

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

Fabiana Ziegler

**Avaliação da autocicatrização de fissuras em concretos com
aditivos cristalizantes**

Porto Alegre
2020

FABIANA ZIEGLER

**AVALIAÇÃO DA AUTOCICATRIZAÇÃO DE FISSURAS EM
CONCRETOS COM ADITIVOS CRISTALIZANTES**

Dissertação 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 Mestre em Engenharia

Profa. Angela Borges Masuero
Dra. pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Brasil
Orientador

Prof. Daniel Tregnago Pagnussat
Dr. Pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Brasil
Coorientador

Porto Alegre
2020

FABIANA ZIEGLER

**AVALIAÇÃO DA AUTOCICATRIZAÇÃO DE FISSURAS EM
CONCRETOS COM ADITIVOS CRISTALIZANTES**

Esta dissertação de mestrado foi julgada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL, área de pesquisa Tecnologia dos Materiais e Sistemas Construtivos, e aprovada em sua forma final pelo Professor Orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 2020.

Profa. Angela Borges Masuero
Dra. pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Brasil
Orientadora

Prof. Daniel Tregnago Pagnussat
Dr. pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Brasil
Coorientador

Profa. Angela Borges Masuero
Coordenadora do PPGCI/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Antonio Eduardo Bezerra Cabral (UFC)
Doutor pela Universidade de São Paulo, Brasil

Profa. Denise Carpena Coitinho Dal Molin (UFRGS)
Doutora pela Universidade de São Paulo, Brasil

Profa. Lais Zucchetti (UFRGS)
Doutora pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Dedico este trabalho à minha família, Lauri, Ivânia e Rodrigo, e ao Marcelo pelo carinho e apoio.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em especial aos meus orientadores, Angela e Daniel, por serem exemplo de pessoas, profissionais e professores. Obrigada por todo o auxílio durante o trabalho. Agradeço às professoras Denise Dal Molin e Laís Zucchetti, pelo acompanhamento constante no decorrer do trabalho, com ajudas no aprimoramento da metodologia e boas observações acerca dos resultados.

Agradeço ao meu noivo Marcelo, por me apoiar das mais diversas formas para conclusão dessa caminhada. Obrigada pelo companheirismo e por estar ao meu lado sempre! Agradeço aos meus pais, Lauri e Ivânia, ao meu irmão Rodrigo, e minha avó Lúcia, pelo empenho e apoio constantes para a realização e conclusão do mestrado. Agradeço à Thaís, por ouvir muitas dúvidas, por discutir muitos assuntos, resultados, e por me proporcionar muitos momentos de diversão nestes últimos anos. Agradeço à Adri, por ouvir muitos desabafos e ser sempre perseverante.

Obrigada ao grupo de pesquisa em autocicatrização, pelo apoio desde o início do desenvolvimento do trabalho, Vanessa, Natália, Deivid e Camila. Um agradecimento em especial para a Camila, por estar presente em todos os momentos deste trabalho, por discutir ideias, aprimorar metodologias, pelas horas e horas de companhia no laboratório.

Agradeço aos técnicos do laboratório, Ari e Airton, pelo apoio e momentos de descontração. Obrigada aos bolsistas pelo auxílio na elaboração dos ensaios e coleta de dados, Milena, Thiago, Lucas, Bianca, Aya e Dimitrius, e a todos que em algum momento contribuíram para realização dos ensaios.

Agradeço ao Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (NORIE) por disponibilizar o Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído (LAMTAC) para o desenvolvimento desta pesquisa.

RESUMO

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.

As estruturas de concreto armado são propensas ao surgimento de fissuras, que se caracterizam como pontos de entrada de agentes agressivos, como os cloretos, os quais aceleraram os processos de corrosão das armaduras e conseqüente redução da vida útil das estruturas. Tornar as matrizes cimentícias capazes de se autorreparem logo após o aparecimento das fissuras representa economia com inspeções e processos de reparo da estrutura. Os materiais de autocicatrização possuem a capacidade de reparar danos, podendo ser estimulados com a utilização de agentes externos. Nesse sentido, os aditivos cristalizantes são inseridos na matriz cimentícia para contribuir com o desenvolvimento do fenômeno da autocicatrização de fissuras. Esse trabalho tem como objetivo avaliar a influência de diferentes aditivos cristalizantes na autocicatrização de fissuras em concretos de cimento Portland. 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. As conclusões obtidas da análise dos resultados foram: (i) 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; (ii) através do ensaio de microscopia ótica não foi possível observar o fechamento das fissuras em todos os concretos ao longo do tempo; (iii) nos corpos de prova não fissurados, a passagem de cloretos ao longo do tempo não ocorreu em nenhum dos concretos avaliados; (iv) quanto ao ensaio de difusão de cloretos, a incorporação dos aditivos cristalizantes reduziu a passagem de cloretos pelos concretos fissurados em relação ao concreto de referência. Após 6 ciclos de molhagem e secagem, verificou-se uma redução de 59,72% na difusão de cloretos e um aumento de 37 anos na previsão de vida útil. O concreto com a sílica ativa apresentou um aumento de 32,15% da difusão de cloretos em relação ao concreto referência e conseqüentemente, uma redução de 15,3 anos da previsão de vida útil.

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

ABSTRACT

ZIEGLER, F. Self-healing evaluation of cracked concrete with different crystalline admixtures. 2020. Dissertation (Master of Science in Civil Engineering) - Postgraduate Program in Civil Engineering: Construction and Infrastructure, Engineering School, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

The reinforced concrete structures are prone to the appearance of cracks characterized as entry points for aggressive agents, such as chlorides, which accelerate the corrosion processes of the reinforcement, leading to a structure's service life reduction. Making cementitious matrices capable of self-repairing soon after the appearance of such cracks represents savings with inspections and processes for structure repairing. Self-healing materials have the internal capacity to self-repair, which can be stimulated by external agents. In this sense, crystalline admixtures are inserted in the cementitious matrix to contribute to develop the phenomenon of self-healing of cracks. This work aims to evaluate the influence of different crystalline admixtures on the self-healing of cracks in Portland cement concrete. The experiments adopted three different crystalline admixtures available on the market, silica fume, and an a/c ratio of 0.4. The crack opening occurred at 3 days, and the specimens were exposed to 2 and 6 wetting and drying cycles to intensify the occurrence of self-healing. The self-healing evaluation was carried out through the natural diffusion of chloride and image analysis by optical microscopy. The achieved conclusions based on the analysis of the results were: (i) the use of crystalline admixtures and silica fume promoted the concretes a reduction in the absorption of water by capillarity and did not compromise the compressive strength; (ii) through the optical microscopy test it was not possible to observe the closure of cracks in all concretes over time; (iii) in samples without crack, the passage of chlorides over the time did not occur in any of the evaluated concretes; (iv) in the chloride diffusion test, the incorporation of crystalline admixtures reduced the passage of chlorides through cracked concretes in relation to the reference concrete. After 6 wetting and drying cycles, there was a reduction of 59.72% in the diffusion of chlorides and an increase of 37 years in the service life prediction. The concrete with the silica fume presented an increase of 32.15% in the diffusion of chlorides in relation to the reference concrete and, consequently, a reduction of 15.3 years of the service life prediction.

Keywords: self-healing, crystalline admixtures, concrete, cracks

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Evolução das pesquisas em relação aos materiais autocicatrizantes | 25 |
| Figura 2 - Tipos de autocicatrização em materiais cimentícios..... | 26 |
| Figura 3 - Agentes da autocicatrização autônoma (a) cápsulas esféricas (b) cápsulas cilíndricas | 26 |
| Figura 4 - Abordagens da cura autógena (a) restrição da abertura da fissura (b) presença de água (c) cristalização | 27 |
| Figura 5 - Colmatação autógena de uma fissura por diferentes origens. | 28 |
| Figura 6 - Precipitação do carbonato de cálcio na superfície da fissura | 29 |
| Figura 7 - Mecanismos de ativação da autocicatrização de fissuras..... | 30 |
| Figura 8 - Mecanismos de ativação da autocicatrização de fissuras..... | 31 |
| Figura 9 - Requisitos de fissuração em relação às classes de agressividade ambiental..... | 37 |
| Figura 10 - Diferentes morfologias internas de fissuras (a) fissura uniforme (b) fissura piramidal (c) fissura convexa (d) fissura côncava. | 38 |
| Figura 11 - (a) atuação do aditivo cristalizante no bloqueio de fissura e (b) revestimento hidrofóbico | 43 |
| Figura 12 - Representação das reações de hidratação dos aditivos cristalizantes | 44 |
| Figura 13 - Representação da matriz experimental | 47 |
| Figura 14 - Granulometria do cimento..... | 50 |
| Figura 15 - Difratoograma do cimento CII-F 40..... | 52 |
| Figura 16 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo | 54 |
| Figura 17 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo..... | 55 |
| Figura 18 - Distribuição granulométrica dos aditivos cristalizantes (a) X (b) Y e (c) Z | 57 |
| Figura 19 - Difratoograma do aditivo cristalizante X..... | 59 |
| Figura 20 - Difratoograma do aditivo cristalizante Y | 59 |
| Figura 21 - Difratoograma do aditivo cristalizante Z | 60 |
| Figura 22 - Distribuição granulométrica da sílica ativa | 61 |
| Figura 23 - Diagrama de dosagem..... | 63 |
| Figura 24 - Quantidade de corpos de prova em cada betonada | 66 |
| Figura 25 - Representação do processo de corte dos corpos de prova (a) corpo de prova integro (b) fatias descartadas (c) fatias utilizadas para ensaio de difusão de cloretos..... | 67 |
| Figura 26 - Posicionamento dos apoios para a abertura da fissura..... | 68 |
| Figura 27 - Molde para auxiliar na marcação dos corpos de prova para auxiliar no posicionamento na prensa | 68 |
| Figura 28 - Ciclo de ciclo de secagem dos corpos de prova | 69 |
| Figura 29 - Representação dos ciclos de molhagem/secagem..... | 70 |

| | |
|---|----|
| Figura 30 - Zonas para capturas de imagens por microscopia ótica..... | 73 |
| Figura 31 - Ajuste da imagem no ImageJ para quantificação da fissura (a) imagem original (b) representação da imagem após tratamento (c) remoção de pixels excedentes à fissura | 74 |
| Figura 32 - Faces impermeabilizadas com epóxi | 75 |
| Figura 33 - Disposição das fatias de concreto no dessecador | 75 |
| Figura 34 - Aparatos de ensaio de difusão de cloretos | 76 |
| Figura 35 - Preparação dos corpos de prova de concreto para o ensaio de difusão de cloretos | 77 |
| Figura 36 - Fixação do corpo de prova de concreto na primeira célula do aparato de ensaio . | 77 |
| Figura 37 - Pontos de apoio com adesivo poliuretano..... | 78 |
| Figura 38 - Secagem completa do aparato de ensaio com apoio em gabarito de madeira..... | 78 |
| Figura 39 - Configuração do ensaio de difusão de cloretos | 79 |
| Figura 40 - Equipamento para leitura do teor de cloretos..... | 80 |
| Figura 41 - Esquema representativo dos corpos de prova utilizados em cada ensaio | 81 |
| Figura 42 - Teste F de Fischer (LSD) para os resultados de resistência à compressão axial... | 86 |
| Figura 43 - Resistência à compressão axial dos concretos ao longo do tempo..... | 87 |
| Figura 44 - Teste de Fischer LSD para a absorção de água por capilaridade | 88 |
| Figura 45 - Absorção de água por capilaridade em 72 horas de ensaio, aos 28 e 91 dias | 89 |
| Figura 46 - Acompanhamento por microscopia ótica aos 3 e 28 dias, para a amostra 01 do concreto REF, submetida a 2 ciclos de molhagem/secagem..... | 91 |
| Figura 47 - Imagem de microscopia para a zona 9 do 01-REF-2C (a) 3 dias (b) 28 dias..... | 92 |
| Figura 48 - Acompanhamento por microscopia ótica aos 3 e 84 dias, para a amostra 02 do REF, submetida a 6 ciclos de molhagem/secagem..... | 92 |
| Figura 49 - Imagem de microscopia para a zona 8 do 02-REF-6C (a) 3 dias (b) 84 dias..... | 93 |
| Figura 50 - Acompanhamento por microscopia ótica aos 3 e 28 dias, para a amostra 02 do aditivo cristalizante X, submetida a 2 ciclos de molhagem/secagem | 93 |
| Figura 51 - Imagem de microscopia para a zona 9 do 02-X-2C (a) 3 dias (b) 28 dias..... | 94 |
| Figura 52 - Acompanhamento por microscopia ótica aos 3 e 84 dias, para a amostra 01 do X, submetida a 6 ciclos de molhagem/secagem..... | 94 |
| Figura 53 - Imagem de microscopia para a zona 2 do 01-X-6C (a) 3 dias (b) 84 dias..... | 95 |
| Figura 54 - Acompanhamento por microscopia ótica aos 3 e 28 dias, para a amostra 01 do aditivo cristalizante Y, submetida a 2 ciclos de molhagem/secagem | 95 |
| Figura 55 - Imagem de microscopia para a zona 3 do 01-Y-2C (a) 3 dias (b) 28 dias..... | 96 |
| Figura 56 - Acompanhamento por microscopia ótica aos 3 e 84 dias, para a amostra 03 do aditivo cristalizante Y, submetida a 6 ciclos de molhagem/secagem | 96 |
| Figura 57 - Imagem de microscopia para a zona 2 do 03-Y-6C (a) 3 dias (b) 84 dias..... | 97 |
| Figura 58 - Acompanhamento por microscopia ótica aos 3 e 28 dias, para a amostra 03 do aditivo cristalizante Z, submetida a 2 ciclos de molhagem/secagem | 98 |

| | |
|--|-----|
| Figura 59 - Imagem de microscopia para a zona 1 do 03-Z-2C (a) 3 dias (b) 28 dias | 98 |
| Figura 60 - Imagem de microscopia para a zona 6 do 03-Z-2C (a) 3 dias (b) 28 dias | 99 |
| Figura 61 - Acompanhamento por microscopia ótica aos 3 e 84 dias, para a amostra 01 do Z, submetida a 6 ciclos de molhagem/secagem | 99 |
| Figura 62 - Imagem de microscopia para a zona 6 do 01-Z-6C (a) 3 dias (b) 84 dias | 100 |
| Figura 63 - Acompanhamento por microscopia ótica aos 3 e 28 dias, para a amostra 02 da SA, submetida a 2 ciclos de molhagem/secagem | 100 |
| Figura 64 - Imagem de microscopia para a zona 1 do 02-SA-2C (a) 3 dias (b) 28 dias..... | 101 |
| Figura 65 - Acompanhamento por microscopia ótica aos 3 e 84 dias, para a amostra 01 do SA, submetida a 6 ciclos de molhagem/secagem | 101 |
| Figura 66 - Imagem de microscopia para a zona 5 do 01-SA-6C (a) 3 dias (b) 84 dias..... | 102 |
| Figura 67 - Imagem de microscopia ótica em fissura sem sujidade superficial (a) logo após a abertura da fissura (a) com sua quantificação por pixel (b) e após a sua autocicatrização (c) e posterior quantificação (d)..... | 103 |
| Figura 68 - Difusão de cloretos, para as amostras não fissuradas, com 28 dias para os diferentes tipos de adição | 106 |
| Figura 69 - Difusão de cloretos, para as amostras não fissuradas, com 84 dias para os diferentes tipos de adição | 108 |
| Figura 70 - Difusão de cloretos, para as amostras com fissura, com 28 dias para os diferentes tipos de adição | 110 |
| Figura 71 - Comportamento da difusão de cloretos em amostras fissuradas, aos 2 ciclos de molhagem/secagem, em relação ao concreto REF | 111 |
| Figura 72 - Difusão de cloretos, para as amostras com fissura, com 84 dias para os diferentes tipos de adição | 112 |
| Figura 73 - Comportamento da difusão de cloretos em amostras fissuradas, aos 6 ciclos de molhagem/secagem, em relação ao concreto REF | 114 |
| Figura 74 - Coeficientes de difusão de cloretos, em relação ao concreto de referência | 118 |
| Figura 75 - Efeito isolado do tipo de adição sobre o coeficiente de difusão de cloretos..... | 120 |
| Figura 76 - Cobrimento nominal relacionado com a classe de agressividade..... | 121 |
| Figura 77 - Vida útil dos concretos fissurados, com 2 ciclos de molhagem/secagem..... | 121 |
| Figura 78 - Vida útil dos concretos fissurados, com 6 ciclos de molhagem/secagem..... | 122 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 - Caracterização do cimento CII-F 40 | 53 |
| Tabela 2 - Caracterização física do agregado miúdo | 53 |
| Tabela 3 - Caracterização física do agregado graúdo | 55 |
| Tabela 4 - Características do aditivo superplastificante..... | 56 |
| Tabela 5 - Granulometria a laser dos aditivos cristalizantes | 57 |
| Tabela 6 - Caracterização química dos aditivos cristalizantes | 58 |
| Tabela 7 - Caracterização química da sílica ativa | 60 |
| Tabela 8 - Granulometria a laser da sílica ativa | 61 |
| Tabela 9 - Curva de dosagem: consumo e F_c28 | 63 |
| Tabela 10 - Proporcionamento dos concretos | 64 |
| Tabela 11 - Abatimento de cada betonada e teor de aditivo utilizado | 64 |
| Tabela 12 - Resistência à compressão axial aos 3 dias dos concretos confeccionados com diferentes adições..... | 83 |
| Tabela 13 - Resistência à compressão axial aos 28 dias dos concretos confeccionados com diferentes adições..... | 83 |
| Tabela 14 - Resistência à compressão axial aos 91 dias dos concretos confeccionados com diferentes adições..... | 84 |
| Tabela 15 - Análise da variância (ANOVA) para a resistência à compressão axial | 85 |
| Tabela 16 - Absorção de água por capilaridade média dos concretos com aditivos cristalizantes e sílica ativa | 87 |
| Tabela 17 - Análise da variância (ANOVA) para a absorção de água por capilaridade..... | 88 |
| Tabela 18 - Coeficientes de difusão médios..... | 117 |
| Tabela 19 - Análise da variância (ANOVA) para o coeficiente de difusão de cloretos | 119 |
| Tabela 20 - Quadro comparativo da vida útil dos concretos após 2 e 6 ciclos de molhagem e secagem | 123 |

LISTA DE EQUAÇÕES

| | |
|----------------|----|
| Equação 1..... | 32 |
| Equação 2..... | 32 |
| Equação 3..... | 43 |
| Equação 4..... | 74 |
| Equação 5..... | 81 |
| Equação 6..... | 81 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI: American Concrete Institute

EE: Escola de Engenharia

EPUSP - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

DMAE: Departamento Municipal de Água e Esgotos

Fck: Resistência Característica do Concreto à Compressão

IPT: Instituto de Pesquisas Tecnológicas

LACER; Laboratório de Materiais Cerâmicos

NORIE: Núcleo Orientado para a Inovação da Construção

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

RILEM; International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures

SHC 221: Self-Healing Phenomena in Cement-Based Material

SHE: Self-healing concrete – Its efficiency and evaluation

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul Compressão

UNISINOS: Universidade do Vale do Rio dos Sinos

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 17 |
| 1.1 | JUSTIFICATIVA | 19 |
| 1.2 | OBJETIVOS DA PESQUISA | 22 |
| 1.2.1 | Objetivo principal | 22 |
| 1.2.2 | Objetivos específicos | 22 |
| 1.3 | LIMITAÇÕES | 22 |
| 1.4 | DELIMITAÇÕES | 22 |
| 1.5 | ESTRUTURA DA PESQUISA | 23 |
| 2 | MECANISMO DA AUTOCICATRIZAÇÃO EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS . | 24 |
| 2.1 | AUTOCICATRIZAÇÃO AUTÔNOMA E AUTÓGENA | 25 |
| 2.2 | FATORES INTERVENIENTES NA AUTOCICATRIZAÇÃO AUTÓGENA..... | 31 |
| 2.2.1 | Influência do tipo de cimento..... | 32 |
| 2.2.2 | Influência da relação água/aglomerante..... | 34 |
| 2.2.3 | Influência das configurações das fissuras | 35 |
| 2.2.3.1 | Idade da abertura de fissuras | 35 |
| 2.2.3.2 | Espessura das fissuras | 36 |
| 2.2.4 | Influência do ambiente de exposição..... | 39 |
| 2.2.5 | Adições..... | 41 |
| 2.2.5.1 | Aditivos cristalizantes..... | 41 |
| 2.2.5.2 | Sílica ativa..... | 45 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS..... | 46 |
| 3.1 | VARIÁVEIS SELECIONADAS..... | 46 |
| 3.1.1 | Variáveis independentes..... | 46 |
| 3.1.2 | Variáveis de resposta | 47 |
| 3.1.3 | Variáveis fixas | 48 |
| 3.1.4 | Variáveis não controladas | 48 |
| 3.2 | MATERIAIS EMPREGADOS | 49 |
| 3.2.1 | Cimento..... | 49 |
| 3.2.1.1 | Massa específica | 49 |
| 3.2.1.2 | Granulometria..... | 50 |
| 3.2.1.3 | Área superficial | 50 |
| 3.2.1.4 | Composição química..... | 51 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.2.1.5 | Caracterização mineralógica | 51 |
| 3.2.1.6 | Perda ao fogo..... | 52 |
| 3.2.1.7 | Resistência à compressão..... | 52 |
| 3.2.2 | Agregado miúdo | 53 |
| 3.2.3 | Agregado graúdo | 54 |
| 3.2.4 | Aditivo redutor de água..... | 56 |
| 3.2.5 | Aditivos cristalizantes..... | 56 |
| 3.2.5.1 | Granulometria..... | 56 |
| 3.2.5.2 | Composição química..... | 57 |
| 3.2.5.3 | Caracterização mineralógica | 58 |
| 3.2.6 | Sílica ativa..... | 60 |
| 3.2.7 | Água..... | 61 |
| 3.3 | PRODUÇÃO DOS CONCRETOS..... | 62 |
| 3.3.1 | Dosagem dos concretos..... | 62 |
| 3.3.2 | Mistura dos materiais..... | 64 |
| 3.3.3 | Ensaio de consistência | 65 |
| 3.3.4 | Massa específica | 65 |
| 3.3.5 | Moldagem dos corpos de prova..... | 65 |
| 3.3.6 | Cura..... | 66 |
| 3.3.7 | Preparação dos corpos de prova para o ensaio de difusão | 66 |
| 3.3.8 | Abertura de fissuras | 67 |
| 3.3.9 | Ciclo de molhagem e secagem | 69 |
| 3.4 | ENSAIOS | 71 |
| 3.4.1 | Caracterização dos concretos | 71 |
| 3.4.1.1 | Resistência à compressão..... | 71 |
| 3.4.1.2 | Absorção de água por capilaridade..... | 71 |
| 3.4.2 | Ensaio para a avaliação da autocicatrização | 72 |
| 3.4.2.1 | Microscopia ótica | 72 |
| 3.4.2.2 | Difusão de cloretos | 74 |
| 3.4.3 | Cálculo do coeficiente de difusão e estimativa da vida útil dos concretos | 80 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 82 |
| 4.1 | Resistência à compressão axial..... | 82 |
| 4.2 | Absorção de água por capilaridade | 87 |
| 4.3 | Visualização e determinação da autocicatrização por microscopia ótica | 90 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.4 | Difusão de cloretos..... | 105 |
| 4.4.1 | Difusão de cloretos nos corpos de prova sem fissura | 105 |
| 4.4.2 | Difusão de cloretos nos corpos de prova com fissura..... | 109 |
| 4.4.3 | Coeficientes de difusão dos concretos | 116 |
| 4.4.4 | Estimativa de vida útil..... | 120 |
| 5 | CONCLUSÕES..... | 124 |
| 6 | SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS..... | 126 |
| | REFERÊNCIAS..... | 127 |
| | APÊNDICE A – Resultados da resistência à compressão axial | 136 |
| | APÊNDICE B – Resultados da absorção de água por capilaridade | 139 |
| | APÊNDICE C – Resultados da microscopia ótica | 143 |
| | APÊNDICE D – Resultados da difusão de cloretos | 155 |
| | ANEXO A – Granulometria do cimento | 171 |
| | ANEXO B – Granulometria dos aditivos cristalizantes | 174 |
| | ANEXO C – Granulometria da sílica ativa..... | 181 |
| | ANEXO D – FRX dos aditivos cristalizantes | 184 |
| | ANEXO E – FRX da sílica ativa..... | 186 |

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um material propenso ao surgimento de manifestações patológicas e a falta de tratamento destes problemas leva à deterioração de uma estrutura. De acordo com Neville (2016), o surgimento de fissuras no concreto caracteriza-se como um efeito físico que influencia diretamente a durabilidade de estruturas em concreto armado, pois serve como caminho preferencial para a entrada de agentes agressivos. Conforme Ribeiro (2014), as alterações físicas e químicas do concreto podem comprometer a estabilidade e funcionalidade das estruturas quando expostas ao ambiente.

A combinação entre um ambiente agressivo contendo cloretos, juntamente com a presença de fissuras no concreto, resulta em um acentuado decréscimo do desempenho da estrutura ao longo do tempo. Devido à necessidade de estruturas de concreto mais resistentes a tais cenários degradantes, estudos e pesquisas referentes à autocicatrização autógena em materiais cimentícios vem ganhando maior destaque internacional (ROOIJ, 2013; VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013; HUANG et al., 2016; MAES et al., 2016; LI et al., 2018; entre outros).

A autocicatrização autógena, ou *self-healing*, caracteriza-se como um processo natural, intrínseco às propriedades e à composição dos materiais cimentícios (ROIG-FLORES et al., 2016). Esse fenômeno ocorre devido a hidratação contínua das partículas de cimento anidro da matriz cimentícia, principalmente nas primeiras idades, e em idades posteriores a carbonatação do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) junto à superfície do concreto se torna um dos principais agentes autocicatrizantes (VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013).

Essa capacidade de auto reparo dos materiais cimentícios pode ser estimulada com a utilização de aditivos cristalizantes, que são inseridos na matriz cimentícia ainda no estado fresco (FERRARA et al., 2014; JIANG et al., 2015). Estes materiais, ao entrarem em contato com a água, reagem e formam depósitos cristalinos de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) modificado e precipitados bloqueadores de poros, que se desenvolvem por toda a matriz cimentícia, tornando-se parte permanente da massa de concreto. À medida que ocorre a formação de fissuras com o passar do tempo, os aditivos cristalizantes continuam reagindo e sendo ativados em presença de água (ACI 212.3R-10, 2010).

De acordo com Oliveira (2019), o maior número de publicações referentes à autocicatrização é verificado na Itália e China, sendo que na Itália concentram-se o maior número de pesquisas relacionadas à autocicatrização com a utilização de aditivos cristalizantes e adições minerais.

Avaliar a eficácia da autocicatrização em materiais cimentícios é uma tarefa experimental bem abrangente e que deve encobrir múltiplas variáveis, desde de espessura de fissuras, condições de cura, materiais utilizados e técnicas laboratoriais eficazes, visto que não há uma normativa que regulamente metodologias de análise para tal assunto (FERRARA, 2018). De acordo com Park e Choi (2019), as metodologias mais comumente utilizadas para avaliação da autocicatrização em materiais cimentícios são os ensaios de permeabilidade à água e a avaliação visual do fechamento de fissuras.

Assim, com o objetivo de contribuir com o conhecimento acerca do fenômeno de autocicatrização, esse trabalho irá dissertar a respeito da autocicatrização autógena de fissuras em concretos contendo aditivos cristalizantes e sílica ativa, frente ao ensaio de difusão de cloretos.

Esse trabalho faz parte de um projeto de pesquisa desenvolvido pelo Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (NORIE) dentro do Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído (LAMTAC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), que tem como finalidade estudar a autocicatrização de fissuras em materiais cimentícios, sendo coordenado pelas professoras Angela Borges Masuero e Denise Carpena Coitinho Dal Molin, juntamente com o professores Daniel Tregnago Pagnussat e Lais Zucchetti.

O objetivo deste grupo de pesquisa, denominado Grupo Autocicatrização LAMTAC/NORIE/UFRGS, é de contribuir para o maior entendimento do tema e auxiliar no desenvolvimento tecnológico e científico do fenômeno de autocicatrização em materiais cimentícios com foco no aumento de durabilidade das estruturas de concreto.

Neste grupo estão sendo desenvolvidos estudos referentes a autocicatrização autógena sob diferentes aspectos. A doutoranda Natália dos Santos Petry tem seu trabalho em desenvolvimento com o objetivo de avaliar diferentes ambientes de exposição para autocicatrização autógena em concretos. O doutorando Deividi Maurente avalia a autocicatrização em materiais cimentícios através da utilização de bactérias como agentes autocicatrizantes. A mestranda Camila Frank Hollmann está avaliando a eficiência da autocicatrização de fissuras em concreto contendo aditivos cristalizantes, frente ao ensaio

acelerado de cloretos. Além destes, alguns trabalhos de iniciação científica e conclusão de curso estão sendo desenvolvidos.

1.1 JUSTIFICATIVA

O concreto é um material mundialmente difundido e utilizado nas mais diversas técnicas construtivas. Tem finalidade de suportar, dentre outros, predominantemente os esforços de compressão atuantes nas estruturas de concreto armado, e de proteger a armadura frente ao ataque de agentes agressivos do ambiente. Mesmo sendo utilizado a muitos anos e ter passado por diversos estudos, esse material cimentício caracteriza-se como sendo altamente suscetível ao surgimento de manifestações patológicas por diferentes origens, que podem comprometer consideravelmente a durabilidade de uma estrutura (KHALIQ e EHSAN, 2016; RAVITHEJA et al., 2019).

Dentre essas manifestações patológicas, as fissuras são encontradas com maior incidência (FERRARA et al., 2016). Esse fato se deve à baixa capacidade do concreto de resistir às solicitações de tração, oriundas principalmente pelos efeitos de variação volumétrica, devido a gradientes de temperatura e umidade, exposição a ciclos de gelo-degelo, fogo e sobrecargas impostas na estrutura (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Além desse comportamento físico dos materiais, as estruturas de concreto armado, dependendo do local que estão inseridas, podem estar sujeitas a distintas combinações do ambiente que afetam o seu desempenho ao longo do tempo.

As atmosferas marinhas, caracterizadas como ambientes agressivos, possuem cloretos como os principais agentes deletérios das estruturas de concreto armado. Devido às mudanças das marés, estes íons ingressam mais rapidamente no concreto e deslocam-se através dos poros capilares, até atingir a armadura e em conjunto com o oxigênio, provocando a corrosão (GJØRV, 2015). Dependendo da qualidade do concreto essa penetração de agentes agressivos pode ser bastante lenta (VAN BELLEGHEM et al., 2018).

A presença de fissuras nesses casos é um fator preponderante no ingresso desses agentes agressivos, pois favorecem e aceleram essa movimentação para o interior da estrutura (SAHMARAN et al., 2013). Assim, a presença de fissuras no concreto, aliada a um ambiente de elevada agressividade, comprometem a durabilidade do concreto armado e conseqüentemente sua vida útil. Belleghem et al. (2017) demonstraram que a vida útil esperada

do concreto não fissurado em um ambiente marinho pode chegar a 97 anos. No entanto, muitas estruturas de concreto armado não atingem essa vida útil sem grandes reparos.

As estruturas de concreto armado, quando expostas a tais condições, necessitam de vistorias a fim de se observar e monitorar a presença de fissuras e suas geometrias. Dependendo das condições e do local em que a estrutura está localizada, a realização das inspeções pode ser dificultada ou mesmo inviabilizada, além de que, tais vistorias e possíveis reparos demandam um alto investimento (LI e HERBERT, 2012; AZARSA et al., 2019; YUAN et al., 2019). De forma a prevenir a deterioração das estruturas pela combinação das fissuras e a ação de cloretos, mais pesquisas em tecnologia dos materiais são necessárias para que se possa assegurar o reparo de tal manifestação patológica logo após o seu aparecimento.

Nesse sentido, a autocicatrização de materiais cimentícios vem sendo foco de diversas pesquisas (HUANG et al., 2014; ROIG-FLORES et al., 2015; NEVŘIVOVÁ et al., 2018). Tal fenômeno, denominado de autocicatrização autógena, ou *self-healing*, ocorre a partir da hidratação contínua da matriz cimentícia, tendo a água como seu mecanismo de ativação (VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013). As autoras ressaltam que a autocicatrização autógena pode ser melhorada com a utilização de materiais como os aditivos cristalizantes, que são inseridos no concreto no momento de sua produção.

De acordo com Guzlena e Sakale (2019), os aditivos cristalizantes apresentam vantagens em comparação à outros materiais autocicatrizantes, como por exemplo, não terem a necessidade de serem encapsulados antes da adição à mistura de concreto. Breugel (2012) salienta que, embora os custos de um concreto com materiais cicatrizantes sejam maiores inicialmente, ao longo do tempo a ausência de reparos em estruturas com estes materiais pode resultar em menores investimentos, quando comparados às estruturas de concretos tradicionais.

Para Oliveira (2019), são diversas as razões para escolha dos aditivos cristalizantes como estimuladores da autocicatrização, sendo elas a facilidade de compra destes produtos, bem como a simplicidade de implementação e inserção do produto na mistura cimentícia. Por outro lado, De Belie (2018) ressalta que, em função de se ter uma grande diversidade de aditivos cristalizantes no mercado, muitas pesquisas ainda deverão ser desenvolvidas a fim de se ter um consenso sobre o comportamento destes materiais.

Nesse sentido, Joa et al. (2015); Hassani et al. (2017) destacaram a falta de estudos e conclusões adequadas sobre os efeitos físicos e mecânicos da utilização dos aditivos cristalizantes em matrizes cimentícias, de modo a transmitir confiança na utilização destes materiais na prática.

Em relação à avaliação da autocicatrização em materiais cimentícios, diferentes abordagens e metodologias são utilizadas. Entre as principais, podem ser citados os ensaios para recuperação das propriedades mecânicas, a avaliação da permeabilidade das matrizes cimentícias e a análise visual do fechamento de fissuras por meio de imagens de microscópico (MUHAMMAD et al., 2016).

No entanto, pouquíssimos trabalhos utilizam ensaios de durabilidade, principalmente o ensaio não acelerado de difusão de cloretos, devido à maior demanda de tempo para sua realização, em função de simular situações reais de exposição do concreto ao ingresso dos agentes deletérios. Oliveira (2019) relata em seu trabalho que o desempenho dos aditivos cristalizantes reportados na literatura, com foco na redução da porosidade e aumento da permeabilidade ainda não são completamente conclusivos, e que a realização de ensaios de longa duração poderiam indicar melhores resultados quanto ao desempenho destes materiais.

Além destes aditivos cristalizantes, a utilização de adições minerais, como a sílica ativa, podem corroborar com a autocicatrização de fissuras principalmente em idades mais avançadas, ao promoverem as reações pozolânicas e formação de C-S-H secundário junto à matriz cimentícia (FERRARA et al., 2014). AYUB et al. (2013) menciona que a utilização de adições minerais proporciona maior durabilidade às matrizes cimentícias em decorrência da sua redução da permeabilidade, promovendo um aumento na resistência aos agentes externos deteriorantes, como os cloretos.

Assim, a relevância dessa pesquisa está em avaliar o comportamento dos aditivos cristalizantes e da sílica ativa no concreto, e a capacidade de tais materiais em promover a autocicatrização interna e superficial de fissuras, mensurada por meio do ensaio de difusão de cloretos. Além disso, o presente estudo irá possibilitar uma previsão da vida útil de estruturas de concreto contendo estes materiais, em comparação com estruturas de concreto tradicionais.

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo principal e os objetivos específicos serão descritos nos itens a seguir.

1.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste estudo é analisar a capacidade de autocicatrização de fissuras em concretos com diferentes aditivos cristalizantes.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- a) analisar o comportamento da autocicatrização de fissuras em concretos com aditivos cristalizantes e com sílica ativa frente à difusão de cloretos;
- b) verificar a viabilidade de utilização do ensaio de difusão de cloretos para detectar a autocicatrização interna das fissuras nas amostras de concreto;
- c) verificar a viabilidade de utilização do ensaio de microscopia ótica para avaliar a autocicatrização superficial das fissuras nas amostras de concreto;
- d) prever a vida útil dos concretos com aditivos cristalizantes através dos resultados obtidos no ensaio de difusão de cloreto;
- e) verificar o desempenho da sílica ativa em relação aos produtos comerciais de autocicatrização, do ponto de vista da passagem de cloretos por difusão.

1.3 LIMITAÇÕES

Algumas limitações dessa pesquisa são salientadas:

- a) ambiente não climatizado para concretagem;
- b) câmara dos ciclos de molhagem e secagem sem controle de temperatura e umidade;
- c) variações nas espessuras das fissuras até 0,4 mm.

1.4 DELIMITAÇÕES

Alguns critérios foram delimitados para conduzir o trabalho:

- a) utilização do cimento Portland do tipo CP II F-40;
- b) utilização de apenas uma relação água/cimento fixada em 0,40;

- c) emprego de uma idade para abertura das fissuras: 3 dias;
- d) condições ideais de cura, conforme NBR 5738 (ABNT, 2015), para os corpos de prova destinados aos ensaios de resistência à compressão axial e absorção de água por capilaridade;
- e) único ambiente para os ciclos de molhagem e secagem;
- f) caracterização do concreto pelo ensaio de resistência à compressão axial e absorção de água por capilaridade;

1.5 ESTRUTURA DA PESQUISA

A pesquisa foi inicialmente estruturada em cinco capítulos que serão descritos a seguir.

O primeiro capítulo abrange a introdução, a justificativa e os objetivos geral e específicos, bem como as limitações e delimitações abordadas para o desenvolvimento da pesquisa.

No segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o fenômeno da autocicatrização autógena e dos seus fatores intervenientes.

O terceiro capítulo aborda o programa experimental empregado nessa pesquisa, constando o planejamento, a descrição dos materiais utilizados, os ensaios e metodologias estipuladas para a aquisição dos resultados.

No quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos para cada metodologia empregada, juntamente com as análises, discussões e as justificativas.

No quinto capítulo são apresentadas as considerações finais e conclusões da pesquisa referentes aos resultados obtidos.

2 MECANISMO DA AUTOCICATRIZAÇÃO EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS

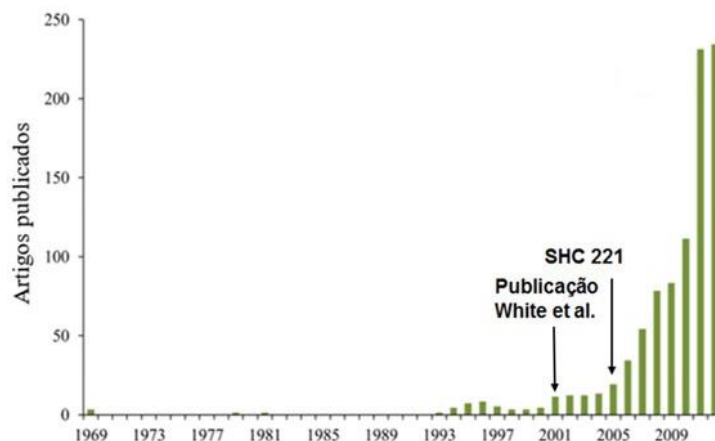
O aparecimento de fissuras no concreto armado muitas vezes não se caracteriza como sinal de alerta de modo a inviabilizar imediatamente uma estrutura. Dependendo da forma e das condições em que se manifesta, a presença de fissuras no concreto armado não é considerada uma falha de tão alto grau e instantâneo prejuízo, desde que a espessura de tais fissuras não ultrapasse o limite máximo permitido pelas normatizações (HUANG et al., 2016). No entanto, a exposição de concretos fissurados ao longo de sua utilização facilita e acelera a penetração de substâncias e agentes agressivos, como os cloretos, oxigênio e água, expondo a estrutura de forma mais acentuada aos riscos de corrosão da armadura (GJØRV, 2015).

Nesse sentido, com a finalidade de tratar tais manifestações patológicas após seu aparecimento, o desenvolvimento ou aprimoramento de tecnologias para a aplicação da autocicatrização em materiais cimentícios vem ganhando maior destaque.

De acordo com De Rooij et al. (2013), as primeiras publicações referentes a autocicatrização remontam do início do século XX, sendo intensificadas a partir do ano de 1920, e tinham como foco principal o conhecimento e a identificação dos parâmetros envolvidos ao fenômeno. No entanto, tal assunto foi reconhecido pela primeira vez no ano de 1836, pela *French Academy of Science*.

Segundo Van Tittelboom; De Belie (2013), somente pelo estudo iniciado em 1994 e finalizado por Dry (1996), nos EUA, que materiais com propriedades de autocicatrização foram inseridos no concreto com objetivo de avaliar seu comportamento. No entanto, somente a partir de 2001, após a publicação de White et al. (2001) na revista *Nature*, que o assunto da autocicatrização começou a ganhar destaque no mundo acadêmico (Figura 1).

Figura 1 - Evolução das pesquisas em relação aos materiais autocicatrizantes



Fonte: VAN TITTELBOOM e DE BELIE (2013).

Em 2005 foi criado o Comitê Técnico SHC 221 – SHC: *Self-Healing Phenomena in Cement-Based Material*, da RILEM, com a finalidade de estudar a autocicatrização em materiais cimentícios. O SHC 221 finalizou suas atividades no ano de 2012, contribuindo consideravelmente na publicação de trabalhos relacionados ao assunto desde a sua criação, favorecendo em 2013 na publicação de um volume denominado como *Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials* (DE ROOIJ et al., 2013).

Atualmente seu sucessor é o Comitê Técnico SHE: *Self-healing concrete – Its efficiency and evaluation*, que tem o objetivo de criar um relatório com recomendações de metodologias de ensaio para a avaliação da autocicatrização no concreto, tanto da perspectiva de selamento de fissuras, quanto da recuperação das propriedades mecânicas de uma estrutura (XING et al. 2016).

Em 2016 foi implantada a COST Action “*Self-healing as prevention repair of concrete structures*” (SARCOS) CA 15202, que tem o foco de contribuir com o desenvolvimento sustentável e o aumento da vida útil das estruturas de concreto, através da criação de novos materiais com capacidades autocicatrizantes (COST ACTION CA 15202 SARCOS, 2016).

2.1 AUTOCICATRIZAÇÃO AUTÔNOMA E AUTÓGENA

A definição da autocicatrização em materiais cimentícios pode ser dividida em dois grupos, a autocicatrização autônoma e a autógena. A autocicatrização autógena é o processo de recuperação onde os componentes responsáveis por tal fenômeno não são especificamente projetados para este fim, como por exemplo, o cimento. A autocicatrização autônoma por sua

vez utiliza componentes que são produzidos com finalidade autocicatrizante (ROOIJ et al., 2013). A Figura 2 representa os tipos de mecanismos responsáveis pela autocicatrização das matrizes cimentícias.

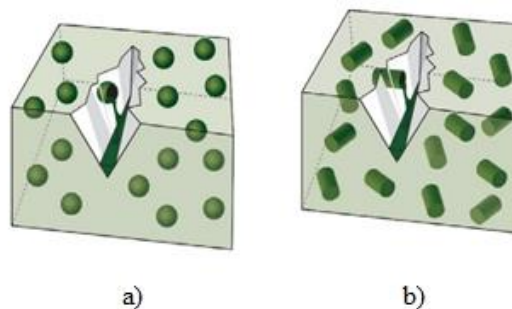
Figura 2 - Tipos de autocicatrização em materiais cimentícios



Fonte: Grupo autocicatrização LAMTAC/NORIE/UFRGS.

Conforme pode ser observado, a autocicatrização autônoma é formada por materiais que são artificialmente produzidos e inseridos na matriz cimentícia no momento de sua produção, por meio da utilização de microcápsulas com bactérias ou polímeros, e fibras com agentes adesivos (MAES et al., 2014; KANELLOPOULOS et al., 2015; ZHANG et al., 2017; TAYEBANI; VAN BELLEGHEM et al., 2018; MOSTOFINEJAD, 2019; GUZLENA e SAKALE, 2019). A Figura 3 ilustra esses agentes autocicatrizantes. O fenômeno da autocicatrização autônoma ocorre a partir do aparecimento de fissuras e consequente rompimento das cápsulas que contém os agentes cicatrizantes, que ao serem liberados reagem com a água, ar ou calor (TANG et al., 2015).

Figura 3 - Agentes da autocicatrização autônoma (a) cápsulas esféricas (b) cápsulas cilíndricas



Fonte: adaptado de TANG et al. (2015).

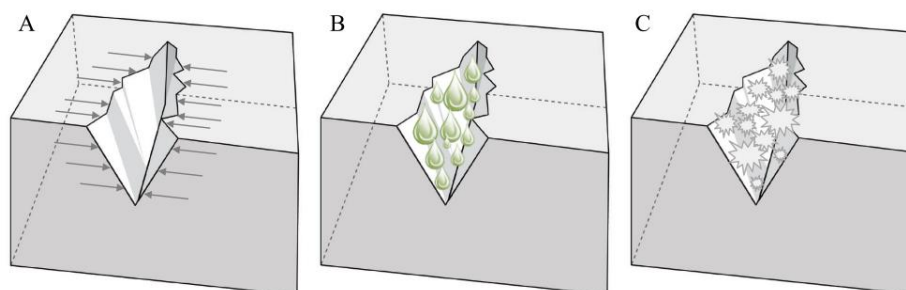
A autocicatrização autógena por sua vez é desenvolvida através da utilização de diferentes cimentos (CAPPELLESSO, 2018; YUAN et al., 2019), adições minerais (JAROENRATANAPIROM e SAHAMITMONGKOL, 2010; SAHMARAN et al., 2013; JIANG et al., 2015) e os aditivos cristalizantes (AZARSA et al., 2019; OLIVEIRA, 2019).

Os aditivos cristalizantes, também conhecidos como redutores de permeabilidade, atuam na densificação da matriz porosa dos materiais cimentícios, mas também estão sendo foco na utilização para o fechamento de fissuras (SISOMPHON et al., 2012; TAKAGI, 2013; ROIG-FLORES et al., 2015; HELENE et al., 2018; RAVITHEJA et al., 2019).

A autocicatrização autógena, ou *self-healing*, é definida como a recuperação do desempenho de um material após uma ação de redução desse desempenho (ROOIJ et al., 2013). Refere-se à hidratação contínua das partículas de cimento anidro, com a precipitação do carbonato de cálcio (CaCO_3) da matriz cimentícia e formação de cristais, sendo intensificado pela presença de água e restrição da abertura da fissura, conforme ilustra a Figura 4 (TAKAGI, 2013; TANG et al., 2015; MAES et al., 2016). Para Oliveira (2019), a autocicatrização autógena favorece o fechamento total ou parcial de fissuras, sendo este fenômeno relacionado à atuação dos próprios constituintes da mistura cimentícia juntamente com a presença de água, podendo ser verificada ou não a recuperação do desempenho mecânico da estrutura.

De acordo com Ter Heide e Schlangen (2007), o concreto nas idades iniciais tem a hidratação contínua dos grãos anidros como agente responsável na autocicatrização, enquanto que em idades mais avançadas tal fenômeno está relacionado com a formação do CaCO_3 junto à matriz.

Figura 4 - Abordagens da cura autógena (a) restrição da abertura da fissura (b) presença de água (c) cristalização

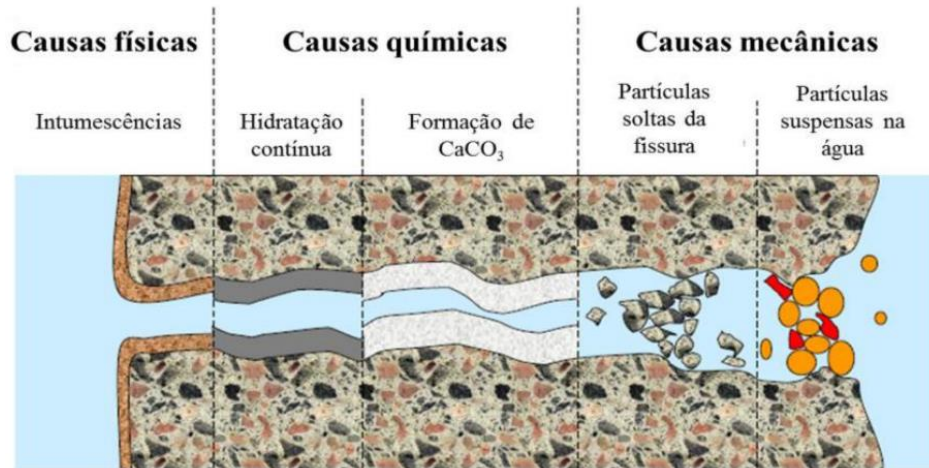


Fonte: VAN TITTELBOOM e DE BELIE (2013).

