839	0,823	0,835	0,810	0,802	0,804	0,824	-1,9	-0,5	-3,5	-4,4	-4,2	-1,8		
		S	0,273	4837,1	3517,1	5078,4	3990,3	5112,1	4517,2	5112,1	4345,7	5274,5	4509,9	5201,3	4460,9	5220,1	4516,1	0,727	0,786	0,884	0,850	0,855	0,858	0,865	8,1	21,5	16,9	17,6	18,0	19,0		
			0,255	4914,5	3665,5	5288,0	4021,1	5182,9	4477,8	5115,7	4224,2	5449,5	4150,6	5201,8	3965,6	5303,5	4239,3	0,746	0,760	0,864	0,826	0,762	0,762	0,799	2,0	15,8	10,7	2,1	2,2	7,2		
			0,132	4991,1	4427,2	5175,8	4842,2	5284,0	5025,2	5267,5	4975,4	5375,0	5026,0	5451,1	5109,5	5431,9	5118,8	0,887	0,936	0,951	0,945	0,935	0,937	0,942	5,5	7,2	6,5	5,4	5,7	6,2		
		C	0,249	5030,4	4489,5	5111,3	4879,2	5308,9	4933,7	5256,4	4957,7	5290,6	4911,6	5346,5	5038,4	5346,5	5038,4	0,892	0,955	0,929	0,943	0,928	0,942	0,942	7,0	4,1	5,7	4,0	5,6	5,6		
			0,142	4955,4	4568,2	5218,5	4900,8	5365,0	5015,3	5218,5	4997,9	5400,5	5047,9	5383,2	5135,6	5457,5	5116,8	0,922	0,939	0,935	0,958	0,935	0,954	0,938	1,9	1,4	3,9	1,4	3,5	1,7		
			0,306	4906,0	3513,6	4925,3	4628,4	5324,8	4906,5	5055,9	4930,6	5324,8	4898,6	5324,8	4994,7	5287,5	5020,2	0,716	0,940	0,921	0,975	0,920	0,938	0,949	31,2	28,7	36,2	28,5	31,0	32,6		
		N	0,171	4979,4	4094,9	5049,4	4796,6	5286,0	4978,2	5160,4	4938,7	5327,0	4994,4	5393,6	5068,8	5307,6	5035,4	0,822	0,950	0,942	0,957	0,938	0,940	0,949	15,5	14,5	16,4	14,0	14,3	15,4		
			0,338	4854,9	2604,3	5096,1	4293,0	5083,3	4281,5	5096,4	4363,0	5130,3	4551,1	5130,3	4558,3	5130,3	4558,3	0,536	0,842	0,842	0,856	0,887	0,889	0,889	57,0	57,0	59,6	65,4	65,6	65,6		
			0,358	4918,6	3506,9	5169,0	4419,6	5112,1	4333,5	5094,5	4507,4	5269,2	4609,7	5269,2	4541,6	5269,2	4541,6	0,713	0,855	0,848	0,885	0,875	0,862	0,862	19,9	18,9	24,1	22,7	20,9	20,9		
0,4	28 dias	NP	0,306	4802,3	3168,6	5130,7	4198,8	5025,6	4392,3	5203,8	4410,6	5255,8	4555,1	5167,0	4555,0	5167,0	4555,0	0,660	0,818	0,874	0,848	0,867	0,882	0,882	24,0	32,5	28,5	31,4	33,6	33,6		
			0,300	4933,1	3853,4	5089,7	4685,2	5042,3	4726,6	5024,9	4732,7	5340,6	4811,3	5303,3	4842,2	5303,3	4842,2	0,781	0,921	0,937	0,942	0,901	0,913	0,913	17,8	20,0	20,6	15,3	16,9	16,9		
			0,258	5412,1	4312,6		3980,1		4049,2	4716,5	4229,0		4885,9	4248,2	4981,7	4331,6	5053,9	4621,4	0,797			0,897	0,869	0,870	0,914			12,5	9,1	9,1	14,8	
		S	0,238	5344,2	4737,5		4001,4		3843,4	4810,9	4179,6	4891,9	4543,3	4875,0	4558,7	5018,5	4096,5	0,886			0,869	0,929	0,935	0,816			-2,0	4,8	5,5	-7,9		
			0,285	5252,5	4041,1		3421,0		3481,3	4938,1	3979,1	5018,5	3876,6	5018,5	4236,1	5151,5	4184,9	0,769			0,806	0,772	0,844	0,812			4,7	0,4	9,7	5,6		
			0,337	5292,8	4843,0		4027,9		4476,9	4923,6	4544,5	4938,3	4511,0	5151,5	4587,3	5011,3	4657,6	0,915			0,923	0,913	0,890	0,929			0,9	-0,2	-2,7	1,6		
		C	0,223	5202,8	4558,3		4369,5		4223,4	4678,4	4295,1	4647,2	4293,6	4826,0	4337,2	4988,5	4306,1	0,876			0,918	0,924	0,899	0,863			4,8	5,5	2,6	-1,5		
			0,182	5407,0	4791,9		3716,7		4278,3	4721,0	4102,4	4721,0	4288,8	4973,8	4402,2	4906,3	4404,9	0,886			0,869	0,908	0,885	0,898			-1,9	2,5	-0,1	1,3		