De Rooij et al., (2013), no volume 11 do RILEM SHC 221, organizaram o progresso natural da colmatação autógena de fissuras (Figura 5). De acordo com os autores, os processos físicos de

autocicatrização são relacionados ao aumento de volume da matriz cimentícia, em decorrência da absorção de água.

Figura 5 - Colmatação autógena de uma fissura por diferentes origens.



Fonte: DE ROOIJ et al. (2013).

A hidratação contínua por sua vez (causa química), ocorre devido à presença de grãos anidros nesta matriz, que reagem ao entrarem em contato com a água que entra pela fissura formada, resultando em novos produtos de hidratação ao longo da extensão da fissura (SISOMPHON et al., 2012). Devido ao teor relativamente alto de partículas de cimento não hidratadas, a hidratação contínua é o principal mecanismo de autocicatrização no concreto jovem (VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013; FERRARA et al., 2016).

Após o aparecimento de fissuras, a hidratação tardia dos grãos de cimento anidro é vista como peça importante na recuperação das propriedades mecânicas da matriz cimentícia, visto que a resistência destes novos produtos de hidratação são maiores que ao CaCO_3 e semelhantes ao C-S-H original (DE BELIE et al., 2018). Huang et al. (2013) destacam que maiores cristais de hidratação são verificados junto à fissura em decorrência da maior disponibilidade de água e espaço para formação de tais compostos, quando comparados aos produtos internos da matriz.

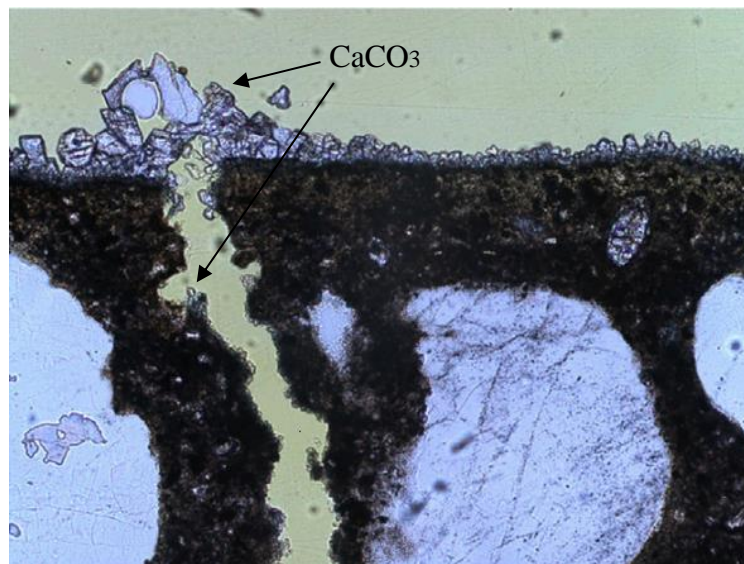
Posteriormente, em idades mais avançadas, a precipitação de CaCO_3 torna-se o principal mecanismo, resultante da união dos íons de cálcio (Ca^{2+}) dos poros com água do concreto, com os íons de carbonato (CO_3^{2-}) presentes na água (AZARSA et al., 2019).

De acordo com Sisomphon et al. (2012), o volume de produtos de hidratação decorrentes desse processo é capaz de fechar fissuras entre 0,05 e 0,15 mm de espessura. Os autores avaliaram

também em seu estudo que a concentração de CaCO_3 próximo a abertura da fissura é mais significativa do que as concentrações observadas em seu interior, devido a maior presença de dióxido de carbono junto à superfície (Figura 6).

Similarmente, no ensaio de Difração de Raios-X realizado no estudo de Wang et al. (2020), verificou-se que os cristais formados junto à superfície das fissuras em amostras de concreto consistiam principalmente de calcita (CaCO_3). Jiang et al. (2014) comprovaram, a partir de MEV/EDS e DRX, a precipitação predominante de cristais de CaCO_3 na superfície de fissuras em pastas cimentícias.

Figura 6 - Precipitação do carbonato de cálcio na superfície da fissura



Fonte: SISOMPHON et al. (2012).

Por fim, as causas mecânicas da autocicatrização são percebidas devido à presença de partículas em suspensão na solução, bem como partículas provenientes da formação da fissura, sendo tal fenômeno de pouca atuação quando sozinho no processo de autocicatrização (ROOIJ et al., 2013; VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013; LI et al., 2018).

Van Tittelboom e De Belie (2013), salientam em seu estudo que apesar das diferentes definições a respeito da autocicatrização autógena, existem ainda divergências entre os pesquisadores em relação ao real mecanismo que causa a cura autógena em materiais cimentícios. No entanto, tais pesquisadores, concordam que para a ocorrência de tal fenômeno se faz necessária a presença de água.

Neste estudo, também citado por Takagi (2013), as autoras ressaltam três mecanismos de ativação da autocicatrização: formação de fissuras, fornecimento de calor e ingresso de líquidos e gases junto a matriz cimentícia, onde a presença da água acaba fazendo parte na maioria dos casos (Figura 7).

Figura 7 - Mecanismos de ativação da autocicatrização de fissuras

| Mecanismo de gatilho | | Resultado |
|------------------------------|------------------------|--|
| Ingresso de líquidos e gases | água + CO ₂ | Cristalização por catalisador com precipitação de fases fibrosas de calcita |
| | água | Cicatrização autógena por hidratação contínua |
| | água + CO ₂ | Cicatrização autógena por precipitação de CaCO ₃ |
| | 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 ₂) ₂ através dos poros |
| | água + O ₂ | Ativação de esporos e precipitação bacteriana de CaCO ₃ |
| | água | Precipitação bacteriana de CaCO ₃ |
| | CO ₂ | Degradação do revestimento envolto em partículas de argilas expandidas e liberação de Na ₂ PFO ₃ |
| Fornecimento de calor | 90°C + água | Fechamento de fissuras por fitas retráteis de polietileno de tereftalato (PET) seguido pela cicatrização autógena |
| | 100 ° C | Derretimento do revestimento de cera envolto em cápsulas 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 espiraladas e liberação de resinas epóxi |
| Formação de fissuras | + água | Fechamento de fissuras por as fibras superelásticas de ligas metálicas com memória de forma seguido 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 para dentro de camada de concreto poroso |

Fonte: TAKAGI (2013) adaptado de VAN TITTELBOOM e DE BELIE (2013).

As autoras destacam ainda algumas técnicas para a análise da autocicatrização em laboratório, sendo elas a recuperação da estanqueidade e das propriedades mecânicas, e as técnicas de visualização (Figura 8). Duas das técnicas de análise por recuperação de estanqueidade serão utilizadas na metodologia deste trabalho, sendo elas a absorção de água por capilaridade e difusão de cloretos, sendo as mesmas apresentadas com maior detalhe no capítulo três.

Figura 8 - Mecanismos de ativação da autocicatrização de fissuras

| Técnica de avaliação da autocicatrização | | Possibilidades |
|--|---|--|
| Visualização e determinação | Microscópio ótico + análise de imagens | Visualização da deposição de cristais e determinação da taxa de cicatrização |
| | Microscópio eletrônico 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 das fissuras |
| | Radiografia de raios-X | Visualização da liberação do agente encapsulado na 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 de produtos precipitados |
| Recuperação da estanqueidade | Permeabilidade à água baixa pressão | Vazão da água através da fissura (cicatrizada) |
| | Permeabilidade à água alta pressão | Vazão da água através da fissura (cicatrizada) |
| | Permeabilidade do ar | Vazão do 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 |
| Recuperação de propriedades mecânicas | 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 a reabertura de fissuras antigas |
| | Laje de carga de impacto | |
| | Análise de emissão acústica | Recuperação da energia / observar o rompimento da cápsula |
| Análise da frequência de ressonância | Recuperação da consistência | |

Fonte: TAKAGI (2013) adaptado de VAN TITTELBOOM e DE BELIE (2013).

2.2 FATORES INTERVENIENTES NA AUTOCICATRIZAÇÃO AUTÓGENA

As propriedades do concreto caracterizam o cenário no qual a autocicatrização autógena se desenvolverá, tendo vários fatores que influenciam diretamente tal fenômeno. Esses parâmetros variam desde as características do cimento a ser utilizado, a relação água/aglomerante adotada, bem como as condições ambientais de exposição do concreto, até a idade e a espessura das

fissuras. A seguir esses fatores serão descritos para melhor compreensão do estudo desenvolvido.

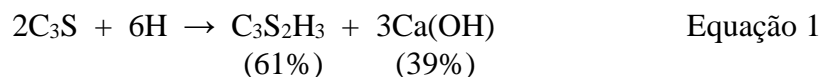
2.2.1 Influência do tipo de cimento

As características de um cimento intervêm de forma acentuada nas propriedades de hidratação de uma matriz cimentícia, sendo seus principais constituintes o silicato tricálcio (C₃S) e dicálcio (C₂S), aluminato tricálcio (C₃A) e ferroaluminato tetracálcio (C₄AF), que participam ativamente junto à capacidade de autocicatrização desta matriz.

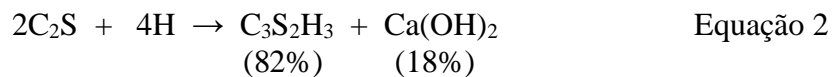
Os silicatos C₃S e C₂S são os maiores responsáveis em proporcionar resistência à pasta de cimento hidratada, podendo tais hidratações serem estimuladas devido a presença do C₄AF. Por sua vez o C₃A possui maior reatividade, ou seja, pega instantânea, sendo tal efeito retardado com a inserção de sulfato de cálcio ao clínquer, além de tal componente contribuir na combinação entre o óxido de cálcio e a sílica (NEVILLE, 2016).

O produto resultante da hidratação do C₃S e C₂S com a água (H) é o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) que libera o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) na forma cristalina. Conforme pode ser observado nas Equações 1 e 2, o C₃S produz 61% de C₃S₂H₃ e 39% de Ca(OH)₂ em sua hidratação, enquanto que o C₂S produz 82% de C₃S₂H₃ e 18% de Ca(OH)₂ (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

C₃S



C₂S



A produção de Ca(OH)₂ é um fator de importante participação na autocicatrização autógena, pois a sua carbonatação tanto no interior da matriz cimentícia ou quando lixiviado até a fissura, resulta no CaCO₃, um dos principais agentes atuantes no selamento de fissuras (TER HEIDE e SCHLANGEN, 2007; SISOMPHON et al., 2012; AZARSA et al., 2019). Não menos importante é a formação do C-S-H, devido a hidratação contínua do C₃S e C₂S ou pela hidratação tardia dos grãos anidros de cimento (NEVILLE, 2016).

De acordo com o mesmo autor, a produção de C-S-H ou Ca(OH)_2 difere entre os cimentos puros ou compostos. Para os cimentos com adição de material pozolânico (CPIV e CPIIZ), a quantidade de C-S-H gerada é maior em comparação com os cimentos puros. Neste caso ocorre a reação pozolânica tardia entre a adição e o Ca(OH)_2 liberado pela hidratação dos silicatos, podendo tais quantidades de C-S-H contribuir com a autocicatrização autógena.

No entanto, nas reações de hidratação destes tipos de cimento ou mesmo concretos com adições minerais, verifica-se conseqüentemente menor formação de Ca(OH)_2 devido ao seu consumo nas reações pozolânicas, e assim pouca contribuição de carbonatação de tal composto na autocicatrização autógena. Porém, a utilização dos cimentos com adições resulta na formação de uma matriz cimentícia com maior durabilidade, devido à sua menor porosidade ou possível reparo de fissuras presentes, proporcionado maior resistência à penetração de agentes agressivos na matriz (GJØRV, 2015).

Além das adições minerais, a característica do grão do cimento tende a influenciar no desenvolvimento de suas reações de hidratação. Nestes casos, quanto maior for a área superficial da partícula cimento, ou seja, quanto mais fino for o material, mais rápido ocorrerão as reações de hidratação e o crescimento da resistência (DESHPANDE et al., 2007; SHABAB et al., 2013).

Nesse sentido, pode ser citado o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV), que em função de possuir extrema finura e pureza, apresenta as reações de hidratação da matriz intensificadas nos primeiros 7 dias (MEHTA e MONTEIRO, 2014). A autocicatrização autógena com a utilização deste cimento é verificada principalmente devido a uma maior geração de Ca(OH)_2 na reação de hidratação dos silicatos, que ao carbonatar forma o CaCO_3 junto a superfície do concreto, proporcionado o selamento de fissuras existentes.

Por sua vez, o cimento Portland composto por fíler (CP II-F), que possui em sua composição uma porcentagem de material carbonático entre 11% e 25% (NBR 16697, 2018), proporciona principalmente influências físicas junto à matriz cimentícia, relacionadas à redução da permeabilidade e exsudação capilar, além de melhorias na trabalhabilidade e massa específica. Cappellesso (2018) menciona a carência de pesquisas que avaliam a influência dos tipos de cimento na capacidade de autocicatrização de misturas cimentícias, principalmente na literatura nacional.

2.2.2 Influência da relação água/aglomerante

A relação água/aglomerante é um fator que também intervém nas propriedades autocicatrizantes de uma matriz cimentícia. Para Neville (2016), a relação água/aglomerante mínima para hidratação de uma matriz quando curada em água é de aproximadamente 0,36. No entanto, a relação água/aglomerante deve ser maior que 0,36 quando a cura da matriz cimentícia foi realizada sem contato com água externa.

As misturas cimentícias de alta resistência à compressão são caracterizadas por menores relações água/aglomerante, fazendo com que o aparecimento de fissuras se torne frágil, sem maiores deformações plásticas (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Nestes casos, ocorre a maior possibilidade de restarem grãos de cimento anidro junto a matriz cimentícia, em virtude da baixa disponibilidade de água para sua completa hidratação. Assim, tais materiais tendem a auxiliar na capacidade autocicatrizante da matriz quando obtiverem contato com a água, através hidratação tardia e da formação de fissuras (OLIVEIRA, 2019).

Para Venquiaruto (2017) a relação água/cimento é um fator condicionante na autocicatrização autógena, onde uma baixa disponibilidade de água promove maiores quantidades de aglomerante anidro na matriz. Por sua vez, em idades mais avançadas e adequada disponibilidade de água, a hidratação contínua da matriz cimentícia resulta em menores quantidades de cimento anidro que poderiam colaborar com a autocicatrização de fissuras (LI et al., 2018).

Além disso, a menor permeabilidade do concreto tem um impacto importante em sua durabilidade, uma vez que a mesma reduz a taxa de penetração da umidade que pode conter solutos agressivos (AKHAVAN et al., 2012). De acordo com Cuenca et al. (2018), para a maioria dos concretos cerca de 20% a 30% das partículas de cimento permanecem anidras na matriz cimentícia. De forma similar, Guzlena e Sakale (2019) reforçam que para concretos com relações água/cimento menores que 0,3, até 20% a 30% das partículas de cimento podem não ser hidratadas.

Já nos casos de matrizes cimentícias com maiores relações água/cimento, a hidratação contínua e tardia é prejudicada devido a maior disponibilidade de água na mistura, que por sua vez tende a favorecer a hidratação de todo ou da maior parte do aglomerante anidro. Van Tittelboom et al. (2012), demonstraram em seu estudo que o aumento da relação água/aglomerante de 0,4 para 0,5 reduziu a capacidade de autocicatrização autógena em consequência da hidratação tardia.

No entanto, nestes casos, a autocicatrização é favorecida em decorrência da matriz cimentícia ser mais porosa e assim promover com maior facilidade a lixiviação de Ca(OH)_2 (NEVILLE, 2016). Além disso, Elsalamawy et al. (2020) ressaltam que a potencialidade dos aditivos cristalizantes em reduzir a permeabilidade do concreto está diretamente ligada a porosidade disponível da matriz cimentícia, de modo que essa maior porosidade facilita a formação e o crescimento de cristais de C-S-H junto à matriz.

2.2.3 Influência das configurações das fissuras

2.2.3.1 Idade da abertura de fissuras

A presença de fissuras no concreto caracteriza-se como uma das principais causas físicas de deterioração, sendo resultado de fatores como variação volumétrica devido a mudanças de temperatura e umidade, bem como das condições de carregamento e utilização da estrutura ao longo da sua vida útil, que podem contribuir com o agravamento das causas químicas (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A colmatação autógena dessas fissuras no concreto é um fenômeno associado as propriedades físicas e químicas da matriz cimentícia, sendo diretamente influenciado pelo surgimento da fissura em idades iniciais e a presença de cimento não hidratado na matriz cimentícia (TANG et al., 2015).

A hidratação contínua dos grãos anidros caracteriza-se como o principal mecanismo de autocicatrização avaliado em concretos jovens, enquanto que em idades mais avançadas se verifica a menor possibilidade de ocorrer essa hidratação, em decorrência do estágio avançado das reações de hidratação da matriz cimentícia (RAMM e BISCOPING, 1998; FERRARA, 2014). Segundo De Belie et al. (2018), em idades mais avançadas, além de ocorrerem as reações de hidratação tardias, é verificado também a precipitação do CaCO_3 .

Huang et al. (2013) corroboram com tais informações, ao atestarem maiores quantidades de produtos de hidratação junto à fissura em pastas de cimento jovens, em comparação com às quantidades verificadas em pastas com maiores idades. De acordo com Ter Heide e Schlangen (2007), quanto maior foi a idade de fissuração da matriz, maior será o grau de hidratação da matriz cimentícia e conseqüentemente menor será o potencial de autocicatrização autógena verificado.

Roig-Flores et al. (2016) analisaram as propriedades autocicatrizantes em amostras de concreto contendo aditivos cristalizantes e fissuradas aos 2 dias de idade. As fissuras continham espessuras entre 0,1 e 0,4 mm, sendo as amostras expostas a cura imersa em água e ciclos de secagem e molhagem de 3,5 dias cada. O estudo mostrou que mesmo as amostras sendo fissuradas precocemente, a taxa de autocicatrização foi comprovada até para as fissuras com 0,4mm de espessura após 42 dias de imersão em água.

O estudo realizado por Jaroenratanapirom e Sahamitmongkol (2010) apresentou melhor desempenho da autocicatrização em amostras de argamassa contendo aditivo cristalizante, em fissuras criadas aos 3 dias, com espessuras de até 0,5 mm. Para as fissuras com até 0,3 mm, a taxa de autocicatrização foi maior para as argamassas contendo sílica ativa, principalmente quando as amostras foram fissuradas aos 28 dias.

2.2.3.2 Espessura das fissuras

A ocorrência de fissuras no concreto caracteriza-se como uma das suas principais manifestações patológicas (FERRARA et al., 2016), onde a fragilidade do concreto em relação à entrada de agentes agressivos se reduz consideravelmente com o aumento da permeabilidade através dessas fissuras (AKHAVAN et al., 2012).

As formas de aparecimento de fissuras no concreto ocorrem tanto em seu estado fresco, quanto endurecido. No estado fresco o desenvolvimento da fissura se dá a partir de assentamento plástico, movimentação da estrutura de suporte e da dessecação superficial do concreto. Já no estado endurecido, as causas da fissuração são originadas pela variação dimensional ou sobrecarga na estrutura (BIANCHIN, 2018). Em situações onde o concreto possui maior resistência, a presença de fissuras com maiores espessuras ocorrem com maior tendência devido à sua rigidez, pelo fato do material absorver maior energia e não sofrer muita deformação (DARWIN et al., 2004).

O controle da abertura de uma fissura no concreto é um dos parâmetros para a eficiência da autocicatrização autógena. No entanto, Rooij et al. (2013) salientam que a influência dos diversos fatores relacionados a capacidade autocicatrizante de uma matriz cimentícia, aliados às distintas configurações possíveis de fissuras, dificultam a criação de um consenso sobre a largura máxima capaz de ser cicatrizada.

De Belie et al. (2018) mencionam que a capacidade autocicatrizante de uma matriz cimentícia, sem adições potencializadoras como pozolanas ou aditivos cristalizantes, pode promover o fechamento de fissuras inferiores a 0,3mm, na presença de água. Os fabricantes dos aditivos cristalizantes por sua vez salientam que o emprego de tais materiais reforça a capacidade da matriz cimentícia em selar fissuras de até 0,4mm.

De acordo com Schlangen e Ter Heide (2007), quanto menor for a espessura da fissura, maiores serão as chances de ocorrer a autocicatrização. Segundo Neville (2016), a espessura mínima de uma fissura visível ao olho nu é de aproximadamente 0,13 mm, sendo esse tipo de fissura colmatada pelo próprio concreto por ser muito estreita. Segundo o autor, nestes casos ocorre a lixiviação do hidróxido de cálcio da matriz cimentícia e de sua precipitação ao entrar em contato com o carbono da atmosfera.

Visando à durabilidade das estruturas de concreto em relação à sua fissuração, algumas exigências mínimas são apresentadas por normativas. A ACI 318 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2008) expõe um limite de abertura de fissuras entre 0,3 mm para áreas externas e 0,4 mm para áreas internas. A NBR 6118 (ABNT, 2014) por sua vez, apresenta limites para a abertura máxima característica da fissura, previstas já em fase de projeto, em relação à classe de agressividade do ambiente de exposição e o tipo de concreto (Figura 9).

Figura 9 - Requisitos de fissuração em relação às 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 freqüente |
| | 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 freqüente |
| 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 freqüente |
| | | ELS-D ¹⁾ | 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 ¹⁾ | Combinação freqüente |
| ¹⁾ A critério do projetista, o ELS-D pode ser substituído pelo ELS-DP com $a_p = 25$ 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. | | | |

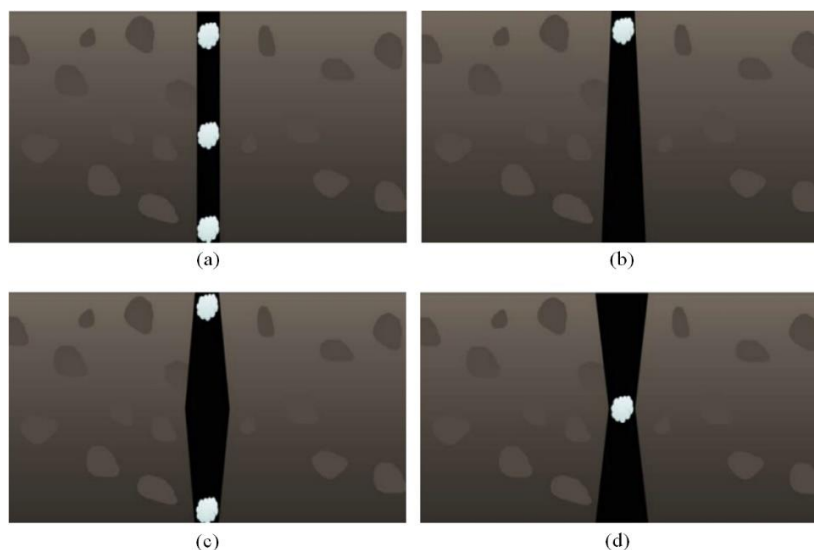
Fonte: ABNT NBR 6118 (2014).

Cuenca et al. (2018) avaliaram espessuras de fissuras classificadas em três grupos, as fissuras grandes ($>0,30\text{mm}$), médias ($0,30$ a $0,15\text{mm}$) e pequenas ($<0,15\text{mm}$), quanto à capacidade de autocicatrização autógena em concretos reforçados com fibras e contendo aditivos cristalizantes, sob repetidos ciclos de fissuração e três diferentes condições de cura. Nesse trabalho se comprovou que a autocicatrização autógena com aditivos cristalizantes em concreto é mais relevante em fissuras estreitas com até $0,15$ mm de espessura, sendo o efeito do cristalizante verificado após sucessivos ciclos de fissuração/autocicatrização em até um ano.

No estudo realizado por Van Tittelboom e De Belie (2013), as autoras afirmam que a espessura máxima da fissura que pode ser fechada através da autocicatrização autógena em materiais cimentícios difere para muitos autores, variando de $0,005$ mm a $0,3$ mm, expondo de qualquer forma que tal fenômeno apresenta maior eficácia em fissuras de menor espessura.

A espessuras das fissuras caracterizam-se como fator importante na eficiência das taxas de autocicatrização, sendo que na maioria dos estudos tais espessuras são avaliadas apenas na superfície das amostras. De acordo com Roig-Flores et al. (2015), a morfologia interna de uma fissura pode ser responsável pela maior eficiência da autocicatrização, ao iniciar tal fenômeno em zonas internas que apresentam menor espessura da fissura, mesmo nos casos onde são verificadas maiores espessuras na superfície das amostras. Na Figura 10, os autores apresentam algumas das possíveis morfologias internas de uma fissura no concreto e os pontos mais favoráveis para a autocicatrização.

Figura 10 - Diferentes morfologias internas de fissuras (a) fissura uniforme (b) fissura piramidal (c) fissura convexa (d) fissura côncava.



Fonte: ROIG-FLORES et al. (2015).

Van den Heede et al. (2014) compararam diferentes aberturas de fissuras (0,10mm, 0,20mm e 0,30mm) com a finalidade de verificar se a redução das espessuras reduziria o ingresso de cloretos no concreto. Os resultados mostraram que todas as espessuras de fissuras estudadas não foram eficazes contra a entrada de agentes agressivos no concreto, onde sugerem que para tal evento não ocorrer, as fissuras devem conter espessuras inferiores a 0,05mm.

Ainda em relação à autocicatrização autógena em ambientes com cloretos, Maes et al. (2016) investigaram tal fenômeno em amostras de argamassas com escória de alto forno contendo fissuras entre 0,1 e 0,3 mm de espessuras, quanto à resistência à penetração de cloretos. Neste trabalho, o selamento completo foi comprovado em fissuras de até 0,1mm. Além disso, os autores verificaram adicionalmente que fissuras com até 0,01 mm de espessura não se caracterizam como caminho preferencial para a passagem de cloretos pela matriz cimentícia.

2.2.4 Influência do ambiente de exposição

O ambiente de exposição no qual os concretos fissurados são condicionados exerce grande influência sobre a autocicatrização autógena, visto que tal fenômeno tem a água como gatilho para iniciar a reação físico-química de cristalização e fechamento de fissuras. Neville (2016) ressalta que a presença de água junto à região da fissura é essencial, em função de acelerar as reações de hidratação do cimento anidro, além de promover a lixiviação do hidróxido de cálcio do interior da fissura até a superfície, de modo a intensificar a formação do carbonato de cálcio.

Nesse sentido, Ferrara et al. (2014) avaliaram a cura de concretos expostos ao ar com umidade relativa (UR) entre 20% e 95%, a ciclos controlados com variações de temperatura e UR 95% e, também, concretos imersos em água, concluindo que as fissuras foram efetivamente reparadas na condição de imersão das amostras.

Da mesma forma, Cuenca et al. (2018) concluíram que a condição de imersão de amostras de concreto com aditivos cristalizantes possibilitou um maior selamento de fissuras com espessura de até 0,3mm, do que a condição de exposição ao ar. Os autores ainda concluíram que a condição de exposição que as amostras são submetidas caracteriza-se como principal fator para a ocorrência da autocicatrização.

Porém Ferrara et al. (2014) verificaram que a presença dos aditivos cristalizantes no concreto possibilitou uma boa performance de autocicatrização em fissuras com até 0,2mm, mesmo em

condições relatadas como menos favoráveis para a ocorrência do fenômeno, como a exposição ao ar ou em câmara úmida.

Roig-Flores et al. (2015) analisaram concretos com aditivos cristalizantes em quatro condições de exposição, sendo estas a imersão, o contato de umas das faces das amostras com água, câmara com UR de 95% e exposição ao ar com UR 40%. Os autores concluíram que as taxas de autocicatrização de fissuras foram maiores nas situações em que o concreto esteve submerso, e definiram uma ordem de fechamento de fissuras, relacionadas ao ambiente de exposição das amostras em: imersão em água > contato com água > cura úmida > exposição ao ar. Os autores enfatizaram ainda a necessidade do fornecimento de água para a ocorrência da autocicatrização, e que a condição de imersão em água vem sendo relatada como a melhor exposição aos concretos com finalidades autocicatrizantes, ao passo que a pior situação é atribuída à exposição ao ar.

Tendo o objetivo de intensificar o processo da autocicatrização de fissuras, muitos trabalhos tem aplicado ciclos de molhagem/secagem às amostras cimentícias, tendo os resultados demonstrado a melhor efetividade de tal condição de exposição, conforme apresentado a seguir.

Sisomphon et al. (2013), ao examinarem a recuperação de propriedades mecânicas de amostras de concreto contendo aditivos cristalizantes quando submetidos a diferentes ambientes de exposição, concluíram que ciclos com 12 horas de molhagem e 12 horas de secagem se mostrou mais favorável à situação avaliada, e estabeleceram uma ordem decrescente das condições de exposição mais eficazes em: ciclos molhagem/secagem > imersão em água com troca regular > imersão em água sem troca regular > exposição ao ar.

Reddy e Ravitheja (2019) avaliaram a capacidade de autocicatrização de fissuras em concretos contendo aditivos cristalizantes, em porcentagem de 1,1% sobre a massa de cimento. As amostras eram fissuradas aos 3 e 28 dias, com espessuras de fissuras entre 0,2 mm e 0,4 mm, expostas às condições de imersão, ciclos de molhagem e secagem, amostra com uma superfície em contato com água e exposição ao ambiente natural. Por meio da microscopia ótica, os autores observaram o selamento superficial completo das fissuras em amostras imersas e submetidas aos ciclos de molhagem e secagem.

Guzlena e Sakale (2019) também salientam em seu estudo de revisão que a autocicatrização com aditivos cristalizantes apresenta melhores resultados quando as amostras ficam imersas em água ou quando são sujeitas a ciclos sucessivos de secagem e molhagem.

Maes et al. (2016) investigaram argamassas de cimento Portland em condição submersa e sob ciclos de molhagem/secagem, com duração de 12 horas cada. Neste estudo, a cura em ciclos de molhagem e secagem apresentou selamento completo das fissuras menores que 0,15 mm após 7 ciclos, sendo que a cura submersa por sua vez não apresentou resultados promissores.

Da mesma forma, Ma et al. (2014) concluíram que os ciclos de molhagem e secagem proporcionaram melhores resultados em relação à capacidade de autocicatrização de fissuras, quando comparado à imersão em água, atribuído tal desempenho principalmente à formação de CaCO_3 no período de secagem.

Nesse sentido, o mecanismo da autocicatrização em materiais cimentícios pode ser verificado tanto nos ciclos de molhagem quanto nos períodos de secagem. No período de imersão verifica-se a hidratação tardia dos grãos anidros após o período normal de cura, bem como a ativação dos aditivos cristalizantes quando presentes na matriz cimentícia, enquanto que no ciclo de secagem a formação do CaCO_3 é notada junto à fissura (VAN TITTELBOOM et al., 2014; JIANG et al., 2015; SNOECK e DE BELIE, 2015).

Assim, o fenômeno da autocicatrização tem a água como agente principal para seu início, mas a alternância entre as condições de cura (ciclos de molhagem e secagem) tende a intensificar tal fenômeno.

2.2.5 Adições

2.2.5.1 Aditivos cristalizantes

O fenômeno autógeno de cicatrização de concretos pode ser aprimorado com a utilização de produtos comerciais, os chamados aditivos cristalizantes. Estes materiais são inseridos na matriz cimentícia durante a sua produção, tendo pesquisas que demonstram o benefício de tal utilização (SISOMPHON et al., 2012; FERRARA et al., 2014). De Belie et al. (2018) classificaram recentemente os aditivos cristalizantes e as adições minerais como estimuladores da autocicatrização autógena.

Tais misturas cristalinas são classificadas como hidrofílicas, onde reagem facilmente ao entrarem em contato com a água, de modo a aumentar a densidade de C-S-H, formando depósitos insolúveis bloqueadores de poros e fissuras existentes, que suportam pressões de até 14 bar (RAVITHEJA et al., 2019).

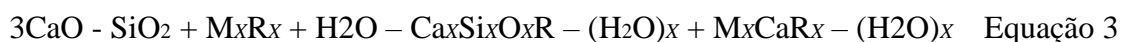
Segundo Pazderka e Hájková (2016); Ferrara et al. (2016); Guzlina e Sakale (2019), a composição química dos aditivos cristalizantes é formada por cimento Portland, fillers, pozolanas, areias, escórias, pó siliciosos e "produtos químicos ativos". Diversificados materiais chamados de aditivos cristalizantes são comercializados no mercado da construção civil, sendo suas composições químicas mantidas em confidencialidade pelos fabricantes. Além de sua composição química, Roig-Flores et al. (2016) menciona que o comportamento destes produtos junto à matriz cimentícia ainda é parcialmente desconhecido.

Em função dos aditivos cristalizantes possuírem variados tipos de aglomerantes e produtos químicos ativos, a sua atuação pode depender de um somatório diversificado de reações, podendo os mesmos reagirem com água, hidróxido de cálcio, grãos de cimento anidro e íons carbonatos. Os agentes autocicatrizantes dessa forma podem produzir o C-S-H, devido a interação do hidróxido de sódio com a sílica do cristalizante, além de poderem atuar como pontos de nucleação e proporcionar um aumento na precipitação de CaCO_3 pelo aumento da dissolução dos íons carbonato (Ca^{2+}) (BOHUS e DROCHYTKA, 2012).

No trabalho de Cuenca et al. (2018), concretos com aditivo cristalizante e curados sob imersão durante 3 meses, indicaram junto à superfície da fissura a presença principalmente de C-S-H, e CaCO_3 em amostra sem o cristalizante. Roig-Flores et al. (2016), destacaram a presença de CaCO_3 na superfície de fissuras, tanto para as amostras do concreto referência, quanto para as amostras com 4% de aditivo cristalizante.

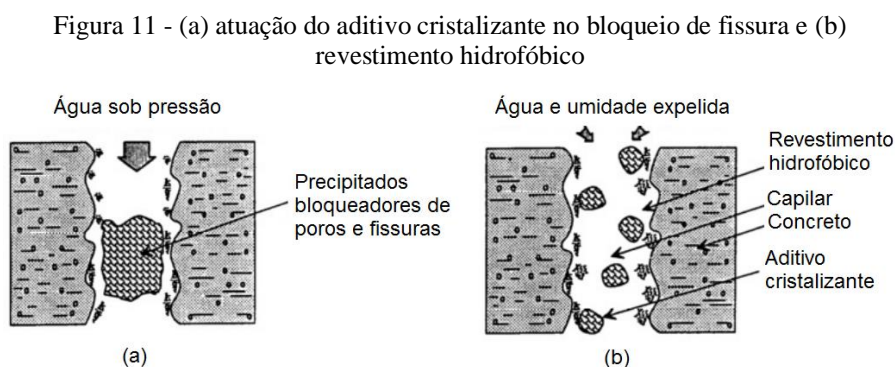
Na região interna da fissura, Ferrara et al. (2014) verificaram a presença de cristais de C-S-H em amostras com 0% e 1% de aditivo cristalizante, quando curadas sob imersão em água durante 3 meses. Já Sisomphon et al. (2013) identificaram CaCO_3 e C-S-H na região interna de fissuras em amostras contendo aditivo cristalizante, sendo que os autores ressaltam que a formação dos produtos cristalizantes variou de acordo com a condição de exposição submetidas às amostras.

De acordo com a ACI 212.3R-10 (2010), a reação dos aditivos cristalizantes com os compostos dos materiais cimentícios ocorre conforme a Equação 3. Neste caso, o promotor cristalino (MxRx) reage com o C_3S e água, produzindo C-S-H modificado e um precipitado bloqueador de poros (MxCaRx) nas microfissuras e capilares existentes, sendo esta reação de hidratação também referenciada por outros autores (CUENCA e FERRARA, 2017; HASSANI et al., 2017; DE BELIE et al., 2018; LI et al., 2018).



(silicato de cálcio + aditivo cristalino + água → C-S-H modificado + precipitado bloqueador de poros)

As reações de hidratação destes aditivos cristalizantes se propagam por toda a matriz porosa do concreto, resultando em um sistema impermeável à água e a outras substâncias agressivas do ambiente externo, além de formar precipitados bloqueadores de poros (FERRARA, 2018). Para Mailvaganam (1995), os aditivos cristalizantes podem causar o fechamento de poros e fissuras (Figura 11a), bem como formar uma camada hidrofóbica (Figura 11b), que repele a entrada de água.

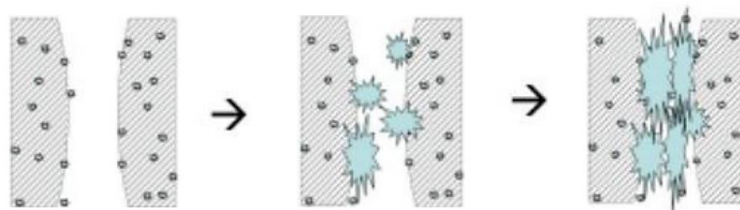


Fonte: adaptado de MAILVAGANAM (1995).

De acordo com Li et al. (2018) e Sisomphon et al. (2012), a recristalização do hidróxido de cálcio lixiviado da matriz cimentícia caracteriza-se como um dos principais fatores para ocorrência da autocicatrização autógena, e a presença de aditivos cristalizantes nestes casos contribui com o aumento da dissolução de íons Ca^{2+} , a ponto de favorecer com os processos de recristalização e formação de CaCO_3 .

Oliveira (2019) destaca que o fornecimento de água é essencial para a ativação dos aditivos cristalizantes, materiais estes caracterizados como hidrofílicos, ao utilizarem a água para catalisar e reagir com as partículas de cimento, e formar depósitos cristalinos no sistema de poros e fissuras presentes. A Figura 12 representa o processo de formação de depósitos cristalinos em uma fissura.

Figura 12 - Representação das reações de hidratação dos aditivos cristalizantes



Fonte: BIPARVA e YUERS (2010).

Além da água presente no concreto ser o principal mecanismo de ativação destas reações, os aditivos cristalizantes podem sofrer uma ativação tardia ao entrarem em contato com a umidade do ambiente externo por meio da formação de fissuras na matriz cimentícia. Ao longo da vida útil de uma estrutura de concreto e da evolução das suas fissuras, é almejado que o comportamento dos aditivos cristalizantes sejam os mesmos que nos períodos iniciais de cura do concreto, pois enquanto houver hidróxido de cálcio, cimento anidro, espaço disponível e umidade, a densificação dos produtos de hidratação dos aditivos cristalizantes deverá ocorrer tanto nos poros quanto nas fissuras (VAN TITTELBOOM, 2012; FERRARA et al., 2016).

Ferrara et al. (2016) salientam que os aditivos cristalizantes promovem um aumento da densidade de C-S-H na matriz cimentícia, os quais se depositam junto aos poros capilares e fissuras existentes, ativando o processo de auto reparo. Em função dos cristalizantes serem inseridos ao concreto no momento de sua produção, ocorre a formação de depósitos cristalinos que ficam integralmente ligados a pasta de cimento hidratada, contribuindo para maior resistência à entrada de agentes agressivos na matriz.

De acordo com Roig Flores et al. (2015), o contato prolongado dos aditivos cristalizantes com a umidade é crucial para que se possa atingir maiores taxas de autocicatrização de fissuras, mesmo com maiores espessuras, podendo ocorrer o selamento completo das mesmas. Conforme Pazderka e Hájková (2016), o processo de autocicatrização dos aditivos cristalizantes só é ativado quando a matriz porosa do concreto estiver em contato com a umidade. No caso da falta dessa umidade, os componentes da mistura cristalina permanecem inativos.

Entre as obras brasileiras que utilizaram aditivos cristalizantes no concreto, destacam-se a laje de subpressão do Museu da Imagem e do Som e a cobertura fluida do Museu de Arte do Rio, ambas situadas no Rio de Janeiro (TAKAGI, 2013). A obra mais recente em utilizar tais aditivos fica no Edifício Pontal em Porto Alegre, na aplicação da laje de subpressão de 20.000m², situada a 3,3 metros abaixo do nível do Lago Guaíba.

2.2.5.2 Sílica ativa

Os benefícios que as adições minerais proporcionam à resistência do concreto em relação a penetração de agentes agressivos é destacada na literatura (GJØRV, 2015; NEVILLE, 2016; ZAYED et al., 2016). A melhora das propriedades de uma matriz cimentícia está relacionada ao efeito pozolânico (químico) que o material apresenta, bem como o efeito filer (físico) das partículas, de forma a contribuir com a melhora da microestrutura do concreto (NEVILLE, 2016).

Dentre os efeitos físicos, podem ser citados a redução do volume de vazios e tamanho dos poros, diminuição da exsudação, e aumento da resistência. Os efeitos químicos por sua vez têm como principal mecanismo a reação pozolânica na transformação do Ca(OH)_2 em C-S-H secundário, de forma a preencher os porosidade do concreto, contribuindo assim com a redução da permeabilidade e aumento da resistência.

Cappellesso (2016) realizou um estudo a partir da utilização da sílica ativa e dos aditivos cristalizantes, a fim de avaliar a redução da porosidade capilar em concretos, demonstrando algumas melhorias ao se utilizar os aditivos cristalizantes, embora tenham se mostrado inferiores em relação ao uso de adição de sílica ativa para a situação avaliada.

Ainda, nesse sentido, Jaroenratanapirom e Sahamitmongkol (2010) avaliaram a autocicatrização de fissuras em amostras de argamassas com fissuras de até 0,3 mm, contendo aditivos cristalizantes (1%) e sílica ativa (10%), fissuradas aos 3 e 28 dias. A eficiência do aditivo cristalizante se mostrou efetivo para fissuras com até 0,05mm, enquanto que a sílica ativa apresentou melhor desempenho em fissuras com maiores espessuras.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia proposta foi desenvolvida para atender os objetivos elencados nesse trabalho, de modo a criar uma matriz experimental a fim de destacar cada fator, sendo estes apresentados nos itens seguintes.

3.1 VARIÁVEIS SELECIONADAS

3.1.1 Variáveis independentes

As variáveis independentes (controladas) são os parâmetros da pesquisa que foram listados para serem avaliados no decorrer do estudo, em função de suas influências sobre as variáveis de respostas. Assim, as variáveis independentes deste trabalho são:

a) Produtos de autocicatrização

Foram utilizados três diferentes tipos de aditivos cristalizantes disponíveis no mercado, denominados como X, Y e Z. Ainda, foi utilizada uma mistura apenas com a adição de sílica ativa, com o objetivo de comparar os efeitos deste material conhecido por seu bom desempenho, em relação aos efeitos dos aditivos cristalizantes, e uma mistura de referência.

b) Ciclos de molhagem e secagem

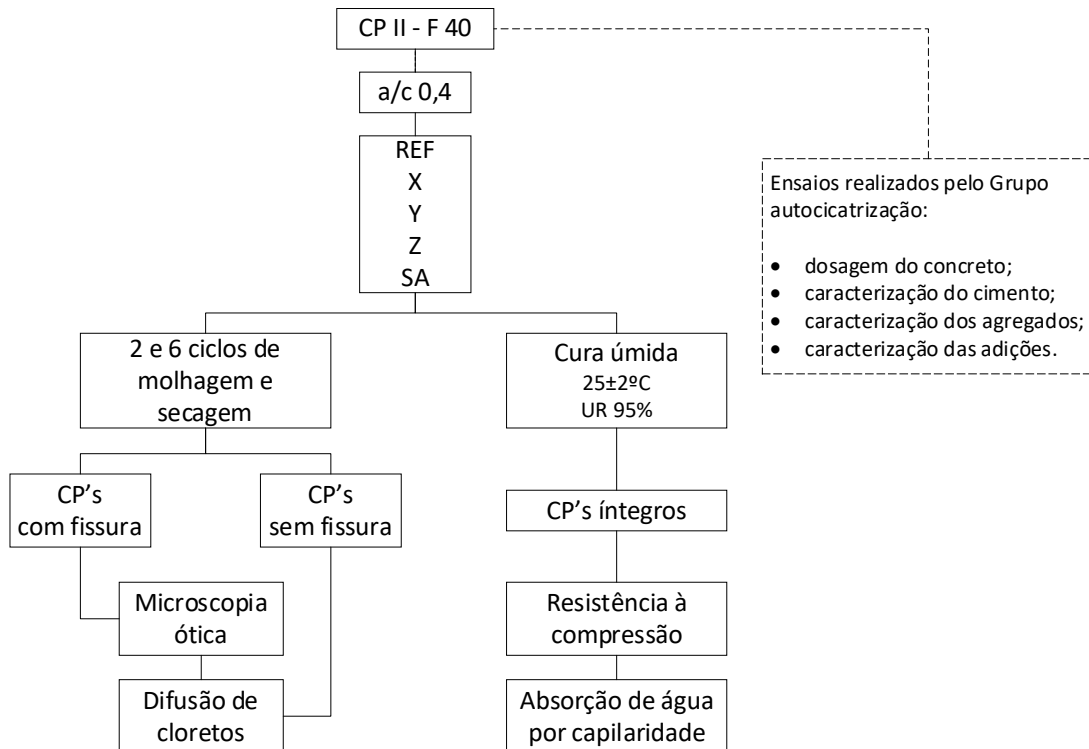
Com o objetivo de intensificar o fenômeno da autocicatrização, foram aplicados ciclos consecutivos de molhagem e secagem. Esta metodologia foi adotada nos demais trabalhos do Grupo autocicatrização LAMTAC/NORIE/UFRGS, além de ser a condição de exposição mais favorável para ativação dos aditivos cristalizantes, de acordo com os fabricantes. O ciclo de molhagem/secagem tem a duração de 14 dias, sendo 2 dias \pm 1 hora de imersão em água potável da rede pública de abastecimento, sendo esta renovada a cada novo ciclo, e mais 12 dias \pm 2 horas fora da imersão, com secagem ao ar.

c) Idade de ruptura à compressão axial

O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado aos 3, 28 e 91 dias. A idade de 3 dias foi determinada por ser a idade da abertura das fissuras, e 28 e 91 dias por serem as idades normalmente utilizadas para caracterização de concretos;

Na Figura 13, está ilustrada a matriz experimental desenvolvida nesta pesquisa. Foram utilizados 3 diferentes aditivos cristalizantes, sílica ativa e um concreto de referência, 2 diferentes idades de início do ensaio de difusão de cloretos, além de amostras fissuradas e não fissuradas, totalizando 20 combinações a serem analisadas.

Figura 13 - Representação da matriz experimental



Fonte: elaborado pela autora.

3.1.2 Variáveis de resposta

Como variáveis de resposta para o estado endurecido foram atribuídas:

- a) resistência à compressão axial, para caracterizar os concretos produzidos e verificar a influência dos aditivos cristalizantes e da sílica ativa nesta propriedade;
- b) absorção de água por capilaridade foi realizada com a finalidade de caracterizar os concretos produzidos, bem como a de avaliar a influência dos aditivos cristalizantes e da sílica ativa;
- c) difusão de cloretos, de modo a avaliar o fenômeno da autocicatrização no concreto e recuperação da estanqueidade;

- d) visualização e determinação da autocicatrização por análise de imagens com microscopia ótica, com o objetivo de avaliar o comportamento superficial de autocicatrização da fissura e complementar os resultados do ensaio de difusão de cloretos.

3.1.3 Variáveis fixas

As variáveis fixas são as denominadas como não prioritárias para o presente estudo, e serão dessa forma mantidas como constantes ao longo de todo o experimento, como sendo:

- a) relação a/c de 0,40, também adotada em outros trabalhos pelo Grupo autocicatrização LAMTAC/NORIE/UFRGS;
- b) a influência dos aditivos cristalizantes foi avaliada em amostras de concreto fissuradas e não fissuradas. Para as amostras fissuradas, a abertura das fissuras foi realizada aos 3 dias, uma vez que em situações reais o aparecimento de fissuras no concreto em idades iniciais é comum e, por conter maior quantidade de cimento anidro na matriz cimentícia, a fim de favorecer na autocicatrização autógena. Além disso, demais trabalhos realizados pelo Grupo autocicatrização LAMTAC/NORIE/UFRGS utilizaram esta idade para abertura de fissuras;
- c) betoneira e equipamentos para a realização dos ensaios;
- d) abatimento do tronco de cone, definido em 220 ± 20 mm (NBR NM 67, ABNT, 1998);
- e) cura ambiente nas primeiras 24 horas após a moldagem, com proteção superior de lona plástica. Após a desforma, armazenamento dos corpos de prova em câmara úmida, com umidade relativa $\geq 95\%$ e temperatura de 23 ± 2 °C até a idade de abertura de fissuras (3 dias). Posteriormente os corpos de prova foram dispostos em uma câmara de ciclos;
- f) espessura das fissuras de no máximo 0,4mm.

3.1.4 Variáveis não controladas

As variáveis não controladas são aquelas que devido às limitações técnicas não puderam ser controladas durante o experimento. Entre essas variáveis estão a temperatura e umidade relativa

do ambiente de concretagem, do local dos ciclos de molhagem/secagem e o local de disposição dos aparatos de ensaio de difusão de cloretos.

3.2 MATERIAIS EMPREGADOS

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram caracterizados pelo Grupo autocicatrização LAMTAC/NORIE/UFRGS, e serão descritos nos itens a seguir.

3.2.1 Cimento

O cimento utilizado nesta pesquisa foi o cimento Portland composto com filler (CP II-F 40), recebido em forma de doação de uma indústria de concreto da cidade de Porto Alegre/RS. A doação foi fornecida a granel, possibilitando que todo o estudo fosse realizado com o mesmo lote de cimento, sendo seu recebimento ocorrido antes da substituição da NBR 11578 (ABNT, 1991) pela NBR 16697 (ABNT, 2018). Dessa forma, a composição do cimento utilizado cumpre os requisitos da NBR 11578 (ABNT, 1991), sendo o teor de material carbonático permitido no tipo de cimento utilizado entre 6% e 10%.

Visto que o presente trabalho faz parte do Grupo Autocicatrização do LAMTAC/NORIE/UFRGS, optou-se em utilizar o mesmo cimento aplicado nas demais pesquisas do grupo, com o objetivo de se ter as mesmas variáveis para futuras comparações de resultados. Além disso, o cimento CP II-F 40 é livre de materiais pozolânicos que poderiam provocar alterações nos resultados com os aditivos cristalizantes.

De modo a caracterizar o cimento utilizado, foram realizados ensaios de caracterização física, química e mecânica. A caracterização física foi realizada por meio do ensaio de massa específica, de acordo com a NBR 16605 (ABNT, 2017), bem como o ensaio de granulometria a laser e método de B.E.T, para determinação da superfície específica do cimento. Em relação a caracterização química, foi realizado o ensaio de difração de Raios X (DRX) e fluorescência de Raios X (FRX) e perda ao fogo. A caracterização mecânica do cimento foi realizada pelo ensaio de determinação da resistência à compressão, de acordo com NBR 7215 (ABNT, 1996). A seguir serão apresentados os métodos e resultados dos referidos ensaios.

3.2.1.1 Massa específica

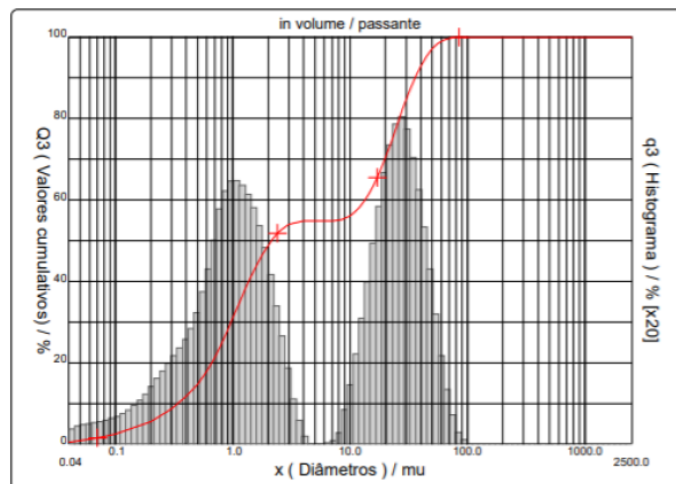
A massa específica do cimento foi determinada no Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído (LAMTAC/NORIE) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

(UFRGS), conforme a NBR 16605 (ABNT, 2017), sendo seu resultado apresentado na Tabela 1.

3.2.1.2 Granulometria

Para determinação da distribuição granulométrica e diâmetro médio das partículas do cimento, foi realizado o ensaio de granulometria a laser no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (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 $\lambda = 830,625$ nm para medir o tamanho das partículas que o atravessam, em uma faixa de análise de 0,04 a 2500 μm . A Figura 14 apresenta a distribuição do tamanho das partículas em forma de histograma e seu valor acumulado, e as granulometrias do material são apresentadas na Tabela 1.

Figura 14 - Granulometria do cimento



Fonte: Grupo Autocatrização LAMTAC/NORIE/UFRGS.

3.2.1.3 Área superficial

A caracterização morfológica do grão de cimento se deu através do método de B.E.T, ensaio realizado no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), pelo equipamento Quantachrome, modelo Nova 100. Nesse ensaio, toda a água e possíveis contaminantes presentes na amostra são removidos através da secagem das mesmas a uma temperatura de 300 °C em um período de 3 horas em vácuo, sendo em seguida injetado nitrogênio gasoso que se deposita nos poros e superfície sólida da amostra. A

área superficial da amostra é determinada então a partir do gás necessário que proporciona uma camada adsorvida por toda a superfície de cada partícula. O resultado da área superficial também é apresentado na Tabela 1.

3.2.1.4 Composição química

O ensaio de fluorescência de Raios X foi realizado no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), com a utilização do equipamento da marca Shimadzu, modelo XRF1800. A partir deste ensaio foi possível determinar a composição química dos óxidos presentes no cimento utilizado (Tabela 1).

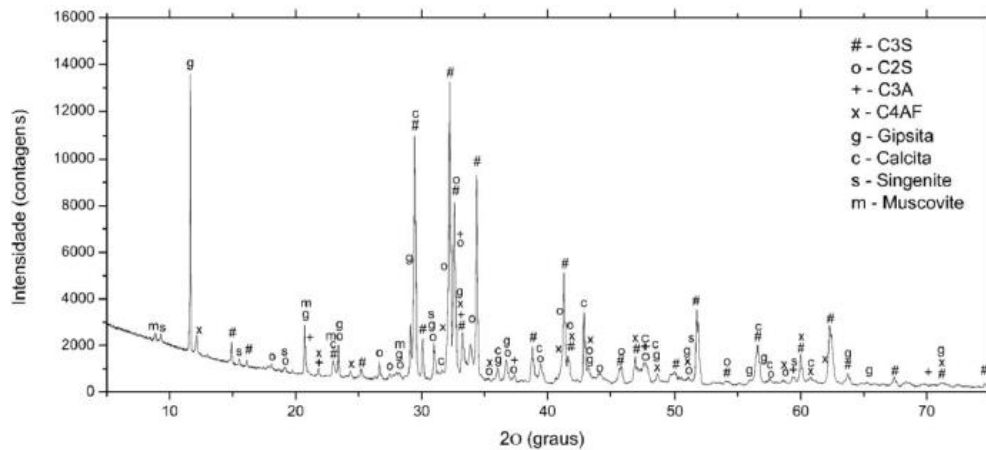
3.2.1.5 Caracterização mineralógica

A difração de Raios X (DRX) foi realizada no Itt Fossil - Instituto Tecnológico de Micropaleontologia, da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS). Para realização do ensaio, uma amostra do cimento foi previamente preparada, sendo limitada a granulometria passante na peneira nº200. O laboratório utiliza um difratômetro modelo Emyrean da Malvern Panalytical (vs. 7.9d 20161215), com material do ânodo de cobre (Cu) – modelo Emyrean Cu LFF HR (9430 033 7310x) DK412109 e detector proporcional de área (PIXcel3D-Medipix3 1x1), intensidade de raios $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=1,541874 \text{ \AA}$) e $\text{CuK}\beta$ ($\lambda=1,392250 \text{ \AA}$), com faixa de varredura de 5° a 80° , ao passo de 0,05.

A avaliação qualitativa das fases cristalinas do cimento foi realizada através do software X'Pert High Score, onde os picos apresentados nos difratogramas, de acordo com suas posições angulares e intensidades relativas difratadas, são analisados comparativamente com fichas existentes em um banco de dados, identificadas como fichas PDF (Powder Diffraction Files), agrupadas e armazenadas pelo Comitê Internacional de espectrometria de Difração de Pó (JCPDS: Joint Committee on Powder Diffraction Standards).

Na Figura 15, é apresentado o difratograma do cimento Portland composto por fíler (CPII-F 40). As fichas utilizadas para análise estão descritas com o número, seguidas da qualidade da ficha entre parênteses, sendo S referente às fichas *Star* e C referente às fichas *Calculated*, após o nome químico e a fórmula química da ficha.

Figura 15 - 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 - 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 Autocatrização LAMTAC/NORIE/UFRGS.

3.2.1.6 Perda ao fogo

A perda ao fogo do cimento utilizado foi determinada conforme a NBR NM 18 (ABNT, 2012) no Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído (LAMTAC/NORIE), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Os resultados são apresentados na Tabela 1.

3.2.1.7 Resistência à compressão

A resistência à compressão do cimento foi determinada segundo a NBR 7215 (ABNT, 1996), sendo os resultados apresentados na Tabela 1.

Na Tabela 1 são apresentados todos os resultados pertencentes aos ensaios anteriormente descritos, associados aos limites normativos, segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018). Sobre a composição química do cimento CP II-F 40 apresentada na Tabela 1, é importante destacar que o teor em massa do trióxido de enxofre (SO_3) ultrapassou o limite permitido pela NBR 11578 (ABNT, 1991).

Tabela 1 - Caracterização do cimento CII-F 40

| Cimento CP II F | Teor (% em massa) | | |
|---|-------------------|-------|-------|
| | REAL | LN | |
| Perda ao Fogo (PF) | 5,20 | ≤6,5 | |
| Dióxido de silício (SiO ₂) | 12,78 | | |
| Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃) | 3,77 | | |
| Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃) | 4,13 | | |
| Óxido de cálcio (CaO) | 66,48 | | |
| Óxido de magnésio (MgO) | 1,46 | - | |
| Trióxido de enxofre (SO ₃) | 6,84 | ≤4,0 | |
| Óxido de sódio (Na ₂ O) | - | | |
| Óxido de potássio (K ₂ O) | 1,19 | | |
| Anidrido Carbônico (CO ₂) | 2,93 | ≤5,0 | |
| Granulometria a laser (µm) | Diâmetro médio | 12,84 | |
| | Diâmetro a 10% | 0,34 | |
| | Diâmetro a 50% | 2,13 | |
| | Diâmetro a 90% | 35,78 | |
| Massa específica (g/cm ³) | 3,11 | | |
| Área específica – B.E.T. (m ² /g) | 5,79 | | |
| Resistência à compressão (MPa) | 3 dias | 30,28 | ≥15,0 |
| | 7 dias | 37,58 | ≥25,0 |
| | 28 dias | 42,88 | ≥40,0 |

LN: Limite normativo, segundo NBR 11578 (ABNT, 1991).

Fonte: Grupo Autocatrização LAMTAC/NORIE/UFRGS.

3.2.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado é de origem quartzosa, oriundo do Rio Jacuí. As características físicas avaliadas foram a massa específica, NBR NM 52 (ABNT, 2009), o módulo de finura e a dimensão máxima, NBR 7211 (ABNT, 2009). A distribuição granulométrica do agregado miúdo foi determinada de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003). Os resultados de tais ensaios são mostrados na Tabela 2. Na Figura 16, pode ser observado que o agregado se enquadrou na zona utilizável da NBR 7211 (ABNT, 2009).

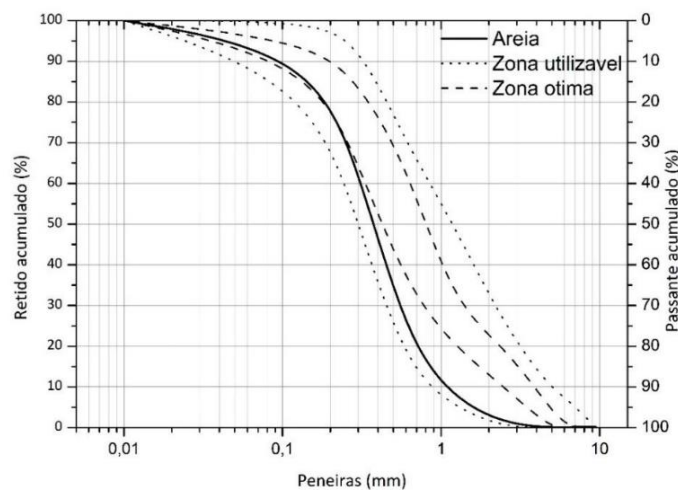
Tabela 2 - Caracterização física do agregado miúdo

| Abertura das peneiras (mm) | AMOSTRA | | NBR 7211 (ABNT, 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 | - | - | - | - | |
| Módulo de finura | | | | | | 1,89 | |
| Dimensão máxima característica (mm) | | | | | | 2,36 | |
| Massa específica agregado seco (g/cm ³) | | | | | | 2,54 | |
| Massa específica saturado superfície seca (g/cm ³) | | | | | | 2,57 | |
| Massa específica aparente (g/cm ³) | | | | | | 2,62 | |
| Massa unitária (g/cm ³) | | | | | | 1,49 | |
| Absorção de água (%) | | | | | | 1,30 | |

Fonte: Grupo Autocicatrização LAMTAC/NORIE/UFRGS.

Figura 16 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Grupo Autocicatrização LAMTAC/NORIE/UFRGS.

3.2.3 Agregado graúdo

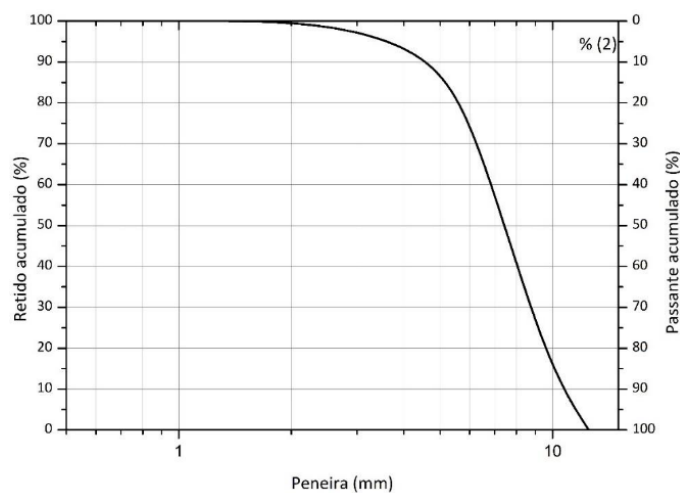
O agregado graúdo utilizado é de origem basáltica, sendo na Tabela 3 apresentada sua composição granulométrica, conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003). Na mesma tabela são apresentadas as informações referentes a sua dimensão máxima característica, conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009), bem como as massas específicas e a absorção de água, de acordo com a NBR 53 (ABNT, 2009). A Figura 17 apresenta a distribuição granulométrica do agregado graúdo.

Tabela 3 - Caracterização física do agregado graúdo

| Abertura das peneiras (mm) | AMOSTRA | |
|--|------------------|----------------------------|
| | Média Retida (%) | Média Retida Acumulada (%) |
| 25 | 0 | 0 |
| 19 | 0 | 0 |
| 12,5 | 0 | 0 |
| 9,5 | 17 | 17 |
| 6,3 | 56 | 73 |
| 4,75 | 20 | 93 |
| 2,36 | 7 | 100 |
| 1,18 | 0 | 100 |
| 0,6 | 0 | 100 |
| 0,3 | 0 | 100 |
| 0,15 | 0 | 100 |
| Fundo | 0 | 100 |
| Módulo de finura | 6,10 | |
| Dimensão máxima característica (mm) | 12,50 | |
| Massa específica agregado seco (g/cm ³) | 3,01 | |
| Massa específica saturado superfície seca (g/cm ³) | 2,94 | |
| Massa específica aparente (g/cm ³) | 2,91 | |
| Massa unitária (kg/dm ³) | 1,51 | |
| Absorção de água (%) | 1,20 | |

Fonte: Grupo Autocicatrização LAMTAC/NORIE/UFRGS.

Figura 17 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo



Fonte: Grupo Autocicatrização LAMTAC/NORIE/UFRGS.

3.2.4 Aditivo redutor de água

O aditivo superplastificante foi utilizado com o intuito de manter o controle do abatimento pré-estabelecido de 220 ± 20 mm, sendo suas características apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Características do aditivo superplastificante

| Aspecto | Líquido |
|------------------|---|
| Cor | Amarelo claro |
| Função | Aditivo superplastificante de alto desempenho |
| pH | 4 a 7 |
| Densidade a 25°C | $1,10\pm 0,2$ g/ml |

Fonte: adaptado do fabricante.

3.2.5 Aditivos cristalizantes

Foram utilizados três diferentes aditivos cristalizantes em pó disponíveis no mercado, denominados como X, Y e Z, também estudados em outros trabalhos do Grupo autocatrização LAMTAC/NORIE/UFRGS. A caracterização dos aditivos cristalizantes foi feita por meio dos ensaios de granulometria a laser, fluorescência de Raios X (FRX) e difração de Raios X (DRX).

3.2.5.1 Granulometria

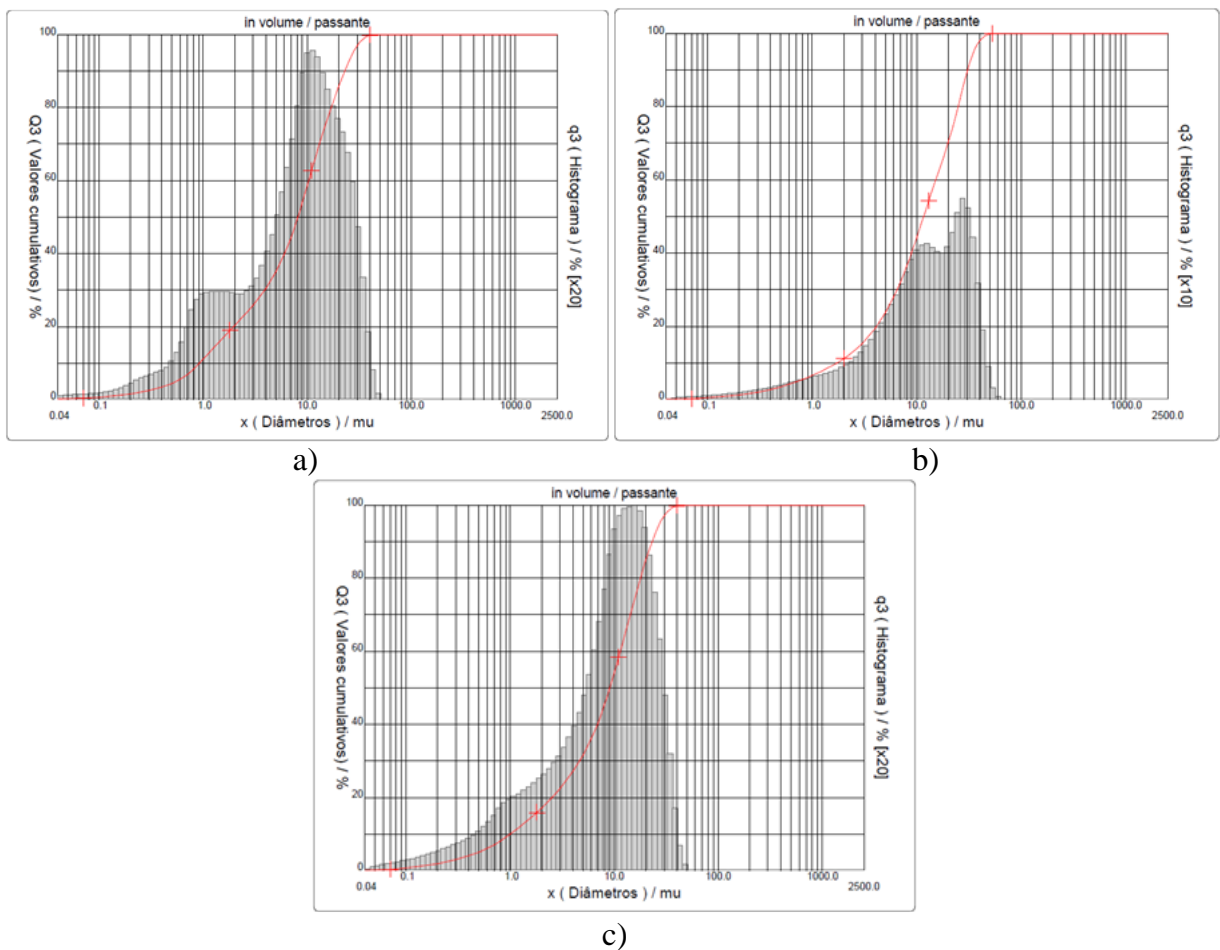
O ensaio de granulometria a laser foi realizado para a determinação da distribuição granulométrica e diâmetro médio das partículas dos aditivos cristalizantes. O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER), na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), com uso de um equipamento CILAS, *Particle Size Analyser*, modelo CILAS 1180 Liquid. A análise foi desenvolvida por via úmida, por meio de um tratamento ultrassônico prévio para a dispersão das partículas, com duração de 60 segundos. No ensaio um feixe de laser é utilizado para medir o tamanho das partículas que o atravessam, em uma faixa de análise de 0,04 a 2500 μ m. A Tabela 5 apresenta um resumo dos resultados do ensaio. A distribuição do tamanho das partículas em forma de histograma e seu valor acumulado é apresentada na Figura 18.

Tabela 5 - Granulometria a laser dos aditivos cristalizantes

| | Aditivo cristalizante X | Aditivo cristalizante Y | Aditivo cristalizante Z |
|----------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Diâmetro a 10% (μm) | 0,92 | 1,73 | 1,00 |
| Diâmetro a 50% (μm) | 8,14 | 11,63 | 9,06 |
| Diâmetro a 90% (μm) | 22,96 | 30,74 | 23,11 |
| Diâmetro médio (μm) | 10,11 | 14,42 | 10,72 |

Fonte: Grupo Autocicatrização LAMTAC/NORIE/UFRGS.

Figura 18 - Distribuição granulométrica dos aditivos cristalizantes (a) X (b) Y e (c) Z



Fonte: Grupo Autocicatrização LAMTAC/NORIE/UFRGS.

3.2.5.2 Composição química

O ensaio de fluorescência de Raios X (FRX) foi realizado com o equipamento Epsilon 1 da marca Panalytical, pelo Itt Fossil – Instituto Tecnológico de Micropaleontologia, da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS). A Tabela 6 mostra a composição química dos aditivos cristalizantes.

Tabela 6 - Caracterização química dos aditivos cristalizantes

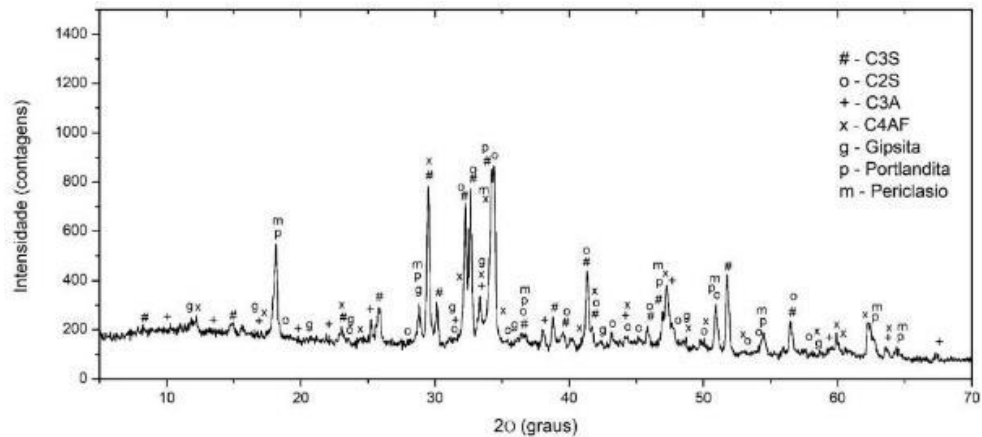
| | Teor (% em massa) | | |
|---|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | Aditivo cristalizante X | Aditivo cristalizante Y | Aditivo cristalizante Z |
| Perda ao Fogo (PF) | 17,81 | 12,87 | 8,57 |
| Dióxido de silício (SiO ₂) | 8,94 | 12,64 | 13,07 |
| Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃) | 2,67 | 2,95 | 3,80 |
| Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃) | 2,24 | 2,50 | 2,81 |
| Óxido de cálcio (CaO) | 64,07 | 58,45 | 60,61 |
| Óxido de magnésio (MgO) | 0,55 | 5,54 | 4,81 |
| Trióxido de enxofre (SO ₃) | 2,44 | 3,43 | 4,43 |
| Óxido de sódio (Na ₂ O) | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Óxido de potássio (K ₂ O) | 0,56 | 1,04 | 1,22 |
| Cloro (Cl) | 0,15 | 0,09 | 0,11 |
| Dióxido de titânio (TiO ₂) | 0,19 | 0,18 | 0,24 |
| Anidrido vanádico (V ₂ O ₅) | 0,01 | 0,01 | 0,02 |
| Óxido de manganês (MnO) | 0,06 | 0,06 | 0,07 |
| Óxido de zinco (ZnO) | 0,02 | N.D. | 0,05 |
| Óxido de estrôncio (SrO) | 0,28 | 0,24 | 0,14 |
| Dióxido de zircônio (ZrO ₂) | N.D. | N.D. | 0,01 |
| Óxido de bário (BaO) | N.D. | N.D. | 0,02 |

Fonte: Grupo Autocicatrização LAMTAC/NORIE/UFRGS.

3.2.5.3 Caracterização mineralógica

O ensaio de difração de Raios X (DRX) foi realizada pelo laboratório do Itt Fossil – Instituto Tecnológico de Micropaleontologia da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS). Para sua realização, os aditivos cristalizantes foram moídos manualmente com auxílio de almofariz e pistilo, sendo utilizado o material passante nº200. O difratômetro utilizado é do modelo Empyrean da Malvern Panalytical (vs 7.9d 20161215), com anôdo de cobre (Cu) modelo Empyrean Cu LFF HR (9430 033 7310k) DK412109 e detector proporcional de área PIXcel3D-Medpix3 1x1, intensidade de raios CuK α (1=1,541874 Å) e CuK β (1=, 392250 Å), com faixa de varredura de 5° a 80°, ao passo de 0,05. Para a avaliação qualitativa das fases cristalinas foi utilizado o auxílio do software X'Pert High Score. Os difratogramas dos aditivos cristalizantes X, Y e Z, respectivamente, estão apresentados na Figura 19, Figura 20 e Figura 21.

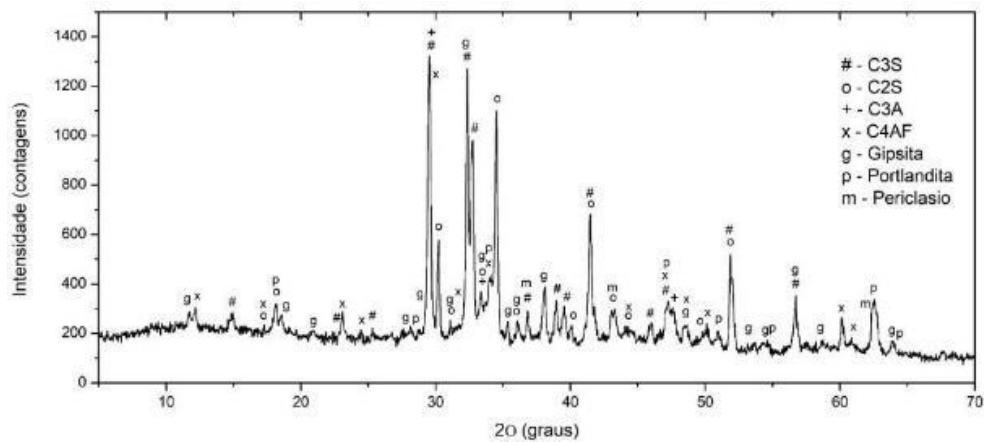
Figura 19 - Difratoograma do aditivo cristalizante X



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 - $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$;
 Portlandita: PDF 00-044-1481 (S) - Calcium Hydroxide - $\text{Ca}(\text{OH})_2$;
 Periclásio: PDF 00-045-0946 (S) - Magnesium Oxide - MgO

Fonte: Grupo Autocicatrização LAMTAC/NORIE/UFRGS.

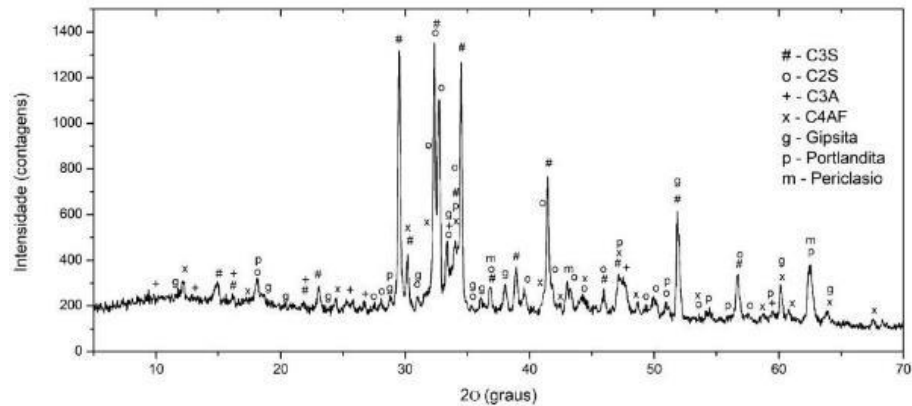
Figura 20 - Difratoograma do aditivo cristalizante Y



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 - $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$;
 Portlandita: PDF 00-044-1481 (S) - Calcium Hydroxide - $\text{Ca}(\text{OH})_2$;
 Periclásio: PDF 00-045-0946 (S) - Magnesium Oxide - MgO

Fonte: Grupo Autocicatrização LAMTAC/NORIE/UFRGS.

Figura 21 - Difratoograma do aditivo cristalizante Z



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 - $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$;
 Portlandita: PDF 00-044-1481 (S) - Calcium Hydroxide - $\text{Ca}(\text{OH})_2$;
 Periclásio: PDF 00-045-0946 (S) - Magnesium Oxide - MgO

Fonte: Grupo Autocicatrização LAMTAC/NORIE/UFRGS.

3.2.6 Sílica ativa

O ensaio de fluorescência de Raios X (FRX) da sílica ativa foi realizado com o equipamento Epsilon 1 da marca Panalytical, pelo Itt Fossil – Instituto Tecnológico de Micropaleontologia, na UNISINOS. A Tabela 7 mostra a composição química da sílica ativa.

Tabela 7 - Caracterização química da sílica ativa

| | Teor (% em massa) |
|---|-------------------|
| Perda ao Fogo (PF) | 2,91 |
| Dióxido de silício (SiO_2) | 88,35 |
| Óxido de alumínio (Al_2O_3) | 1,72 |
| Óxido de ferro (Fe_2O_3) | 0,10 |
| Óxido de cálcio (CaO) | 0,68 |
| Óxido de magnésio (MgO) | 4,30 |
| Trióxido de enxofre (SO_3) | 0,13 |
| Óxido de sódio (Na_2O) | 0,00 |
| Óxido de potássio (K_2O) | 0,91 |
| Cloro (Cl) | 0,23 |
| Dióxido de titânio (TiO_2) | <0,01 |
| Óxido de manganês (MnO) | 0,05 |
| Óxido de zinco (ZnO) | <0,01 |
| Pentóxido de difósforo (P_2O_5) | 0,57 |
| Óxido de cromo (Cr_2O_3) | <0,01 |
| Óxido de európio (Eu_2O_3) | 0,01 |

Fonte: Grupo Autocicatrização LAMTAC/NORIE/UFRGS.

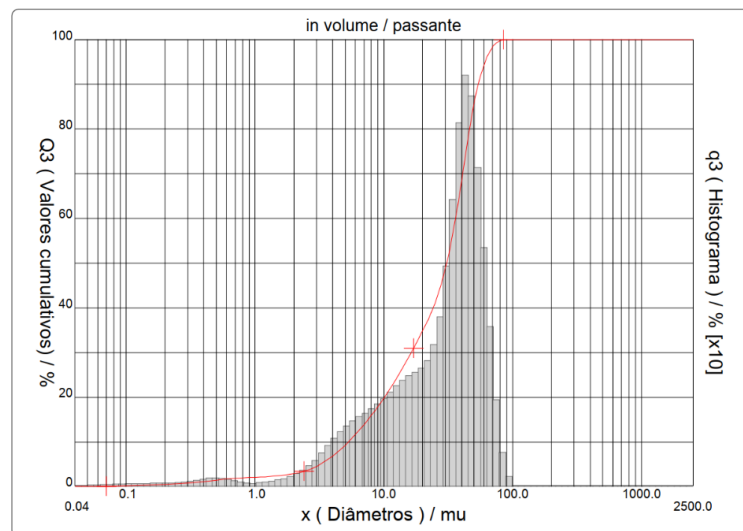
O ensaio de granulometria a laser foi realizado para a determinação da distribuição granulométrica e diâmetro médio das partículas da sílica ativa. O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER), na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), com uso de um equipamento CILAS, *Particle Size Analyser*, modelo CILAS 1180 Liquid. A Tabela 8 apresenta um resumo dos resultados do ensaio. A Figura 22 apresenta a distribuição do tamanho das partículas em forma de histograma e seu valor acumulado. Conforme pode ser observado, a sílica ativa apresentou um diâmetro médio bem maior do que o esperado, e este fato pode estar associado à aglomeração das partículas.

Tabela 8 - Granulometria a laser da sílica ativa

| | |
|----------------------------------|-------|
| Diâmetro a 10% (μm) | 5,29 |
| Diâmetro a 50% (μm) | 30,80 |
| Diâmetro a 90% (μm) | 54,18 |
| Diâmetro médio (μm) | 29,99 |

Fonte: Grupo Autocicatrização LAMTAC/NORIE/UFRGS.

Figura 22 - Distribuição granulométrica da sílica ativa



Fonte: Grupo Autocicatrização LAMTAC/NORIE/UFRGS.

3.2.7 Água

A água utilizada na produção dos concretos e para a realização dos ciclos de imersão é proveniente da rede pública de abastecimento de água de Porto Alegre, sendo distribuída e monitorada pelo Departamento Municipal de Água e Esgotos (DMAE).

3.3 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS

No presente trabalho, o estudo de dosagem para o concreto utilizado foi previamente desenvolvido pelo Grupo Autocicatrização LAMTAC/NORIE/UFRGS, onde então foi realizado um estudo com os mesmos materiais empregados neste programa experimental. Dessa forma, neste item é descrito o procedimento de dosagem do concreto e mistura dos materiais adotados pelo Grupo Autocicatrização LAMTAC/NORIE/UFRGS. Além disso, são apresentados os ensaios de consistência, moldagens dos corpos de prova, tipos de cura e preparação dos corpos de prova para o ensaio de difusão de cloretos.

3.3.1 Dosagem dos concretos

A dosagem do concreto foi realizada de acordo com o método proposto pelo IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1992), definido a partir da determinação de um teor ótimo de argamassa com o valor do abatimento fixo. O teor ótimo de argamassa é resultante de um traço definido como intermediário, com quantidade média de aglomerante, sendo na sequência preparados os traços ricos, formados por um teor maior de aglomerante, e mais pobres, com menor teor de aglomerante, com a finalidade de elaborar o diagrama de dosagem.

A partir deste método foi definido o traço intermediário 1:5 (cimento:agregados secos), com a utilização do cimento Portland composto com filler (CPII-F 40), e o teor de argamassa ideal para os materiais utilizados, igual a 52%. Para o abatimento seguiu-se as recomendações apresentadas na NBR NM 67 (ABNT, 1998), sendo fixado em 220 ± 20 mm por meio da utilização de aditivo superplastificante. Foram desenvolvidos ainda mais três traços, sendo dois ricos (1:2 e 1:3,5) e um pobre (1:6,5). Para determinação da resistência à compressão axial aos 28 dias, conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018), foram moldados corpos de prova cilíndricos de 100x200mm.

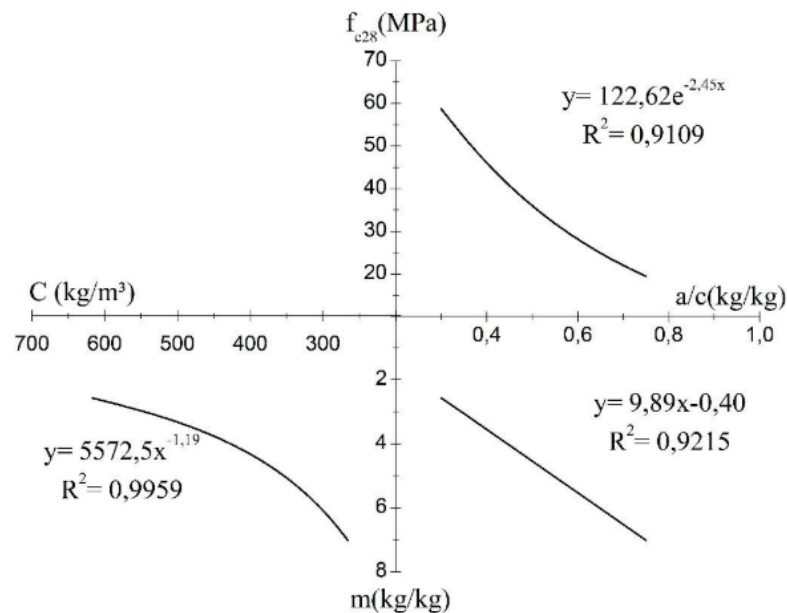
Os resultados da dosagem experimental são apresentados na Tabela 9, sendo que na dosagem o teor de aditivo superplastificante foi mantido fixo para os diferentes traços de uma mesma família de concretos. No diagrama de dosagem apresentado na Figura 23, são apontados estes dados em quatro eixos: resistência à compressão aos 28 dias, relação água/cimento, teor de agregados e consumo de cimento.

Tabela 9 - Curva de dosagem: consumo e Fc28

| Traço unitário (1:m) (kg/kg) | Relação a/c | Aditivo (%) | f _{c28} potencial (MPa) | Consumo de cimento (kg/m ³) |
|------------------------------|-------------|-------------|----------------------------------|---|
| 1:2,0 | 0,29 | 0,22 | 67,47 | 741,42 |
| 1:3,5 | 0,39 | 0,22 | 47,22 | 488,68 |
| 1:5,0 | 0,47 | 0,22 | 31,56 | 358,19 |
| 1:6,5 | 0,73 | 0,22 | 22,21 | 275,91 |

Fonte: Grupo Autocicatrização LAMTAC/NORIE/UFRGS.

Figura 23 - Diagrama de dosagem



Fonte: Grupo Autocicatrização LAMTAC/NORIE/UFRGS.

Com os resultados da curva de dosagem, foi possível definir o traço para a relação água/cimento fixa deste trabalho de 0,40 (Tabela 10), sendo essa uma relação a/c adotada em outros trabalhos do Grupo Autocicatrização LAMTAC/NORIE/UFRGS. Todos os concretos foram moldados seguindo as parcelas de materiais apresentados na Tabela 10, variando apenas o tipo de cristalizante que foi utilizado na dosagem de 1% sobre a massa de cimento, sendo este teor recomendado pelos fabricantes. O aditivo superplastificante foi utilizado na quantidade necessária para manter o abatimento fixo de 220 ± 20 mm em cada traço. A sílica ativa foi utilizada no teor de 5% sobre a massa de cimento. Um teor baixo de sílica ativa foi adotado com a finalidade de evitar uma elevada resistência mecânica do concreto, o que por sua vez prejudicaria a semelhança das espessuras das fissuras das amostras deste traço, em relação aos demais traços.

Tabela 10 - Proporcionamento dos concretos

| Concreto | a/c | m | Traço | Cimento (kg) | Areia (kg) | Brita (kg) | Água (kg) | Cristalizante (g) | Sílica ativa (g) | CC (kg/m ³) |
|----------|------|------|-------------|--------------|------------|------------|-----------|-------------------|------------------|-------------------------|
| REF | 0,40 | 3,55 | 1:1,37:2,18 | 18,32 | 25,02 | 40,00 | 7,33 | - | - | 503,74 |
| Crist. X | 0,40 | 3,55 | 1:1,37:2,18 | 18,32 | 25,02 | 40,00 | 7,33 | 183,15 | - | 503,74 |
| Crist. Y | 0,40 | 3,55 | 1:1,37:2,18 | 18,32 | 25,02 | 40,00 | 7,33 | 183,15 | - | 503,74 |
| Crist. Z | 0,40 | 3,55 | 1:1,37:2,18 | 18,32 | 25,02 | 40,00 | 7,33 | 183,15 | - | 503,74 |
| SA | 0,40 | 3,55 | 1:1,37:2,18 | 18,32 | 25,02 | 40,00 | 7,33 | - | 915,75 | 503,74 |

Fonte: elaborado pela autora.

A Tabela 11 apresenta o abatimento de cada betonada, e a quantidade de aditivo superplastificante utilizado para a obtenção do abatimento determinado.

Tabela 11 - Abatimento de cada betonada e teor de aditivo utilizado

| Concreto | Abatimento (mm) | | Aditivo (%)* | Temperatura (°C) | Umidade (%) |
|-----------------|-----------------|------------|--------------|------------------|-------------|
| | Betonada 1 | Betonada 2 | | | |
| Referência | 200 | 200 | 0,09 | 23,0 | 73,1 |
| Cristalizante X | 200 | 200 | 0,13 | 24,1 | 77,2 |
| Cristalizante Y | 200 | 200 | 0,16 | 23,4 | 78,6 |
| Cristalizante Z | 210 | 210 | 0,14 | 24,0 | 86,2 |
| Sílica Ativa | 200 | 200 | 0,17 | 12,3 | 53,5 |

*em relação à massa de cimento

Fonte: elaborado pela autora.

3.3.2 Mistura dos materiais

A mistura dos materiais se deu através da utilização de uma betoneira planetária de eixo vertical, devidamente imprimada com argamassa de cimento e areia oriundos desse trabalho. A ordem de colocação dos materiais na betoneira foi efetuada a partir da colocação de toda a brita do traço, seguindo com um terço de água. Posteriormente foram adicionados o cimento, o restante da água, parte do aditivo superplastificante e a areia. Em seguida, era adicionado o aditivo cristalizante ou a sílica ativa, dependendo do traço. Por fim, o restante do aditivo superplastificante era adicionado em quantidade suficiente para garantir um abatimento entre 220±20 mm.

O tempo decorrido desde a colocação da água na brita até o ensaio de abatimento do tronco de cone era de 5 minutos. Após o ensaio, o concreto utilizado era devolvido para a betoneira e homogeneizado por mais 30 segundos. Na sequência era realizado o ensaio de massa específica

no estado fresco, sendo o concreto devolvido novamente à betoneira após sua realização. O concreto era misturado por mais 30 segundos e então era realizado o processo de moldagem dos corpos de prova. Para cada traço foram necessárias duas betonadas, sendo o procedimento de confecção dos concretos mantido fixo para todas as betonadas realizadas.

3.3.3 Ensaio de consistência

O controle da consistência do concreto foi realizado a partir do ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump*), de acordo com a NBR NM 67 (ABNT, 1998), sendo fixado em 220 ± 20 mm. Com a finalidade de manter a padronização em todas as misturas, o devido ensaio foi aplicado em todas as betonadas, sendo executado pelo mesmo operador com o objetivo de evitar alterações nas medições de consistência.

3.3.4 Massa específica

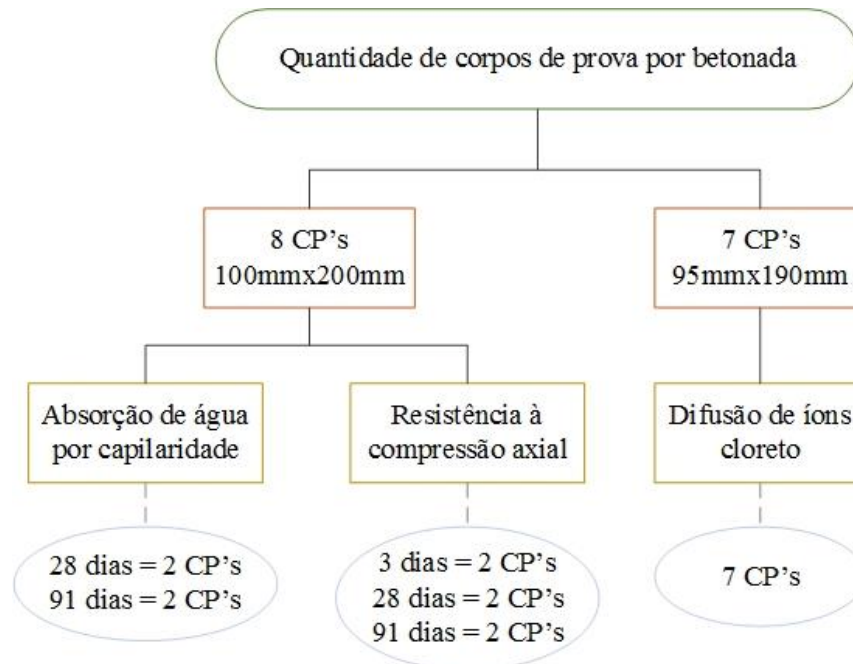
O ensaio da massa específica dos concretos foi realizado conforme preconizado pela NBR 9833 (ABNT, 2008), sendo realizada para cada betonada e pelo mesmo operador. O recipiente utilizado para o ensaio foi calibrado de acordo com a NBR 9833 (ABNT, 2008), sendo seu volume de $14,296 \text{ dm}^3$.

3.3.5 Moldagem dos corpos de prova

Para cada concreto duas betonadas foram realizadas, sendo que em cada betonada 8 corpos de prova cilíndricos (100 mm x 200 mm) eram moldados. Destes, 2 foram destinados para o ensaio de absorção de água por capilaridade, totalizando 4 corpos de prova para cada data de ensaio (28 e 84 dias) e 6 corpos de prova de cada betonada foram destinados ao ensaio de resistência à compressão axial, sendo 2 corpos de prova para cada idade de ruptura (3, 28 e 91 dias). Dessa forma, para cada idade de ruptura (3, 28 e 91 dias) 4 corpos de prova eram ensaiados (2 de cada betonada).

Além disso, foram moldados 7 corpos de prova cilíndricos (95 mm x 190 mm) para o ensaio de difusão de cloretos. Neste caso, foram utilizados corpos de prova de menor diâmetro devido a limitação da dimensão dos aparatos de ensaio, os quais foram produzidos com tubos de PVC de 100mm de diâmetro, possibilitando dessa forma melhor acoplamento das amostras de concreto para o ensaio. A Figura 24 ilustra a quantidade de corpos de prova moldados em cada betonada.

Figura 24 - Quantidade de corpos de prova em cada betonada



Fonte: elaborado pela autora.

Com a finalidade de proporcionar uniformidade aos corpos de prova de concreto, durante as moldagens o método de adensamento adotado foi o mecânico, através da utilização de uma mesa vibratória, sendo executadas 3 camadas com vibração de 15 segundos cada, de acordo com metodologia adotada pelo Grupo Autocicatrização LAMTAC/NORIE/UFRGS.

3.3.6 Cura

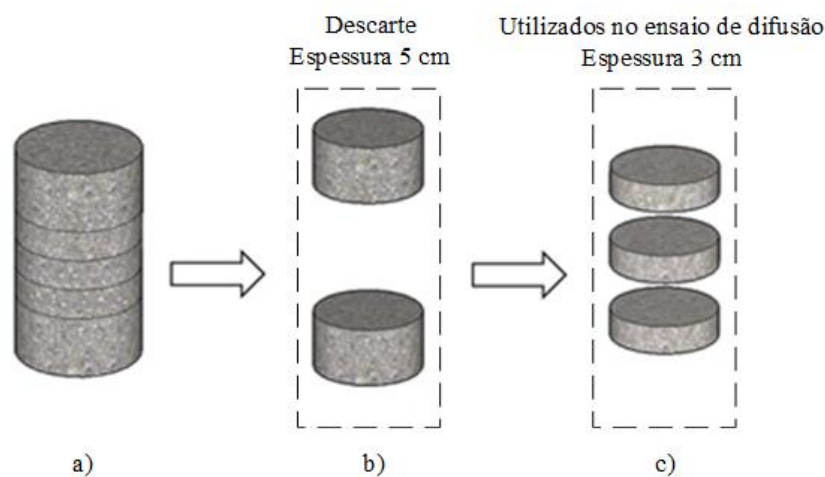
Para a cura do concreto, os corpos de prova permaneceram nos moldes durante 24 horas, cobertos com lona plástica a fim de evitar a perda de umidade para o ambiente, conforme recomenda a NBR 5738 (ABNT, 2015). Posteriormente os mesmos foram desmoldados e armazenados em câmara úmida, mantida em temperatura de 25 ± 2 °C e umidade relativa do ar superior a 95%, de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015). Os corpos de prova destinados aos ensaios de resistência à compressão axial e de absorção de água por capilaridade foram mantidos na câmara até a idade de realização dos ensaios. Já os corpos de prova destinados ao ensaio de difusão de cloretos permaneceram na câmara úmida até a idade de 3 dias, quando então foram retirados para realizar o corte e a abertura de fissuras.