			0,095	5290,8	5005,0		4297,3		4297,4	4770,5	4397,3	4784,7	4348,2	4838,0	4487,4	5007,7	4455,6	0,946			0,922	0,909	0,928	0,890			-2,6	-3,9	-2,0	-5,9		
		NP	0,153	5316,5	5013,1		4293,2		3661,1	4766,0	4360,0	4796,4	4322,4	4908,3	4438,7	4983,5	4482,4	0,943			0,915	0,901	0,904	0,899			-3,0	-4,4	-4,1	-4,6		
			0,217	5275,0	4247,7		3686,3		3704,6	4709,9	4142,5	4625,8	4115,1	4831,1	4319,2	4831,1	4277,1	0,805			0,880	0,890	0,894	0,885			9,2	10,5	11,0	9,9		
			0,169	5307,7	4922,6		4874,8		4851,4	4946,6	4843,6	5127,8	4954,4	5235,4	4962,5	5291,7	4995,4	0,927			0,979	0,966	0,948	0,944			5,6	4,2	2,2	1,8		
S	0,145	5213,6	4050,9		4845,6		4814,1	4940,4	4799,3	5160,4	4838,1	5198,9	4884,9	5287,9	4979,7	0,777			0,971	0,938	0,940	0,942			25,0	20,7	20,9	21,2				
	0,221	5286,6	4824,7		4899,6		4845,3	4988,0	4860,7	5054,5	4923,1	5142,3	4962,4	5286,7	5035,7	0,913			0,974	0,974	0,965	0,953			6,8	6,7	5,7	4,4				
	0,154	5216,5	3987,9		4850,0		4798,2	4895,8	4769,6	5235,5	4951,3	5164,1	4943,8	5164,1	4978,3	0,764			0,974	0,946	0,957	0,964			27,4	23,7	25,2	26,1				
C	0,366	5296,2	3877,1		4863,0		4776,7	4934,0	4754,9	5068,0	4893,0	5192,2	4949,3	5263,2	4925,7	0,732			0,964	0,965	0,953	0,936			31,6	31,9	30,2	27,8				
	0,091	4627,5	4287,2		4798,7		4828,7		4665,3	4908,8	4707,8	5007,4	4728,7	5007,4	4753,6	0,926					0,959	0,944	0,949				3,5	1,9	2,5			
	0,294	4593,2	3961,3		4374,3		4309,0		3938,0	4803,3	4442,6	5025,6	4635,8	5025,6	4221,0	0,862					0,925	0,922	0,840				7,2	7,0	-2,6			
0,4	91 dias	NP	0,195	4605,1	4158,0		4423,0		4598,6	4646,8	4944,1	4690,5	4944,1	4729,1	0,903						0,955	0,949	0,957				5,8	5,1	5,9			
			0,266	4665,8	4202,5		4419,7		4391,8		4378,7	4881,1	4661,2	5061,2	4737,8	5061,2	4696,1	0,901					0,955	0,936	0,928				6,0	3,9	3,0	
			0,124	4562,0	4381,2		4407,5		4808,7		4674,6	4890,1	4784,7	5047,9	4814,9	5047,9	4770,5	0,960					0,978	0,954	0,945				1,9	-0,7	-1,6	
		S	0,097	4583,9	4170,7		4774,8		4751,7		4695,0	4886,6	4735,5	5291,7	4780,5	5291,7	4828,3	0,910					0,969	0,903	0,912				6,5	-0,7	0,3	
			0,251	4522,1	3683,3		4266,4		4324,9		4008,9	4862,0	4419,1	5020,6	4422,6	5020,6	4443,4	0,815					0,909	0,881	0,885				11,6	8,1	8,7	
			0,229	4673,9	4208,5		4493,8		4789,3		4723,5	4967,2	4740,0	5048,1	4795,1	5048,1	4818,7	0,900					0,954	0,950	0,955				6,0	5,5	6,0	
		C	0,291	4578,4	4115,0		4323,9		4633,0		4089,1	4990,6	4555,8	4968,3	4596,2	4968,3	4626,0	0,899					0,913	0,925	0,931				1,6	2,9	3,6	
			0,203	4721,1	4551,0		4281,3	4838,8	4717,0	4793,9	4651,9	4807,7	4452,1	5140,1	4363,9	5121,4	4460,9	0,964			0,975	0,970	0,926	0,849	0,871			1,1	0,7	-3,9	-11,9	-9,6
			0,209	4638,0	4102,8		4478,1	4853,0	4721,7	4867,1	4577,2	4821,0	4586,9	5060,7	4692,4	5234,3	4649,2	0,885			0,973	0,940	0,951	0,927	0,888			10,0	6,3	7,6	4,8	0,4
		NP	0,265	4623,6	2972,3		3461,0	4823,5	4052,1	4574,5	4223,4	4792,4	3964,0	4904,2	4011,1	4969,6	4343,9	0,643			0,840	0,923	0,827	0,818	0,874			30,7	43,6	28,7	27,2	36,0