3.3.7 Preparação dos corpos de prova para o ensaio de difusão

Na idade de 3 dias os corpos de prova cilíndricos de 95x190 mm foram serrados em 5 fatias, em uma serra diamantada refrigerada à água, específica para concreto. Durante o corte, os

corpos de prova foram posicionados dentro de um gabarito de madeira, para facilitar o corte e manter a padronização das espessuras das fatias. O processo foi iniciado com o corte e descarte da parte superior do corpo de prova, com espessura de 5 cm. Posteriormente, as três fatias centrais destinadas à abertura de fissuras eram cortadas, sendo 3 cm a espessura de cada uma delas. Estas fatias centrais foram escolhidas por apresentarem maior homogeneidade. Por fim, a fatia inferior com 5 cm de espessura era descartada. A Figura 25 apresenta uma representação do processo de corte dos corpos de prova.

Figura 25 - Representação do processo de corte dos corpos de prova (a) corpo de prova íntegro (b) fatias descartadas (c) fatias utilizadas para ensaio de difusão de cloretos

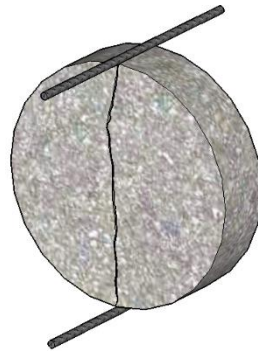


Fonte: elaborado pela autora.

3.3.8 Abertura de fissuras

Com o processo de corte dos corpos de prova finalizado, a abertura de fissuras era então iniciada, sendo adotada a mesma metodologia criada e utilizada pelo Grupo Autocicatrização do LAMTAC/NORIE/UFRGS. Para isso, os corpos de prova (3 cm de espessura) eram posicionados na prensa de acordo com a NBR 7222 (ABNT, 2011), a qual estabelece os critérios para a determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Foram utilizadas 2 barras metálicas de bitola de 5 mm, com a finalidade de criar esforços de tração no concreto e resultar no direcionamento da fissura, perpendicularmente à face de aplicação da carga (Figura 26).

Figura 26 - Posicionamento dos apoios para a abertura da fissura



Fonte: elaborado pela autora.

De modo a garantir o posicionamento correto do corpo de prova na prensa, foi confeccionado um gabarito de madeira (Figura 27). O molde possui comprimento de 95 mm, mesmo diâmetro do corpo de prova, e altura interna de 47,5 mm, correspondente a meio diâmetro. Dessa forma, as duas laterais do corpo de prova eram marcadas com caneta, sendo estes os pontos de posicionamento das barras metálicas para a abertura de fissuras.

Figura 27 - Molde para auxiliar na marcação dos corpos de prova para auxiliar no posicionamento na prensa



Fonte: elaborado pela autora.

O carregamento aplicado para a abertura das fissuras tinha velocidade de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s de forma constante, sendo cessado em decorrência da queda de força relacionado a ruptura e visual aparecimento de fissura. De forma a impedir o rompimento por completo dos corpos de prova, foi utilizado um limitador lateral, o qual não será apresentado nesse trabalho por estar em processo de patente.

Posteriormente, os corpos de prova fissurados eram medidos com o auxílio de um microscópio ótico, onde foram selecionadas as amostras que apresentavam uma fissura com espessura inferior a 0,4 mm.

3.3.9 Ciclo de molhagem e secagem

Em virtude da autocicatrização autógena de fissuras se desenvolver a partir do contato dos aditivos cristalizantes com a água, o ambiente de exposição no qual os concretos foram inseridos é um fator relevante no progresso do fenômeno. Os tempos de duração dos períodos de molhagem e secagem em cada ciclo foram definidos pelo Grupo autocicatrização LAMTAC/NORIE/UFRGS, sendo que os demais trabalhos do grupo realizaram os ciclos de molhagem/secagem com mesma duração.

Dessa forma, no dia seguinte ao processo de corte dos corpos de prova, abertura das fissuras e microscopia ótica, os corpos de prova fissurados, e também os não fissurados, eram levados à câmara de ciclos. No início do ciclo, os corpos de prova ficavam imersos em água, por um período de 2 dias \pm 1 h. Em seguida, os corpos de prova eram retirados da água e eram expostos a um período de secagem com duração de 12 dias, completando 14 dias de molhagem e secagem, o que corresponde a 1 ciclo. A câmara onde os ciclos foram realizados não possuía controle de temperatura e umidade. A Figura 28 mostra a secagem dos corpos de prova.

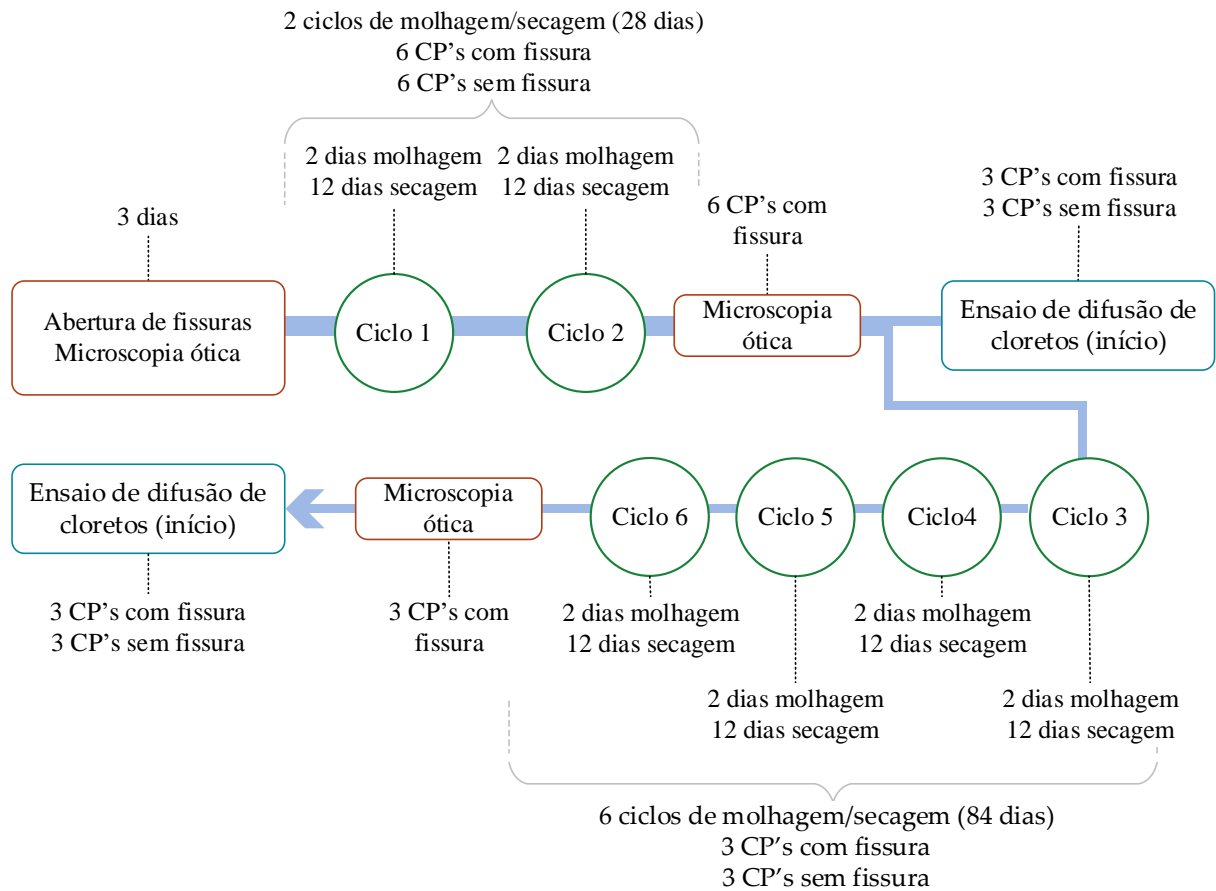
Figura 28 - Ciclo de ciclo de secagem dos corpos de prova



Fonte: elaborado pela autora.

O ensaio de difusão de cloretos foi iniciado em duas idades, após o término de 2 e 6 ciclos de molhagem e secagem. Estas idades de início dos ensaios foram definidas por representarem uma idade correspondente aos 28 dias, enquanto o período correspondente aos 6 ciclos é de aproximadamente 91 dias (Figura 29).

Figura 29 - Representação dos ciclos de molhagem/secagem



Fonte: elaborado pela autora.

A água utilizada para os ciclos de imersão foi proveniente da rede pública, sendo a mesma renovada a cada ciclo, de forma a evitar a interferência de lixiviados dos concretos na autocicatrização das fissuras. Com a finalidade de representar as condições reais de exposição do concreto com a água, decidiu-se em não saturar a água dos ciclos de molhagem com hidróxido de cálcio, o qual provoca um equilíbrio químico da solução e que evita a lixiviação desses produtos internos da matriz cimentícia. Apesar da água ser caracterizada como um gatilho para a autocicatrização de fissuras, a execução dos ciclos tende a acelerar tal fenômeno, devido a lixiviação do hidróxido de cálcio que é o principal produto da cicatrização autógena ao carbonatar e formar o carbonato de cálcio. Além disso, cada traço foi armazenado em um recipiente separado durante o período de imersão, para que não houvesse interferência do material lixiviado entre os diferentes traços.

Durante todo o período dos ciclos, os corpos de prova foram mantidos no mesmo posicionamento, sendo a parte superior dos mesmos marcada para que os corpos de prova não fossem girados entre os ciclos. Tanto nos ciclos de molhagem, quanto no de secagem, as fissuras

eram mantidas na posição horizontal nos corpos de prova fissurados. Além disso, uma distância entre as faces dos corpos de prova era sempre mantida, de modo permitir a circulação de ar entre eles. Para evitar a movimentação dos corpos de prova durante o período de secagem, foram confeccionados suportes de madeira para facilitar o posicionamento dos mesmos.

3.4 ENSAIOS

Nos itens a seguir, serão descritos os ensaios realizados neste trabalho. O ensaio de difusão de cloretos foi realizado com o objetivo de verificar o desempenho da autocicatrização de fissuras dos concretos, em comparação aos concretos sem fissura. O ensaio de microscopia ótica foi realizado com a finalidade de medir o fechamento das fissuras, bem como complementar os resultados obtidos no ensaio de difusão de cloretos. Para a caracterização dos concretos, foram realizados os ensaios de resistência à compressão axial e absorção de água por capilaridade.

3.4.1 Caracterização dos concretos

3.4.1.1 Resistência à compressão

Com o intuito de caracterizar os concretos em relação a sua resistência mecânica, realizou-se o ensaio de resistência à compressão axial, aos 3, 28 e 91 dias, conforme prescrito pela NBR 5739 (ABNT, 2018). As três datas foram avaliadas pelo fato de contemplarem o programa experimental, sendo 3 dias a abertura de fissuras, enquanto 28 e 91 dias são as idades normatizadas mais próximas das idades de realização do ensaio de difusão de cloretos.

A realização do ensaio se deu no Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído (LAMTAC/NORIE), na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), sendo utilizada uma prensa da marca EMIC. Para cada idade de ensaio foram rompidos 4 corpos de prova cilíndricos de 100x200mm, sendo 2 de cada betonada, de forma a possibilitar o mapeamento de possíveis erros experimentais inseridos durante a produção dos concretos.

3.4.1.2 Absorção de água por capilaridade

De modo a determinar a capacidade de sucção capilar dos concretos estudados, realizou-se o ensaio de absorção de água por capilaridade, de acordo com a NBR 9779 (ABNT, 2012), aos 28 e 91 dias. Para isso, foram moldados 2 corpos de prova cilíndricos de 100x200mm em cada betonada, totalizando 4 corpos de prova para cada idade de ensaio.

Para o início do ensaio, os corpos de prova eram levados à estufa até sua constância de massa. Antes da imersão parcial dos corpos de prova em água, os mesmos eram envoltos com plástico PVC em suas laterais, exceto as faces superior e inferior com os 5 mm nas laterais, a qual fica em contato com a água. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído (LAMTAC/NORIE), na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

3.4.2 Ensaio para a avaliação da autocicatrização

3.4.2.1 Microscopia ótica

O ensaio de microscopia ótica foi realizado com o objetivo de avaliar, por meio de imagens, a autocicatrização de fissuras ao longo do tempo. Para sua realização, foi utilizado o microscópio ótico Zeiss Stemi 508, com ampliação entre 2x e 250x, do Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído (LAMTAC/NORIE), na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). As imagens foram extraídas com ampliação de 2x na resolução de 0,65x, apresentando escala de 0,5mm nas imagens.

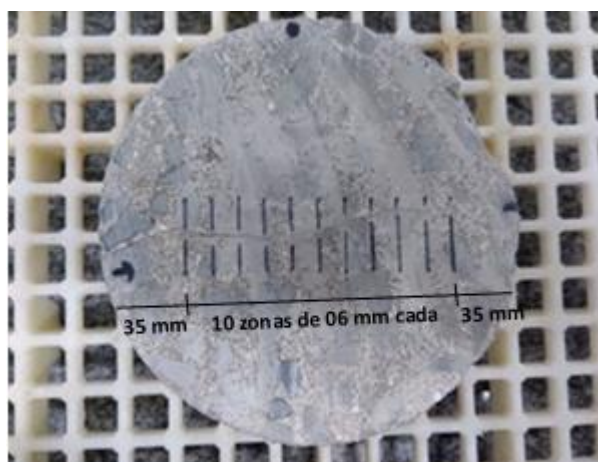
Na idade de 3 dias dos concretos, logo após ao processo de abertura de fissuras, todos os corpos de prova fissurados foram avaliados microscopicamente, para a seleção das fissuras que seriam utilizados no ensaio de difusão de cloretos. Foram selecionados os corpos de prova que apresentavam fissuras inferiores a 0,4 mm, sendo os demais descartados. Entre as duas faces do corpo de prova, a microscopia ótica era realizada apenas na face que apresentava a maior espessura da fissura, sendo esta escolhida por análise visual. Para cada concreto eram escolhidos 6 corpos de prova fissurados, sendo 3 destinados à cada idade do ensaio de difusão de cloretos (28 e 84 dias).

Após o processo inicial de seleção das espessuras das fissuras, a microscopia ótica foi aplicada novamente em dois outros momentos. Após os corpos de prova completarem 2 ciclos (28 dias) de molhagem e secagem, a microscopia ótica foi repetida nos mesmos 6 corpos de prova. Posteriormente, 3 destes foram submetidos ao ensaio de difusão de cloretos, enquanto que os outros 3 retornavam à câmara de ciclos, até o término dos 6 ciclos de molhagem e secagem (84 dias). Neste momento, a microscopia ótica era aplicada novamente nestes 3 corpos de prova restantes, sendo em seguida realizado o ensaio de difusão de cloretos. O ensaio de microscopia ótica foi aplicado em duas idades de modo a servir como um complemento aos resultados do

ensaio de difusão de cloretos, possibilitando a visualização do fechamento das fissuras devido aos ciclos de molhagem e secagem.

Para que nas diferentes idades da microscopia ótica as imagens fossem geradas do mesmo local, foram demarcadas dez zonas de 06mm na região central dos corpos de prova, sendo descontados os 35 mm das bordas, como pode ser observado na Figura 30. Foram geradas cerca de 300 imagens, sendo que os 5 concretos estudados continham 3 amostras em cada idade, e de cada amostra eram geradas 10 imagens.

Figura 30 - Zonas para capturas de imagens por microscopia ótica



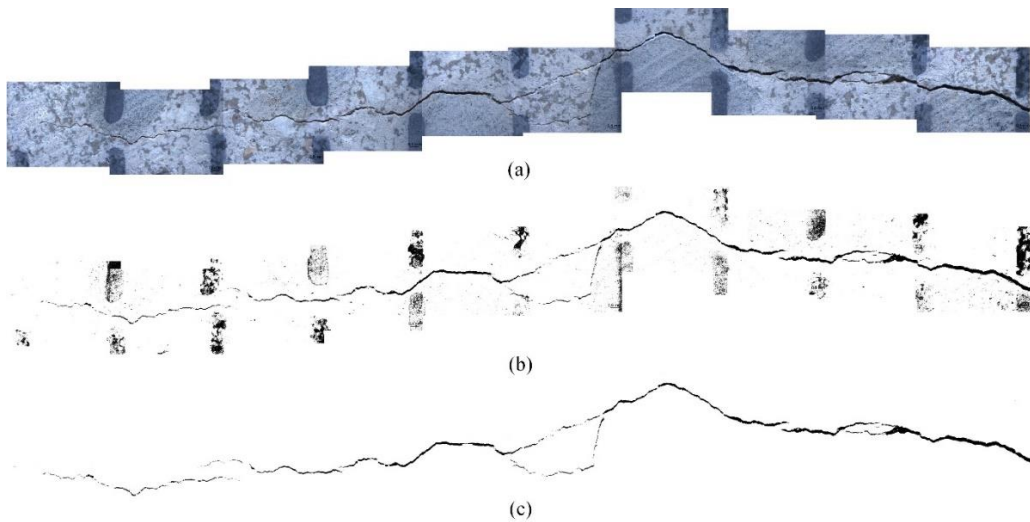
Fonte: elaborado pela autora.

As amostras foram identificadas da seguinte forma: numeração da amostra-tipo de concreto e adição-número de ciclos que foi submetida-idade da coleta de imagem. Como exemplo, para a amostra 02 do concreto com aditivo cristalizante X, submetida a 2 ciclos de molhagem e secagem, com a coleta de imagem aos 3 dias, têm-se a denominação: 02-X-2C-3dias. Cabe ressaltar que 02-X-2C e 02-X-6C são diferentes amostras, de um mesmo concreto, que apresentam fissuras diferentes e que foram expostas a diferentes ciclos de molhagem/secagem. Além disso, a numeração apresentada acima das imagens agrupadas se refere à identificação da zona de coleta da imagem, de 1 a 10. Esta numeração é apresentada para facilitar a correlação das imagens e visualização da fissura em diferentes idades.

Com as imagens geradas pelo microscópio ótico, foi possível realizar a quantificação da espessura das fissuras através da utilização do software ImageJ. Essa metodologia consiste em quantificar os pixels em cor preta referente a região da fissura, em relação a área da amostra contida na imagem. As regiões excedentes demarcadas em cor preta pelo software, como poros

ou marcações da caneta são removidos com ferramentas do software, ficando apenas a região referente a fissura (Figura 31).

Figura 31 - Ajuste da imagem no ImageJ para quantificação da fissura (a) imagem original (b) representação da imagem após tratamento (c) remoção de pixels excedentes à fissura



Fonte: elaborado pela autora.

Posteriormente é calculado o percentual da fissura em relação à amostra (T) através da Equação 4 abaixo.

$$T (\%) = \frac{NúmC}{NúmA - NúmB} \quad \text{Equação 4}$$

Onde: *NúmA*: número total de pixels da amostra;

NúmB: quantidade inicial de pixels brancos da amostra;

NúmC: pixels pretos da fissura;

3.4.2.2 Difusão de cloretos

Para a avaliação da autocicatrização de fissuras e consequente recuperação da estanqueidade, foi realizado o ensaio de difusão de cloretos, com adaptação da norma UNE 83987 (2014). Para simular uma situação real de exposição dos concretos a um ambiente com cloretos, optou-se em realizar o ensaio sem a aplicação da tensão de 12 V.

Um dia após o término de cada ciclo de molhagem e secagem (2 e 6 ciclos), as laterais dos corpos de prova eram impermeabilizadas com a utilização de um adesivo epóxi de média fluidez

da marca Sika, de forma a garantir a movimentação unidirecional dos cloretos no interior do concreto (Figura 32).

Figura 32 - Faces impermeabilizadas com epóxi



Fonte: elaborado pela autora.

Para garantir que o transporte de cloretos no concreto ocorresse predominantemente por difusão e não absorção, no dia seguinte da impermeabilização dos corpos de prova as amostras passavam por um processo de saturação, conforme preconizado pela norma UNE 83987 (2014). Assim, os corpos de prova eram dispostos dentro de um dessecador com água deionizada até a total imersão. Posteriormente uma bomba de vácuo era ligada ao dessecador, durante 2 h, com a finalidade de remover todo ar presente na estrutura porosa do concreto. Ao completar essa etapa a bomba era então desligada, o dessecador era completamente vedado, e as amostras de concreto permaneciam submersas por mais $18 \pm 2h$ (Figura 33).

Figura 33 - Disposição das fatias de concreto no dessecador



Fonte: elaborado pela autora.

O aparato utilizado no ensaio de difusão de cloretos foi baseado no modelo proposto pela norma UNE 83987 (2014). As modificações foram realizadas em função de já se ter alguns aparatos prontos no laboratório e por tal modelo ser hermeticamente fechado, a fim de evitar possíveis contaminações de cloretos pelo laboratório. A Figura 34 mostra a configuração do aparato utilizado no ensaio.

Figura 34 - Aparatos de ensaio de difusão de cloretos

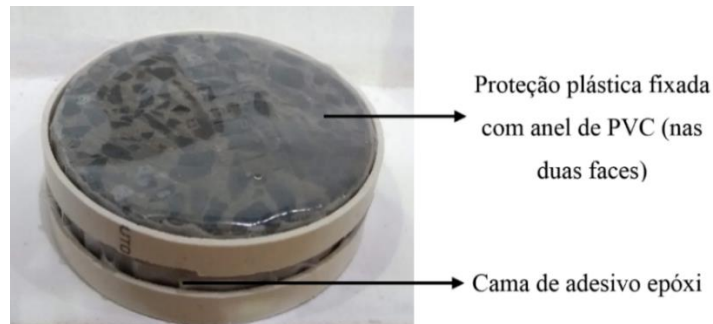


Fonte: elaborado pela autora.

Conforme pode ser observado na Figura 34, o aparato de ensaio era de material PVC, formado pela união de duas células, sendo cada célula confeccionada por um tubo central para acoplamento do corpo de prova, 2 CAP's e um TE, todos com 100mm de diâmetro.

Após o processo de saturação dos corpos de prova citado no item anterior, se dava o início da etapa de montagem dos corpos de prova aos aparatos de ensaio. Inicialmente, todos os corpos de prova eram retirados da imersão no mesmo momento. Para garantir que os mesmos ficassem saturados durante a montagem de todos os aparatos de ensaio, proteções plásticas foram aplicadas nas duas faces dos corpos de prova, sendo fixadas com anéis de PVC com 100mm de diâmetro. Dessa forma, a perda de umidade do corpo de prova para o ambiente era impedida por essa proteção plástica e pela camada de epóxi aplicada na face circular, conforme pode ser observado na Figura 35.

Figura 35 - Preparação dos corpos de prova de concreto para o ensaio de difusão de cloretos



Fonte: elaborado pela autora.

Em seguida, a montagem do aparato de ensaio consistia primeiramente pela colocação do corpo de prova em uma das células de PVC, sendo fixado com uma camada de adesivo poliuretano, conforme mostra a Figura 36.

Figura 36 - Fixação do corpo de prova de concreto na primeira célula do aparato de ensaio



Fonte: elaborado pela autora.

Para facilitar o processo de fixação do corpo de prova nesta primeira célula, e garantir que o adesivo poliuretano secasse sem a movimentação do corpo de prova, foram aplicados quatro pontos de adesivo poliuretano na parte interna do tubo de PVC, de forma a servirem de apoio para o corpo de prova (Figura 37).

Figura 37 - Pontos de apoio com adesivo poliuretano



Fonte: elaborado pela autora.

Após a secagem do adesivo poliuretano da primeira célula com o corpo de prova, era realizada a união com a segunda célula (Figura 38). Para garantir a secagem completa do adesivo poliuretano sem movimentações das células, foi utilizado um gabarito de madeira para servir de apoio. Além disso, tomou-se o cuidado de posicionar o corpo de prova entre as células de forma que ficasse na mesma posição em que foi mantido durante os ciclos de molhagem/secagem.

Figura 38 - Secagem completa do aparato de ensaio com apoio em gabarito de madeira

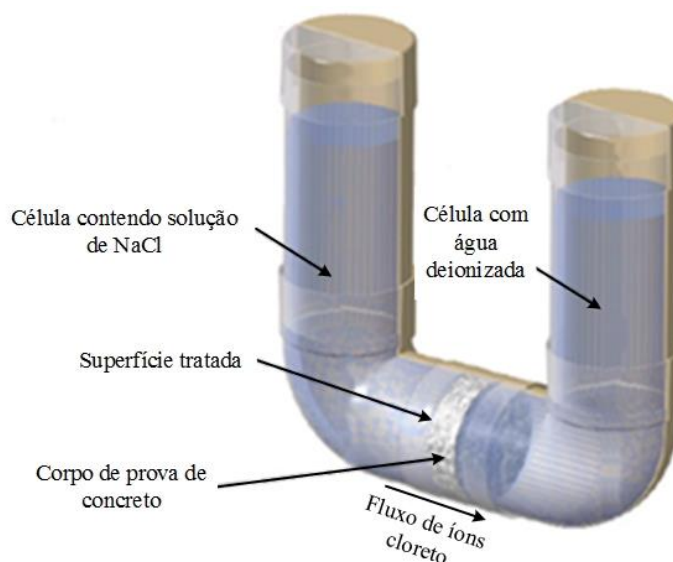


Fonte: elaborado pela autora.

De forma a garantir a completa secagem do adesivo poliuretano, somente no dia seguinte era iniciado o ensaio de difusão de cloretoS. De acordo com a norma UNE 83987 (2014), uma das células era preenchida com uma solução composta por água deionizada e NaCl, em proporções de 58,42 g de NaCl para cada litro de água, e a outra célula somente com água deionizada,

similar ao mostrado no esquema da Figura 39. Cada uma destas células era preenchida com água e solução até uma altura de 25 cm.

Figura 39 - Configuração do ensaio de difusão de cloretos



Fonte: adaptado de MEDEIROS (2008).

O ensaio de difusão de cloretos ocorre a partir de uma diferença de concentrações entre duas soluções, onde o fluxo destes íons ocorre da solução com maior concentração, para a de menor concentração, conforme mostrado na Figura 39 acima. Dessa forma, no presente trabalho, a difusão ocorreu pela passagem dos cloretos pelo corpo de prova de concreto, entre a célula com NaCl, em direção à outra célula apenas com água deionizada.

Desta célula com água deionizada eram realizadas as coletas de amostras, para verificar a passagem de cloretos pelos corpos de prova ao longo do tempo. As coletas foram realizadas por 203 dias. Para as amostras fissuradas as coletas eram realizadas a cada 7 dias, e a cada 28 dias eram realizadas as coletas nos aparatos que continham os corpos de prova não fissurados. De cada aparato de ensaio eram coletados 4 ml de amostra, que posteriormente eram avolumados com água deionizada para 29 ml, para facilitar o processo de leitura. Para realização desta leitura e determinação do teor de cloretos das amostras, foi utilizado o equipamento HI 98191 da Hanna Instruments, e o eletrodo combinado de íons seletivo HI 4007, de mesmo fabricante (Figura 40).

Figura 40 - Equipamento para leitura do teor de cloretos



Fonte: adaptado de HANNA INSTRUMENTS.

A partir das leituras das amostras coletas ao longo do tempo, foi possível visualizar o comportamento dos aditivos cristalizantes em atuar na densificação da matriz cimentícia e na autocicatrização de fissuras.

3.4.3 Cálculo do coeficiente de difusão e estimativa da vida útil dos concretos

O coeficiente de difusão configura-se como um parâmetro que caracteriza a resistência à passagem de cloretos no concreto, sendo obtido, neste trabalho, a partir do ensaio de difusão.

A estimativa de vida útil, por sua vez, corresponde a um período de tempo que os agentes agressivos levam para percorrer a camada de cobrimento das estruturas de concreto, até alcançarem a armadura e provocarem a sua corrosão. Dessa forma, a estimativa de vida útil é totalmente influenciada pelo coeficiente de difusão, ou seja, quanto maior o coeficiente de difusão, menor será a resistência do concreto à passagem de cloretos e consequentemente, menor será a vida útil calculada.

Tanto o coeficiente de difusão de cloretos, bem como o tempo de avanço da frente desses íons podem ser encontrados por meio de modelos matemáticos, como a 2ª Lei de Fick.

A equação da 2ª Lei de Fick apresenta a vantagem de ser de fácil aplicação, sendo muito utilizada pelos pesquisadores. Além disso, retrata uma situação mais real da passagem dos cloretos pelo concreto, pois contempla a difusão no estado não estacionário, ou seja, considera

o fluxo variável de cloretos com a profundidade de penetração e com o tempo (HOFFMANN, 2001; GJØRV, 2015; SILVESTRO, 2018).

Dessa forma, por meio dos resultados do ensaio de difusão de cloretos e aplicação da 2ª Lei de Fick, foi possível encontrar os coeficientes de difusão dos concretos estudados neste trabalho, bem como a elaboração dos gráficos que relacionam a profundidade de penetração de cloretos, com a vida útil de projeto. Para efeito, são utilizadas as Equações 5 e 6, desenvolvidas a partir da 2ª Lei de Fick.

$$Ecl = 2(z)\sqrt{Dt} \quad \text{Equação 5}$$

$$\text{erf}(z) = 1 - \frac{Ccl - Co}{Cs - Co} \quad \text{Equação 6}$$

Onde: *Ecl*: profundidade atingida pela frente de cloretos com teor de cloretos igual a *Ccl* (cm);

D: coeficiente de difusão de cloretos (cm²/s);

t: duração do tempo considerado (s);

erf(*z*): função erro de Gauss;





Ccl: teor de cloretos na profundidade *Ecl*, no tempo *t* (mg/l);



Cs: teor de cloretos na superfície do componente estrutural de concreto, admitido como constante (mg/l);

Co: teor inicial de cloretos no interior do componente estrutural de concreto.

De forma resumida a Figura 41 apresenta o número de corpos de prova utilizados, para cada idade de realização dos ensaios.

Figura 41 - Esquema representativo dos corpos de prova utilizados em cada ensaio

| Caracterização dos concretos | | |
|--|--|--|
| Resistência à compressão axial NBR 5739 (ABNT, 2018) CP's cilíndricos 100x200mm |  |  Íntegros |
| | |  Fissurados |
| Absorção de água por capilaridade NBR 9779 (ABNT, 2012) CP's cilíndricos 100x200mm |  | |

| Avaliação da autocatrização | |
|---|--|
| Microscopia ótica CP's cilíndricos 95x30mm |  |
| Difusão de cloretos CP's cilíndricos 95x30mm |  |

Fonte: elaborado pela autora.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir serão apresentados os resultados referentes à caracterização dos concretos por meio do ensaio de resistência à compressão axial e absorção de água por capilaridade, além dos resultados relacionados à avaliação da autocatrização de fissuras por meio do ensaio de microscopia ótica e difusão de cloretos.

4.1 Resistência à compressão axial

O ensaio de resistência à compressão axial dos concretos foi realizado para todos os concretos estudados e em três idades, conforme descrito na metodologia deste trabalho. Na Tabela 12 são apresentados os resultados obtidos para as resistências à compressão axial para a idade de 3 dias. As médias foram adquiridas a partir da ruptura de 3 corpos de prova para cada idade estabelecida.

A partir disso, observa-se um incremento na resistência dos concretos contendo os aditivos cristalizantes, mesmo em idade precoce de 3 dias, quando comparados aos resultados dos concretos contendo sílica ativa (SA) e referência (REF). Fato este que pode estar relacionado principalmente com as características destes materiais, que reagem facilmente com a umidade disponível no interior do concreto e com os subprodutos do cimento disponíveis na matriz cimentícia jovem Cappellesso (2016).

Tabela 12 - Resistência à compressão axial aos 3 dias dos concretos confeccionados com diferentes adições

| Idade/material | Relação a/c | Resistência média (MPa) | DP (MPa) | CV (%) | Em relação ao REF (%) |
|----------------|-------------|-------------------------|----------|--------|-----------------------|
| REF | 0,4 | 29,7 | 1,5 | 5,0 | - |
| Crist. X | | 34,1 | 0,2 | 0,5 | +14,7 |
| Crist. Y | | 35,7 | 1,0 | 2,8 | +20,3 |
| Crist. Z | | 32,3 | 0,4 | 1,1 | +8,8 |
| SA | | 30,3 | 1,7 | 5,5 | +1,9 |

DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação

Fonte: elaborado pela autora.

Os resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias são apresentados na Tabela 13. Pode ser notado aumento na resistência à compressão em relação à idade de 3 dias para todas as situações.

Tabela 13 - Resistência à compressão axial aos 28 dias dos concretos confeccionados com diferentes adições

| Idade/material | Relação a/c | Resistência média (MPa) | DP (MPa) | CV (%) | Ganho em relação ao REF (%) |
|----------------|-------------|-------------------------|----------|--------|-----------------------------|
| REF | 0,4 | 34,9 | 3,6 | 10,4 | - |
| Crist. X | | 40,3 | 1,8 | 4,5 | +15,4 |
| Crist. Y | | 45,7 | 1,2 | 2,7 | +30,9 |
| Crist. Z | | 54,0 | 2,7 | 5,0 | +54,6 |
| SA | | 44,8 | 2,2 | 4,8 | +28,4 |

DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação

Fonte: elaborado pela autora.

Aos 28 dias e em relação ao REF os concretos contendo aditivos cristalizantes X, Y e Z apresentaram ganhos na resistência de 15,4%, 30,9% e 54,6%, respectivamente. Este comportamento pode estar relacionado ao preenchimento dos poros e vazios provocados pelos aditivos cristalizantes, de forma a contribuir com a resistência à compressão.

Da mesma forma, Roig-Flores et al. (2015) relataram em seu trabalho um aumento de 15% na resistência à compressão de concretos contendo aditivos cristalizantes, quando comparados ao concreto de referência. Os autores destacam que esse aumento da resistência à compressão pode estar relacionado com o efeito fíler proporcionado pelo material a ponto de contribuir com a

colmatação dos poros da matriz. Ainda, tal material pode ter atuado como um ativador da hidratação do cimento, além de contribuir com a densificação de C-S-H na matriz cimentícia (AZARSA et al., 2019).

Por outro lado, Hassani et al. (2017) atribuíram maior influência do tipo de cimento utilizado e da relação água/aglomerante no aumento da resistência à compressão dos concretos aos 28 dias, do que a adição de 1% de aditivo cristalizante na mistura cimentícia, mesmo que tal porcentagem tenha se mostrado significativa ao acréscimo da resistência de um modo geral.

Pazderka e Hájková (2016) não obtiveram um ganho significativo quanto a resistência à compressão de concretos contendo 2% de aditivo cristalizante aos 28 dias. Mesmo comportamento verificado por Ferrara e Krelani (2010), onde os autores verificaram que o teor de 1% de aditivos cristalizante não conferiu aumento da resistência à compressão de amostras de concreto até os 30 dias, quando comparadas às amostras sem as adições.

O concreto com SA apresentou um ganho de 28,4% na resistência à compressão em relação ao REF. Resultado semelhante foi encontrado por Cappellesso et al. (2016) onde os autores concluíram que a adição de 5% de sílica ativa promoveu um acréscimo de 27% na resistência à compressão em relação ao concreto de referência aos 28 dias.

Para a idade de 91 dias (Tabela 14) pode ser notado que todos os concretos apresentaram acréscimo da resistência à compressão, em relação aos 28 dias. Os valores obtidos para o concreto com o aditivo cristalizante Z não foram considerados devido ao alto coeficiente de variação apresentado (13,2%), em decorrência provavelmente de um problema na prensa utilizada.

Tabela 14 - Resistência à compressão axial aos 91 dias dos concretos confeccionados com diferentes adições

| Idade/material | Relação a/c | Resistência média (MPa) | DP (MPa) | CV (%) | Em relação ao REF (%) |
|-----------------------|--------------------|--------------------------------|-----------------|---------------|------------------------------|
| REF | 0,4 | 50,7 | 2,5 | 5,0 | - |
| Crist. X | | 43,2 | 3,1 | 7,1 | -14,7 |
| Crist. Y | | 47,1 | 4,3 | 9,1 | -7,1 |
| Crist. Z | | - | - | - | - |
| SA | | 49,7 | 3,6 | 7,3 | -1,8 |

DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação

Para a idade de 91 dias, pode ser notado que os concretos contendo os aditivos cristalizantes apresentaram menor resistência à compressão, quando comparados ao REF. Da mesma forma, Helene et al. (2018) demonstraram pouca contribuição dos aditivos cristalizantes na resistência à compressão dos concretos, para as mesmas relações a/c, na idade de 91 dias.

Munn et al. (2005) constataram que a adição de 0,8% e 1,2% de aditivo cristalizante não aumentou consideravelmente a resistência à compressão de concretos confeccionados com cimento comum, porém verificaram um aumento da resistência aos 3, 28 e 91 dias, para os concretos produzidos com cimento pozolânico e adição de 1,2% de aditivo cristalizante.

Guignone et al. (2015) observaram em seu trabalho uma elevação da resistência à compressão de 19% e 20%, respectivamente, entre os concretos contendo aditivos cristalizantes e o concreto de referência, para uma relação a/c de 0,45.

O aumento da resistência à compressão proporcionado pela sílica ativa ao longo do tempo já era esperado, visto que a mesma é considerada uma super pozolana eficaz quando utilizada em concretos que necessitam de baixa permeabilidade e alta resistência à compressão (NEVILLE, 2016).

Para a análise da significância das variáveis controláveis, foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA) com fatorial cruzada através da utilização do software Statistica 13 (Tabela 15).

Tabela 15 - Análise da variância (ANOVA) para a resistência à compressão axial

| <i>Efeitos</i> | <i>SQ</i> | <i>GL</i> | <i>MQ</i> | <i>Teste F</i> | <i>p.</i> | <i>Sig.</i> |
|---|-----------|-----------|-----------|----------------|-----------|-------------|
| Cristalizantes e Sílica ativa | 114,48 | 3 | 38,16 | 6,377 | 0,001972 | Sim |
| Idade do concreto | 994,15 | 1 | 994,15 | 166,134 | 0,000000 | Sim |
| Cristalizantes e Sílica ativa *Idade do ensaio | 477,17 | 7 | 68,17 | 11,392 | 0,000001 | Sim |
| Erro | 167,55 | 28 | 5,98 | - | - | - |

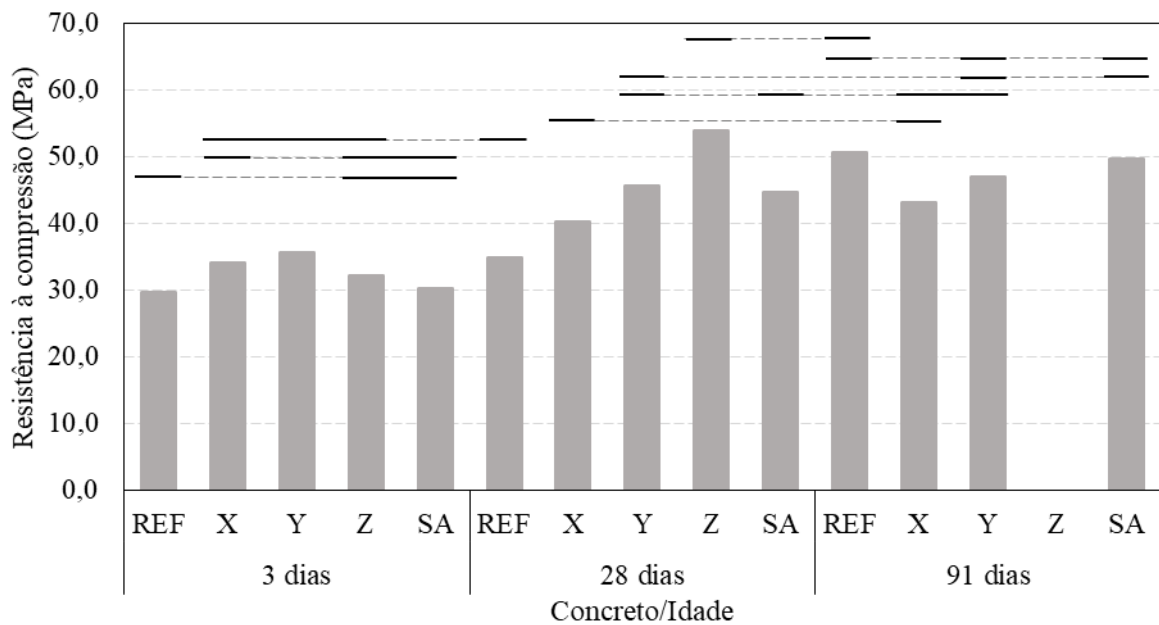
SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade (n-1); SQF: média quadrática; Teste F: valor calculado de F; p: nível de significância; Se $p < 5\%$ = efeito significativo

Fonte: elaborado pela autora.

Nota-se que a influência das variáveis controláveis utilizadas foi considerada estatisticamente significativa, dessa forma, a utilização dos aditivos cristalizantes e da sílica ativa, bem como o acréscimo da idade do concreto fazem diferença quanto aos resultados referentes à resistência à compressão.

Em seguida, realizou-se o Teste de Fischer (LSD) para verificar a significância entre os tipos de concretos, sendo estes comparados ao concreto referência, como pode ser visto na Figura 42.

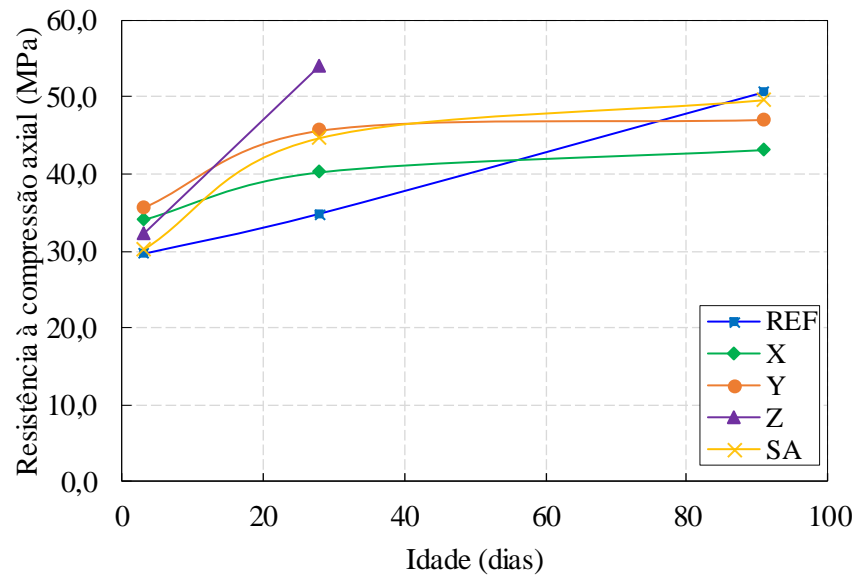
Figura 42 - Teste F de Fischer (LSD) para os resultados de resistência à compressão axial



Fonte: elaborado pela autora.

Conforme pode ser observado na Figura 42, nas idades de 3 e 28 dias, todos os concretos apresentaram crescimento da resistência à compressão axial. Aos 91 dias, os concretos REF e SA apresentaram acréscimo na resistência em relação aos 28 dias, e os concretos com os aditivos cristalizantes X e Y não apresentaram diferença significativa em relação aos 28 dias. A Figura 43 apresenta a influência dos diferentes concretos estudados e as idades de ensaio na resistência à compressão axial.

Figura 43 - Resistência à compressão axial dos concretos ao longo do tempo



Fonte: elaborado pela autora.

4.2 Absorção de água por capilaridade

Os resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade dos corpos de prova de concreto são apresentados na Tabela 16, correspondentes à média dos valores de absorção após 72 horas de ensaio. Os resultados dos demais horários de leitura constam no Apêndice B.

Tabela 16 - Absorção de água por capilaridade média dos concretos com aditivos cristalizantes e sílica ativa

| Material | 28 dias | | | Em relação ao REF (%) | 91 dias | | | Em relação ao REF (%) |
|----------|--|-------------------------|--------|-----------------------|--|-------------------------|--------|-----------------------|
| | Absorção média 72 h (g/cm ²) | DP (g/cm ²) | CV (%) | | Absorção média 72 h (g/cm ²) | DP (g/cm ²) | CV (%) | |
| REF | 0,76 | 0,05 | 6,80 | - | 0,77 | 0,05 | 6,69 | - |
| X | 0,71 | 0,10 | 14,10 | -7 | 0,62 | 0,07 | 11,52 | -24 |
| Y | 0,54 | 0,03 | 6,15 | -41 | 0,54 | 0,04 | 6,79 | -43 |
| Z | 0,67 | 0,10 | 14,64 | -13 | 0,59 | 0,03 | 5,40 | -31 |
| SA | 0,48 | 0,04 | 7,70 | -58 | 0,43 | 0,03 | 6,97 | -79 |

DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação

Fonte: elaborado pela autora.

Para análise da significância da utilização dos aditivos cristalizantes e sílica ativa no concreto, foi realizada uma Análise da Variância (ANOVA) com fatorial cruzada no software Statistica 13, onde se obtiveram os resultados apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 - Análise da variância (ANOVA) para a absorção de água por capilaridade

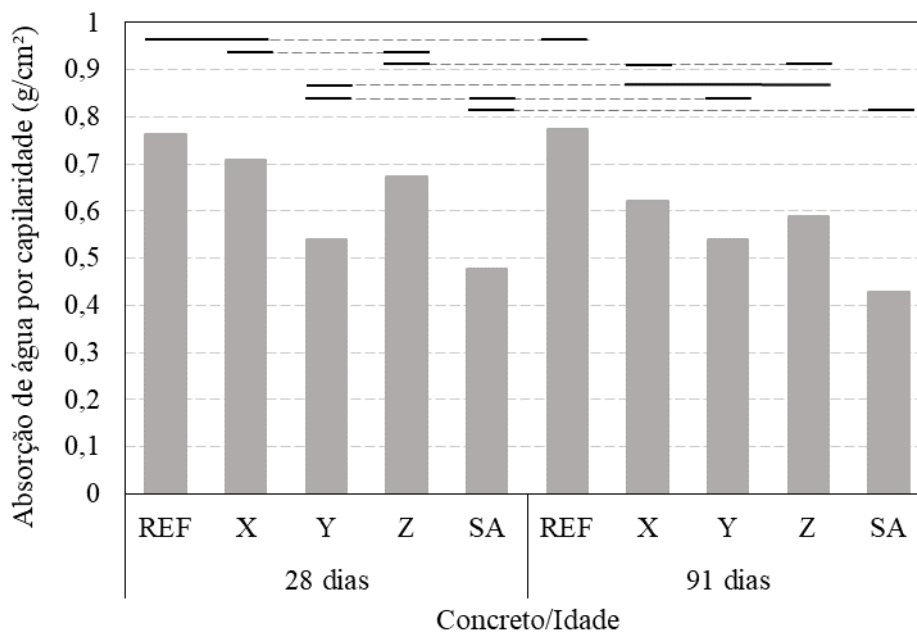
| <i>Efeitos</i> | <i>SQ</i> | <i>GL</i> | <i>MQ</i> | <i>Teste F</i> | <i>p.</i> | <i>Sig.</i> |
|---|-----------|-----------|-----------|----------------|-----------|-------------|
| Cristalizantes e Sílica ativa | 0,46399 | 4 | 0,11600 | 32,345 | 0,000000 | Sim |
| Idade do ensaio | 0,01818 | 1 | 0,01818 | 5,069 | 0,031831 | Sim |
| Cristalizantes e Sílica ativa *Idade do ensaio | 0,01687 | 4 | 0,00422 | 1,176 | 0,341151 | Não |
| Erro | 0,10759 | 30 | 0,00359 | - | - | - |

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

Fonte: elaborado pela autora.

A análise de variância indicou que a utilização dos aditivos cristalizantes e a sílica ativa apresentaram influência significativa na absorção de água por capilaridade dos concretos estudados, assim como a idade da realização do ensaio. Observa-se, no entanto, que a interação entre os materiais e a idade do ensaio mostraram-se não significativos. Em seguida, realizou-se o Teste de Fisher (LSD), para analisar a significância entres tipos de concreto, sendo estes comparados ao concreto referência (Figura 44).

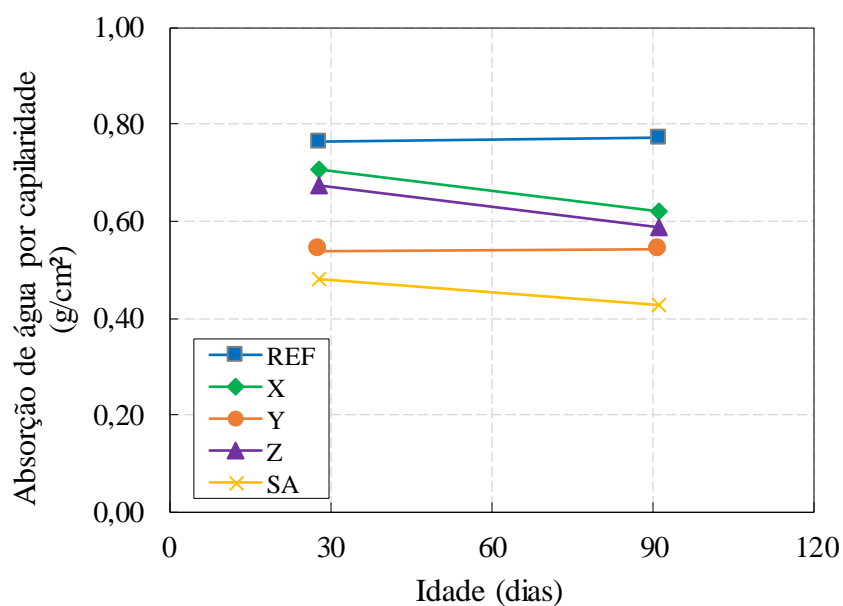
Figura 44 - Teste de Fischer LSD para a absorção de água por capilaridade



Fonte: elaborado pela autora.

Como pode ser observado, os concretos apresentaram resultados estatisticamente iguais nas duas idades de realização do ensaio. Exceções podem ser verificadas para os concretos contendo os aditivos cristalizantes X e Z, que apresentaram menor absorção de água na idade de 91 dias em relação aos 28 dias. A Figura 45 ilustra a interação entre o tipo de concreto e a idade de ensaio e sua influência na absorção de água por capilaridade após 72 horas de ensaio.

Figura 45 - Absorção de água por capilaridade em 72 horas de ensaio, aos 28 e 91 dias



Fonte: elaborado pela autora.

De acordo com Neville (2016), o mecanismo de absorção de água por capilaridade é influenciado tanto pelas características do líquido, como densidade, tensão superficial e viscosidade, como também depende das características do sólido, como a tortuosidade, raio e comunicação entre os poros capilares, ou seja, a absorção de água é mais intensa quanto menores forem os diâmetros dos poros capilares e suas ligações.

Dessa forma, a maior absorção de água por capilaridade observada no REF, para as duas idades, pode estar relacionada com cimento utilizado no presente trabalho. O cimento CII-F possui fíler em sua composição, material este considerado inerte e com finura semelhante ao cimento, que atua na densificação da matriz cimentícia, causando a redução dos tamanhos dos poros capilares, que por sua vez tendem a aumentar a absorção.

Já a adição da sílica ativa se mostrou mais eficiente em comparação aos outros concretos, visto que apresentou uma redução de 58% e 79% da absorção de água por capilaridade aos 28 e 91

dias. Esta redução se deve a menor permeabilidade da matriz cimentícia em função das reações pozolânicas proporcionadas pela sílica ativa, bem como pela quebra da intercomunicação entre os poros devido ao efeito fíler de tal material. Cappellesso et al. (2016) também constataram em seu trabalho que a adição de sílica ativa foi mais eficiente do que o aditivo cristalizante nos resultados de absorção de água por capilaridade.

Em relação ao efeito proporcionado pelos aditivos cristalizantes, é possível observar que ocorreu uma redução da absorção de água por capilaridade nos concretos com estes materiais. Aos 28 dias e em comparação ao REF, os concretos com os aditivos X, Y e Z apresentaram redução de 7%, 41% e 13%, respectivamente.

Aos 91 dias um efeito mais considerável foi observado com a utilização destes materiais, onde a redução da absorção foi de 24%, 43% e 31%. Também é possível perceber que o concreto REF não apresenta uma redução da absorção dos 28 para os 91 dias, indicando que a redução da absorção percebida nos demais concretos é devido principalmente ao efeito dos aditivos cristalizantes utilizados e da sílica ativa.

No estudo realizado por Joa et al. (2015) a utilização de 3% de aditivo cristalizante em argamassas proporcionou uma redução da porosidade e da absorção de água em argamassas. Por outro lado, Hassani et al. (2017) constatou que não houve diferença considerável nos resultados de absorção de água em concretos contendo 1% de aditivo cristalizante aos 28 dias.

4.3 Visualização e determinação da autocicatrização por microscopia ótica

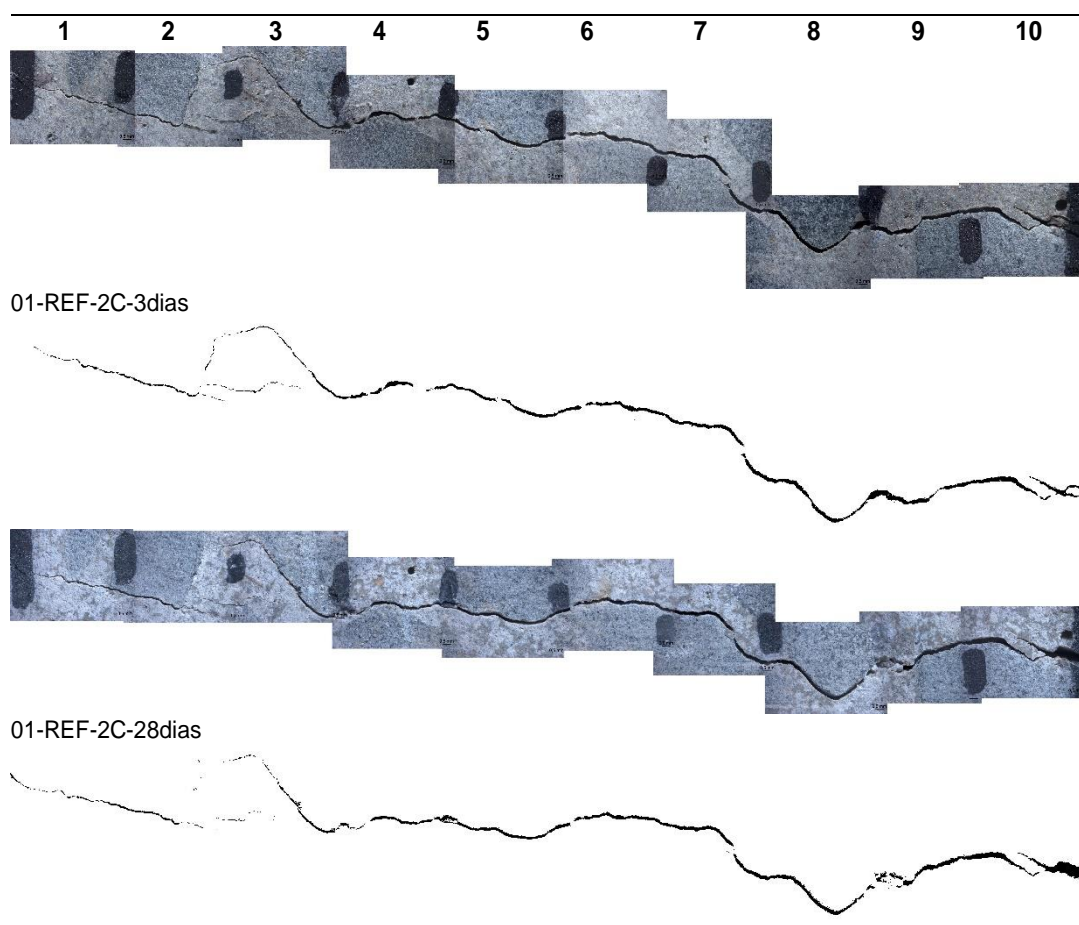
A determinação e visualização da autocicatrização das fissuras foi realizada por imagens obtidas por microscópio ótico, nos mesmos corpos de prova utilizados para o ensaio de difusão de cloretos.

Devido à grande quantidade de imagens e também aos resultados que foram semelhantes para todos os concretos estudados, optou-se em apresentar neste item apenas as imagens que representassem melhor visualização dos resultados, sendo as demais imagens exibidas no Apêndice C.

Primeiramente serão apresentados os resultados referentes ao concreto de Referência (REF). Na Figura 46 está apresentada a combinação para a amostra 01-REF-2C, com espessura média de 0,18mm, aos 3 dias e aos 28 dias, após os 2 ciclos de molhagem/secagem. Nota-se, por

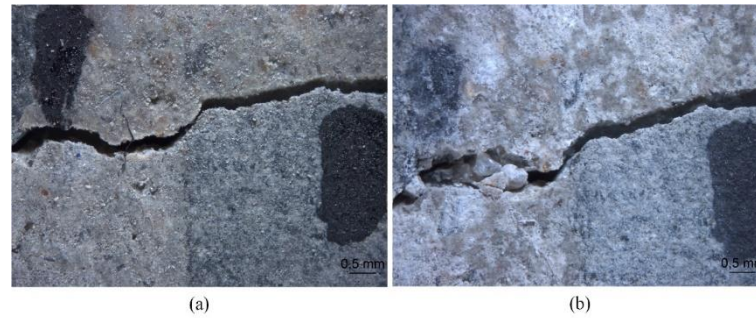
análise visual, que não há formação de produtos de cicatrização junto à fissura em nenhum dos trechos. Fato este pode ser observado na Figura 47, que apresenta uma ampliação da zona 7, aos 3 e 28 dias. Por meio da quantificação por pixel, foi observado aos 28 dias, um aumento de 7,10% na espessura da fissura em relação aos 3 dias. Além disso, pode ser observado um desprendimento de parte da fissura aos 28 dias, em decorrência da lavagem das amostras com a aplicação dos ciclos de molhagem e secagem.

Figura 46 - Acompanhamento por microscopia ótica aos 3 e 28 dias, para a amostra 01 do concreto REF, submetida a 2 ciclos de molhagem/secagem



Fonte: elaborado pela autora.

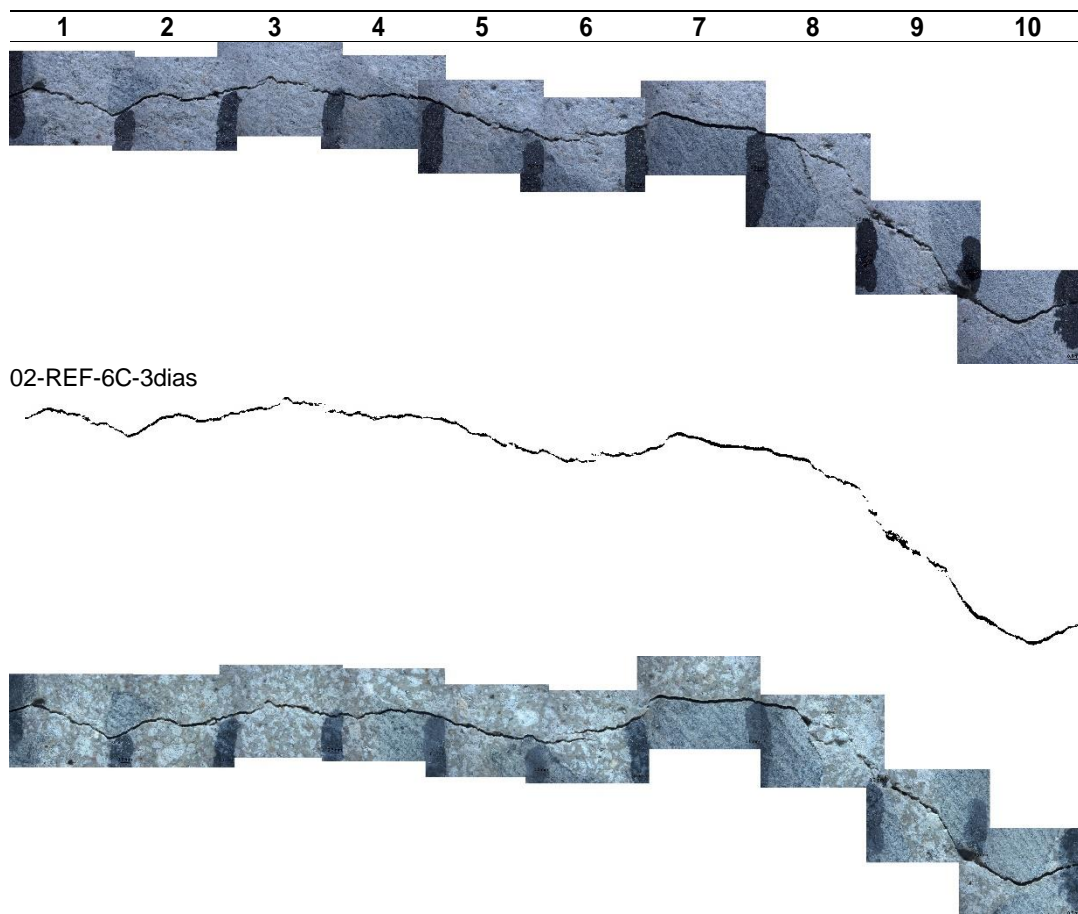
Figura 47 - Imagem de microscopia para a zona 9 do 01-REF-2C (a) 3 dias (b) 28 dias



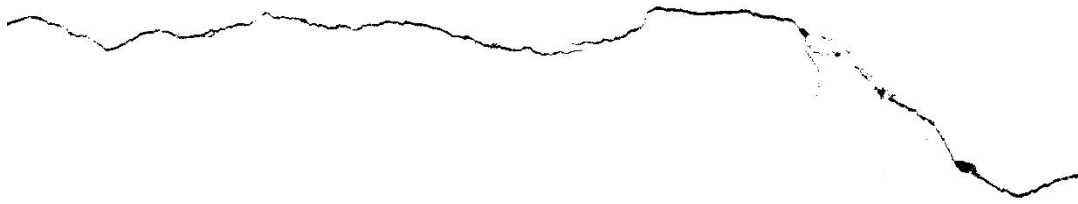
Fonte: elaborado pela autora.

Mesmo comportamento pode ser observado na Figura 48, para a amostra 02-REF-6C, com maior idade e espessura média de 0,16mm, submetida aos 6 ciclos de molhagem e secagem. A partir da quantificação por pixel também foi verificado um aumento da espessura da fissura aos 84 dias, de 3,5%. Na Figura 49 é possível observar esse processo com mais detalhe, podendo ser notado ainda uma alteração da configuração da fissura após a aplicação dos ciclos.

Figura 48 - Acompanhamento por microscopia ótica aos 3 e 84 dias, para a amostra 02 do REF, submetida a 6 ciclos de molhagem/secagem



02-REF-6C-84dias



Fonte: elaborado pela autora.

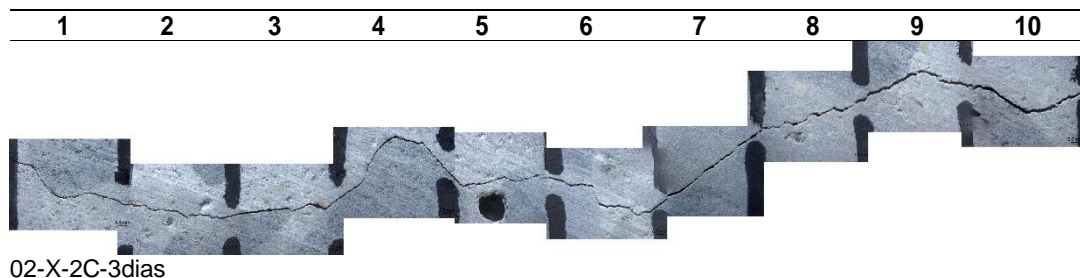
Figura 49 - Imagem de microscopia para a zona 8 do 02-REF-6C (a) 3 dias (b) 84 dias



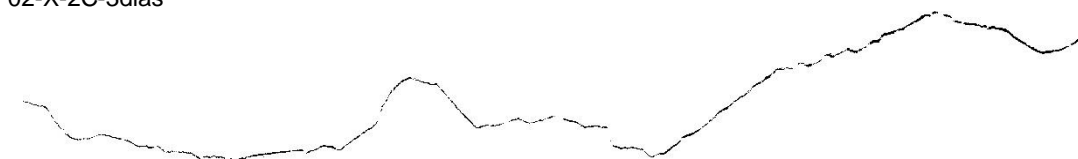
Fonte: elaborado pela autora.

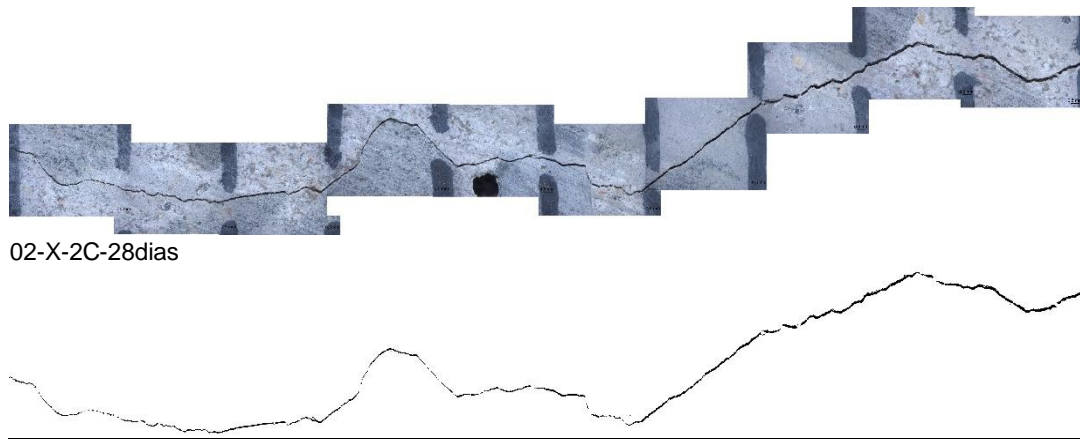
A seguir serão apresentados os resultados do concreto com aditivo cristalizante X. Na Figura 50 está apresentada a combinação para a amostra 02-X-2C, aos 3 e 28 dias, com espessura média de 0,15mm, submetida aos 2 ciclos de molhagem e secagem. Para esta foi observado 10,32 % de aumento da espessura da fissura aos 28 dias, e no destaque do trecho 9 na Figura 51, verifica-se a formação de produtos de hidratação junto à fissura.

Figura 50 - Acompanhamento por microscopia ótica aos 3 e 28 dias, para a amostra 02 do aditivo cristalizante X, submetida a 2 ciclos de molhagem/secagem



02-X-2C-3dias





Fonte: elaborado pela autora.

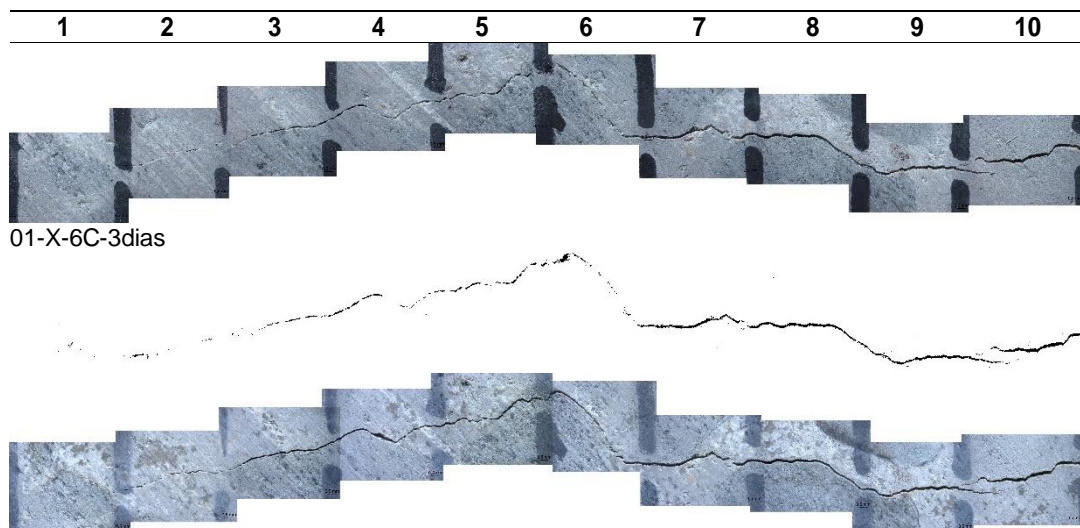
Figura 51 - Imagem de microscopia para a zona 9 do 02-X-2C (a) 3 dias (b) 28 dias



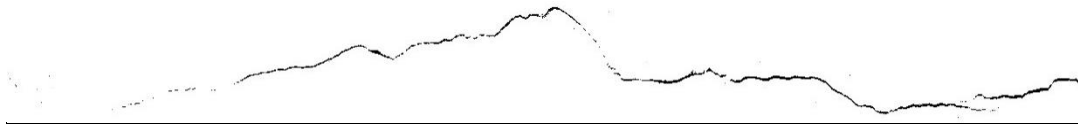
Fonte: elaborado pela autora.

Mesmo comportamento é observado na Figura 52, para a combinação 01-X-6C, com espessura média de 0,12 mm, submetida a 6 ciclos de molhagem e secagem, com uma taxa de aumento da fissura de 4,73 %. Na Figura 53 é dado destaque ao trecho 02 dessa combinação.

Figura 52 - Acompanhamento por microscopia ótica aos 3 e 84 dias, para a amostra 01 do X, submetida a 6 ciclos de molhagem/secagem



01-X-6C-84dias



Fonte: elaborado pela autora.

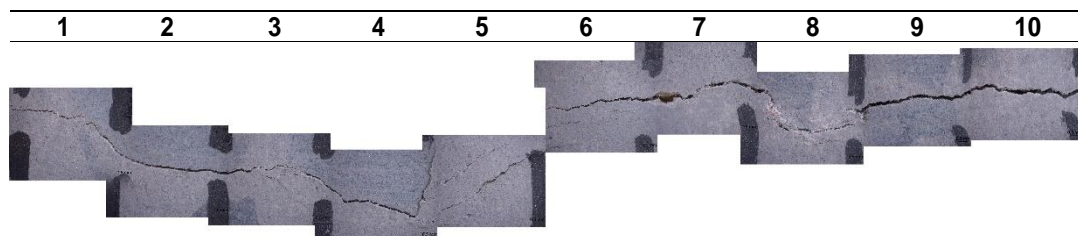
Figura 53 - Imagem de microscopia para a zona 2 do 01-X-6C (a) 3 dias (b) 84 dias



Fonte: elaborado pela autora.

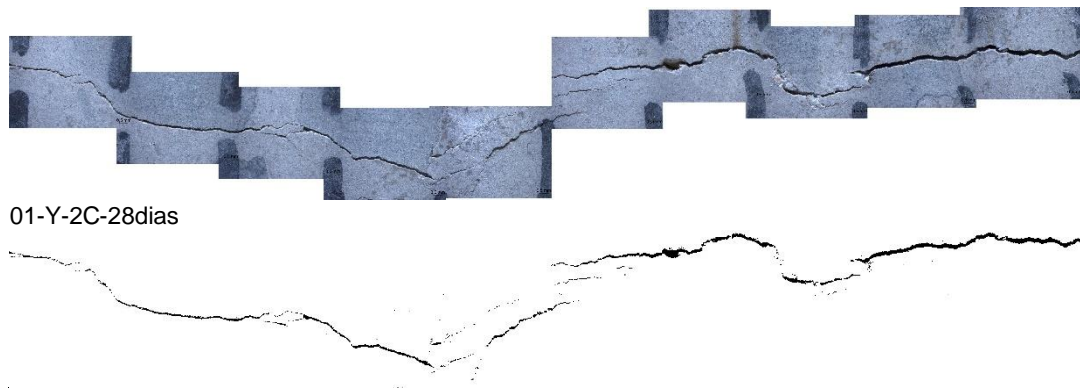
A seguir, os resultados de duas amostras representativas do concreto com aditivo cristalizante Y serão apresentadas. Na Figura 54 está apresentada a combinação para a amostra 01-Y-2C, aos 3 e 28 dias, com espessura média de 0,17mm, e na Figura 55 é dado destaque ao trecho 3. Nessa amostra não é perceptível nenhum produto de hidratação junto à fissura, e através da quantificação por pixel, da mesma forma ocorreu um aumento de 32,43% da espessura da fissura após os 2 ciclos de molhagem e secagem.

Figura 54 - Acompanhamento por microscopia ótica aos 3 e 28 dias, para a amostra 01 do aditivo cristalizante Y, submetida a 2 ciclos de molhagem/secagem



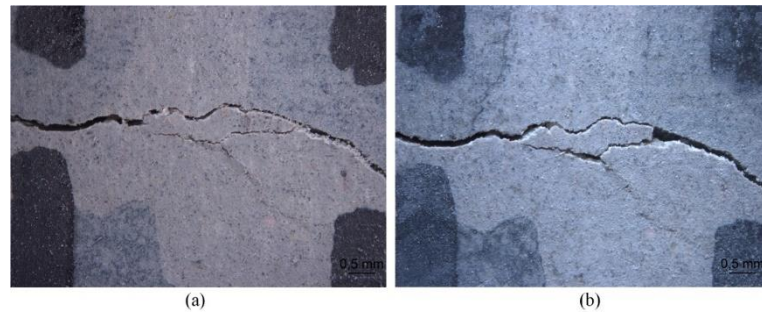
01-Y-2C-3dias





Fonte: elaborado pela autora.

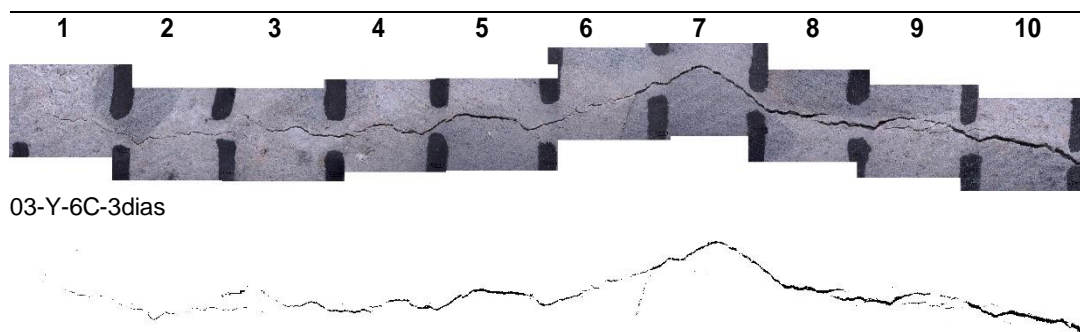
Figura 55 - Imagem de microscopia para a zona 3 do 01-Y-2C (a) 3 dias (b) 28 dias

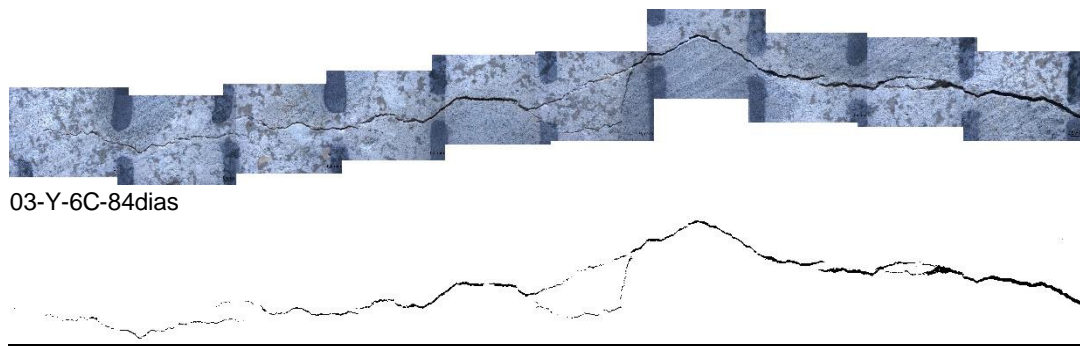


Fonte: elaborado pela autora.

Para o mesmo concreto, porém para a amostra submetida a 6 ciclos de molhagem e secagem, a Figura 56 mostra a combinação 03-Y-6C, aos 3 e 84 dias (6 ciclos), com espessura média de 0,13mm. Nota-se que não é possível verificar fechamento por observação visual, mesmo para a imagem do trecho 2 ampliada na Figura 57 não se percebe produtos carbonatados na superfície da fissura. Por quantificação por pixel, novamente foi verificado um aumento de 16,08% da espessura da fissura aos 84 dias, em relação à quantificação inicial aos 3 dias.

Figura 56 - Acompanhamento por microscopia ótica aos 3 e 84 dias, para a amostra 03 do aditivo cristalizante Y, submetida a 6 ciclos de molhagem/secagem





Fonte: elaborado pela autora.

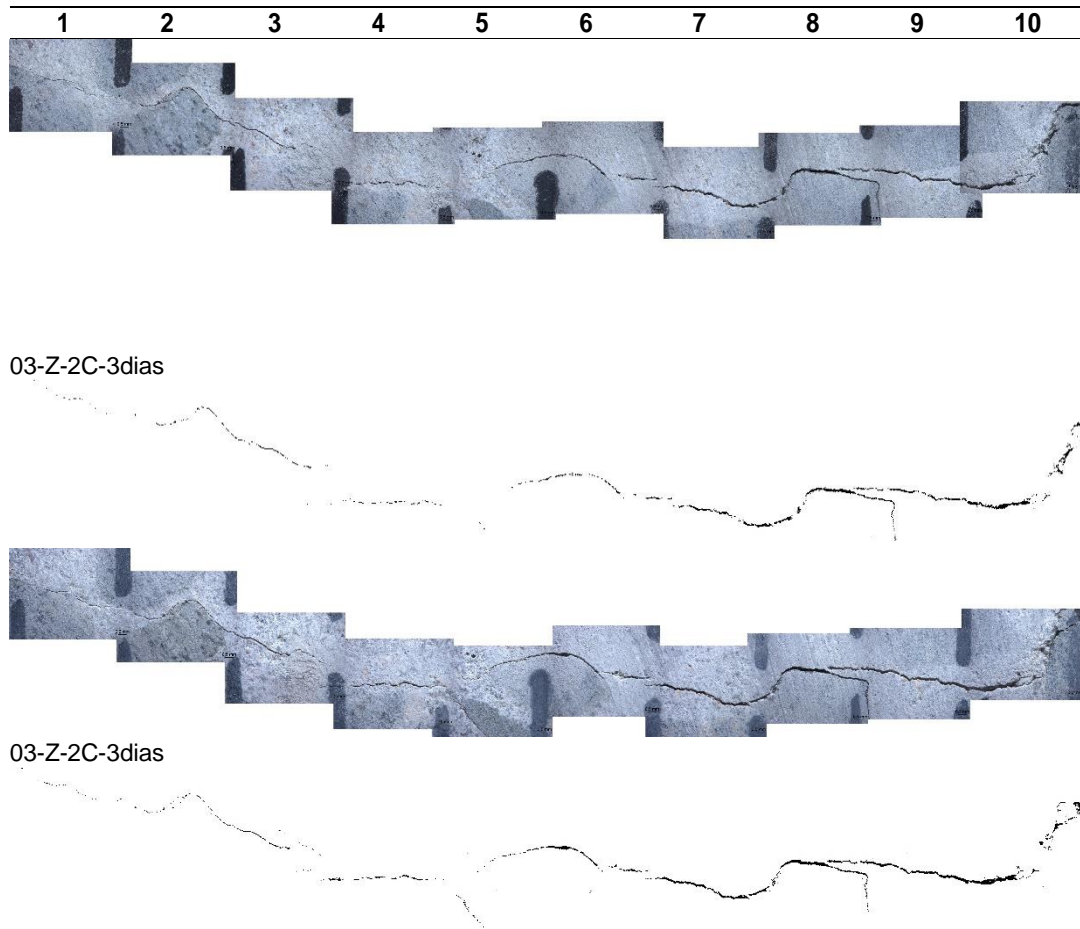
Figura 57 - Imagem de microscopia para a zona 2 do 03-Y-6C (a) 3 dias (b) 84 dias



Fonte: elaborado pela autora.

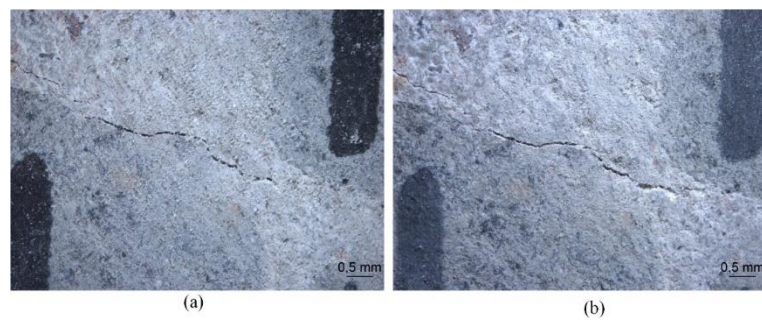
A seguir serão apresentados os resultados obtidos para o concreto com o aditivo cristalizante Z. Na Figura 58 está apresentada a amostra representativa do concreto com o aditivo cristalizante Z, quando submetido a 2 ciclos de molhagem e de secagem, sendo esta amostra nomeada 03-Z-2C, aos 3 e 28 dias, com espessura média de 0,11mm. Para esta combinação não fica evidente fechamento da fissura por produtos de autocicatrização, nem mesmo para a faixa mais estreita da fissura do trecho 1 da imagem, com 0,024mm, conforme mostra a Figura 59. Além disso, foi verificado um aumento da espessura total da fissura em 22,34 % em relação à quantificação inicial, como mostrado na Figura 60.

Figura 58 - Acompanhamento por microscopia ótica aos 3 e 28 dias, para a amostra 03 do aditivo cristalizante Z, submetida a 2 ciclos de molhagem/secagem



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 59 - Imagem de microscopia para a zona 1 do 03-Z-2C (a) 3 dias (b) 28 dias



Fonte: elaborado pela autora.

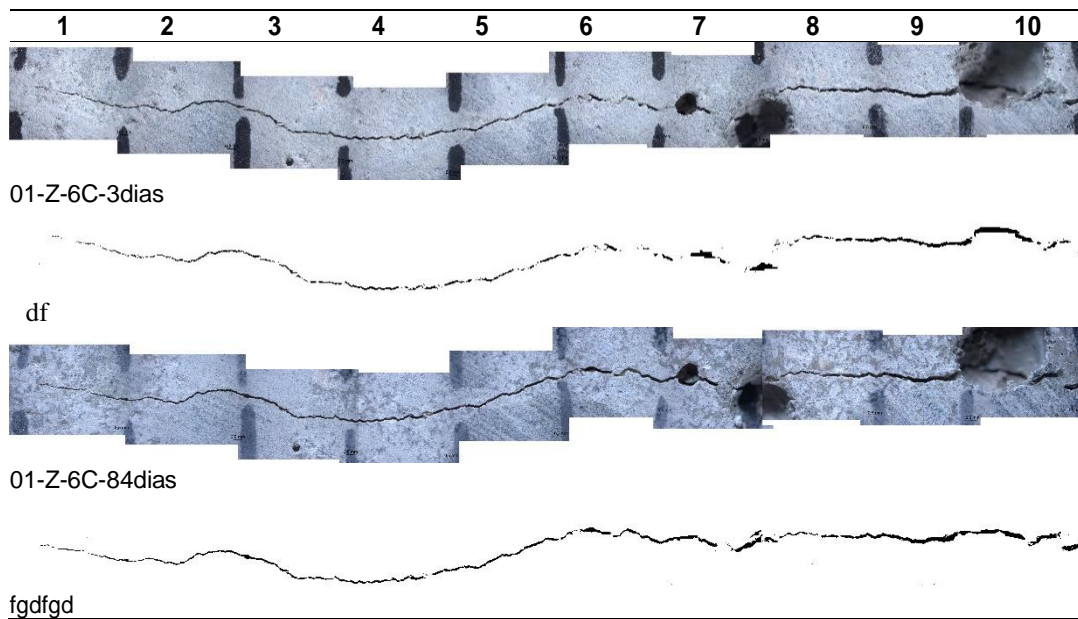
Figura 60 - Imagem de microscopia para a zona 6 do 03-Z-2C (a) 3 dias (b) 28 dias



Fonte: elaborado pela autora.

A Figura 61 apresenta a combinação para a amostra 01-Z-6C, aos 3 e 84 dias, exposta aos 6 ciclos de molhagem e secagem, com espessura média de 0,12mm, sendo visualizado apenas um aumento da espessura da fissura em 22,27%, conforme mostrado na Figura 62.

Figura 61 - Acompanhamento por microscopia ótica aos 3 e 84 dias, para a amostra 01 do Z, submetida a 6 ciclos de molhagem/secagem



Fonte: elaborado pela autora.

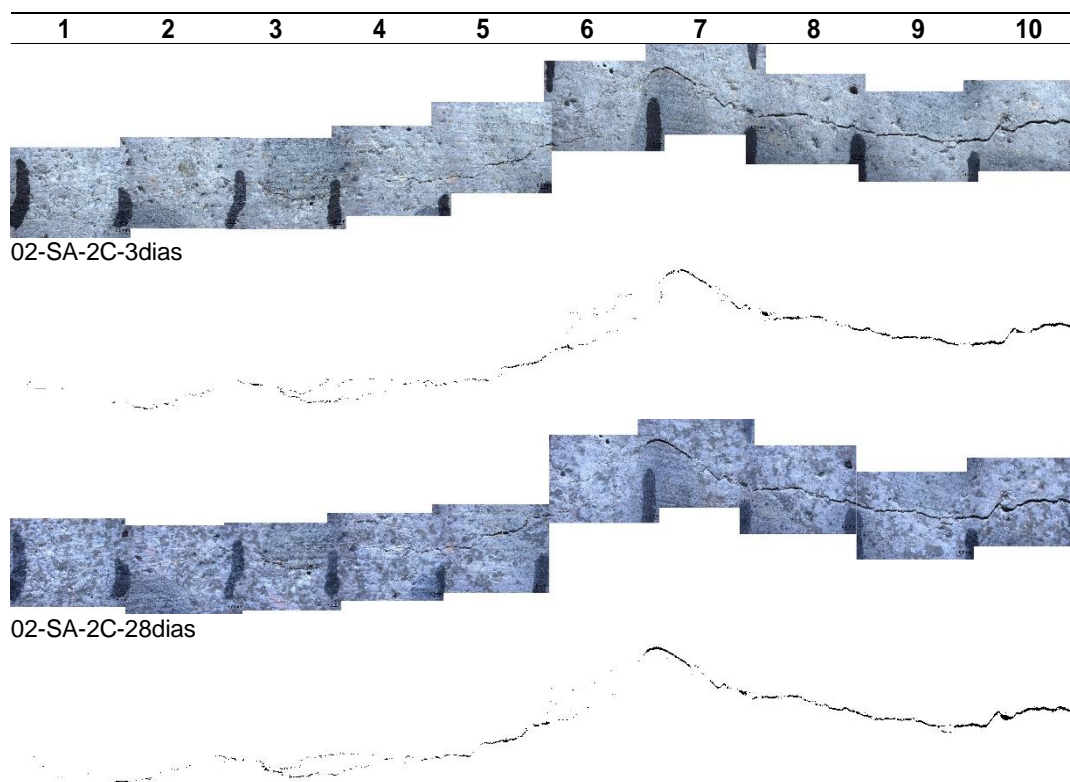
Figura 62 - Imagem de microscopia para a zona 6 do 01-Z-6C (a) 3 dias (b) 84 dias



Fonte: elaborado pela autora.

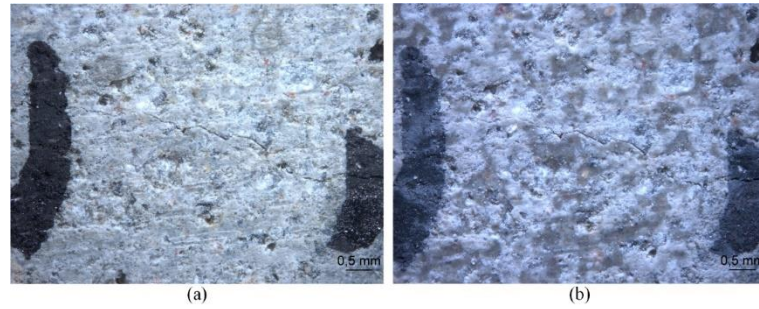
A seguir, os resultados do concreto com sílica ativa (SA) serão apresentados. Na Figura 63 está apresentada a combinação da amostra 02-SA-2C, com espessura média de 0,10mm, que representa as demais amostras do concreto com sílica ativa aos 3 e 28 dias, quando aplicados os 2 ciclos de molhagem e secagem. Nesta não se observa fechamento da fissura ao longo do tempo por produtos de autocicatrização, nem mesmo na faixa mais estreita da fissura, na zona 1 (Figura 64), sendo verificado apenas um aumento da espessura total em 15,73% em relação aos 3 dias.

Figura 63 - Acompanhamento por microscopia ótica aos 3 e 28 dias, para a amostra 02 da SA, submetida a 2 ciclos de molhagem/secagem



Fonte: elaborado pela autora.

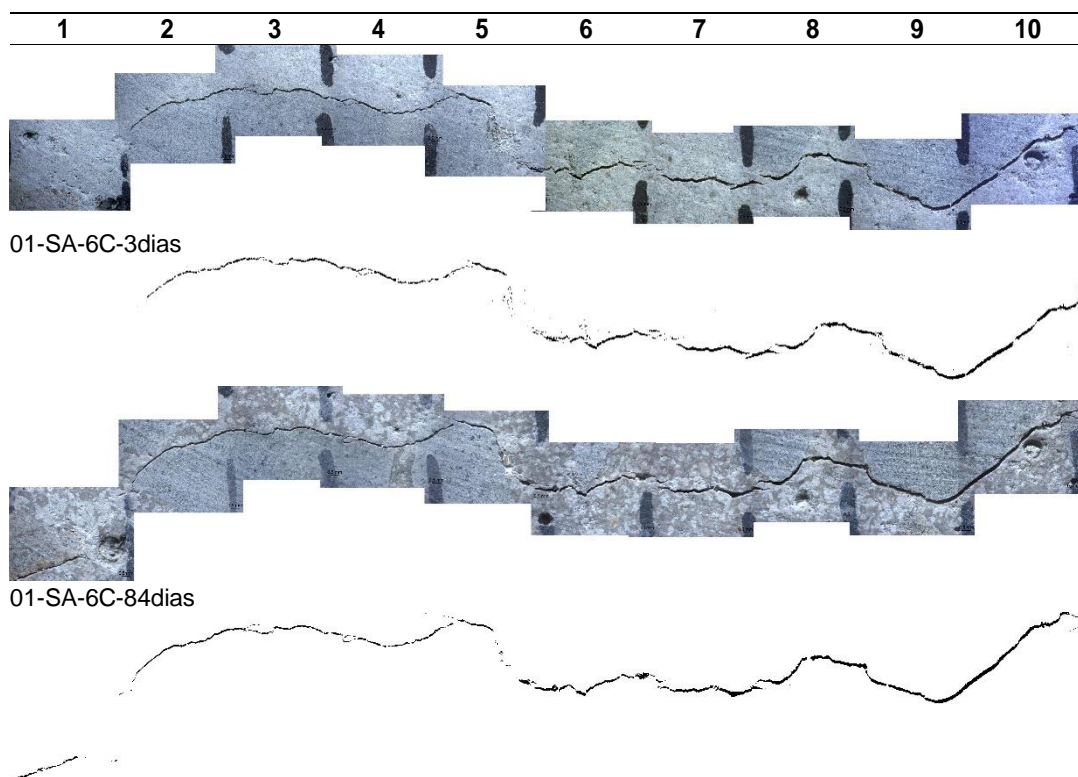
Figura 64 - Imagem de microscopia para a zona 1 do 02-SA-2C (a) 3 dias (b) 28 dias



Fonte: elaborado pela autora.

Da mesma forma, para a combinação da amostra 01-SA-6C (Figura 65), a análise visual não permite observar alterações de fechamento da fissura aos 84 dias, nem mesmo em maior destaque conforme apresentada na Figura 66. Na quantificação por pixel foi observado um aumento de 8,46 % na espessura da fissura, comportamento semelhante ao das amostras de concreto com sílica ativa aos 2 ciclos de molhagem e secagem.

Figura 65 - Acompanhamento por microscopia ótica aos 3 e 84 dias, para a amostra 01 do SA, submetida a 6 ciclos de molhagem/secagem



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 66 - Imagem de microscopia para a zona 5 do 01-SA-6C (a) 3 dias (b) 84 dias



Fonte: elaborado pela autora.

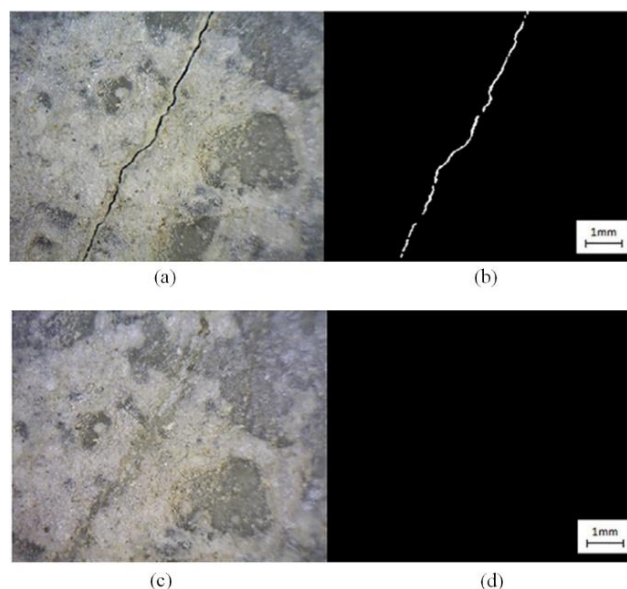
Conforme pôde ser observado nos resultados anteriormente apresentados, foi verificado um aumento das espessuras das fissuras, para todos os tipos de concretos estudados, nas diferentes idades e ciclos de molhagem/secagem aplicados.

Um dos fatores relacionados a esse aumento está na quantificação da fissura por pixels. Para todos os casos, essa quantificação se mostrou menor aos 3 dias, e maior após os ciclos de molhagem/secagem. Conforme mostrado nas imagens mais detalhadas anteriormente, a presença dos resquícios visíveis ao olho nu junto às bordas da fissura fez com que essa quantificação da espessura parecesse menor superficialmente aos 3 dias.

Com a aplicação dos ciclos de molhagem e secagem, estes resquícios foram removidos, ocasionado em uma maior quantidade de pixels da fissura, ou seja, observou-se um aumento da fissura ao longo do tempo e em relação a quantificação inicial. Dessa forma, a autocicatrização de uma fissura precisa ser superior aos finos soltos gerados no corte dos corpos de prova para ser percebida pela quantificação por pixel.

No entanto, essa influência de sujidade sobre os resultados de microscopia ótica não é percebida quando as amostras não passam pelo processo de corte e são moldadas diretamente nas dimensões em que serão usadas. Nesse sentido, Cuenca et al. (2018) avaliaram a autocicatrização de fissuras em concretos com aditivos cristalizantes através da análise de imagem. Os autores conseguiram avaliar e quantificar o fenômeno da autocicatrização, pois aplicaram o ensaio em corpos de prova que não apresentavam sujidade superficial na primeira coleta das imagens. Na Figura 67 é possível observar uma fissura logo após sua abertura (a) e sua quantificação por pixel (b), e a mesma posteriormente autocicatrizada (c) e (d).

Figura 67 - Imagem de microscopia ótica em fissura sem sujidade superficial (a) logo após a abertura da fissura (a) com sua quantificação por pixel (b) e após a sua autocicatrização (c) e posterior quantificação (d).



Fonte: CUENCA et al. (2018).

Com a utilização dos aditivos cristalizantes era esperado uma nítida autocicatrização na maior parte das amostras, inclusive para maiores espessuras de fissuras. No entanto um fator considerado influente nessa baixa formação de produtos de cicatrização foi a carência de umidade, visto que os concretos foram expostos a condições predominantemente secas, onde cada ciclo era formado por apenas 2 dias de molhagem, e 14 dias de secagem.

Fato este que vai ao encontro dos resultados obtidos por Roig-Flores et al. (2015), que analisaram a autocicatrização de fissuras em concretos com aditivos cristalizantes em quatro condições de exposição, concluindo que as taxas de autocicatrização foram superiores nas situações em que o concreto esteve submerso. Além disso, os autores atribuem à água a principal responsabilidade em promover o mecanismo da autocicatrização de fissuras, enquanto que a pior situação é atribuída à exposição ao ar. Resultados também observados por Ferrara et al. (2014) e Krelani e Ferrara (2013).

Por outro lado, os ciclos de molhagem e secagem podem se mostrar efetivos em promover a autocicatrização de fissuras, quando o período de imersão das amostras for maior ou igual ao período de secagem aplicado. Nesse sentido, Maes et al. (2016) investigaram a autocicatrização de fissuras em argamassas de cimento Portland sob ciclos de molhagem/secagem, com duração de 12 horas cada. Neste estudo a cura em ciclos de molhagem e secagem apresentou selamento completo das fissuras menores que 0,15 mm após 7 ciclos.

Sisomphon et al. (2013), ao examinarem amostras de concreto com aditivos cristalizantes quando submetidos a diferentes ambientes de exposição, observaram que ciclos de molhagem e secagem com duração de 12 horas cada se mostrou mais favoráveis ao processo de autocicatrização.

Reddy e Ravitheja (2019) avaliaram a capacidade de autocicatrização de fissuras em concretos contendo aditivos cristalizantes, por microscopia ótica. Os autores observaram o selamento superficial completo das fissuras em amostras submetidas a ciclos de molhagem e secagem com duração de 3,5 dias cada.