			0,153	4571,0	4136,8		4146,3	4921,1	4644,8	4799,2	4613,0	4889,4	4531,0	5136,4	4337,1	5171,7	4254,3	0,905			0,944	0,961	0,927	0,844	0,823			4,3	6,2	2,4	-6,7	-9,1
			0,181	4649,5	4472,8		4153,6	4926,2	4482,1	4742,3	4367,8	4878,8	4386,5	5041,8	4321,7	5142,7	4279,1	0,962			0,910	0,921	0,899	0,857	0,832			-5,4	-4,3	-6,5	-10,9	-13,5
S	0,179	4658,3	4493,2		4368,3	5073,3	4502,9	4703,5	4361,7	4769,1	4343,2	4845,8	4162,2	5037,7	4357,2	0,965			0,888	0,927	0,911	0,859	0,865			-8,0	-3,9	-5,6	-10,9	-10,3		
	0,245	4700,5	3762,7		3750,3	5027,9	4389,1	4801,7	4056,4	4786,2	4087,5	4947,4	4136,1	5011,2	4264,7	0,800			0,873	0,845	0,854	0,836	0,851			9,1	5,5	6,7	4,4	6,3		
	0,181	4662,7	4535,5		4608,8	4875,2	4547,6	4713,9	4376,8	4713,9	4391,7	4937,1	4339,9	5182,6	4297,3	0,973			0,933	0,929	0,932	0,879	0,829									

0,5	182 dias	C	0,299	4771,6	3365,4	5179,7	4712,1	5214,4	4932,4	5143,5	4876,9	5143,5	4808,4	5214,5	4924,1	5053,9	4846,5	0,705	0,910	0,946	0,948	0,935	0,944	0,959	29,0	34,1	34,4	32,5	33,9	36,0
			0,221	4856,9	4429,9		4617,8	4590,2	4666,5	4826,0	4637,4	5032,5	4668,6	5080,4	4718,5	5047,3	4707,3	0,912		1,017	0,961	0,928	0,929	0,933		11,5	5,4	1,7	1,8	2,3
			0,192	4759,6	4346,8		4670,4	4653,0	4600,1	4725,0	4692,0	5022,9	4714,6	5105,1	4714,6	5022,9	4736,1	0,913		0,989	0,993	0,939	0,924	0,943		8,3	8,7	2,8	1,1	3,2
			0,206	4975,8	4321,7		4574,4	4775,8	4574,8	4948,6	4610,3	5149,7	4400,7	5168,5	4819,8	5184,3	4865,7	0,869		0,958	0,932	0,855	0,933	0,939		10,3	7,3	-1,6	7,4	8,1
			0,218	4931,7	3659,8		4344,1	4557,0	4494,8	4912,5	4489,9	5132,5	4234,3	4973,8	4534,4	5132,5	4697,1	0,742		0,986	0,914	0,825	0,912	0,915		32,9	23,2	11,2	22,9	23,3
			0,277	4790,3	3469,9		4044,0	4749,3	4150,3	4878,9	4270,1	5021,6	3922,9	5126,7	4713,2	5243,4	4807,2	0,724		0,874	0,875	0,781	0,919	0,917		20,6	20,8	7,8	26,9	26,6
			0,251	5041,1	3771,2		4289,2	4783,2	4286,3	5055,6	4520,4	5273,7	4107,4	5175,7	4590,6	5226,8	4654,7	0,748		0,896	0,894	0,779	0,887	0,891		19,8	19,5	4,1	18,6	19,0
			0,276	4827,9	3126,3		4271,9	4673,1	4331,6	4913,6	4495,1	5045,6	4340,8	5047,3	4645,8	5094,7	4412,5	0,648		0,927	0,915	0,860	0,920	0,866		43,1	41,3	32,9	42,1	33,7
			0,237	4810,9	3180,5		4343,6	4725,7	4400,8	4982,5	4496,1	5100,4	4157,0	5131,7	4557,1	5149,3	4623,9	0,661		0,931	0,902	0,815	0,888	0,898		40,9	36,5	23,3	34,3	35,8
			0,235	4879,4	4115,7		4561,4	4757,9	4629,1	4924,9	4608,3	5120,1	4341,4	5137,5	4741,2	5186,4	4715,6	0,843		0,973	0,936	0,848	0,923	0,909		15,3	10,9	0,5	9,4	7,8
		N	0,240	4801,1	3655,6	4820,2	4466,4	5064,0	4531,0	4901,3	4458,1	5098,4	4528,9	4916,6	4653,7	5133,6	4321,0	0,761	0,927	0,895	0,910	0,888	0,947	0,842	21,7	17,5	19,5	16,7	24,3	10,5
			0,227	4934,9	4411,0	4949,2	4633,2	5239,6	4794,5	5031,2	4669,0	5258,5	4817,5	5028,4	4734,8	5240,0	4802,1	0,894	0,936	0,915	0,928	0,916	0,942	0,916	4,7	2,4	3,8	2,5	5,3	2,5
			0,160	4710,9	3377,4	5006,6	4287,4	5246,8	4538,0	4974,7	4411,5	5283,7	4635,3	5086,7	4289,1	5211,9	4335,7	0,717	0,856	0,865	0,887	0,877	0,843	0,832	19,4	20,6	23,7	22,4	17,6	16,0