Assim como os concretos com aditivos cristalizantes, o concreto com a sílica ativa também não teve evidência de autocicatrização superficial das fissuras. Isso se deve ao fato de que o hidróxido de cálcio que seria lixiviado, preenchendo a fissura superficialmente, foi consumido pela reação pozolânica da sílica ativa no interior da matriz cimentícia.

Comportamento semelhante foi verificado por Cappellesso (2018), ao perceber menor capacidade autocicatrizante de fissuras em concretos produzidos com cimento CPIV, em função deste conter pozolana em substituição ao clínquer, resultando no consumo de Ca(OH)_2 , e conseqüentemente, redução de carbonatos na superfície das fissuras. Além disso, a autora menciona que mesmo a lixiviação do Ca(OH)_2 junto à fissura ser importante no processo da autocicatrização devido à formação do CaCO_3 , se a espessura da fissura for muito grande, ou mesmo demorar para ser autocicatrizada, a perda por lixiviação durante os ciclos se torna mais predominante do que a precipitação do CaCO_3 .

Uma das principais causas da autocicatrização autógena de fissuras está relacionada à formação de CaCO_3 junto à abertura da fissura, em decorrência da lixiviação do Ca(OH)_2 , sendo este processo dependente da temperatura, do pH e da concentração dos reagentes (DE ROOIJ et al., 2013).

Conforme pode ser observado nas imagens apresentadas, em todos os concretos não é possível observar a formação de CaCO_3 em função da lixiviação do Ca(OH)_2 . Como mencionado anteriormente, este fato pode estar fortemente relacionado ao curto período de molhagem para as reações de hidratação do cimento e dos aditivos cristalizantes. Contudo, também pode estar relacionado às baixas temperaturas do inverno (mínima de aproximadamente 2°C) que os concretos foram expostos durante os ciclos de molhagem/secagem, retardando as reações de hidratação, visto que estes ciclos foram aplicados no período de inverno e a câmara de ciclagem

não possuía controle de temperatura e umidade. Fato este que vai ao encontro dos resultados obtidos por Reinhardt e Jooss (2003), que avaliaram que o fenômeno da autocicatrização de fissuras é acelerado em maiores temperaturas.

Diante do exposto, verifica-se que externamente não foi possível observar o fenômeno de autocicatrização das fissuras. Este fato pode ser corroborado através dos resultados do ensaio de difusão de cloretos que serão apresentados no item a seguir. A partir destes, é possível observar que possivelmente os aditivos cristalizantes continuaram a reagir a partir do contato direto com a água durante o ensaio, e dessa forma atuaram na redução das espessuras das fissuras e conseqüente redução da passagem de cloretos. Para Pazderka e Hájková (2016), as reações de hidratação dos aditivos cristalizantes só são ativadas quando o concreto atingir um nível suficiente de umidade.

4.4 Difusão de cloretos

Outra maneira de avaliar a autocicatrização dos concretos estudados foi através do ensaio de difusão de cloretos. O íon cloreto possui pequena dimensão e, portanto, tem grande importância em auxiliar na verificação da capacidade de estanqueidade dos concretos contendo os aditivos cristalizantes e sílica ativa, em impedir a entrada de agentes agressivos na matriz cimentícia. O ensaio foi realizado em amostras íntegras, e também com amostras fissuradas, após 2 e 6 ciclos de molhagem e secagem.

O ensaio foi realizado sem a aplicação de uma diferença de potencial entre as células, de forma a simular uma condição real de exposição aos concretos, onde os resultados foram obtidos a partir da coleta de amostras ao longo do tempo.

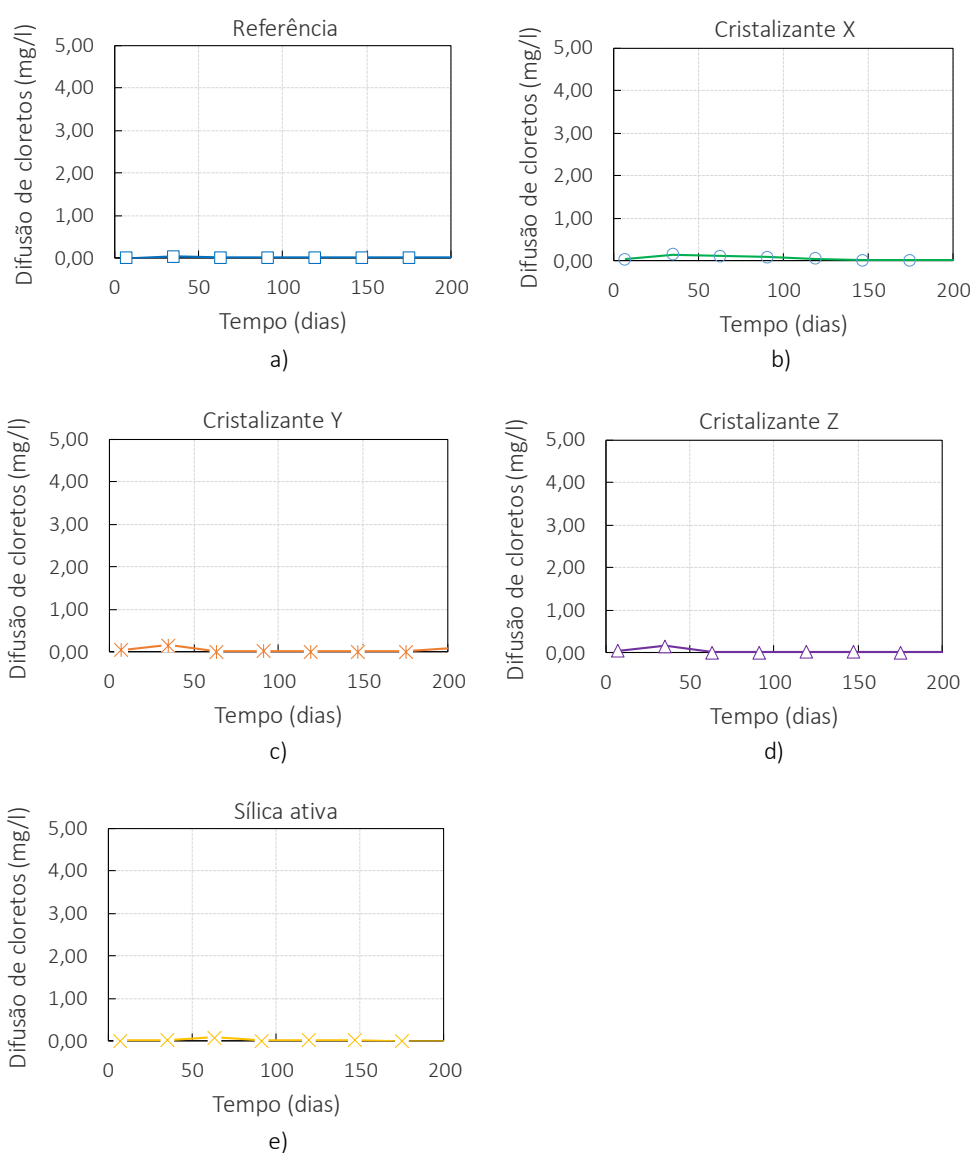
Dessa forma, neste item serão apresentados os resultados obtidos no ensaio de difusão de cloretos, tanto para as amostras sem fissuras, como também para as fissuradas. Para estas duas condições o ensaio foi iniciado em duas idades, após 2 (28 dias) e 6 (84 dias) ciclos de molhagem e secagem.

4.4.1 Difusão de cloretos nos corpos de prova sem fissura

Na Figura 68 ilustra-se a concentração de cloretos passantes nos cinco tipos de concretos ensaiados, sendo estas as amostras não fissuradas e submetidas aos 2 ciclos de molhagem/secagem, com o início do ensaio de difusão aos 28 dias. Observa-se, para todos os

concretos um mesmo comportamento, ou seja, a passagem de cloretos não ocorreu ao longo do tempo.

Figura 68 - Difusão de cloretos, para as amostras não fissuradas, com 28 dias para os diferentes tipos de adição



Fonte: elaborado pela autora.

Os dados obtidos mostram que a baixa relação água/aglomerante (0,40) utilizada neste trabalho teve grande influência em dificultar a passagem dos cloretos pelo concreto, podendo até ser impossibilitada. Essa baixa relação água/aglomerante tende a formar uma matriz cimentícia densa, com baixa porosidade e interconexões bloqueadas, de modo a dificultar a passagem dos agentes agressivos e garantir maior durabilidade às estruturas de concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Oliveira (2019) em seu trabalho avaliou a penetração de cloretos em compósitos cimentícios contendo aditivos cristalizantes, e observou um aumento de aproximadamente 18% na resistência à penetração de cloretos nas amostras de referência, em decorrência exclusivamente da redução da relação a/c de 0,60 para 0,55.

A redução da porosidade da matriz também foi intensificada devido à utilização dos aditivos cristalizantes. As reações de hidratação destes materiais se propagam por toda a matriz, de forma a criar um sistema impermeável à água e a outras substâncias agressivas do ambiente externo, além de formar precipitados bloqueadores de poros (FERRARA, 2018). Já a melhora da microestrutura do concreto pela utilização da sílica ativa está relacionada ao seu efeito pozolânico (químico), bem como o efeito fíler (físico) das partículas (NEVILLE, 2016).

Tendo em vista o mesmo comportamento para todos os concretos ensaiados, a análise e comparação dos efeitos dos aditivos cristalizantes e da sílica ativa em promover uma maior estanqueidade à passagem de cloretos foi dificultada através do ensaio de difusão. Porém, em estudos que analisam concretos com maior relação água/aglomerante e conseqüentemente, maior porosidade, a atuação destes materiais possivelmente poderá ser percebida com maior facilidade. Além disso, o ensaio de difusão natural aplicado neste trabalho, em amostras íntegras, necessita de uma maior demanda de tempo para a sua realização e apresentação de resultados mais notáveis.

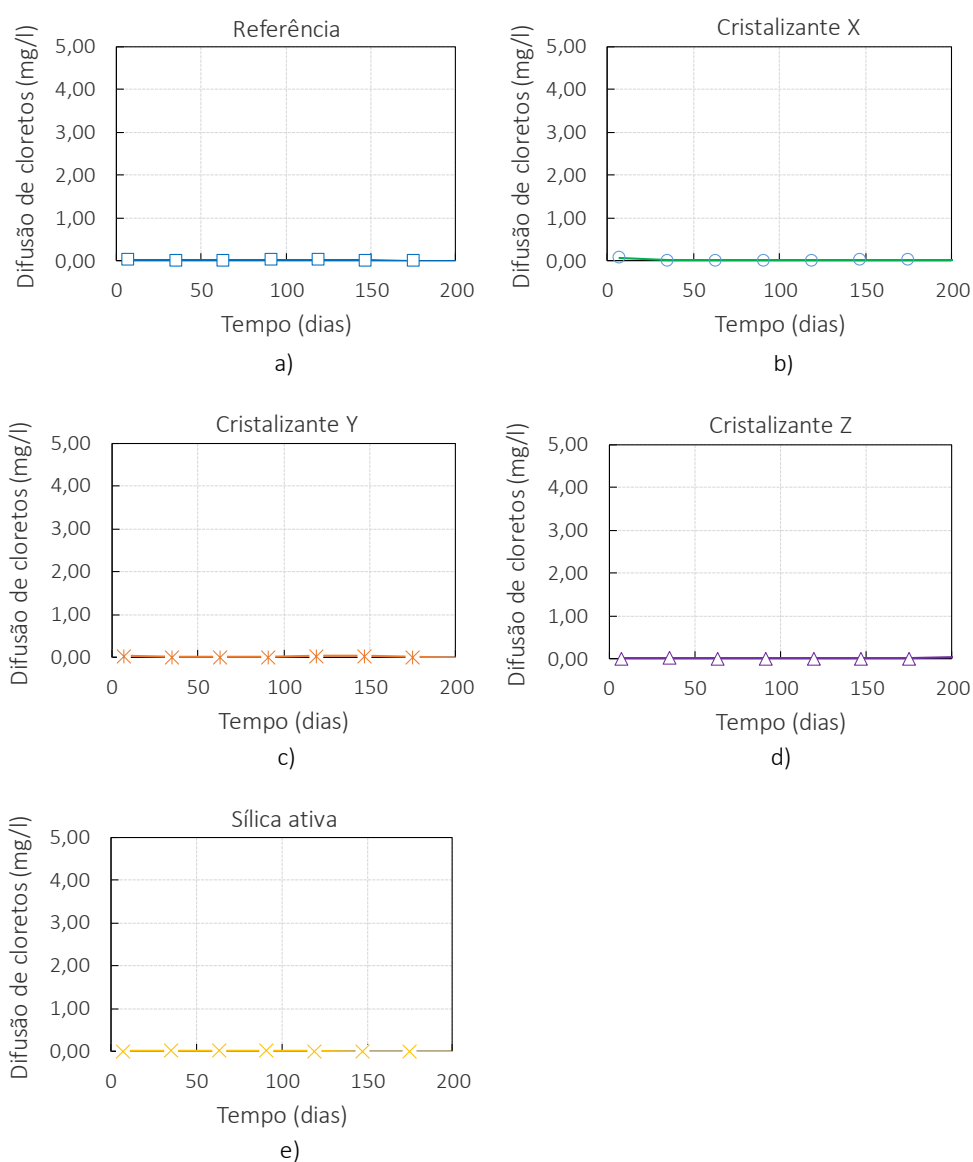
Nestas circunstâncias, de toda forma, pesquisas tem analisado a influência dos aditivos cristalizantes e da sílica ativa através de outros métodos de ensaio, que também avaliam a permeabilidade de concretos quanto à passagem de cloretos. Nesse sentido, Cappellesso (2016) avaliou a redução da permeabilidade de concretos com relação água/aglomerante de 0,41, contendo aditivos cristalizantes e sílica ativa. A autora verificou que o concreto com adição de cristalizante teve uma redução de 29% na permeabilidade em relação ao concreto de referência, enquanto a sílica ativa se mostrou mais eficiente, com uma redução de 75%.

Helene et al. (2018) avaliaram a estanqueidade de concretos à passagem de cloretos, utilizando a relação a/c 0,45 e aditivos cristalizantes. Os resultados demonstraram que a utilização dos aditivos cristalizantes resultou em uma redução de 30% na passagem de cloretos em comparação ao concreto de referência. Além disso, os autores também associaram esse resultado com a cura submersa dos concretos e o cimento utilizado (CP III 40-RS).

Por outro lado, Bianchin (2018) verificou em seu estudo que os concretos com os aditivos cristalizantes mantiveram um comportamento similar ao concreto referência para todas as idades e relações água/aglomerante testadas, quando submetidos ao ensaio de penetração de cloretos.

Na Figura 69 pode ser observado que resultados semelhantes foram obtidos para os concretos não fissurados, quando expostos a 6 ciclos de molhagem e secagem, tendo o início do ensaio de difusão aos 84 dias.

Figura 69 - Difusão de cloretos, para as amostras não fissuradas, com 84 dias para os diferentes tipos de adição



Fonte: elaborado pela autora.

Conforme pode ser observado, a passagem de cloretos pelos concretos também não ocorreu ao longo do tempo. A maior densificação das matrizes cimentícias e conseqüentemente, uma maior estanqueidade à passagem dos cloretos foi, possivelmente, mais acentuada devido a maior idade dos concretos para o início do ensaio de difusão, bem como o maior número de ciclos (6) de molhagem e secagem aplicados aos concretos.

Azarsa et al. (2019) destacam que à medida que o concreto envelhece, a resistência à passagem de cloretos aumentou devido a maior hidratação do cimento. Enfatizaram a dependência da resistividade à entrada de agentes agressivos com as propriedades da microestrutura interna do concreto.

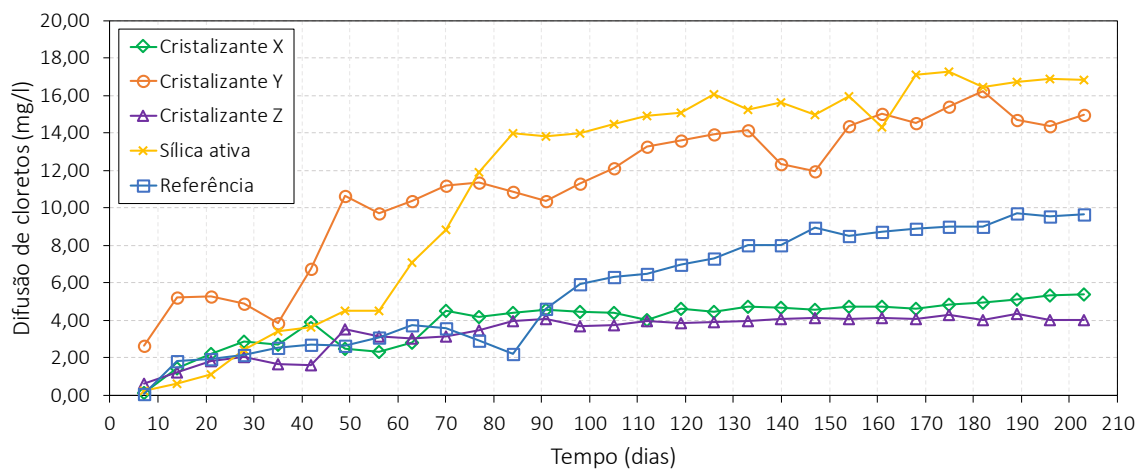
Além disso, o processo de autocatrização da matriz cimentícia se intensificou com a aplicação dos ciclos de molhagem e secagem. No período de imersão têm-se a hidratação tardia dos grãos anidros após o período normal de cura, bem como a ativação dos aditivos cristalizantes quando presentes na matriz cimentícia, enquanto que a formação do carbonato de cálcio é notada no ciclo de secagem (SNOECK e DE BELIE, 2015).

Por fim, com o objetivo de avaliar em maiores idades o comportamento dos aditivos cristalizante e da sílica ativa quanto à estanqueidade à passagem de cloretos, tomou-se a decisão de dar continuidade ao ensaio de difusão.

4.4.2 Difusão de cloretos nos corpos de prova com fissura

Na Figura 70 estão apresentados os resultados obtidos para a difusão de cloretos, para os diferentes tipos de concretos estudados, sendo estas as amostras com fissura e submetidas aos 2 ciclos de molhagem e secagem, com o início do ensaio de difusão aos 28 dias.

Figura 70 - Difusão de cloretos, para as amostras com fissura, com 28 dias para os diferentes tipos de adição



Fonte: elaborado pela autora.

Pode ser observado, que entre os aditivos cristalizantes, X e Z apresentaram a menor passagem de cloretos ao longo do tempo. O aditivo cristalizante Y teve o pior resultado ao longo de todo o ensaio, ou seja, possibilitou uma maior passagem de cloretos ao longo do tempo, mostrando-se inferior inclusive ao desempenho do concreto REF. Este resultado apresentado pelo cristalizante Y pode estar relacionado a sua maior granulometria, de forma a retardar as reações de hidratação desse material antes do início do ensaio de difusão. De acordo com Shabab et al. (2013), a característica do grão influencia as reações de hidratação do material. Quanto maior for a área superficial da partícula, ou seja, quanto mais fino for o material, mais rápido ocorrerão as suas reações químicas e o crescimento de cristais de C-S-H junto à fissura e no interior da matriz cimentícia, de modo a criar uma barreira à passagem dos agentes agressivos.

De maneira inesperada nota-se um pior desempenho do concreto com SA. O benefício da sílica ativa é conhecido por seu efeito pozolânico e microfíler proporcionado, que resulta em uma microestrutura mais fechada e densa, de modo a dificultar a entrada de cloretos para o interior da matriz cimentícia (NEVILLE, 2016).

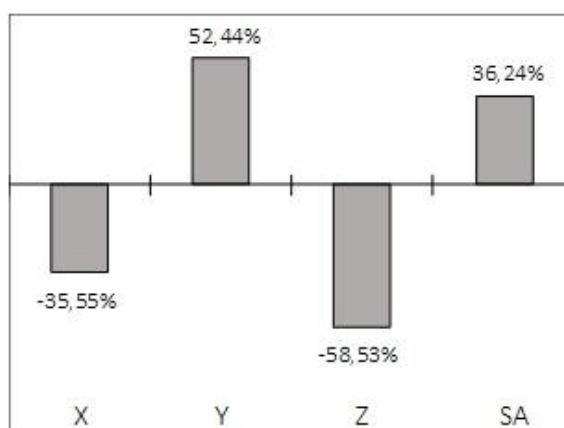
Nesse sentido, BORG et al. (2018) avaliaram a capacidade de autocicatrização de fissuras em concreto, com aditivos cristalizantes e sílica ativa como agentes facilitadores de autocicatrização, quando expostas em ambientes ricos em cloretos. Para os concretos contendo sílica ativa, os autores verificaram um aumento na capacidade de autocicatrização de fissuras com até 0,15 mm de espessura, quando expostos a uma imersão contínua ou a ciclos de

molhagem/secagem com 12h cada. No entanto, a alta reatividade hidrofílica dos aditivos cristalizantes atribuiu a estes materiais o melhor desempenho para a maioria das condições de exposição investigadas, e até mesmo para a vedação de fissuras com até 0,3 mm de espessura.

No mesmo sentido, Jaroenratanapirom e Sahamitmongkol (2011) investigaram a capacidade de autocicatrização de fissuras em argamassas com aditivos cristalizantes e sílica ativa, quando fissuradas aos 3 e 28 dias. Para fissuras com até 0,05 mm de espessura, a argamassa com mistura cristalina apresentou o melhor desempenho autocicatrizante, para as duas idades de abertura de fissuras (3 e 28 dias). Nessa faixa de espessura e para fissuras abertas aos 3 dias, os autores verificaram que a argamassa com sílica ativa necessitou de 7 dias a mais para o fechamento completo das fissuras. No entanto, para fissuras com até 0,3 mm, a argamassa com sílica ativa teve melhor desempenho na capacidade autocicatrizante, principalmente quando a fissura foi gerada aos 28 dias de idade.

A Figura 71 apresenta a porcentagem de redução ou aumento da passagem de cloretos pelos concretos com os aditivos cristalizantes e a SA, em relação ao concreto REF. Conforme pode ser observado, os cristalizantes X e Z apresentaram uma redução de 35,55% e 58,53%, respectivamente, enquanto que o cristalizante Y apresentou um aumento dessa passagem ao longo do tempo em 52,44%. A SA também não apresentou bons resultados, tendo um aumento de 36,24% em relação ao REF.

Figura 71 - Comportamento da difusão de cloretos em amostras fissuradas, aos 2 ciclos de molhagem/secagem, em relação ao concreto REF

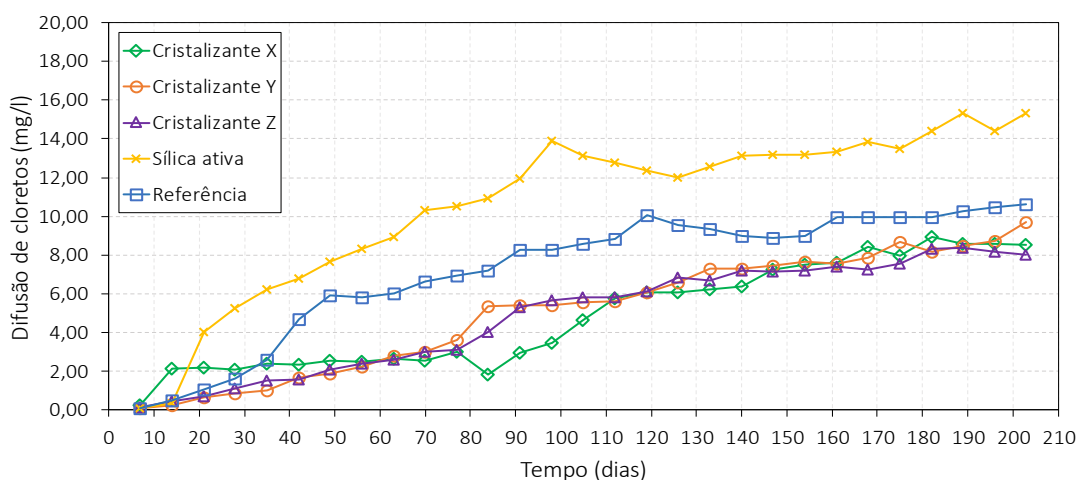


Fonte: elaborado pela autora.

Na Figura 72 são ilustrados os resultados para os corpos de prova fissurados, com o início do ensaio de difusão de cloretos após 6 ciclos de molhagem e secagem (84 dias). Cabe destacar

novamente que o objetivo destes ciclos foi de intensificar o processo da autocatrização de fissuras. No período de molhagem ocorre a hidratação tardia de grãos anidros, bem como a ativação dos aditivos cristalizantes presentes na matriz cimentícia, enquanto que no ciclo de secagem é verificada a formação do carbonato de cálcio junto à fissura (SNOECK e DE BELIE, 2015).

Figura 72 - Difusão de cloretos, para as amostras com fissura, com 84 dias para os diferentes tipos de adição



Fonte: elaborado pela autora.

Nesse sentido, conforme pode ser observado nas Figura 71 e Figura 72, os comportamentos dos corpos de prova fissurados e com os aditivos cristalizantes foram semelhantes nas duas idades avaliadas, ou seja, não impossibilitaram a passagem de cloretos pelo concreto. Verifica-se que os ciclos de molhagem/secagem aplicados nos concretos não foram completamente efetivos em ativar e acelerar as reações dos aditivos cristalizantes e da sílica ativa para a autocatrização das fissuras, antes dos corpos de prova serem submetidos ao ensaio de difusão de cloretos. Estes resultados podem estar relacionados aos ciclos predominantemente secos que foram aplicados, com 12 dias de secagem, e ao curto período de tempo no qual as amostras ficaram submersas durante cada ciclo de molhagem (2 dias).

Roig-Flores et al. (2016) concluíram que a condição de imersão em água foi mais eficaz do que os ciclos de molhagem e secagem no fechamento de fissuras, para amostras de concreto convencionas e de alta resistência, contendo 4% de aditivo cristalizante. Da mesma forma, Krelani e Ferrara (2013) verificaram que a imersão em água proporcionou uma maior

capacidade de autocicatrização dos concretos com os aditivos cristalizantes, principalmente para maiores espessuras de fissuras.

Para um concreto com sílica ativa, Cappellesso (2016) constatou melhor desempenho quanto à penetração de cloretos, sendo que as amostras foram curadas durante 28 dias em câmara úmida, sob temperatura de $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade maior que 95%, até a data de realização do ensaio.

Mehta e Monteiro (2014) e Venquiaruto (2017) afirmam que as condições de cura devem ser muito mais rigorosas para concretos com adição de sílica ativa do que no concreto sem adição, para que o benefício da sua utilização seja efetivo.

Na execução dos ciclos de molhagem é verificada a solubilização do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ produzido durante a hidratação do cimento, que se deposita na tortuosidade da fissura. Esse composto, ao entrar em contato com o dióxido de carbono (CO_2) no ciclo de secagem, lixivia e sofre carbonatação e tende a formar CaCO_3 , que possui grande influência no processo de fechamento de fissuras (JIANG et al., 2015; VAN TITTELBOOM et al., 2014). Huang (2014) verificou que esse processo corresponde a aproximadamente 80% da quantidade de produtos formados na fissura.

No entanto, para o concreto com SA, a autocicatrização de fissuras devido a carbonatação do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pode ter sido prejudicada, devido ao consumo deste componente nas reações pozolânicas geradas pela sílica ativa (GJØRV, 2015; NEVILLE, 2016), o que por sua vez, pode ter corroborado com a maior passagem de cloretos pela fissura durante o ensaio de difusão. Segundo Mehta e Monteiro (2014), o uso de pozolanas é capaz de consumir quase que completamente a portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) produzida nas reações de hidratação do cimento.

Aliado a essa redução da formação de CaCO_3 em função das reações pozolânicas, está a alteração do pH da matriz cimentícia. A alcalinidade do concreto é formada pelas reações de hidratação do C_3S e C_2S que liberam o $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Juntamente com os álcalis do cimento, o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ confere à matriz cimentícia uma solução de poros de caráter alcalino, com pH em torno de 12,5 (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Associado a isso, o teor de cloretos capaz de provocar a corrosão da armadura é diretamente influenciado por sua fixação com os compostos cimentícios. Os cloretos podem ser quimicamente fixados pela matriz cimentícia com a formação de sal de Friedel ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$), através da reação do aluminato tricálcico (C_3A) do cimento com

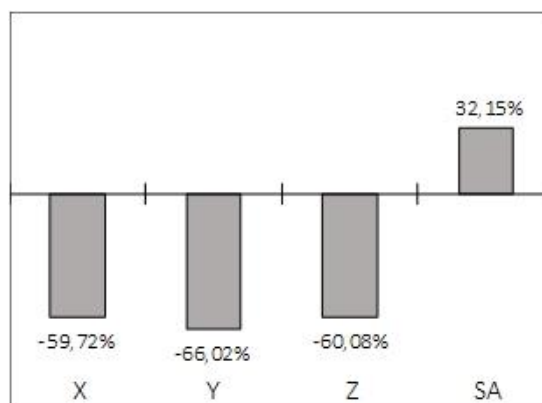
os cloretos (JUSTNES, 2004; FIGUEIREDO et al., 2014). Além disso, podem se apresentar de forma livre na solução dos poros do concreto, sendo estes que efetivamente são capazes de influenciar no processo corrosivo das armaduras (SAIKIA et al., 2006; TALERO et al., 2011).

De acordo com Vieira (2003), a estabilidade do sal de Friedel é dependente do pH da solução de poros. A redução do pH do concreto em função de adições pozolânicas aumenta a solubilidade desse composto, disponibilizando maiores teores de cloretos livres na solução dos poros no interior do concreto. Isso, de acordo com Shi et al. (2012), ocorre porque a sílica reduz a quantidade de aluminatos presentes, os quais são responsáveis pela fixação dos cloretos. De acordo com Reddy et al. (2002), pequenas reduções do pH são suficientes para a alteração dos cloretos fixados em livres.

Dessa forma, a maior concentração de cloretos observados no ensaio de difusão para o concreto com sílica ativa deste trabalho pode estar relacionado a essa redução do pH da matriz cimentícia em decorrência das reações pozolânicas. Segundo Castellote et al. (2002) e Yuan et al. (2009) a adição ou substituição do cimento Portland por sílica ativa leva a uma redução do pH, o que impacta no aumento da proporção de cloretos livres. Santos (2006) observou uma menor resistência à penetração de cloretos em amostras de concreto com substituição de CII-F 32 por 10% de sílica ativa, sendo também observado por Dousti (2009); Neri (2015) e Thomas et al. (2012).

A Figura 73 mostra a passagem de cloretos dos concretos fissurados contendo os aditivos cristalizantes e a sílica ativa em relação ao referênci, quando submetidos ao ensaio de difusão, após os 6 ciclos de molhagem e secagem.

Figura 73 - Comportamento da difusão de cloretos em amostras fissuradas, aos 6 ciclos de molhagem/secagem, em relação ao concreto REF



Fonte: elaborado pela autora.

Nota-se que, entre os aditivos cristalizantes, a maior redução da passagem de cloretos pela fissura foi proporcionada pelo cristalizante Y, com 66,02%, mostrando que este aditivo necessita de um tempo mais longo para suas reações de hidratação devido a sua maior granulometria. Resultado este que corrobora com os resultados já discutidos anteriormente, para as amostras submetidas aos 2 ciclos de molhagem/secagem. Conforme pode ser observado, o acréscimo da idade e também dos ciclos de molhagem/secagem não propiciaram bom desempenho ao concreto com SA, visto que a passagem de cloretos neste caso foi 32,15% superior que o concreto REF.

De toda forma, conforme pode ser observado, todos os aditivos cristalizantes proporcionaram uma redução na passagem de cloretos, ou seja, atuaram na redução da espessura da fissura. Nesse sentido, Huang (2014) descobriu que o preenchimento de fissuras com produtos de hidratação foi de 28% depois de curar em água por 200 h. Isso demonstra que a autocicatrização de fissuras pode reduzir significativamente a entrada de agentes agressivos e, assim, prolongar a vida útil de estruturas de concreto, mesmo que as fissuras não sejam completamente preenchidas com produtos de hidratação.

Jacobsen et al. (1996) verificaram a autocicatrização de fissuras em amostras de concreto, após três meses de imersão em água, observando uma redução na taxa de migração de cloretos. A redução foi de 28% a 35% em comparação com a migração de amostras recém-fissuradas. Esse efeito está de acordo com os achados de Şahmaran (2007), que observou um coeficiente de difusão de cloreto reduzido e uma taxa de penetração mais lenta, devido aos efeitos da autocicatrização autógena de fissuras.

Šavija e Schlangen (2016) descobriram que fissuras menores que 0,06 mm recuperaram totalmente sua resistência à entrada de cloretos, ou seja, ocorre o selamento completo da fissura. No entanto, fissuras com maiores espessuras apenas recuperaram parcialmente sua capacidade de resistir à entrada de cloretos.

Conforme mencionado anteriormente, os ciclos de molhagem e secagem não proporcionaram o fechamento completo das fissuras, principalmente devido ao curto período de molhagem que os corpos de prova foram expostos. No entanto, após estes ciclos, o contato direto dos aditivos cristalizantes com a água durante o ensaio de difusão pode ter influenciado positivamente na redução da passagem de cloretos, a partir da contínua reação dos aditivos cristalizantes com a água do ensaio.

Isso vai ao encontro dos resultados observados por Borg et al. (2018), que verificaram que a capacidade de vedação de fissuras no concreto continuou ocorrendo para as amostras submersas em água com cloreto, salientando ainda que essa autocicatrização pode se mostrar mais eficiente do que na água sem cloretos. Os autores presumem que esses resultados podem ter sido influenciados devido a um efeito de sinergia entre as reações de autocicatrização e os cloretos.

Da mesma forma, Li e Li (2011) observaram que as microfissuras de compósitos cimentícios projetados, imersas em uma solução de NaCl a 3% por 30 dias ou mais, pareciam totalmente seladas como resultado da autocicatrização.

Por outro lado, Maes et al. (2016) verificaram que a composição da solução de imersão, com ou sem cloretos, não teve influência significativa no mecanismo de autocicatrização. Exceto para os casos em que a solução contém sulfato de magnésio (adicional), que resulta na formação de uma camada de brucita, causando vedação adicional das rachaduras. O trabalho ainda mostrou que fissuras em argamassas cimentícias com até 0,1 mm de espessura, quando expostas a ambientes marinhos, podem ser completamente seladas e inibirem a penetração de cloretos.

A morfologia interna das fissuras é outro fator que pode ter contribuído com a maior ou menor passagem de cloretos pelos concretos com os aditivos cristalizantes e sílica ativa. Os corpos de prova fissurados utilizados nesse trabalho foram selecionados por análise de imagem, conhecendo-se dessa forma apenas a superfície externa da fissura, e não sua configuração interna. De acordo com Roig-Flores et al. (2015), a morfologia interna de uma fissura pode ser responsável pela maior eficiência da autocicatrização, ao iniciar tal fenômeno em zonas internas que apresentam menor espessura da fissura, mesmo nos casos onde são verificadas maiores espessuras na superfície das amostras.

4.4.3 Coeficientes de difusão dos concretos

O ensaio de difusão de cloretos foi realizado de forma natural, sem aplicação de uma diferença de potencial para acelerar o ensaio, de forma a simular uma condição real de exposição dos concretos a passagem de cloretos. Conforme apresentado no item anterior, os concretos sem fissura não apresentaram passagem de cloretos até a idade de 203 dias, impossibilitando dessa forma o cálculo do coeficiente de difusão a estes concretos. Dessa forma, os resultados apresentados neste item se referem apenas aos concretos fissurados.

A partir do ensaio de difusão de cloretos, e da aplicação da Equação 5 e 6, da 2ª Lei de Fick, identificou-se o coeficiente de difusão de cloretos para cada concreto estudado. Para utilização das Equações 5 e 6, primeiramente foi necessária a determinação de alguns parâmetros. A profundidade da frente de cloretos (Ecl) foi fixada em 3 cm para todos os concretos, sendo essa a espessura dos corpos de prova submetidos à passagem de cloretos durante o ensaio de difusão.

Considerou-se a concentração inicial de cloretos (Co) igual a 0, ou seja, não havia a presença de cloretos no concreto durante sua produção e moldagem. A concentração de cloretos na superfície do concreto (Cs) foi fixada em 58,42 g/l, sendo essa a concentração da solução nos aparatos de ensaio de difusão. O teor de cloretos (Ccl) passantes em certa profundidade (Ecl) no tempo (t) foi determinado a partir dos gráficos gerados pelo ensaio de difusão de cloretos.

Dessa forma, por meio da Tabela 18 é possível identificar os resultados médios dos coeficientes de difusão de cloretos em estado não estacionário, bem como o desvio padrão e os coeficientes de variação.

Tabela 18 - Coeficientes de difusão médios

| | Concreto | Coef. difusão (cm^2/s) | DP (cm^2/s) | CV (%) |
|--------------------------------------|-----------------|---|-------------------------------|--------|
| 2 ciclos de molhagem e secagem | REF | $5,82 \cdot 10^{-8}$ | $1,02 \cdot 10^{-8}$ | 17,56 |
| | Cristalizante X | $4,07 \cdot 10^{-8}$ | $8,18 \cdot 10^{-9}$ | 20,07 |
| | Cristalizante Y | $8,96 \cdot 10^{-8}$ | $9,13 \cdot 10^{-9}$ | 10,2 |
| | Cristalizante Z | $3,56 \cdot 10^{-8}$ | $1,51 \cdot 10^{-9}$ | 4,22 |
| | SA | $8,47 \cdot 10^{-8}$ | $2,94 \cdot 10^{-8}$ | 34,64 |
| 6 ciclos de molhagem e secagem | REF | $6,48 \cdot 10^{-8}$ | $1,60 \cdot 10^{-8}$ | 24,75 |
| | Cristalizante X | $3,10 \cdot 10^{-8}$ | $1,14 \cdot 10^{-9}$ | 3,69 |
| | Cristalizante Y | $4,07 \cdot 10^{-8}$ | $2,08 \cdot 10^{-9}$ | 5,09 |
| | Cristalizante Z | $4,19 \cdot 10^{-8}$ | $2,08 \cdot 10^{-9}$ | 4,95 |
| | SA | $7,46 \cdot 10^{-8}$ | $3,52 \cdot 10^{-8}$ | 47,24 |

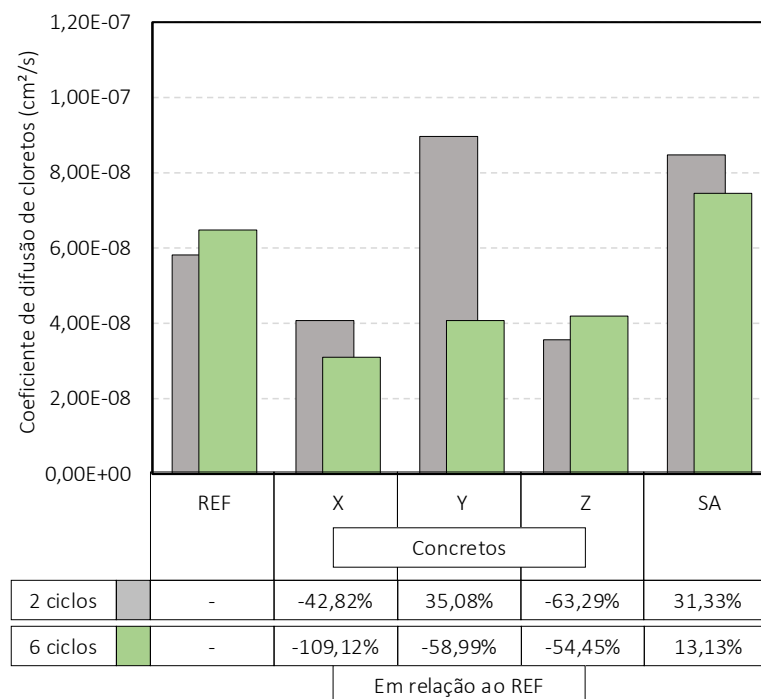
DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação

Fonte: elaborado pela autora.

Considerando se tratar de um ensaio lento em relação a outros encontrados na literatura, e considerando as dificuldades próprias da execução do ensaio, os resultados de coeficiente de difusão em regime não estacionário apresentaram coeficiente de variação médio de 17,34% para 2 ciclos de molhagem e secagem e 17,14% para os 6 ciclos, valores toleráveis diante dos fatos expostos. A partir da Figura 74, tem-se as alterações dos coeficientes de difusão de

cloretos representados graficamente, em relação ao concreto de referência e aos concretos submetidos a 2 e 6 ciclos de molhagem/secagem.

Figura 74 - Coeficientes de difusão de cloretos, em relação ao concreto de referência



Fonte: elaborado pela autora.

Verifica-se, para os corpos de prova submetidos a 2 ciclos de molhagem/secagem, que os coeficientes de difusão dos concretos com aditivos cristalizantes X e Z apresentaram uma redução de 42,82% e 63,29%, respectivamente, em relação ao concreto REF. Conforme discutido anteriormente, os concretos com o aditivo cristalizante Y e com SA apresentaram uma menor resistência à passagem de cloretos durante o ensaio de difusão, e dessa forma, obtiveram coeficientes de difusão de 35,08% e 31,33% superiores ao REF. Para os 6 ciclos de molhagem/secagem, destacam-se os três aditivos cristalizantes com percentual de redução em relação ao REF, contemplando uma maior resistência à entrada de cloretos.

Azarsa et al. (2019) investigaram, através de diferentes metodologias, a eficácia dos aditivos cristalizantes em promover melhorias no fenômeno da autocicatrização em concretos, além de melhorias quanto à penetração de cloretos e permeabilidade a água. Em relação à penetração de cloretos, os resultados indicaram que as amostras de concreto tratadas com o aditivo cristalizante apresentaram menor coeficiente de difusão nas duas idades de cura (28 e 56 dias),

em comparação a mistura de controle, sugerindo a formação de estruturas cristalinas no interior do concreto de modo a atuar como uma barreira física à passagem dos cloretos.

Da mesma forma, Abro et al. (2019) observaram uma redução no coeficiente de difusão de concretos fissurados com aditivo cristalizante, com uma progressiva melhoria devido ao maior tempo de cura das amostras (28 e 56 dias).

Şahmaran (2007) avaliou a relação entre a difusão de cloretos e fissuras entre 0,029 e 0,39 mm de espessura em amostras de argamassa, observando que a fissura produz mais efeito no coeficiente de difusão quando a sua espessura for superior a 0,135 mm.

A análise da variância (ANOVA) do coeficiente de difusão dos concretos estudados está apresentada na Tabela 19. Foi realizada com fatorial cruzada no software Statistica 13, e adotou-se um nível de confiança de 95% e um nível de significância de 5%.

Tabela 19 - Análise da variância (ANOVA) para o coeficiente de difusão de cloretos

| <i>Efeitos</i> | <i>SQ</i> | <i>GL</i> | <i>MQ</i> | <i>Teste F</i> | <i>p.</i> | <i>Sig.</i> |
|---|-----------|-----------|-----------|----------------|-----------|-------------|
| Cristalizantes e Sílica ativa | 8,23E-15 | 4 | 2,06E-15 | 7,800 | 0,000 | Sim |
| Idade do ensaio | 9,30E-16 | 1 | 9,30E-16 | 3,523 | 0,075 | Não |
| Cristalizantes e Sílica ativa *Idade do ensaio | 3,03E-15 | 4 | 7,59E-16 | 2,875 | 0,049 | Não |
| Erro | 5,28E-15 | 20 | 2,64E-16 | - | - | - |

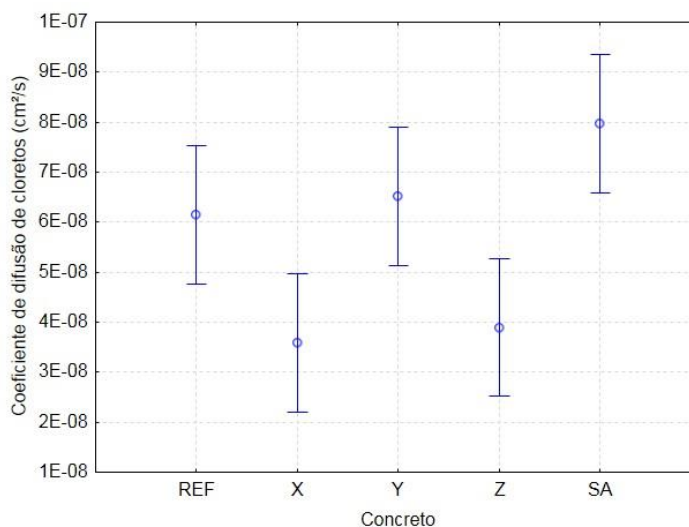
SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade (n-1); SQF: média quadrática; Teste F: valor calculado de F; p: nível de significância; Se $p < 5\%$ = efeito significativo

Fonte: elaborado pela autora.

Verificam-se que os resultados entre os concretos com os aditivos cristalizantes e a SA apresentaram diferenças significativas. A interação entre os aditivos cristalizantes e SA, com a idade do ensaio foi considerada como não significativa, por apresentar uma significância de 4,9%, valor muito próximo ao nível de significância definido neste trabalho (5%).

A fim de verificar a influência de cada variável no coeficiente de difusão de cloretos, foram realizadas análises gráficas específicas tais como a representada na Figura 75, que representa o efeito isolado do tipo de adição no concreto sobre o coeficiente de difusão de cloretos.

Figura 75 - Efeito isolado do tipo de adição sobre o coeficiente de difusão de cloretos



Fonte: elaborado pela autora.

Por meio do gráfico é possível constatar que a utilização dos aditivos cristalizantes proporcionou melhora na resistência à passagem de cloretos, ou seja, reduções nos coeficientes de difusão, destacando-se os cristalizantes X e Z, respectivamente.

4.4.4 Estimativa de vida útil

A estimativa da vida útil de concretos caracteriza-se como consequência da passagem de cloretos pelo concreto ao longo do tempo, e dos coeficientes de difusão de cloretos que são calculados. Dessa forma, em função dos concretos sem fissura não terem apresentado passagem de cloretos ao longo do tempo, e consequentemente, nenhum coeficiente de difusão, a estimativa de vida útil a estes concretos não foi calculada.

A partir dos resultados de coeficientes de difusão dos concretos fissurados apresentados anteriormente, realizou-se a análise da estimativa de vida útil por meio da 2ª Lei de Fick, sendo também aplicadas as Equações 5 e 6, porém com a fixação de outros parâmetros.

Para a concentração superficial de cloretos (C_s) foi definido o valor de 0,63%. Este valor trata-se de um percentual definido por Helene (1993), como referencial ou orientativo para concretos com relação água/cimento <0,48, com f_{ck} >35 MPa, submetidos à névoa salina.

Conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014), adotou-se como premissas a classe de agressividade ambiental III (agressividade forte, ambiente marinho e com risco grande de deterioração). Os elementos estruturais considerados para as análises foram as vigas e pilares, por apresentarem

normalmente a maior situação de exposição. Dessa forma, para as análises de vida útil dos concretos, foram adotadas as classes de agressividade III, com um cobrimento (E_{cl}) de 40 mm, situações onde a névoa salina é mais intensa (Figura 76).

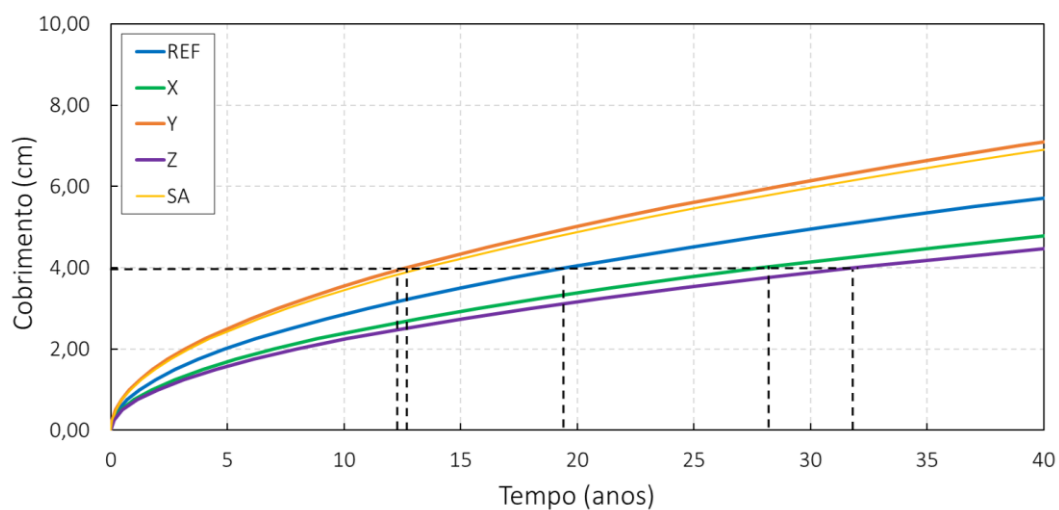
Figura 76 - Cobrimento nominal relacionado com a classe de agressividade

| Tipo de estrutura | Componente ou elemento | Classe de agressividade ambiental | | | |
|-------------------|---|-----------------------------------|----|-----------|----|
| | | I | II | III | IV |
| | | Cobrimento nominal (mm) | | | |
| Concreto armado | Laje | 20 | 25 | 35 | 45 |
| | Viga/pilar | 25 | 30 | 40 | 50 |
| | Elementos estruturais em contato com o solo | 30 | | 40 | 50 |

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014).

A concentração de cloretos (C_{cl}) crítica para despassivação das armaduras foi fixada em 0,4% em relação a massa do cimento. Este valor foi adotado em função de ser o valor médio entre as normas NBR 6118 (ABNT, 2018) 0,50%, e americana ACI-318, 0,30%, além de ser uma concentração adotada em demais trabalhos que analisaram a estimativa de vida útil (HELENE et al., 2018; KAZMIERCZAK et al., 2016). Dessa forma, a Figura 77 apresenta a vida útil dos concretos fissurados, submetidos a 2 ciclos de molhagem/secagem.

Figura 77 - Vida útil dos concretos fissurados, com 2 ciclos de molhagem/secagem



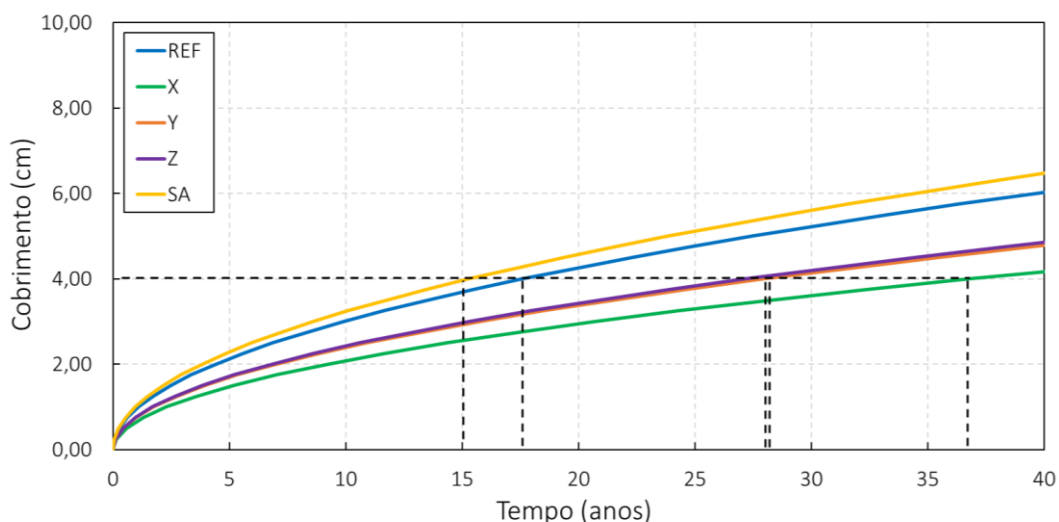
Fonte: elaborado pela autora.

Considerando o cobrimento de 4 cm recomendando pela norma para a classe de agressividade III, e concentração superficial de cloretos de 0,63% recomendada por Helene (1993) para edificação exposta a névoa salina, têm-se, para o concreto REF, uma estimativa de 19,6 anos até que os cloretos atinjam a armadura para despassivá-la.

O concreto com o aditivo cristalizante X apresentou um tempo de vida útil de 28 anos, representando um acréscimo de 42,80% em relação ao REF. Dentre os aditivos cristalizantes o pior desempenho pode ser notado para Y, que apresentou uma estimativa de vida útil em torno de 13 anos, com redução de 35% em relação ao REF, enquanto que o aditivo cristalizante Z apresentou maior eficiência, com acréscimo da vida útil em 32 anos (63,30%). Devido ao maior coeficiente de difusão apresentado pela SA, esta apresentou 13,5 anos para despassivação das armaduras, e em torno de 32% inferior ao REF.

A estimativa de vida útil dos concretos também fissurados, porém submetidos aos 6 ciclos de molhagem/secagem é apresentada na Figura 78 a seguir.

Figura 78 - Vida útil dos concretos fissurados, com 6 ciclos de molhagem/secagem



Fonte: elaborado pela autora.

Pode ser notado que o concreto com SA, mesmo em idade mais avançada e maior tempo de cura, apresentou novamente resultados insatisfatórios, com 15,3 anos para a vida útil, 13% inferior ao REF com 17,6 anos. Nota-se maior tempo de vida útil para o concreto com aditivo cristalizante X, com 37 anos, enquanto que os concretos com os aditivos cristalizantes Y e Z apresentaram desempenho semelhante, com aproximadamente 28 anos, com um ganho de 57%

do tempo para início da despassivação das armaduras. A Tabela 20 apresenta os resultados da vida útil dos concretos nas duas idades avaliadas.

Tabela 20 - Quadro comparativo da vida útil dos concretos após 2 e 6 ciclos de molhagem e secagem

| Concreto/ciclos de molhagem e secagem | 2 ciclos (anos) | 6 ciclos (anos) |
|--|------------------------|------------------------|
| REF | 19,6 | 17,6 |
| X | 28 | 37 |
| Y | 13 | 28 |
| Z | 32 | 28 |
| SA | 13,5 | 15,3 |

Fonte: elaborado pela autora.

Dessa forma, pode ser observado que a utilização dos aditivos cristalizantes proporcionou uma redução na passagem de cloretos pelos concretos fissurados durante o ensaio de difusão, e consequentemente, um prolongamento do tempo até que estes íons atinjam a armadura para provocar o início da corrosão. O concreto com sílica ativa por sua vez apresentou resultados inesperados, com menor capacidade de autocicatrização das fissuras e consequentemente, menor estimativa de vida útil, podendo esse fato estar relacionado principalmente com o consumo do Ca(OH)_2 e redução do pH da matriz cimentícia.

Cabe ressaltar que os resultados apresentados se referem a concretos fissurados, que permitem uma movimentação mais acelerada de cloretos pelo interior da matriz cimentícia, e como resultado, menor tempo para despassivação das armaduras. Além disso, é importante destacar que a corrosão da armadura, além da concentração de cloretos, depende de outros fatores, tais como diferença de potencial, presença de umidade para movimentação dos cloretos e disponibilidade de oxigênio (GJØRV, 2015).

5 CONCLUSÕES

As matrizes cimentícias possuem uma tendência à fissuração devido as suas próprias características e também a fatores externos, que agem de forma a causar o aparecimento dessa manifestação patológica. Eliminar ou minimizar os efeitos causados pela presença de fissuras caracteriza-se como um avanço no desempenho das edificações e na redução de custos relacionados a reparos e a manutenções. Desse modo, o fenômeno da autocicatrização pode desempenhar um importante papel em proporcionar o fechamento dessas fissuras, e dificultar ou até mesmo impossibilitar a entrada de agentes agressivos para o interior da estrutura. Neste caso, concretos com aditivos cristalizantes podem se apresentar como uma solução promissora em solucionar esse problema, sendo estes materiais facilmente inseridos no concreto e adquiridos no mercado.

Quanto à influência dos ciclos de molhagem e secagem, foi observado que estes não foram eficientes em proporcionar a autocicatrização completa das fissuras. Embora a execução dos ciclos seja relatada na literatura como situação favorável para o desenvolvimento da autocicatrização e, também, ser citada pelos fabricantes dos aditivos cristalizantes como situação mais favorável para a ocorrência do fenômeno, o curto período de molhagem que os concretos foram expostos influenciaram negativamente nas taxas de autocicatrização.

Para os diferentes períodos de execução dos ciclos de molhagem e secagem (2 e 6 ciclos), os concretos fissurados com os aditivos cristalizantes X e Z apresentaram, nas duas idades, uma redução na passagem de cloretos diante do ensaio de difusão, em relação ao concreto de referência. O concreto com o aditivo cristalizante Y por sua vez apresentou essa redução somente após os 6 ciclos de molhagem e secagem. Contudo, a execução dos diferentes ciclos de molhagem e secagem não proporcionou uma selagem completa das fissuras e, conseqüentemente, a formação de uma barreira para impedir a passagem de cloretos.

O ensaio de difusão natural de cloretos se mostrou viável para detectar a autocicatrização, quando aplicado em amostras fissurados. Para as diferentes idades que o ensaio foi iniciado (após 2 e 6 ciclos de molhagem/secagem), foi possível observar que os aditivos cristalizantes dificultaram a passagem dos cloretos ao longo do tempo e em relação ao concreto referência. Em estruturas de concreto armado, esse comportamento tende a retardar a chegada da frente de cloretos junto à armadura e, conseqüentemente, prolongar a estimativa da vida útil. No entanto,

os aditivos cristalizantes devem promover um selamento significativo ou por completo da fissura, para justificar sua utilização e garantir que os cloretos não atinjam a armadura.

Ainda em relação as amostras com fissura, o ensaio de difusão possibilitou avaliar que o concreto com sílica ativa apresentou, para as duas idades de ensaio avaliadas, menor resistência quanto à passagem de cloretos, o que por sua vez lhe conferiu menor estimativa de vida útil em comparação aos concretos com aditivos cristalizantes e referência.

Estes resultados podem estar associados à cura inapropriada desse concreto, visto que este também foi exposto aos ciclos de molhagem e secagem. Além disso, a maior passagem de cloretos deste concreto pode estar associada a menor taxa de autocicatrização das fissuras, em decorrência da menor precipitação de CaCO_3 junto à fissura, devido ao consumo do Ca(OH)_2 pelas reações pozolânicas ocasionadas pela sílica ativa. Aliado a esse consumo de hidróxido de cálcio está a redução do pH da matriz cimentícia, que aumenta a solubilidade do sal de Friedel, disponibilizando maiores teores de cloretos livres.

O ensaio de difusão permitiu avaliar a capacidade autocicatrizante dos concretos a partir dos coeficientes de difusão calculados. No entanto, pelas fissuras não estarem totalmente autocicatrizadas, não foi possível analisar a capacidade de estanqueidade à passagem de cloretos dos cristais formados na fissura.

Em relação aos concretos não fissurados, o ensaio de difusão natural de cloretos não se mostrou uma metodologia eficaz para avaliar os efeitos dos aditivos cristalizantes e da sílica ativa no concreto. Nestas circunstâncias, o ensaio necessita de um longo período para apresentar alguma passagem de cloreto pela porosidade do concreto, sendo que este processo pode ser impossibilitado pela densificação da matriz cimentícia ocasionada pela evolução da autocicatrização autógena.

A análise e quantificação de imagem por microscopia ótica não possibilitou detectar a autocicatrização dos concretos, principalmente pela presença de fragmentos de argamassa soltos na superfície da fissura, devido ao procedimento de corte das amostras de concreto. No entanto, esta pode se mostrar uma metodologia eficaz quando o corpo de prova não passa por esse processo de corte e é moldado nas dimensões que será utilizado durante o ensaio.

Além das conclusões relatadas, com o desenvolvimento do trabalho foi possível observar algumas adequações que podem contribuir para o aperfeiçoamento das técnicas de avaliação da autocicatrização, sendo algumas considerações descritas nos itens a seguir.

- a) ciclos com maior período de molhagem para concretos com aditivos cristalizantes;
- b) utilizar maiores relações a/c que a utilizada neste trabalho (0,40), para avaliar o desempenho dos aditivos cristalizantes em corpos de prova sem fissura quando submetidos ao ensaio de difusão natural de cloretos;
- c) para análise da autocicatrização de fissuras por microscopia ótica, utilizar corpos de prova moldados e não serrados;

Esse trabalho permitiu analisar a capacidade de autocicatrização de fissuras em concretos com a utilização de sílica ativa e diferentes aditivos cristalizantes, sendo notada uma melhora nos concretos fissurados com aditivos cristalizantes e piores resultados para o concreto com a sílica ativa. No entanto, não foi possível obter resultados para as amostras sem fissura para nenhum dos concretos estudados.

6 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Diante das variáveis que podem influenciar o desenvolvimento da autocicatrização autógena, e das diversas formas de avaliar o fenômeno, são sugeridos os seguintes estudos para futuras pesquisas:

- a) avaliar a estanqueidade de fissuras em concretos com os aditivos cristalizantes quanto ao ensaio de difusão natural de cloretos;
- b) avaliar a influência de diferentes dosagens de aditivo cristalizante;
- c) reproduzir o ensaio de difusão de cloretos em concretos com os aditivos cristalizantes, quando curados sob imersão em água e em água com cloreto;
- d) executar um ensaio de água sob pressão para avaliar a estanqueidade em corpos de prova fissurados de concreto com aditivos cristalizantes;
- e) comparar uma condição real de exposição de concretos com os aditivos cristalizantes com o ensaio de difusão de cloretos, para validação deste ensaio como metodologia para avaliação da autocicatrização de fissuras.

REFERÊNCIAS

ABRO, F. UL R. et al. Using the steady-state chloride migration test to evaluate the self-healing capacity of cracked mortars containing crystalline, expansive, and swelling admixtures. *Materials*, v. 12, n. 11, 2019.

AKHAVAN, A.; SHAFATIAN, S. M. H.; RAJABIPOUR, F. Quantifying the effects of crack width, tortuosity, and roughness on water permeability of cracked mortars. *Cement and Concrete Research*, v. 42, n. 2, p. 313–320, 2012.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318: building code requirements for structural concrete. ACI Committee 318. Detroit, Michigan, 2008.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. C 212.3R-10, A. Report on Chemical Admixtures for Concrete. Reported by ACI Committee 212, v. 1, n. 631, 2010.

A RAVITHEJA, REDDY, C. S. Self-Healing Concrete with Crystalline Admixture — A Review. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* Oct. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 53: Agregado Graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR NM 52: Agregado Miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR 9779: Argamassa e Concreto Endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR NM 18: Cimento Portland – Análise química – Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

_____. NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

_____. NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. NBR NM 67: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

_____. NBR 7222: Concreto e argamassa — determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. NBR 9833: Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008.

_____. NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

AYUB, T.; SHAFIQ, N.; KHAN, S. Durability of concrete with different mineral admixtures: A comparative review. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil Science and Engineering*, v. 7, n. 8, p. 1161–1172, 2013.

AZARSA, P.; GUPTA, R.; BIPARVA, A. Assessment of self-healing and durability parameters of concretes incorporating crystalline admixtures and Portland Limestone Cement. *Cement and Concrete Composites*, v. 99, n. February, p. 17–31, 2019a.

BELIE, N. DE et al. Durability of self-healing concrete. v. 01003, p. 1–8, 2019.

BELLEGHEM, B. VAN et al. Quantification of the service life extension and environmental benefit of Chloride Exposed Self-Healing Concrete. *Materials*, v. 10, n. 1, 2017.

BIANCHIN, F. H. Avaliação da autocicatrização em concretos produzidos com aditivo cristalizante e fissurados nas primeiras idades. Trabalho de Conclusão de Curso. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.

BIPARVA, A.; YUERS, K. Integral Crystalline Waterproofing Technology. Disponível em <<https://pt.slideshare.net/KrytonIntl/integral-crystalline-waterproofing-technology>>. Acesso em: 27 jan. 2020.

BOHUS, S.; DROCHYTKA, R. Cement based material with crystal-growth ability under long term aggressive medium impact. *Applied Mechanics and Materials*, v. 166–169, n. May, p. 1773–1778, 2012.

BORG, R. P. et al. Crack sealing capacity in chloride-rich environments of mortars containing different cement substitutes and crystalline admixtures. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, v. 7, n. 3, p. 141–159, 2018.

BREUGEL, K. VAN. Self-healing material concepts as solution for aging infrastructure. 37th Conference on Our World in Concrete & Structures, p. 1–17, 2012.

CAPPELLESSO, V. et al. Self-healing approach on early age cracked concretes with smart admixture. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, v. 1, p. 89–92, 2016.

CAPPELLESSO, V. G. Influência do tipo de cimento na autocicatrização de fissuras em concreto. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul., 2018.

CAPPELLESSO, V. GI. Uso de impermeabilizante por cristalização para redução da permeabilidade do concreto. p. 141, 2016.

CASTELLOTE, M.; ANDRADE, C.; ALONSO, C. Accelerated simultaneous determination of the chloride depassivation threshold and of the non-stationary diffusion coefficient values. *Corrosion Science*, v. 44, n. 11, p. 2409–2424, 2002.

CHEN, J.; XIANG, L. Controllable synthesis of calcium carbonate polymorphs at different temperatures. *Powder Technology*, v. 189, n. 1, p. 64–69, 2009.

COST ACTION CA 15202 SARCOS. Memorandum of Understanding for the Implementation of the COST Action "Self-healing As Preventive Repair of Concrete Structures). p. 15, 2016.

CUENCA, E.; FERRARA, L. Self-healing capacity of fiber reinforced cementitious composites. State of the art and perspectives. *KSCE Journal of Civil Engineering*, v. 21, n. 7, p. 2777–2789, 2017.

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

DAL MOLIN, D. C. C. Fissuras em estrepuras de concreto armado. Análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no estado do Rio Grande do Sul. Dissertação de mestrado, 1988.

DARWIN, D.; BROWNING, J.; LINDQUIST, W. D. Control of Cracking in Bridge Decks: Observations from the Field. *Cement, Concrete, and Aggregates*, v. 26, n. 2, p. 1–7, 2004.

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

DE ROOIJ, M. et al. RILEM TC 221-SHC: Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials. Springer, v. 1, p. 242, 2013.

DESHPANDE, S.; DARWIN, D.; BROWNING, J. Evaluating free shrinkage of concrete for control of cracking in bridge decks. Structural Engineering and Engineering Materials SM Report No. 89. UNIVERSITY OF KANSAS CENTER FOR RESEARCH, INC. LAWRENCE, KANSAS, v. 5, n. 89, 2007.

DOUSTI, A. Effect of Silica fume on Chloride binding in Concrete, 2009.

DRY, C. Procedures developed for self-repair of polymer matrix composite materials. *Composite Structures*, v. 35, n. 3, p. 263–269, 1996.

ELSALAMAWY, M.; MOHAMED, A. R.; ABOSEN, A. LATIF E. Performance of crystalline forming additive materials in concrete. *Construction and Building Materials*, v. 230, p. 117056, 2020.

FERRARA, L. Self-healing cement-based materials: An asset for sustainable construction industry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 442, n. 1, 2018.

FERRARA, L. et al. Experimental characterization of the self-healing capacity of cement based materials and its effects on the material performance.pdf, 2018.

FERRARA, L.; KRELANI, V. A fracture testing based approach to assess the self healing capacity of cementitious composites. VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, 2010.

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

FERRARA, L.; KRELANI, V.; MORETTI, F. On the use of crystalline admixtures in cement based construction materials : from porosity reducers to promoters of self healing, 2016.

FIGUEIREDO, C. P. et al. The role of metakaolin in the protection of concrete against the deleterious action of chlorides O papel do metacaulim na proteção dos concretos contra a ação deletéria de cloretos. v. 7, n. 4, 2014.

GJØRV, O. E. Projeto de durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade. In: FIGUEIREDO, E. P.; HELENE, P. Ed. *Oficina de Textos*. São Paulo, 2015

GUILHERME, G.; VIEIRA, G.; MORONI, F.; RONCETTI, L. Avaliação da penetração acelerada de cloretos em concretos com aditivo impermeabilizante por cristalização e diferentes relações água/cimento. *CONPAT - Lisboa*, p. 1–8, 2015.

HELENE, P. et al. Evaluation of the chloride penetration and life cycle of the self-healing concretes activated by crystalline admixture. v. 11, n. 3, 2018.

HELENE, P. R. L. Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado. São Paulo, 1993. Tese (Livre Docência em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. *Manual de Dosagem e Controle do Concreto*. São Paulo: PINI, 1992. 349 p.

HEIDE, N. TER; SCHLANGEN, E. Self-healing of early age cracks in concrete. *Proceedings of the First International Conference on Self Healing Materials*, v. 18–20, n. Abril, p. 1–12, 2007.

HUANG, H. *Thermodynamics of Autogenous Self-healing in Cementitious Materials*. 2014.

HUANG, H. et al. Self-healing in cementitious materials: Materials, methods and service conditions. *Materials and Design*, v. 92, p. 499–511, 2016.

HUANG, H.; YE, G.; DAMIDOT, D. Characterization and quantification of self-healing behaviors of microcracks due to further hydration in cement paste. *Cement and Concrete Research*, v. 52, p. 71–81, 2013.

JACOBSEN, S.; MARCHAND, J.; BOISVERT, L. Effect of cracking and healing on chloride transport in opc concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, No. 6, pp. 869-881, v. 26, n. 4, p. 551–556, 1996.

JAROENRATANAPIROM, D. R. S. Effects of Different Mineral Additives and Cracking Ages on Self-Healing Performance of Mortar. *Annual Concrete Conference 6, thailand Concrete*

Association, n. August, p. 551–556, 2010.

JAROENRATANAPIROM, D.; SAHAMITMONGKOL, R. Self-crack closing ability of mortar with different additives. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, v. 21, n. 1, p. 9–17, 2011.

JIANG, Z. et al. Self-healing of cracks in concrete with various crystalline mineral additives in underground environment. *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*, v. 29, n. 5, p. 938–944, 2014.

JIANG, Z.; LI, W.; YUAN, Z. Influence of mineral additives and environmental conditions on the self-healing capabilities of cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, v. 57, p. 116–127, 2015.

JOA, B. W. et al. Effect of incorporation of self healing admixture (SHA) on physical and mechanical properties of mortars. *Journal of Ceramic Processing Research*, v. 16, n. November 2015, p. s138–s143, 2015.

KANELLOPOULOS, A.; QURESHI, T. S.; AL-TABBAA, A. Glass encapsulated minerals for self-healing in cement based composites. *Construction and Building Materials*, v. 98, p. 780–791, 2015.

KAZMIERCZAK, C. DE S. et al. Contribuição à Previsão da Vida Útil de Estruturas de Concreto. 2016.

KHALIQ, W.; EHSAN, M. B. Crack healing in concrete using various bio influenced self-healing techniques. *Construction and Building Materials*, v. 102, n. January 2016, p. 349–357, 2016.

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

L MUNN, R.; TIAN CHANG, Z.; KAO, G. Performance of Australian Commercial Concretes Modified with a permeability reducing admixture. *22th Biennial Conference - CONCRETE 05*, 2005.

LI, M.; LI, V. C. Cracking and healing of engineered cementitious composites under chloride environment. *ACI Materials Journal*, v. 108, n. 3, p. 333–340, 2011.

LI, V. C.; HERBERT, E. Robust Self-Healing Concrete for Sustainable Infrastructure. *Journal of Advanced Concrete Technology*, v. 10, n. 6, p. 207–218, 2012.

LI, W. et al. Recent Advances in Intrinsic Self-Healing Cementitious Materials. *Advanced Materials*, v. 30, n. 17, p. 1–9, 2018.

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

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, 2016a.

MAES, M.; TITTELBOOM, K. VAN; BELIE, N. DE. The efficiency of self-healing cementitious materials by means of encapsulated polyurethane in chloride containing environments. *Construction and Building Materials*, v. 71, p. 528–537, 2014.

MAILVAGANAM, N. I. *Miscellaneous Admixtures. Concrete Admixtures Handbook: Properties, Science, and Technology*. Second ed. Ottawa: Elsevier, 1995.

MEDEIROS, M. H. F. Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente à ação de íons cloretos. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, v. Doutorado, p. 140 p., 2008.

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

MOHAMMADREZA HASSANI, E. et al. Influence of permeability-reducing admixtures on water penetration in concrete. *ACI Materials Journal*, v. 114, n. 6, p. 911–922, 2017.

MUHAMMAD, N. Z. et al. Tests and methods of evaluating the self-healing efficiency of concrete: A review. *Construction and Building Materials*, v. 112, p. 1123–1132, 2016.

NERI, K. D. Avaliação do teor crítico de cloretos em concreto armado com adição de sílica e metacaulim através dos ensaios acelerados induzidos por campo elétrico e magnético. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande - Paraíba, 2015.

NEVILLE, A. M. *Propriedades do concreto*. In: CREMONINI, R. A. (Tradução) 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NEVŘISOVÁ, L.; ŽIŽKOVÁ, N.; LÉDL, M. Influence of a Crystalline Additive on the Porosity of Cement Mortars. *Defect and Diffusion Forum. Trans Tech Publications, Switzerland*. v. 382. pp. 254-260, 2018.

OLIVEIRA, A. DE S. Estudo do potencial de aditivo cristalizante como estimulador de autocicatrização de fissuras de matrizes cimentícias. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, p. 5–10, 2019.

PARK, B.; CHOI, Y. C. Prediction of Self-Healing Potential of Cementitious Materials Incorporating Crystalline Admixture by Isothermal Calorimetry. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, v. 13, n. 1, 2019.

PAZDERKA, J.; HÁJKOVÁ, E. Crystalline admixtures and their effect on selected properties of concrete. *Acta Polytechnica*, v. 56, n. 4, p. 306–311, 2016.

RAMM, W.; BISCOPING, M. Autogenous healing and reinforcement corrosion of water-penetrated separation cracks in reinforced concrete. *Nuclear Engineering and Design*, v. 179, n. 2, p. 191–200, 1998.

REDDY, B. et al. On the corrosion risk presented by chloride bound in concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 24, n. 1, p. 1–5, 2002.

- REDDY, T. C. S.; RAVITHEJA, A. Macro mechanical properties of self healing concrete with crystalline admixture under different environments. *Ain Shams Engineering Journal*, v. 10, n. 1, p. 23–32, 2019.
- 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.
- RIBEIRO, D. V. *Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise*. São Paulo: Elsevier. 2014.
- ROIG-FLORES, M. et al. Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments. *Construction and Building Materials*, v. 86, p. 1–11, 2015.
- ROIG-FLORES, M. et al. Effect of crystalline admixtures on the self-healing capability of early-age concrete studied by means of permeability and crack closing tests. *Construction and Building Materials*, v. 114, p. 447–457, 2016.
- ROOIJ, M. . DE; E. S. C. J. STAR 221-SHC - Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials. [s.l: s.n.].
- ŞAHMARAN, M. Effect of flexure induced transverse crack and self-healing on chloride diffusivity of reinforced mortar. *Journal of Materials Science*, v. 42, n. 22, p. 9131–9136, 2007.
- SAHMARAN, M.; YILDIRIM, G.; ERDEM, T. K. Self-healing capability of cementitious composites incorporating different supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, v. 35, n. 1, p. 89–101, 2013.
- SAIKIA, N.; KATO, S.; KOJIMA, T. Thermogravimetric investigation on the chloride binding behaviour of MK-lime paste. *Thermochimica Acta*, v. 444, n. 1, p. 16–25, 2006.
- SAKALE, S. G. G. Self-Healing Concrete with Crystalline Admixture—A Review. *Materials Science and Engineering, Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*, v. 34, n. 5, p. 1143–1154, 2019.
- SANTOS, L. Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciaçãoda corrosão induzida por cloretos em estruturasde concreto. *Dissertação (Mestrado) - Brasília, UNB*, p. 161, 2006.
- ŠAVIJA, B.; SCHLANGEN, E. Autogeneous healing and chloride ingress in cracked concrete. *Heron*, v. 61, n. 1, p. 15–32, 2016.
- SCHLANGEN, NYNKE TER HEIDE, E. Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties. *Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties*, n. September 2015, 2007.
- SHABAB, M. E. et al. Effect of mineral admixtures on the properties of mass concrete - A review. *International Journal of Advanced Structures and Geotechnical Engineering* ISSN 2319-5347, Vol. 02, No. 04, ResearchGate, October 2013. Pakistan., 2013.
- SHI, X. et al. Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview. *Construction and Building Materials*, v. 30, p. 125–138, 2012.

SILVESTRO, L. Validação de modelo para previsão de vida útil de estruturas de concreto armado: iniciação da corrosão por cloretos. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura - Escola de Engenharia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.

SISOMPHON, K.; COPUROGLU, O.; KOENDERS, E. A. B. Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive. *Cement and Concrete Composites*, v. 34, n. 4, p. 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. *Construction and Building Materials*, v. 42, p. 217–224, 2013.

SNOECK, D.; DE BELIE, N. From straw in bricks to modern use of microfibers in cementitious composites for improved autogenous healing - A review. *Construction and Building Materials*, v. 95, p. 774–787, 2015.

TAKAGI, E. M. Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória de alto forno ativados por catalisador cristalino. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica - Instituto Tecnológico de Aeronáutica - São José dos Campos, SP., 2013.

TALERO, R. et al. Comparative and semi-quantitative XRD analysis of Friedel's salt originating from pozzolan and Portland cement. *Construction and Building Materials*, v. 25, n. 5, p. 2370–2380, 2011.

TANG, L.; NILSSON, L.-O.; BASHEER, P. A. M. Resistance of Concrete to Chloride Ingress: Testing and modelling. n. February 2019, p. 264, 2011.

TANG, W.; KARDANI, O.; CUI, H. Robust evaluation of self-healing efficiency in cementitious materials - A review. *Construction and Building Materials*, v. 81, p. 233–247, 2015.

TAYEBANI, B.; MOSTOFINEJAD, D. Self-healing bacterial mortar with improved chloride permeability and electrical resistance. *Construction and Building Materials*, v. 208, p. 75–86, 2019.

THOMAS, M. D. A. et al. The effect of supplementary cementitious materials on chloride binding in hardened cement paste. *Cement and Concrete Research*, v. 42, n. 1, p. 1–7, 2012.

VAN BELLEGHEM, B. et al. Chloride induced reinforcement corrosion behavior in self-healing concrete with encapsulated polyurethane. *Cement and Concrete Research*, v. 113, n. December 2017, p. 130–139, 2018.

UNE 83987-14. Durabilidad Del hormigon. Metodos de ensayo. Determinacion de los coeficientes de difusion de los iones cloruro em el hormigon endurecido . Metodo multirregimen, 2014.

VAN BELLEGHEM, B.; VAN TITTELBOOM, K.; DE BELIE, N. Efficiency of self-healing cementitious materials with encapsulated polyurethane to reduce water ingress through cracks. *Materiales de Construcción*, v. 68, n. 330, 2018.

VAN DEN HEEDE, P.; MAES, M.; DE BELIE, N. Influence of active crack width control on the chloride penetration resistance and global warming potential of slabs made with fly ash + silica fume concrete. *Construction and Building Materials*, v. 67, p. 74–80, 2014a. .

VAN TITTELBOOM, KIM; DE BELIE, N. Self-healing in cementitious materials-a review. *Materials*, v. 6, n. 6, p. 2182-2217. 2013

VAN TITTELBOOM, K. et al. 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.

VENQUIARUTO, S. D. *Influência Da Microfissuração Causada Nas Primeiras Idades Na Durabilidade De Concretos Ao Longo Do Tempo (Self-Healing)*. 2017.

VIEIRA, F. M. P. *Contribuição ao estudo da corrosão de armaduras em concretos com adição de sílica ativa*. Porto Alegre, RS: Tese de Doutorado. Programa de Pós_Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais (PPGEM). Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2003.

XING, F. et al. RILEM TC SHE: Self-Healing concrete – Its efficiency and evaluation. Disponível em: <<https://www.rilem.net/groupe/she-self-healing-concrete-its-efficiency-and-evaluation-345>>. Acesso em: 17 jan. 2020.

WANG, X. F. et al. Effect of carbonate-containing self-healing system on properties of a cementitious composite: Fresh, mechanical, and durability properties. *Construction and Building Materials*, v. 235, p. 117442, 2020.

WHITE, S. R. Autonomic healing of polymer composites. *Nature*, v. 409, 2001.

YUAN, L. et al. Research on the improvement of concrete autogenous self-healing based on the regulation of cement particle size distribution (PSD). *Materials*, v. 12, n. 7, 2019.

YUAN, Q. et al. Chloride binding of cement-based materials subjected to external chloride environment - A review. *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 1, p. 1–13, 2009.

ZAYED, A. et al. Effects of Chemical and Mineral Admixtures on Performance of Florida Structural Concrete. p. 359, 2016.

ZHANG, J. et al. Immobilizing bacteria in expanded perlite for the crack self-healing in concrete. *Construction and Building Materials*, v. 148, p. 610–617, 2017.

APÊNDICE A – Resultados da resistência à compressão axial

| Ensaio realizado na idade de 3 dias | | | | | | | | |
|-------------------------------------|----|---------------------|-------------------|------------|--------------------------------|-------------|---------------------|-----------------------------|
| Concreto | CP | Diâmetro médio (mm) | Altura média (mm) | Carga (kN) | Resistência à compressão (MPa) | Média (MPa) | Desvio padrão (MPa) | Coeficiente de variação (%) |
| REF | 1 | 100,00 | 199,26 | 198,30 | 25,3* | 29,7 | 1,5 | 5,0 |
| | 2 | 99,73 | 198,71 | 219,60 | 28,1 | | | |
| | 3 | 99,81 | 198,51 | 243,30 | 31,1 | | | |
| | 4 | 100,65 | 197,28 | 237,00 | 29,8 | | | |
| X | 1 | 100,23 | 196,81 | 268,20 | 34,0 | 34,1 | 0,2 | 0,5 |
| | 2 | 99,65 | 196,57 | 263,90 | 33,9* | | | |
| | 3 | 99,83 | 196,76 | 265,40 | 33,9 | | | |
| | 4 | 99,91 | 197,25 | 268,20 | 34,2 | | | |
| Y | 1 | 99,28 | 198,71 | 272,50 | 35,2 | 35,7 | 1,0 | 2,8 |
| | 2 | 99,96 | 199,13 | 275,20 | 35,1 | | | |
| | 3 | 99,97 | 199,35 | 289,10 | 36,9 | | | |
| | 4 | 99,80 | 199,92 | 228,70 | 29,3* | | | |
| Z | 1 | 100,63 | 197,47 | 257,90 | 32,4 | 32,3 | 0,4 | 1,1 |
| | 2 | 99,92 | 198,60 | 249,80 | 31,9 | | | |
| | 3 | 100,00 | 198,26 | 255,60 | 32,6 | | | |
| | 4 | 100,04 | 199,45 | 236,30 | 30,1* | | | |
| SA | 1 | 100,22 | 198,21 | 211,80 | 26,9* | 30,3 | 1,7 | 5,5 |
| | 2 | 99,78 | 198,58 | 239,80 | 30,7 | | | |
| | 3 | 100,15 | 199,44 | 223,80 | 28,4 | | | |
| | 4 | 99,90 | 198,80 | 248,00 | 31,7 | | | |

*resultados descartados

| Ensaio realizado na idade de 28 dias | | | | | | | | |
|--------------------------------------|----|---------------------|-------------------|------------|--------------------------------|-------------|---------------------|-----------------------------|
| Concreto | CP | Diâmetro médio (mm) | Altura média (mm) | Carga (kN) | Resistência à compressão (MPa) | Média (MPa) | Desvio padrão (MPa) | Coeficiente de variação (%) |
| REF | 1 | 100,39 | 197,09 | 203,20 | 25,7* | 34,9 | 3,6 | 10,4 |
| | 2 | 100,01 | 198,06 | 241,20 | 30,7 | | | |
| | 3 | 100,06 | 199,48 | 288,38 | 36,7 | | | |
| | 4 | 100,01 | 198,38 | 292,60 | 37,3 | | | |
| X | 1 | 99,79 | 196,66 | 313,70 | 40,1 | 40,3 | 1,8 | 4,5 |
| | 2 | 100,02 | 199,81 | 302,40 | 38,5 | | | |
| | 3 | 100,19 | 198,84 | 300,90 | 38,2* | | | |
| | 4 | 100,47 | 200,68 | 333,90 | 42,1 | | | |
| Y | 1 | 100,09 | 198,65 | 369,20 | 46,9 | 45,7 | 1,2 | 2,7 |
| | 2 | 100,60 | 197,76 | 353,50 | 44,5 | | | |
| | 3 | 100,51 | 199,40 | 361,20 | 45,5 | | | |
| | 4 | 100,48 | 198,50 | 328,00 | 41,4* | | | |
| Z | 1 | 99,85 | 199,59 | 325,40 | 41,6* | 54,0 | 2,7 | 5,0 |
| | 2 | 99,63 | 197,49 | 400,90 | 51,5 | | | |
| | 3 | 99,80 | 198,69 | 419,00 | 53,6 | | | |
| | 4 | 100,18 | 196,84 | 447,60 | 56,8 | | | |
| SA | 1 | 100,16 | 199,22 | 282,30 | 35,9* | 44,8 | 2,2 | 4,8 |
| | 2 | 100,11 | 199,59 | 364,30 | 46,3 | | | |
| | 3 | 100,70 | 199,58 | 364,30 | 45,8 | | | |
| | 4 | 100,27 | 197,81 | 333,90 | 42,3 | | | |

*resultados descartados

| Ensaio realizado na idade de 91 dias | | | | | | | | |
|--------------------------------------|----|---------------------|-------------------|------------|--------------------------------|-------------|---------------------|-----------------------------|
| Concreto | CP | Diâmetro médio (mm) | Altura média (mm) | Carga (kN) | Resistência à compressão (MPa) | Média (MPa) | Desvio padrão (MPa) | Coeficiente de variação (%) |
| REF | 1 | 100,00 | - | 400,70 | 51,0 | 50,7 | 2,5 | 5,0 |
| | 2 | 100,00 | - | 376,40 | 47,9 | | | |
| | 3 | 100,00 | - | 370,40 | 47,2* | | | |
| | 4 | 100,00 | - | 415,90 | 53,0 | | | |
| X | 1 | 99,81 | 198,43 | 344,60 | 44,1 | 43,2 | 3,1 | 7,1 |
| | 2 | 100,27 | 197,31 | 310,81 | 39,4* | | | |
| | 3 | 100,10 | 198,29 | 359,64 | 45,7 | | | |
| | 4 | 99,92 | 199,53 | 311,47 | 39,7 | | | |
| Y | 1 | 100,01 | 199,48 | 346,10 | 44,1 | 47,1 | 4,3 | 9,1 |
| | 2 | 99,68 | 200,63 | 352,10 | 45,1 | | | |
| | 3 | 100,16 | 198,80 | 327,90 | 41,6* | | | |
| | 4 | 100,21 | 198,78 | 409,80 | 52,0 | | | |
| Z | 1 | 100,63 | 197,43 | - | - | - | - | - |
| | 2 | 100,18 | 199,20 | - | - | | | |
| | 3 | 100,30 | 199,29 | - | - | | | |
| | 4 | 100,40 | 197,88 | - | - | | | |
| SA | 1 | 100,00 | 200,58 | 362,60 | 46,2 | 49,7 | 3,6 | 7,3 |
| | 2 | 99,90 | 200,11 | 349,00 | 44,6* | | | |
| | 3 | 100,21 | 197,66 | 390,30 | 49,5 | | | |
| | 4 | 99,63 | 199,52 | 416,70 | 53,5 | | | |

*resultados descartados

APÊNDICE B – Resultados da absorção de água por capilaridade

Referência

| 28 dias | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------------|----------------------------------|--|--------------|--------------|--------------|--------------|
| CP | Massa (g) | | | | | | Diâmetro médio (mm) | Área da seção (cm ²) | Absorção de água por capilaridade (g/cm ²) | | | | |
| | 0 h | 3 h | 6 h | 24 h | 48 h | 72 h | | | 3 h | 6 h | 24 h | 48 h | 72 h |
| 1 | 3610,0 | 3630,0 | 3634,0 | 3645,0 | 3665,0 | 3675,0 | 100,00 | 78,54 | 0,255 | 0,306 | 0,446 | 0,700 | 0,828 |
| 2 | 3635,0 | 3650,0 | 3658,0 | 3670,0 | 3685,0 | 3695,0 | 100,00 | 78,54 | 0,191 | 0,293 | 0,446 | 0,637 | 0,764 |
| 3 | 3685,0 | 3705,0 | 3710,0 | 3720,0 | 3735,0 | 3745,0 | 100,00 | 78,54 | 0,255 | 0,318 | 0,446 | 0,637 | 0,764 |
| 4 | 3640,0 | 3660,0 | 3666,0 | 3675,0 | 3690,0 | 3695,0 | 100,00 | 78,54 | 0,255 | 0,331 | 0,446 | 0,637 | 0,700 |
| Média | | | | | | | | | 0,239 | 0,312 | 0,446 | 0,653 | 0,764 |

| 91 dias | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------------|----------------------------------|--|--------------|--------------|--------------|--------------|
| CP | Massa (g) | | | | | | Diâmetro médio (mm) | Área da seção (cm ²) | Absorção de água por capilaridade (g/cm ²) | | | | |
| | 0 h | 3 h | 6 h | 24 h | 48 h | 72 h | | | 3 h | 6 h | 24 h | 48 h | 72 h |
| 1 | 3578,0 | 3594,0 | 3600,0 | 3616,0 | 3631,6 | 3640,1 | 100,00 | 78,54 | 0,204 | 0,280 | 0,484 | 0,682 | 0,791 |
| 2 | 3598,0 | 3612,0 | 3616,0 | 3632,0 | 3646,7 | 3653,5 | 100,00 | 78,54 | 0,178 | 0,229 | 0,433 | 0,620 | 0,707 |
| 3 | 3644,0 | 3662,0 | 3666,0 | 3684,0 | 3701,4 | 3709,2 | 100,00 | 78,54 | 0,229 | 0,280 | 0,509 | 0,731 | 0,830 |
| 4 | 3604,0 | 3620,0 | 3626,0 | 3642,0 | 3657,1 | 3664,2 | 100,00 | 78,54 | 0,204 | 0,280 | 0,484 | 0,676 | 0,766 |
| Média | | | | | | | | | 0,204 | 0,267 | 0,477 | 0,677 | 0,773 |

Aditivo cristalizante X

| 28 dias | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------------|----------------------------------|--|--------------|--------------|--------------|--------------|
| CP | Massa (g) | | | | | | Diâmetro médio (mm) | Área da seção (cm ²) | Absorção de água por capilaridade (g/cm ²) | | | | |
| | 0 h | 3 h | 6 h | 24 h | 48 h | 72 h | | | 3 h | 6 h | 24 h | 48 h | 72 h |
| 1 | 3739,4 | 3761,7 | 3768,5 | 3782,7 | 3790,6 | 3795,6 | 100,18 | 78,81 | 0,283 | 0,369 | 0,549 | 0,650 | 0,713 |
| 2 | 3703,4 | 3724,1 | 3730,6 | 3746,8 | 3756,8 | 3762,9 | 99,74 | 78,13 | 0,265 | 0,348 | 0,555 | 0,683 | 0,762 |
| 3 | 3692,1 | 3706,7 | 3717,1 | 3736,3 | 3747,6 | 3754,3 | 100,13 | 78,74 | 0,185 | 0,317 | 0,561 | 0,705 | 0,790 |
| 4 | 3732,1 | 3748,4 | 3753,0 | 3764,4 | 3771,5 | 3776,5 | 99,97 | 78,49 | 0,208 | 0,266 | 0,412 | 0,502 | 0,566 |
| Média | | | | | | | | | 0,235 | 0,325 | 0,519 | 0,635 | 0,708 |

| 91 dias | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------------|----------------------------------|--|--------------|--------------|--------------|--------------|
| CP | Massa (g) | | | | | | Diâmetro médio (mm) | Área da seção (cm ²) | Absorção de água por capilaridade (g/cm ²) | | | | |
| | 0 h | 3 h | 6 h | 24 h | 48 h | 72 h | | | 3 h | 6 h | 24 h | 48 h | 72 h |
| 1 | 3744,0 | 3755,0 | 3764,0 | 3795,0 | 3790,0 | 3795,0 | 100,18 | 78,81 | 0,140 | 0,254 | 0,647 | 0,584 | 0,647 |
| 2 | 3706,0 | 3715,0 | 3726,0 | 3770,0 | 3754,0 | 3760,0 | 99,74 | 78,13 | 0,115 | 0,256 | 0,819 | 0,614 | 0,691 |
| 3 | 3696,0 | 3710,0 | 3716,0 | 3755,0 | 3740,0 | 3745,0 | 100,13 | 78,74 | 0,178 | 0,254 | 0,749 | 0,559 | 0,622 |
| 4 | 3734,0 | 3740,0 | 3746,0 | 3785,0 | 3770,0 | 3775,0 | 99,97 | 78,49 | 0,076 | 0,153 | 0,650 | 0,459 | 0,522 |
| Média | | | | | | | | | 0,127 | 0,229 | 0,716 | 0,554 | 0,621 |

Aditivo cristalizante Y

| 28 dias | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------------|----------------------------------|--|--------------|--------------|--------------|--------------|
| CP | Massa (g) | | | | | | Diâmetro médio (mm) | Área da seção (cm ²) | Absorção de água por capilaridade (g/cm ²) | | | | |
| | 0 h | 3 h | 6 h | 24 h | 48 h | 72 h | | | 3 h | 6 h | 24 h | 48 h | 72 h |
| 1 | 3727,1 | 3747,3 | 3748,3 | 3758,6 | 3765,5 | 3770,1 | 100,00 | 78,54 | 0,257 | 0,270 | 0,401 | 0,489 | 0,547 |
| 2 | 3745,1 | 3760,1 | 3764,7 | 3775,0 | 3780,2 | 3783,9 | 100,00 | 78,54 | 0,191 | 0,250 | 0,381 | 0,447 | 0,494 |
| 3 | 3743,4 | 3760,5 | 3765,4 | 3777,9 | 3784,2 | 3788,4 | 100,00 | 78,54 | 0,218 | 0,280 | 0,439 | 0,519 | 0,573 |
| 4 | 3766,5 | 3783,3 | 3787,8 | 3799,9 | 3805,8 | 3809,5 | 100,00 | 78,54 | 0,214 | 0,271 | 0,425 | 0,500 | 0,547 |
| Média | | | | | | | | | 0,220 | 0,268 | 0,412 | 0,489 | 0,540 |

| 91 dias | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------------|----------------------------------|--|--------------|--------------|--------------|--------------|
| CP | Massa (g) | | | | | | Diâmetro médio (mm) | Área da seção (cm ²) | Absorção de água por capilaridade (g/cm ²) | | | | |
| | 0 h | 3 h | 6 h | 24 h | 48 h | 72 h | | | 3 h | 6 h | 24 h | 48 h | 72 h |
| 1 | 3705,0 | 3715,0 | 3725,0 | 3740,0 | 3750,0 | 3750,0 | 100,00 | 78,54 | 0,127 | 0,255 | 0,446 | 0,573 | 0,573 |
| 2 | 3745,0 | 3755,0 | 3760,0 | 3770,0 | 3780,0 | 3785,0 | 100,00 | 78,54 | 0,127 | 0,191 | 0,318 | 0,446 | 0,509 |
| 3 | 3730,0 | 3745,0 | 3750,0 | 3760,0 | 3770,0 | 3770,0 | 100,00 | 78,54 | 0,191 | 0,255 | 0,382 | 0,509 | 0,509 |
| 4 | 3755,0 | 3770,0 | 3775,0 | 3790,0 | 3795,0 | 3800,0 | 100,00 | 78,54 | 0,191 | 0,255 | 0,446 | 0,509 | 0,573 |
| Média | | | | | | | | | 0,159 | 0,239 | 0,398 | 0,509 | 0,541 |

Aditivo cristalizante Z

| 28 dias | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------------|----------------------------------|--|--------------|--------------|--------------|--------------|
| CP | Massa (g) | | | | | | Diâmetro médio (mm) | Área da seção (cm ²) | Absorção de água por capilaridade (g/cm ²) | | | | |
| | 0 h | 3 h | 6 h | 24 h | 48 h | 72 h | | | 3 h | 6 h | 24 h | 48 h | 72 h |
| 1 | 3691,6 | 3708,3 | 3713,8 | 3727,3 | 3736,4 | 3741,0 | 100,08 | 78,67 | 0,212 | 0,282 | 0,454 | 0,569 | 0,628 |
| 2 | 3685,7 | 3699,8 | 3704,9 | 3721,9 | 3732,5 | 3738,6 | 100,27 | 78,96 | 0,179 | 0,243 | 0,458 | 0,593 | 0,670 |
| 3 | 3678,2 | 3696,3 | 3703,8 | 3722,6 | 3734,7 | 3741,9 | 99,99 | 78,52 | 0,231 | 0,326 | 0,565 | 0,720 | 0,811 |
| 4 | 3712,5 | 3728,1 | 3733,0 | 3745,8 | 3754,0 | 3758,3 | 99,96 | 78,48 | 0,199 | 0,261 | 0,424 | 0,529 | 0,584 |
| Média | | | | | | | | | 0,205 | 0,278 | 0,476 | 0,603 | 0,673 |

| 91 dias | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------------|----------------------------------|--|--------------|--------------|--------------|--------------|
| CP | Massa (g) | | | | | | Diâmetro médio (mm) | Área da seção (cm ²) | Absorção de água por capilaridade (g/cm ²) | | | | |
| | 0 h | 3 h | 6 h | 24 h | 48 h | 72 h | | | 3 h | 6 h | 24 h | 48 h | 72 h |
| 1 | 3695,0 | 3705,0 | 3750,0 | 3730,0 | 3735,0 | 3745,0 | 100,08 | 78,67 | 0,127 | 0,699 | 0,445 | 0,508 | 0,636 |
| 2 | 3695,0 | 3705,0 | 3710,0 | 3725,0 | 3735,0 | 3740,0 | 100,27 | 78,96 | 0,127 | 0,190 | 0,380 | 0,507 | 0,570 |
| 3 | 3690,0 | 3705,0 | 3710,0 | 3720,0 | 3730,0 | 3735,0 | 99,99 | 78,52 | 0,191 | 0,255 | 0,382 | 0,509 | 0,573 |
| 4 | 3720,0 | 3730,0 | 3740,0 | 3750,0 | 3760,0 | 3765,0 | 99,96 | 78,48 | 0,127 | 0,255 | 0,382 | 0,510 | 0,573 |
| Média | | | | | | | | | 0,143 | 0,350 | 0,397 | 0,509 | 0,588 |