			0,214	4873,2	3822,8	4914,1	4309,5	5076,8	4641,4	4832,7	4529,9	5076,8	4654,8	4882,7	4391,8	5076,8	4395,8	0,784	0,877	0,914	0,937	0,917	0,899	0,866	11,8	16,5	19,5	16,9	14,7	10,4
			0,202	4733,6	3218,4	4874,0	4111,8	5141,8	4280,9	4954,7	4069,3	5194,2	4396,9	4883,2	4273,1	5177,1	4275,0	0,680	0,844	0,833	0,821	0,847	0,875	0,826	24,1	22,5	20,8	24,5	28,7	21,5
			0,157	4846,0	4302,2	4841,7	4505,6	5025,2	4665,9	4955,7	4541,2	5107,0	4695,9	4900,7	4686,9	5107,0	4646,7	0,888	0,931	0,928	0,916	0,919	0,956	0,910	4,8	4,6	3,2	3,6	7,7	2,5
			0,302	4919,3	4174,6	4996,8	4289,5	5253,8	4363,8	5079,6	4166,6	5145,1	4260,1	5150,7	4387,1	5307,6	4411,5	0,849	0,858	0,831	0,820	0,828	0,852	0,831	1,2	-2,1	-3,3	-2,4	0,4	-2,1
			0,235	5104,8	4351,0	4923,2	4452,8	5005,0	4492,1	4890,7	4300,3	5082,7	4375,3	4983,4	4459,9	5082,7	4459,6	0,852	0,904	0,898	0,879	0,861	0,895	0,877	6,1	5,3	3,2	1,0	5,0	2,9
			0,099	5112,2	4319,9	4894,8	4336,3	4961,1	4375,9	4863,5	4233,6	5078,4	4827,2	4976,7	4209,4	5078,4	4308,9	0,845	0,886	0,882	0,870	0,844	0,846	0,848	4,8	4,4	3,0	-0,1	0,1	0,4
			0,226	5059,0	3818,1	4868,1	3920,8	5013,7	4185,1	4918,0	3875,2	4999,4	3897,6	4999,4	3871,1	4982,4	3852,5	0,755	0,805	0,835	0,788	0,780	0,774	0,773	6,7	10,6	4,4	3,3	2,6	2,5
		0,226	5036,1	3643,7	4991,4	4095,9	5154,8	3915,2	4927,8	3687,0	5078,4	3452,2	5009,4	3564,3	5113,8	3537,0	0,724	0,821	0,760	0,748	0,680	0,712	0,692	13,4	5,0	3,4	-6,0	-1,7	-4,4	
		S	0,178	4839,6	4054,4	4930,0	4708,5	5240,8	4919,8	5082,1	4856,6	5320,6	4910,9	5240,8	5057,0	5318,7	4967,6	0,838	0,955	0,939	0,956	0,923	0,965	0,934	14,0	12,1	14,1	10,2	15,2	11,5
			0,121	4873,3	3786,8	5018,0	4712,3	5329,7	4879,4	5184,2	4918,0	5256,9	4888,9	5329,7	5049,3	5274,6	5007,6	0,777	0,939	0,916	0,949	0,930	0,947	0,949	20,8	17,8	22,1	19,7	21,9	22,2
			0,289	4815,6	4363,2	4991,3	4830,1	5200,9	4928,2	5219,5	4842,8	5235,5	4904,2	5234,7	4991,6	5290,2	5007,5	0,906	0,968	0,948	0,928	0,937	0,954	0,947	6,8	4,6	2,4	3,4	5,2	4,5
			0,117	4833,7	4233,4	5025,4	4688,4	5159,2	4893,6	5141,8	4854,8	5231,4	4909,5	5267,5	4991,3	5196,8	4974,8	0,876	0,933	0,949	0,944	0,938	0,948	0,957	6,5	8,3	7,8	7,2	8,2	9,3
			0,229	4916,8	3507,1	4958,3	4606,6	5280,7	4856,7	5157,7	4825,4	5263,0	4826,3	5281,9	4984,7	5281,9	4920,5	0,713	0,929	0,920	0,936	0,917	0,944	0,932	30,3	28,9	31,2	28,6	32,3	30,6
			0,212	4922,3	4453,2	5152,6	4762,0	4981,5	4787,1	5048,4	4781,9	5064,3	4810,0	5191,8	4849,1	5264,4	4834,5	0,905	0,924	0,961	0,947	0,950	0,934	0,918	2,2	6,2	4,7	5,0	3,2	1,5
			0,328	4863,7	3691,0	5010,0	4217,2	4925,2	4579,8	4893,7	4646,1	5010,0	4593,7	5119,2	4487,0	5170,7	4292,7	0,759	0,842	0,930	0,949	0,917	0,877	0,830	10,9	22,5	25,1	20,8	15,5	9,4
			0,179	4891,5	4172,5	5096,5	4603,9	5011,5	4761,8	5061,6	4767,9	5179,5	4759,8	5179,5	4900,1	5271,9	4796,8	0,853	0,903	0,950	0,942	0,919	0,946	0,910	5,9	11,4	10,4	7,7	10,9	6,7
			0,306	4863,9	3850,8	5121,5	4431,7	4902,0	4674,2	4953,6	4677,7	4951,7	4706,2	5069,7	4770,8	5121,5	4729,2	0,792	0,865	0,954	0,944	0,950	0,941	0,923	9,3	20,4	19,3	20,0	18,9	16,6
			0,226	4836,2	4403,4	5086,9	4636,3	4873,6	4699,0	4955,2	4721,3	5005,3	4721,3	5023,4	4793,8	5160,1	4659,7	0,911	0,911	0,964	0,953	0,943	0,954	0,903	0,1	5,9	4,6	3,6	4,8	-0,8
		0,277	4754,9	3566,0	4838,2	4298,6	4846,5	4668,8	4964,1	4669,3	4942,6	4662,8	4942,3	4755,8	5127,8	4647,6	0,750	0,888	0,963	0,941	0,943	0,962	0,906	18,5	28,4	25,4	25,8	28,3	20,9	
		0,227	4878,8	3958,4	4971,2	4513,0	4860,9	4706,3	4905,8	4711,4	4971,2	4732,4	5106,3	4783,6	5141,8	4787,3	0,811	0,908	0,968	0,960	0,952	0,937	0,931	11,9	19,3	18,4	17,3	15,5	14,8	
		0,246	4905,7	3971,4	5133,9	4510,1	4913,8	4841,4	4848,8	4751,5	4972,2	4799,7	5117,1	4916,4	5133,9	4850,8	0,810	0,878	0,985	0,980	0,965	0,961	0,945	8,5	21,7	21,0	19,2	18,7	16,7	
		0,195	4773,1	3902,9	5192,8	4200,1	5102,4	4637,3	4872,8	4629,0	4938,8	4667,2	5174,0	4749,9	5192,8	4714,8	0,818	0,809	0,909	0,950	0,945	0,918	0,908	-1,1	11,2	16,2	15,6	12,3	11,0	
		N	0,102	5211,9	4156,4		4278,0		4781,6	4958,3	4781,3	4874,9	4805,4	4920,4	4859,6	5034,0	4875,8	0,797		0,964	0,986	0,988	0,969			20,9	23,6	23,8	21,5	
			0,214	5215,7	4109,6		4129,3		4697,4	4968,2	4697,4	4885,9	4711,8	5241,1	4779,2	5132,7	4750,0	0,788		0,945	0,964	0,912	0,925			20,0	22,4	15,7	17,5	
			0,188	5299,9	3294,5		3643,6		4414,3	5006,3	4724,0	5172,8	4693,9	5144,7	4858,1	5180,7	4850,0	0,622		0,944	0,907	0,944	0,936			51,8	46,0	51,9	50,6	
			0,203	5282,6	4632,9		4450,2		4724,3	4954,7	4760,9	4793,3	4783,4	5303,2	4891,4	5213,9	4883,3	0,877		0,961	0,998	0,922	0,937			9,6	13,8	5,2	6,8	
			0,227	5294,4	3524,4		3660,2		4417,7	4807,7	4457,5	4888,6	4677,5	5084,9	4768,4	5050,5	4788,6	0,666		0,927	0,957	0,938	0,948			39,3	43,7	40,9	42,4	
			0,125	5206,8	4780,4		4600,4		4763,7	4765,7	4824,1	4540,9	4809,2	5291,6	4972,5	5165,4	4980,4	0,918		1,012	1,059	0,940	0,964			10,3	15,4	2,4	5,0	
			0,115	5126,4	4359,8		3860,7		4209,5	4762,3	4284,4	5134,8	4327,8	4674,3	4273,5	4917,6	4031,1	0,850		0,900	0,843	0,914	0,820			5,8	-0,9	7,5	-3,6	
			0,162	5230,7	3981,4		3825,3		4262,1	4731,0	4311,8	4986,3	4360,9	4907,8	4688,7	5016,1	4412,6	0,761		0,911	0,875	0,955	0,880			19,7	14,9	25,5	15,6	
			0,148	5248,7	3806,6		3665,5		4168,9	4814,6	4243,3	4																		

0,65	91 dias	C	0,267	4718,4	3806,6		4688,0	5080,7	4908,8	5286,8	4910,5	5249,0	5031,9	4942,1	4876,1	5196,3	4946,5	0,807		0,966	0,929	0,959	0,987	0,952		19,8	15,1	18,8	22,3	18,0				
			0,299	4775,3	3529,4		4729,9	5440,7	4849,3	5277,9	4889,4		5100,0	4794,9	5179,2	4831,6	4995,2	4934,6	0,739		0,891	0,926	0,940	0,933	0,988		20,6	25,3	27,2	26,2	33,7			
			0,280	4800,2	4046,8								4907,5	4636,4	5159,9	4721,1	5139,4	4706,3	0,843				0,945	0,915	0,916					12,1	8,5	8,6		
			0,222	4757,5	3832,7								4876,9	4372,9	5056,9	4404,7	5091,8	4218,5	0,806				0,897	0,871	0,828					11,3	8,1	2,8		
			0,147	4770,2	4467,1								4926,0	4733,3	5174,7	4799,5	5245,5	4822,4	0,936				0,961	0,927	0,919					2,6	-1,0	-1,8		
			0,220	4791,7	3734,0								4897,9	4442,4	5128,6	4474,9	5216,6	4474,9	0,779				0,907	0,873	0,860					16,4	12,0	10,4		
			0,156	4753,0	4013,6								4878,9	4541,1	5129,8	4434,0	5074,7	4306,3	0,844				0,931	0,864	0,849					10,2	2,4	0,5		
			0,136	4830,7	3743,2								4917,3	4580,0	5080,1	4655,7	5132,0	4325,0	0,775				0,931	0,916	0,843					20,2	18,3	8,8		
		0,230	4723,9	3771,5								4735,3	4535,6	5003,5	4652,3	4891,8	4653,0	0,798				0,958	0,930	0,951					20,0	16,5	19,1			
		0,212	4765,1	4524,0								4915,2	4635,6	5116,6	4713,8	5188,6	4752,3	0,949				0,943	0,921	0,916					-0,7	-3,0	-3,5			
		0,153	4794,8	4007,1								4859,6	4646,4	5105,1	4785,1	5174,9	4763,7	0,836				0,956	0,937	0,921					14,4	12,2	10,1			
		0,281	4781,3	3640,7	5017,3	4285,8	4985,8	4280,8	5246,7	4322,9	5067,0	4142,9	5245,2	4391,7	5067,0	3985,7	0,761	0,854	0,859	0,824	0,818	0,837	0,787	12,2	12,8	8,2	7,4	10,0	3,3					
		0,140	4856,9	4377,6	4639,5	4499,6	4846,0	4692,0	4846,0	4662,5	4895,6	4576,3	5024,4	4703,2	4846,0	4530,2	0,901	0,970	0,968	0,962	0,935	0,936	0,935	7,6	7,4	6,7	3,7	3,9	3,7					
		0,274	4815,2	3408,1	4818,8	3952,1	5054,5	3953,2	5054,5	3941,5	5023,3	4416,8	5054,5	4403,2	4818,8	4194,2	0,708	0,820	0,782	0,780	0,879	0,871	0,870	15,9	10,5	10,2	24,2	23,1	23,0					
		0,141	4817,6	3943,6	5123,6	4111,2	5157,9	4002,4	4809,0	3944,3	5034,3	3691,8	5105,0	4737,6	4873,0	3671,2	0,819	0,802	0,776	0,820	0,733	0,738	0,753	-2,0	-5,2	0,2	-10,4	-9,8	-8,0					
		0,328	4841,9	3733,5	4859,1	3969,1	5015,0	3738,8	4821,1	3878,4	4859,1	3645,9	4923,8	3558,8	4777,4	3546,4	0,771	0,817	0,746	0,804	0,750	0,723	0,742	5,9	-3,3	4,3	-2,7	-6,3	-3,7					
		0,183	4926,3	3739,4	4993,6	4145,4	5041,4	4195,9	4916,3	4234,8	4993,6	4131,5	5077,6	4132,9	4875,5	3888,9	0,759	0,830	0,832	0,861	0,827	0,814	0,798	9,4	9,6	13,5	9,0	7,2	5,1					
		0,181	4848,7	4060,9	5121,3	4274,5	5155,0	4267,6	4946,4	4214,4	5003,5	4020,2	5136,3	3961,1	4878,7	3972,4	0,838	0,835	0,828	0,852	0,803	0,771	0,814	-0,3	-1,2	1,7	-4,1	-7,9	-2,8					
		0,242	4936,3	3822,5	4900,1	4712,7	5297,9	4889,7	5279,3	4910,8	5086,3	4801,2	5260,7	4857,8	5297,9	4821,9	0,774	0,962	0,923	0,930	0,944	0,923	0,910	24,2	19,2	20,1	21,9	19,2	17,5					
		0,331	4899,6	4273,6	4976,5	4675,6	5218,2	4941,6	5113,9	4965,7	5199,9	4903,4	5385,1	5030,7	5147,2	4903,4	0,872	0,940	0,947	0,971	0,943	0,934	0,953	7,7	8,6	11,3	8,1	7,1	9,2					
		0,185	4860,7	4473,5	4874,7	4802,6	5285,0	4994,4	5303,3	5010,5	5053,2	4962,7	5267,1	5118,0	5142,8	5002,6	0,920	0,985	0,945	0,945	0,982	0,972	0,973	7,1	2,7	2,7	6,7	5,6	5,7					
		0,349	4946,5	4392,3	4845,1	4683,5	5073,4	4920,2	5107,9	4913,0	5073,4	4800,4	5146,4	4983,7	5198,2	4884,4	0,888	0,967	0,970	0,962	0,946	0,968	0,940	8,9	9,2	8,3	6,6	9,1	5,8					
		0,207	4934,6	4428,5	4848,7	4644,8	5093,6	4901,5	5110,9	4909,3	5093,6	4838,7	5218,2	4893,7	5093,6	4877,9	0,897	0,958	0,962	0,961	0,950	0,938	0,958	6,7	7,2	7,0	5,9	4,5	6,7					
		0,194	4595,2	3112,5			4577,4	4172,2	4850,3	4508,0	4820,0	4469,2	4977,3	4539,0	4996,0	4580,5	0,677			0,911	0,929	0,927	0,912	0,917			34,6	37,2	36,9	34,6	35,4			
		0,075	4626,3	4284,3			4611,7	4538,0	4936,5	4690,3	4936,5	4676,5	5168,6	4786,4	5151,3	4786,8	0,926			0,984	0,950	0,947	0,926	0,929			6,3	2,6	2,3	0,0	0,3			
		0,257	4612,3	3129,8			4576,7	4176,0	4688,4	4158,0	4886,7	4346,2	5028,3	4294,1	5045,2	4343,4	0,679			0,912	0,887	0,889	0,854	0,861			34,5	30,7	31,1	25,8	26,9			
		0,165	4579,5	3409,1			4601,5	4222,1	4765,6	4464,4	4871,1	4464,4	5043,6	4586,7	5083,5	4579,1	0,744			0,918	0,937	0,917	0,909	0,901			23,3	25,8	23,1	22,2	21,0			
		0,189	4638,2	3366,0			4692,9	4175,2	4878,9	4449,5	4913,5	4442,8	5040,4	4548,3	5040,4	4618,3	0,726			0,890	0,912	0,904	0,902	0,916			22,6	25,7	24,6	24,3	26,3			
	0,150	4631,8	3998,3			4537,8	4359,0	4783,4	4660,5	4873,4	4689,8	5052,3	4762,8	5192,0	4800,9	0,863			0,961	0,974	0,962	0,943	0,925			11,3	12,9	11,5	9,2	7,1				
	0,188	4576,3	3473,5			4553,5	4134,2	4707,3	4534,1	5004,3	4553,4	5018,0	4627,9	5138,6	4706,0	0,759			0,908	0,963	0,910	0,922	0,916			19,6	26,9	19,9	21,5	20,7				
	0,229	4573,0	3383,1			4593,2	4236,5	4693,5	4399,2	5041,5	4223,5	5017,9	4496,7	5311,6	4594,3	0,740			0,922	0,937	0,838	0,862	0,865			24,7	26,7	13,2	16,5	16,9				
	0,200	4897,7	4338,1	5887,3	4805,8	5818,0	4716,5	5905,4	4644,6	5801,5	4768,3	5608,3	4724,1	5881,5	4799,3	0,886	0,816	0,811	0,786	0,822	0,842	0,816	-7,8	-8,5	-11,2	-7,2	-4,9	-7,9						
	0,133	4893,6	3697,0	5119,2	4669,9	5020,1	4289,3	5318,5	4262,1	5189,9	4475,6	5006,7	4389,4	5208,5	4183,5	0,755	0,912	0,854	0,801	0,862	0,877	0,803	20,7	13,1	6,1	14,1	16,0	6,3						
	0,146	4984,1	4203,3	5213,6	4613,3	5059,0	4520,5	5323,7	4297,7	5141,4	4477,4	5060,3	4626,8	5213,6	4690,1	0,843	0,885	0,894	0,807	0,871	0,914	0,900	4,9	6,0	-4,3	3,3	8,4	6,7						
	0,351	4865,6	3667,8	5110,8	4196,1	5023,2	3775,9	5290,4	3809,4	5234,7	3734,5	5061,4	4113,9	5253,3	4141,6	0,754	0,821	0,752	0,720	0,713	0,813	0,788	8,9	-0,3	-4,5	-5,4	7,8	4,6						
	0,127	4820,9	4307,2	5160,6	4712,1	5160,6	4646,4	5440,4	4591,5	5249,0	4678,1	5035,1	4651,6	5302,9	4733,7	0,893	0,913	0,900	0,844	0,891	0,924	0,893	2,2	0,8	-5,5	-0,2	3,4	-0,1						
	0,197	4891,7	4470,7	4908,9	4419,4	4988,9	4406,9	4988,9	4285,5	5110,9	4255,8	5060,7	4464,9	4972,3	4401,7	0,914	0,900	0,883	0,859	0,833	0,882	0,885	-1,5	-3,3	-6,0	-8,9	-3,5	-3,1						
	0,141	4933,2	3890,9	5096,3	3932,6	5096,3	3966,8	4964,7	4020,3	5186,7	3998,3	5355,0	4097,1	5149,4	4196,2	0,789	0,772	0,778	0,810	0,771	0,765	0,815	-2,2	-1,3	2,7	-2,3	-3,0	3,3						
	0,234	4954,2	3932,4	5088,2	3930,6	5006,7	4019,3	5006,7	4064,2	5178,4	3838,9	5348,0	3768,4	5123,2	3871,1	0,794	0,772	0,803	0,812	0,741	0,705	0,756	-2,7	1,1	2,3	-6,6	-11,2	-4,8						
	0,208	4883,3	4367,6	4977,0	3852,6	4943,8	3928,4	4771,2	3802,4	5043,4	4162,5	5043,4	4228,3	5026,3	4335,3	0,894	0,774	0,795	0,797	0,825	0,838	0,863	-13,5	-11,2	-10,9	-7,7	-6,3	-3,6						
	0,198	4811,8	4293,8	4882,8	4035,4	4742,4	4010,5	4882,8	3849,3	5063,4	4035,3	5016,6	4421,2	4930,3	4104,1	0,892	0,826	0,846	0,788	0,797	0,881	0,832	-7,4	-5,2	-11,7	-10,7	-1,2	-6,7						
	0,228	4796,4	4367,3	5149,6	4752,1	5080,9	4789,9	5417,5	4903,8	5380,7	4934,2	5323,2	5059,7	5378,8	4956,3	0,911	0,923	0,943	0,905	0,917	0,951	0,921	1,3	3,5	-0,6	0,7	4,4	1,2						
	0,139	4883,2	4464,2	5186,0	4793,0	5238,2	4854,5	5571,2	4969,3	5274,8	5008,6	5353,0	5047,4	5353,0	4984,3	0,914	0,924	0,927	0,892	0,950	0,943	0,931	1,1	1,4	-2,4	3,9	3,1	1,9						
	0,118	4924,2	4519,6	5318,8	4931,1	518																												

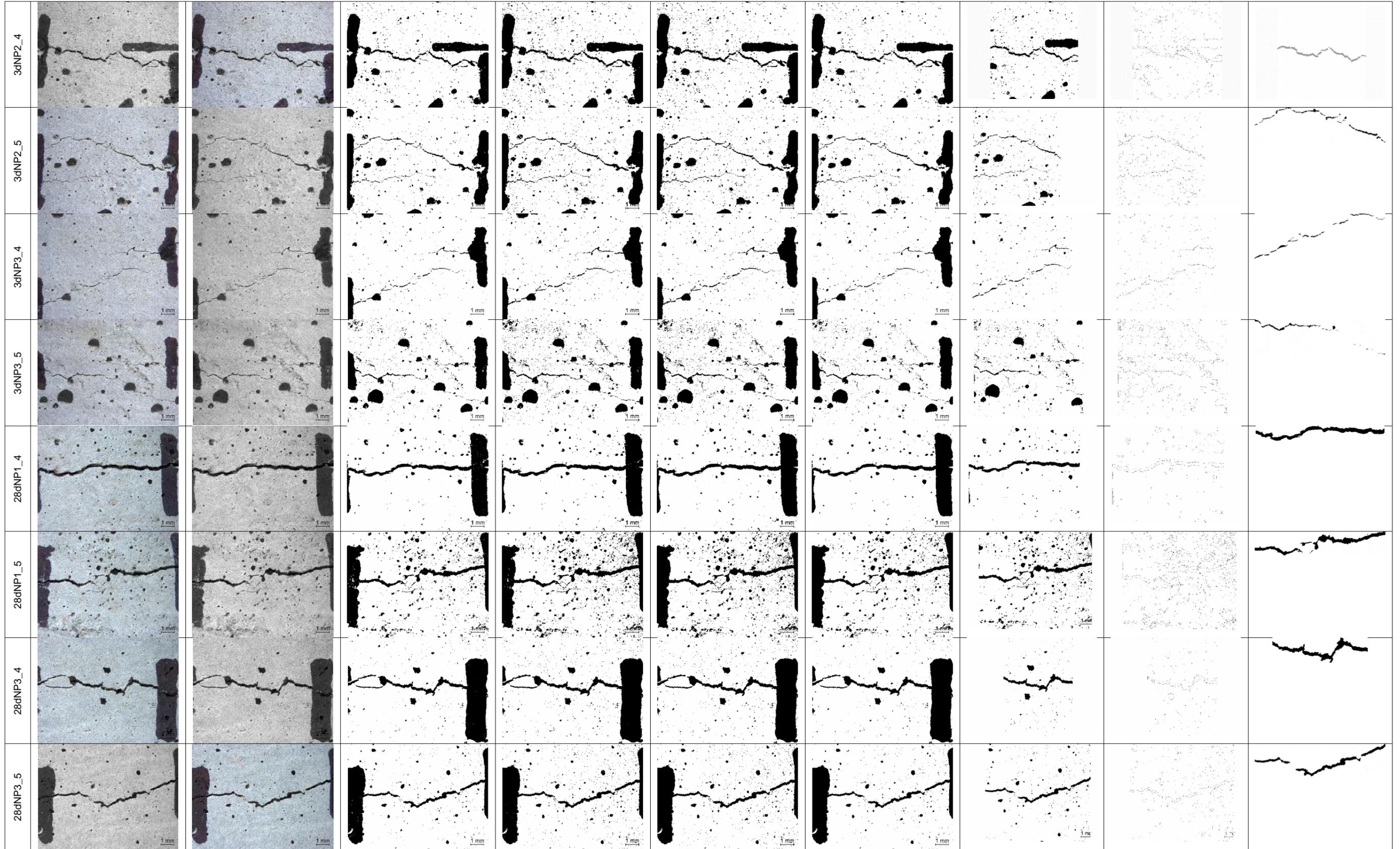


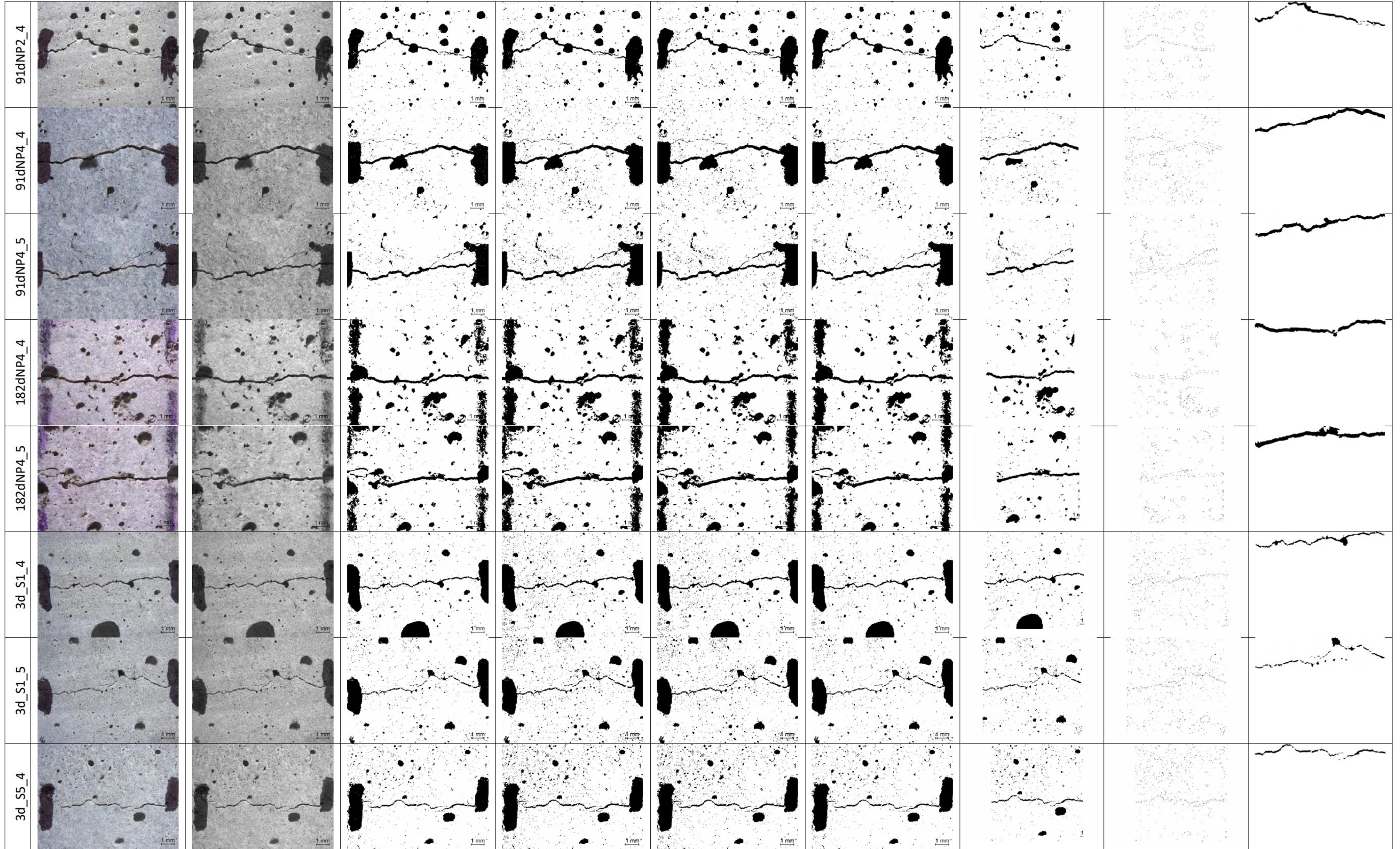
		0,091	4782,7	4371,2	4930,0	4481,7	4973,6	4489,1	5265,9	4581,8	5111,5	4640,3	5108,4	4768,6	5075,4	4666,7	0,914	0,909	0,903	0,870	0,908	0,933	0,919	-0,5	-1,2	-4,8	-0,7	2,1	0,6
		0,126	4561,6	4512,8	4911,1	4919,1	4725,6	4850,2	4911,1	4966,2	5055,9	4717,9	4725,6	4717,9	5024,1	5014,2	0,989	1,002	1,026	1,011	0,933	0,998	0,998	1,2	3,7	2,2	-5,7	0,9	0,9
		0,091	4485,0	4205,1	4946,3	4561,8	4704,2	4582,2	4889,5	4561,8	4993,0	4481,7	4606,6	4481,7	4872,8	4774,9	0,938	0,922	0,974	0,933	0,898	0,973	0,980	-1,6	3,9	-0,5	-4,3	3,8	4,5
		0,226	4508,4	4327,0	4955,7	4622,0	4691,6	4539,4	4938,9	4622,0	5039,4	4459,8	4691,4	4459,8	5019,6	4729,5	0,960	0,933	0,968	0,936	0,885	0,951	0,942	-2,8	0,8	-2,5	-7,8	-0,9	-1,8
		0,206	4567,6	4231,2	4761,5	4555,3	4587,2	4514,6	4761,5	4494,5	4909,2	4435,4	4587,2	4435,4	4835,3	4660,2	0,926	0,957	0,984	0,944	0,903	0,967	0,964	3,3	6,2	1,9	-2,5	4,4	4,0
		0,137	4520,0	3982,0	4966,9	4672,9	4746,5	4281,9	5018,8	4354,8	4983,5	4228,8	4642,1	4228,8	5105,4	4392,1	0,881	0,941	0,902	0,868	0,849	0,911	0,860	6,8	2,4	-1,5	-3,7	3,4	-2,3
		0,102	4575,6	4383,3	4949,9	4683,6	4642,9	4579,0	4933,0	4662,3	5026,4	4599,6	4690,0	4599,6	4986,5	4748,6	0,958	0,946	0,986	0,945	0,915	0,981	0,952	-1,2	3,0	-1,3	-4,5	2,4	-0,6
		0,164	4479,8	2977,4	5052,7	4061,2	4749,7	4110,5	5016,3	4248,1	5034,1	4178,2	4698,6	4178,2	5017,3	4414,3	0,665	0,804	0,865	0,847	0,830	0,889	0,880	20,9	30,2	27,4	24,9	33,8	32,4
		0,139	4584,1	4489,1	4945,8	4803,7	4793,4	4694,1	4946,1	4737,3	5029,1	4609,9	4733,8	4609,9	5044,1	4872,0	0,979	0,971	0,979	0,958	0,917	0,974	0,966	-0,8	0,0	-2,2	-6,4	-0,6	-1,4
		0,205	4647,0	3617,1	4907,9	4328,2	4736,7	4481,4	4955,6	4603,6	5011,5	4442,1	4593,8	4442,1	4972,2	4667,3	0,778	0,882	0,946	0,929	0,886	0,967	0,939	13,3	21,5	19,3	13,9	24,2	20,6

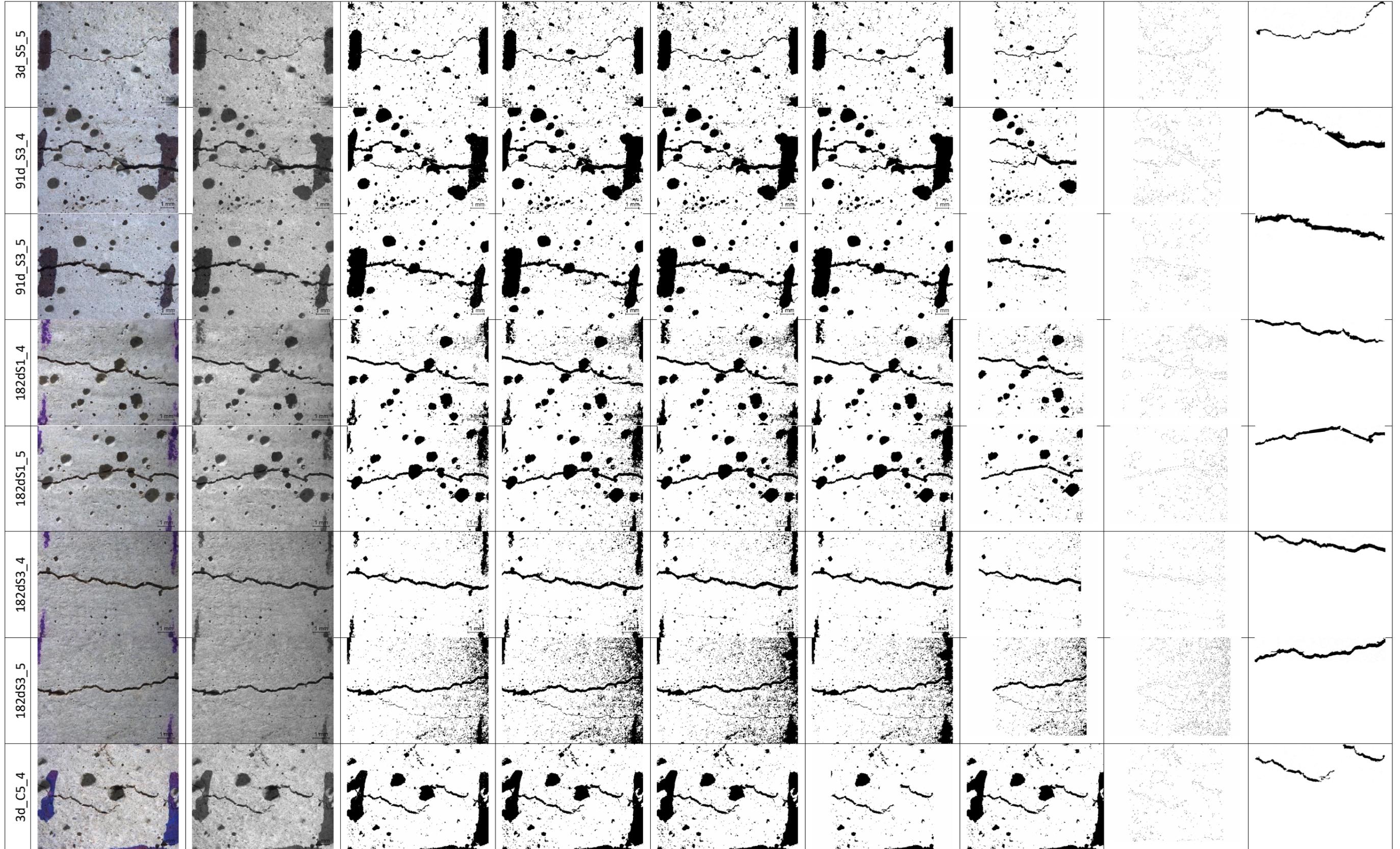
## **APÊNDICE F – Imagens obtidas no processamento de imagem.**

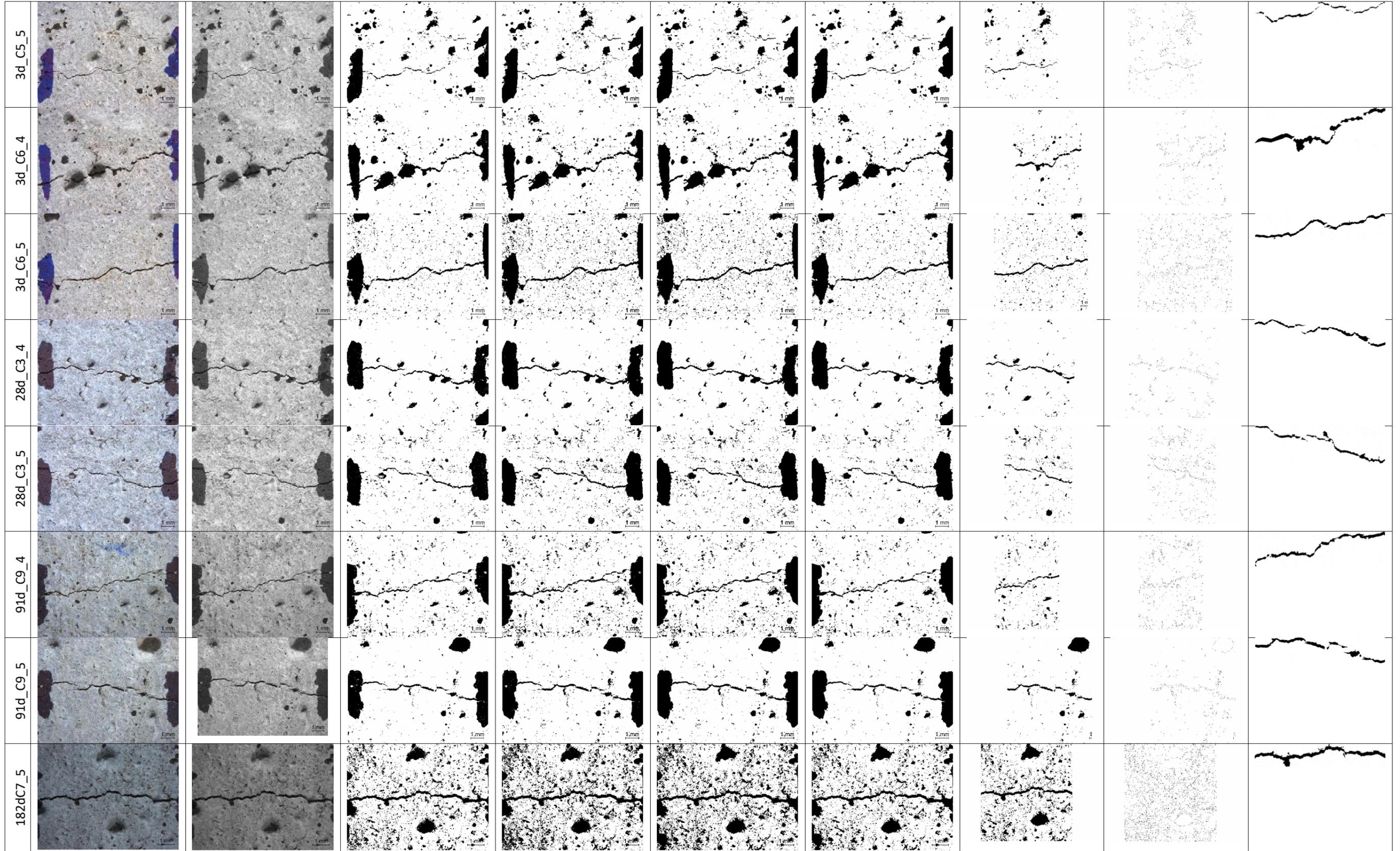
Etapas do processamento de imagens para a idade de 0 dias.

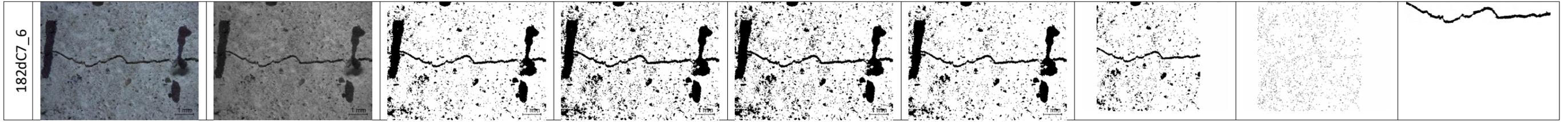
	RGB	8 Bit	Aplicação do Thershold	Dilatação	Preenchimento	Erosão	Recorte das bordas	Seleção da fissura	Descarte e área selecionada
3dN3_4									
3dN3_5									
28d_N2_1									
28d_N2_5									
91d_N4_4									
91d_N4_5									
182d_N5_4									











## **ANEXO A – Distribuição granulométrica do cimento**