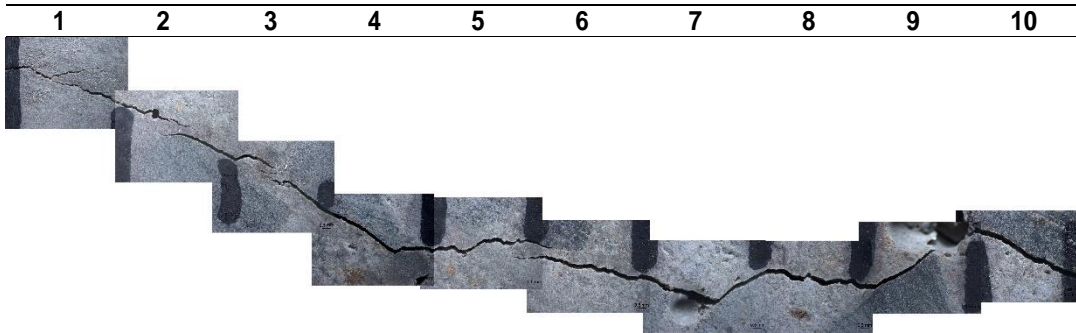
Sílica Ativa

| 28 dias | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------------|----------------------------------|--|--------------|--------------|--------------|--------------|
| CP | Massa (g) | | | | | | Diâmetro médio (mm) | Área da seção (cm ²) | Absorção de água por capilaridade (g/cm ²) | | | | |
| | 0 h | 3 h | 6 h | 24 h | 48 h | 72 h | | | 3 h | 6 h | 24 h | 48 h | 72 h |
| 1 | 3610,0 | 3615,0 | 3625,0 | 3635,0 | 3640,0 | 3645,0 | 99,81 | 78,24 | 0,064 | 0,192 | 0,320 | 0,383 | 0,447 |
| 2 | 3660,0 | 3670,0 | 3675,0 | 3685,0 | 3695,0 | 3700,0 | 99,73 | 78,11 | 0,128 | 0,192 | 0,320 | 0,448 | 0,512 |
| 3 | 3635,0 | 3645,0 | 3650,0 | 3660,0 | 3670,0 | 3670,0 | 99,96 | 78,47 | 0,127 | 0,191 | 0,319 | 0,446 | 0,446 |
| 4 | 3545,0 | 3560,0 | 3565,0 | 3575,0 | 3580,0 | 3585,0 | 100,04 | 78,60 | 0,191 | 0,254 | 0,382 | 0,445 | 0,509 |
| Média | | | | | | | | | 0,128 | 0,207 | 0,335 | 0,431 | 0,479 |

| 91 dias | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------------|----------------------------------|--|--------------|--------------|--------------|--------------|
| CP | Massa (g) | | | | | | Diâmetro médio (mm) | Área da seção (cm ²) | Absorção de água por capilaridade (g/cm ²) | | | | |
| | 0 h | 3 h | 6 h | 24 h | 48 h | 72 h | | | 3 h | 6 h | 24 h | 48 h | 72 h |
| 1 | 3597,0 | 3607,4 | 3610,7 | 3618,7 | 3623,9 | 3628,1 | 99,81 | 78,24 | 0,133 | 0,175 | 0,277 | 0,344 | 0,397 |
| 2 | 3652,4 | 3664,2 | 3668,7 | 3678,0 | 3683,7 | 3688,6 | 99,73 | 78,11 | 0,151 | 0,209 | 0,328 | 0,401 | 0,463 |
| 3 | 3626,0 | 3637,6 | 3640,9 | 3649,6 | 3654,1 | 3658,1 | 99,96 | 78,47 | 0,148 | 0,190 | 0,301 | 0,358 | 0,409 |
| 4 | 3535,9 | 3548,5 | 3552,2 | 3561,1 | 3566,1 | 3570,4 | 100,04 | 78,60 | 0,160 | 0,207 | 0,321 | 0,384 | 0,439 |
| Média | | | | | | | | | 0,148 | 0,195 | 0,307 | 0,372 | 0,427 |

APÊNDICE C – Resultados da microscopia ótica

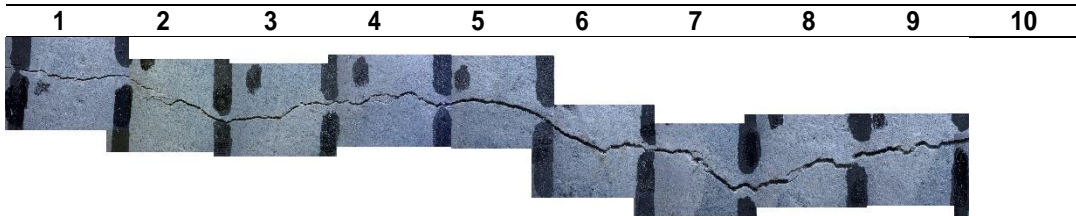
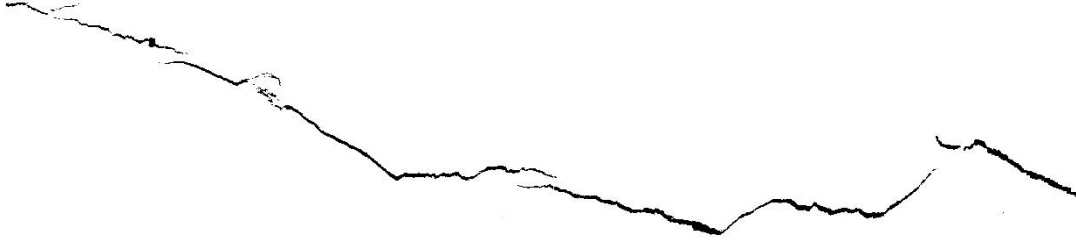
Referência - 2 ciclos de molhagem/secagem



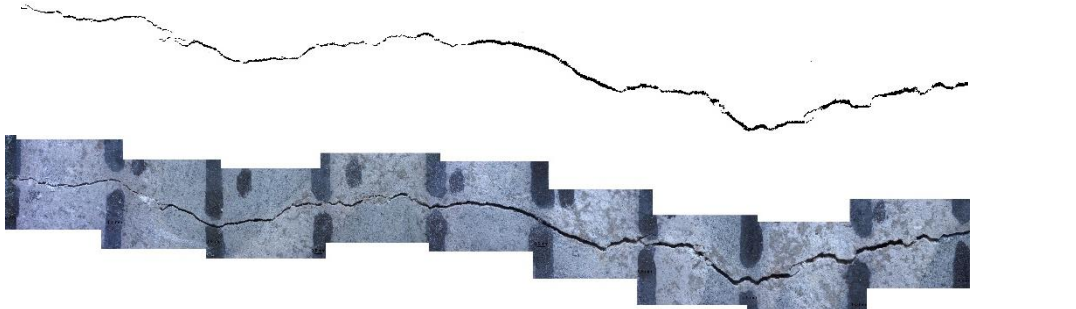
02-REF-2C-3dias



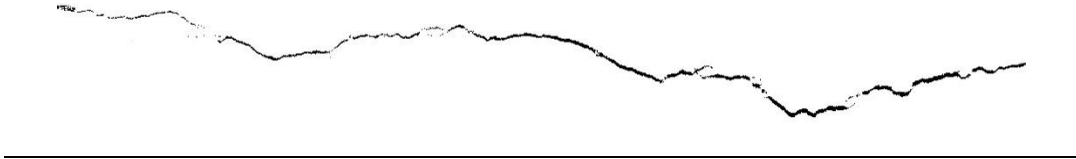
02-REF-2C-28dias



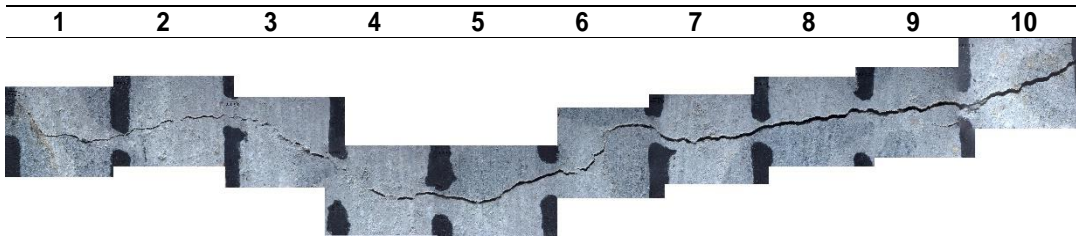
03-REF-2C-3dias



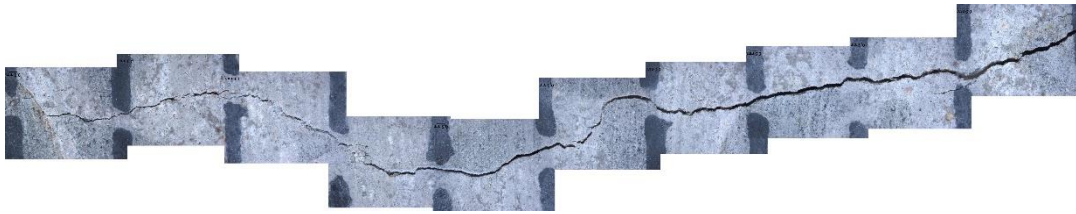
03-REF-2C-28dias



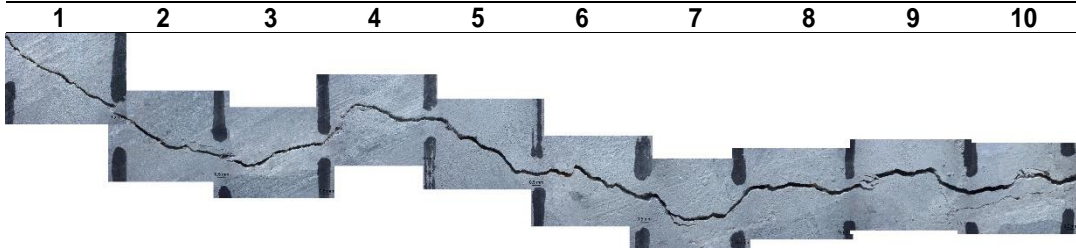
Aditivo cristalizante X - 2 ciclos de molhagem/secagem



01-X-2C-3dias

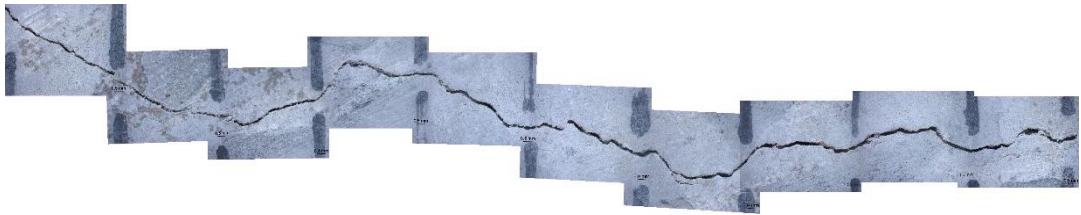


01-X-2C-28dias

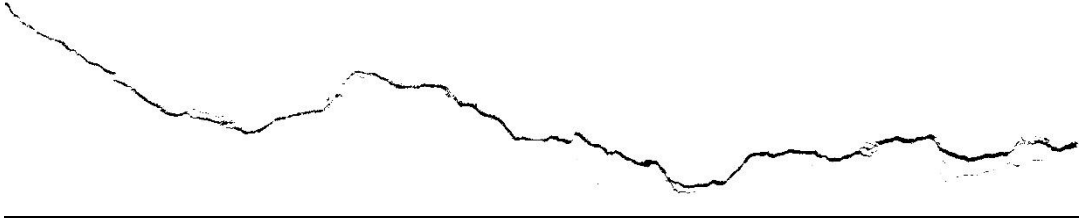


03-X-2C-3dias

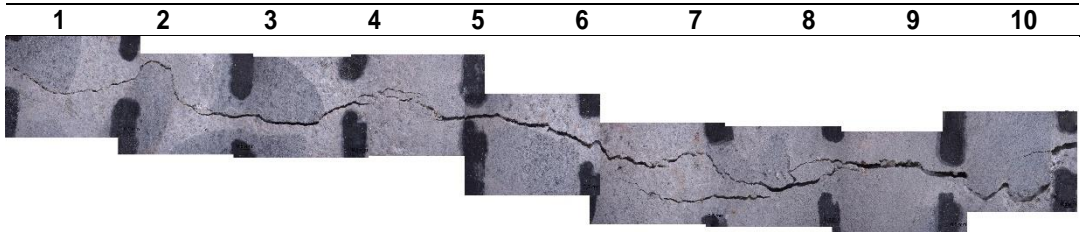




03-X-2C-28dias



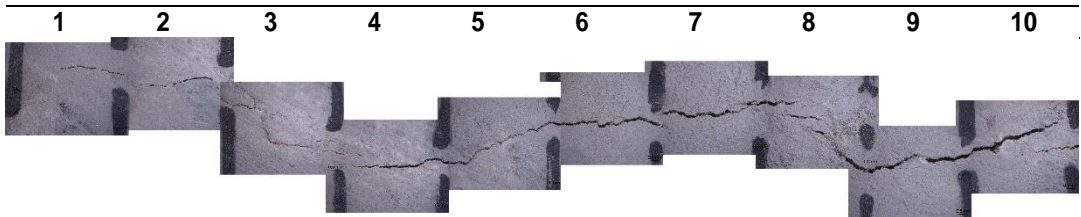
Aditivo cristalizante Y - 2 ciclos de molhagem/secagem



02-Y-2C-3dias

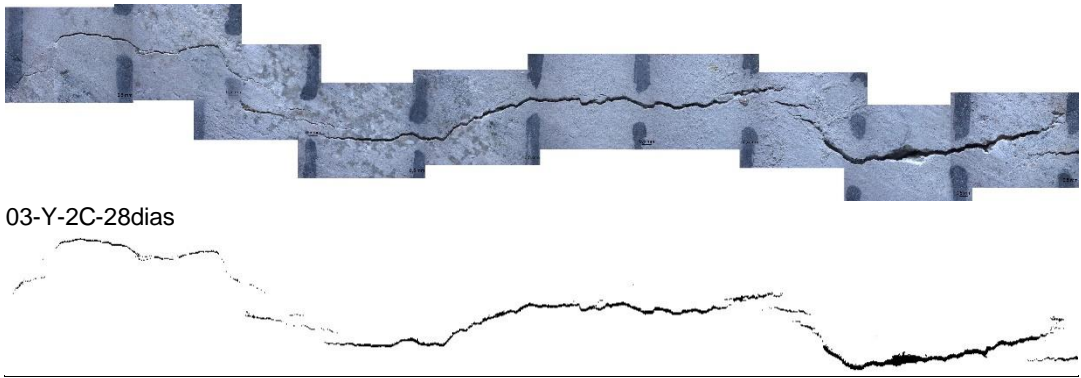


02-Y-2C-28dias

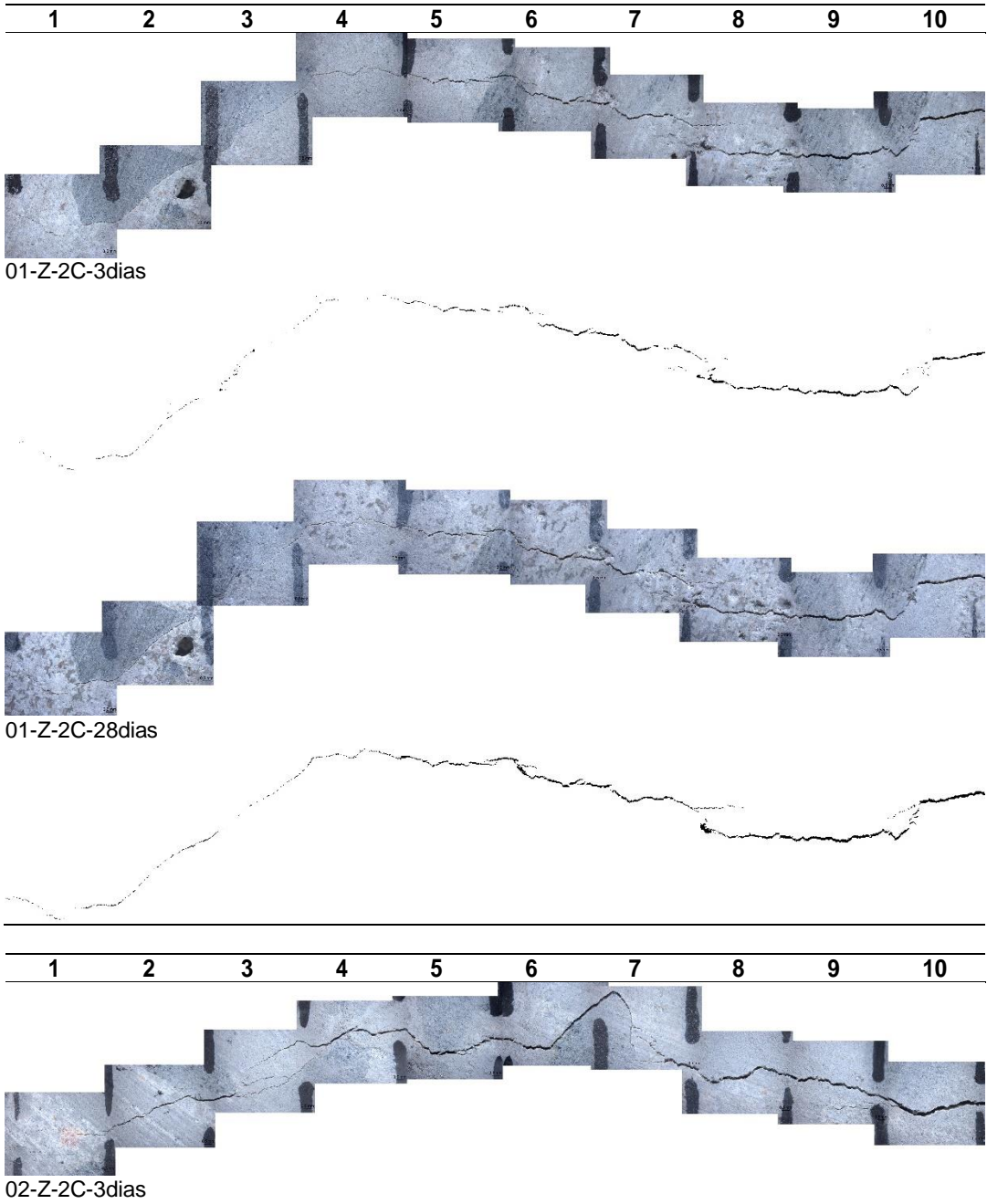


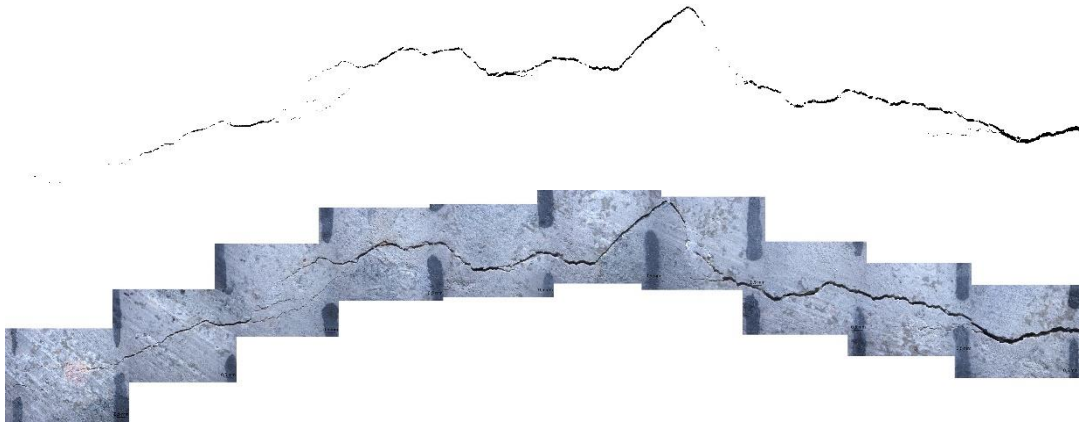
03-Y-2C-3dias



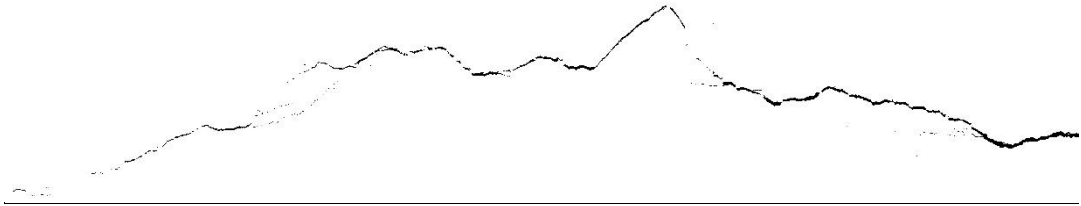


Aditivo cristalizante Z - 2 ciclos de molhagem/secagem

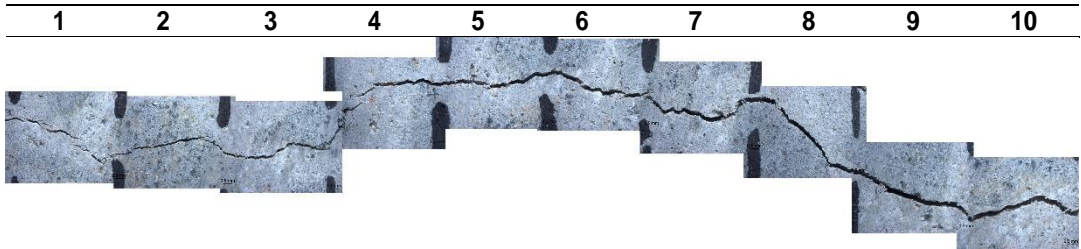




02-Z-2C-28dias



Sílica ativa - 2 ciclos de molhagem/secagem

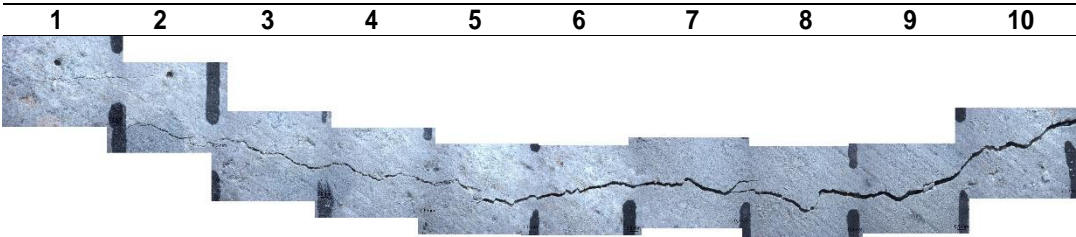


01-SA-2C-3dias



01-SA-2C-28dias





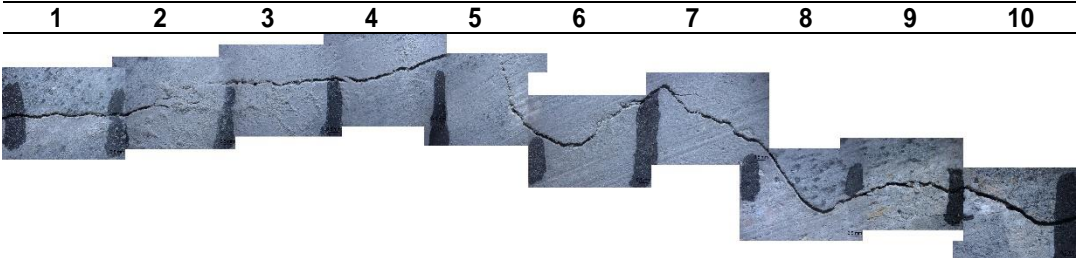
03-SA-2C-3dias



03-SA-2C-28dias



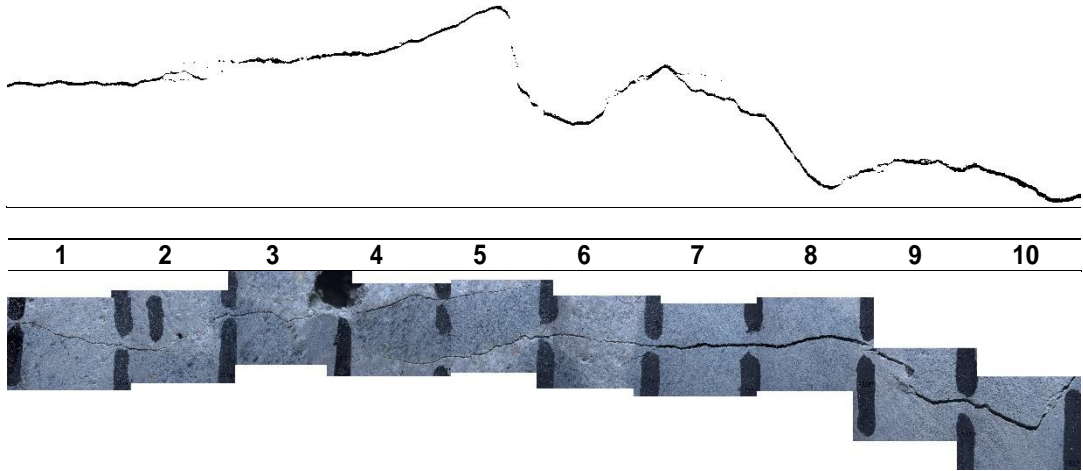
Referência - 6 ciclos de molhagem/secagem



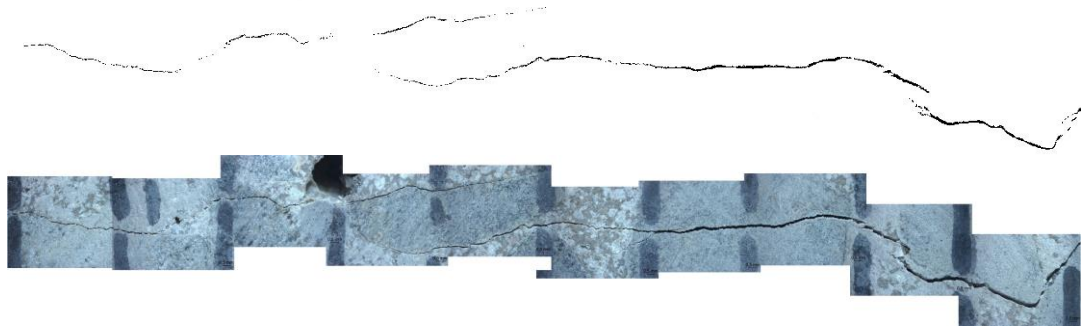
01-REF-6C-3dias



01-REF-6C-84dias



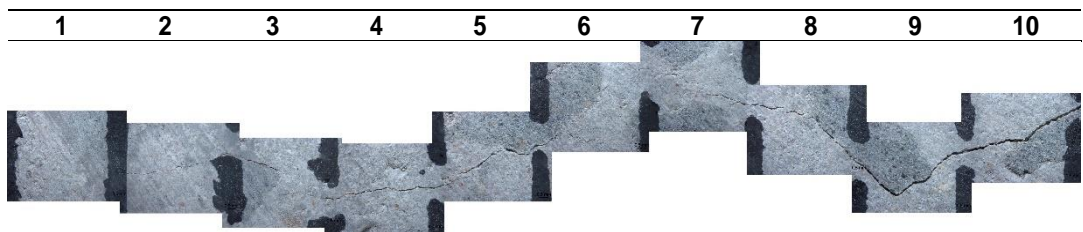
03-REF-6C-3dias



03-REF-6C-84dias



Aditivo cristalizante X - 6 ciclos de molhagem/secagem

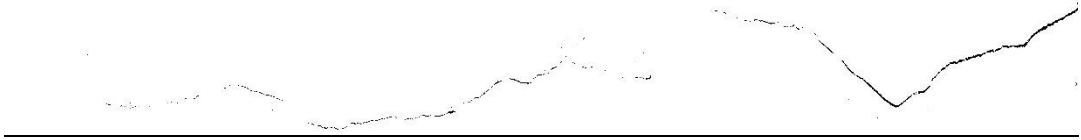


02-X-6C-3dias





02-X-6C-84dias



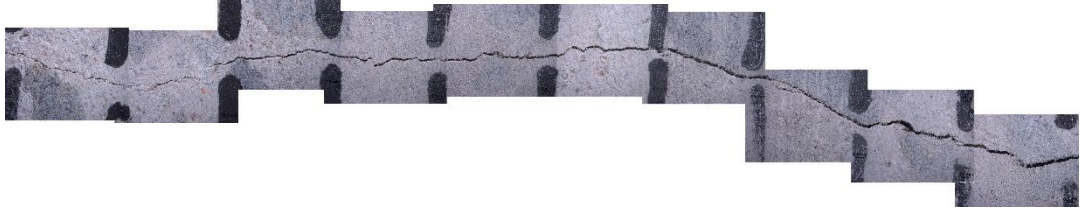
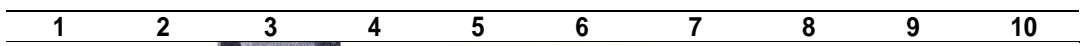
03-X-6C-3dias



03-X-6C-84dias



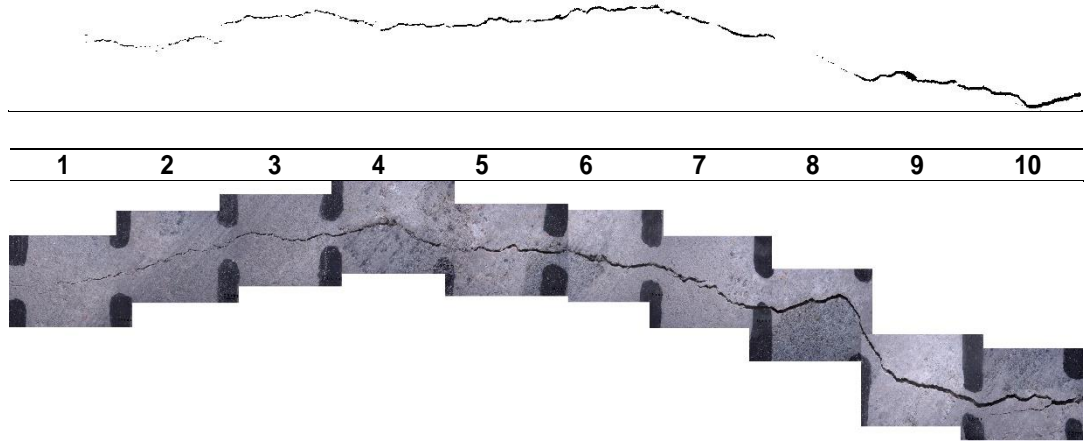
Aditivo cristalizante Y - 6 ciclos de molhagem/secagem



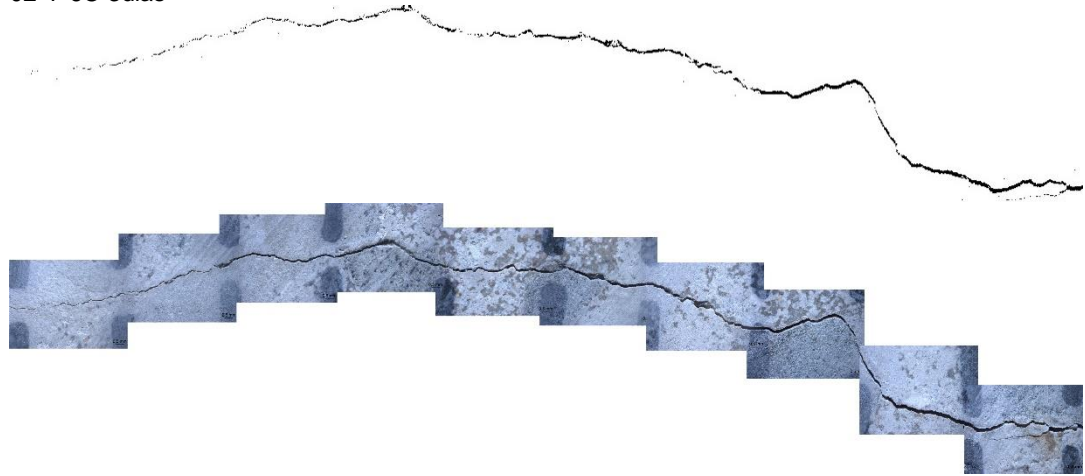
01-Y-6C-3dias



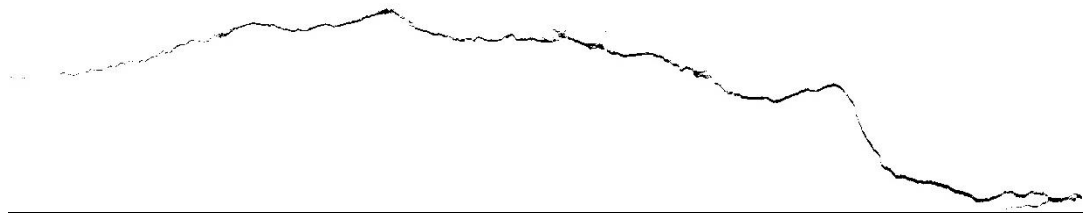
01-Y-6C-84dias



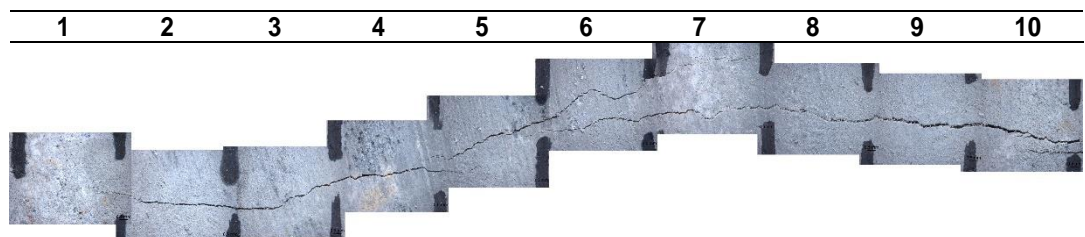
02-Y-6C-3dias



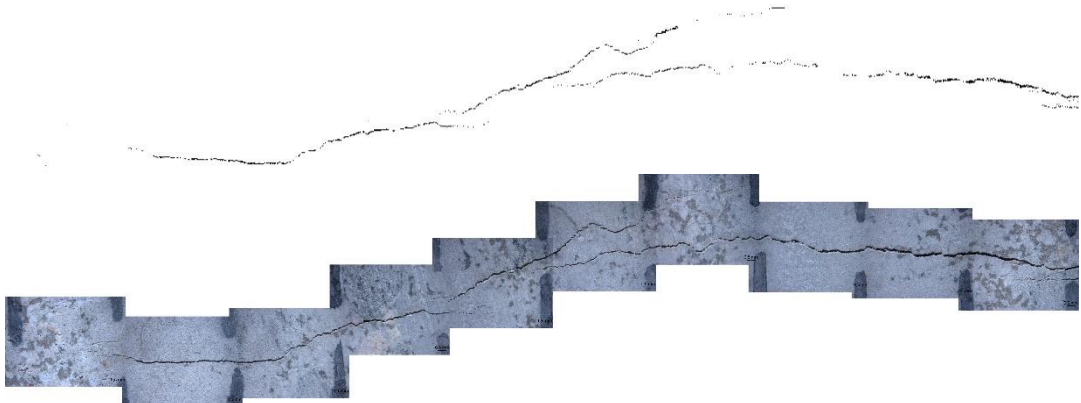
02-Y-6C-84dias



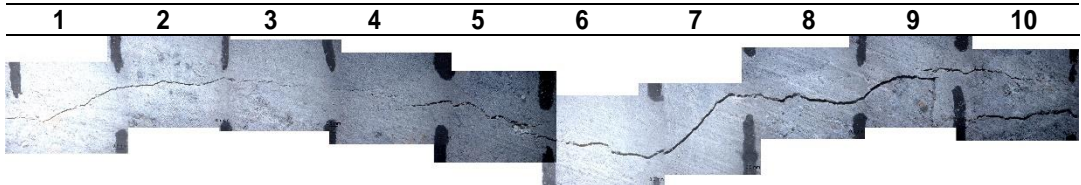
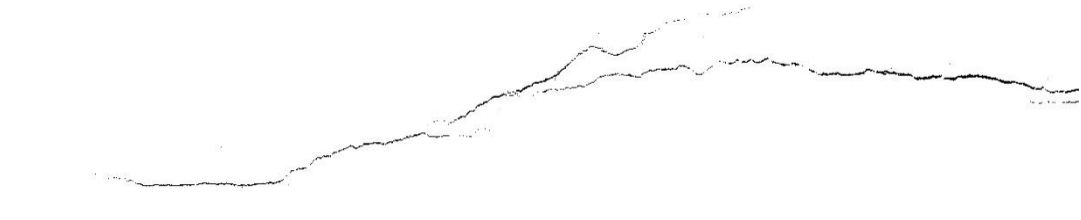
Aditivo cristalizante Z - 6 ciclos de molhagem/secagem



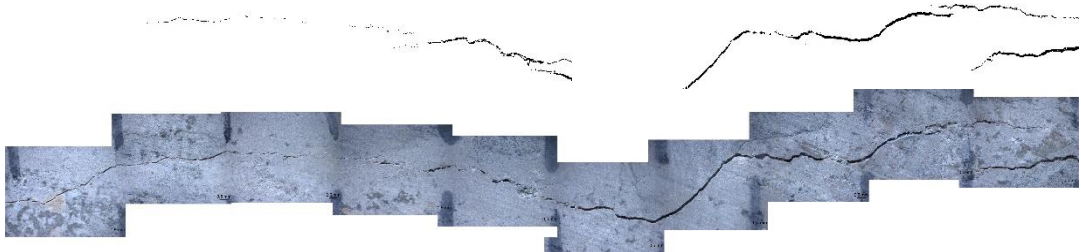
02-Z-6C-3dias



02-Z-6C-84dias



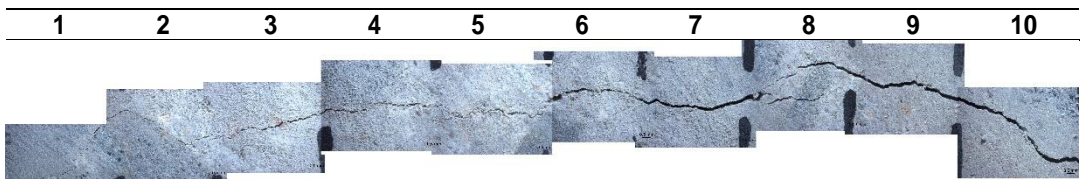
03-Z-6C-3dias



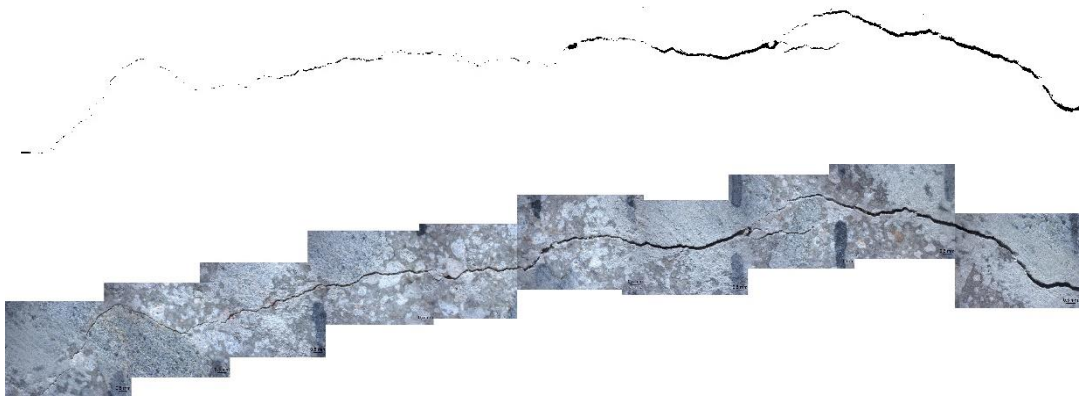
03-Z-6C-84dias



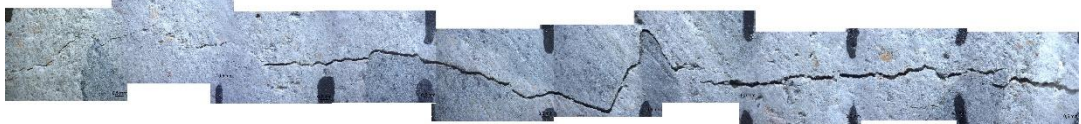
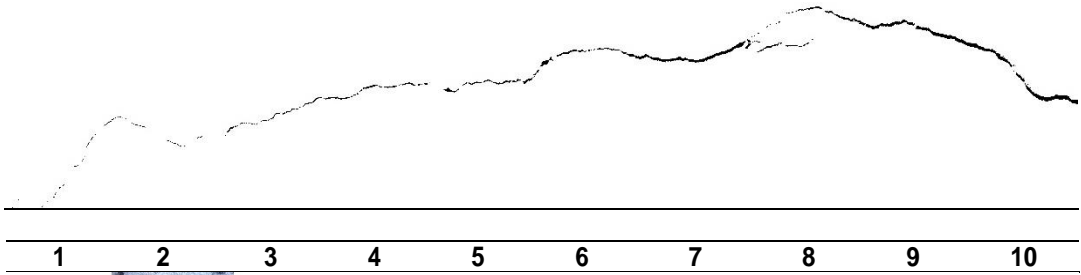
Sílica ativa - 6 ciclos de molhagem/secagem



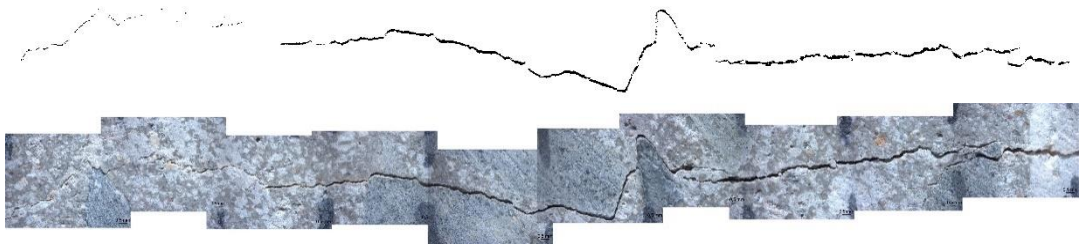
02-SA-6C-3dias



02-SA-6C-84dias



03-SA-6C-3dias



03-SA-6C-84dias



APÊNDICE D – Resultados da difusão de cloretos

Amostras fissuradas – 2 ciclos de molhagem/secagem

Referência

| Referência | Data início | Amostra | 7 dias | | | | 14 dias | | | | 21 dias | | | | | | | | | |
|------------|-------------|---------|--------------------------|-----------------|-----------|--------------------------|-----------------|--------------------------|-----------------|-----------|--------------------------|-----------------|--------------------------|-----------------|-----------|--------------------------|-----------------|--------------------------|-----------------|--------|
| | | | Coleta 1 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 2 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 3 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | | | |
| | | | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | | | |
| | 19.07.19 | 1-F-2C | 10,40 | 8,22 | 9,31 | 0,1284 | | | | | 163,00 | 169,00 | 166,00 | 2,2897 | | | | | | |
| | | 2-F-2C | 2,75 | 2,28 | 2,52 | 0,0347 | | | | | 109,00 | 112,00 | 110,50 | 1,5241 | | | | | | |
| | | 3-F-2C | 1,01 | 0,94 | 0,98 | 0,0135 | | | | | 119,00 | 118,00 | 118,50 | 1,6345 | | | | | | 1,9080 |
| | | | 28 dias | | | | 35 dias | | | | 42 dias | | | | 49 dias | | | | | |
| Coleta 4 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 5 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 6 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 7 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | |
| L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | |
| 183,00 | 197,00 | 190,00 | 2,6207 | | 208,00 | 203,00 | 205,50 | 2,8345 | | 264,00 | 240,00 | 252,00 | 3,4759 | | 270,00 | 240,00 | 255,00 | 3,5172 | | |
| 128,00 | 135,00 | 131,50 | 1,8138 | 2,1471 | 144,00 | 155,00 | 149,50 | 2,0621 | 2,5080 | 159,00 | 155,00 | 157,00 | 2,1655 | 2,6759 | 144,00 | 148,00 | 146,00 | 2,0138 | 2,6414 | |
| 145,00 | 146,00 | 145,50 | 2,0069 | | 204,00 | 177,00 | 190,50 | 2,6276 | | 175,00 | 171,00 | 173,00 | 2,3862 | | 182,00 | 165,00 | 173,50 | 2,3931 | | |
| | | | 56 dias | | | | 63 dias | | | | 70 dias | | | | 77 dias | | | | | |
| Coleta 8 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 9 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 10 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 11 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | |
| L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | |
| 299,00 | 272,00 | 285,50 | 3,9379 | | 415,00 | 317,00 | 366,00 | 5,0483 | | 383,00 | 318,00 | 350,50 | 4,8345 | | 416,50 | 377,00 | 396,75 | 17,6333 | | |
| 175,00 | 161,00 | 168,00 | 2,3172 | 3,0805 | 185,00 | 172,00 | 178,50 | 2,4621 | 3,7563 | 166,00 | 171,00 | 168,50 | 2,3241 | 3,5862 | 186,00 | 180,00 | 183,00 | 2,5241 | 7,9697 | |
| 226,00 | 207,00 | 216,50 | 2,9862 | | 288,00 | 257,00 | 272,50 | 3,7586 | | 263,00 | 259,00 | 261,00 | 3,6000 | | 276,50 | 267,50 | 272,00 | 3,7517 | | |
| | | | 84 dias | | | | 91 dias | | | | 98 dias | | | | 105 dias | | | | | |
| Coleta 12 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 13 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 14 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 15 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | |
| L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | |
| 206,00 | 189,00 | 197,50 | 2,7241 | | 450,00 | 436,00 | 443,00 | 6,1103 | | 536,00 | 531,00 | 533,50 | 7,3586 | | 635,00 | 557,00 | 596,00 | 8,2207 | | |
| 290,00 | 276,00 | 283,00 | 3,9034 | 3,3138 | 208,00 | 200,00 | 204,00 | 2,8138 | 4,6253 | 207,00 | 211,00 | 209,00 | 2,8828 | 5,9080 | 208,00 | 200,00 | 204,00 | 2,8138 | 6,3126 | |
| | | | | | 368,00 | 350,00 | 359,00 | 4,9517 | | 541,00 | 544,00 | 542,50 | 7,4828 | | 570,00 | 576,00 | 573,00 | 7,9034 | | |
| | | | 112 dias | | | | 119 dias | | | | 126 dias | | | | 133 dias | | | | | |
| Coleta 16 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 17 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 18 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 19 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | |
| L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | |
| 630,00 | 574,00 | 602,00 | 8,3034 | | 700,00 | 623,00 | 661,50 | 9,1241 | | 721,00 | 675,00 | 698,00 | 9,6276 | | 812,00 | 717,00 | 764,50 | 10,5448 | | |
| 194,00 | 193,00 | 193,50 | 2,6690 | 6,4874 | 194,00 | 185,00 | 189,50 | 2,6138 | 6,9563 | 208,00 | 196,00 | 202,00 | 2,7862 | 7,2874 | 208,00 | 201,00 | 204,50 | 2,8207 | 8,0391 | |
| 622,00 | 609,00 | 615,50 | 8,4897 | | 649,00 | 675,00 | 662,00 | 9,1310 | | 684,00 | 686,00 | 685,00 | 9,4483 | | 813,00 | 746,00 | 779,50 | 10,7517 | | |
| | | | 140 dias | | | | 147 dias | | | | 154 dias | | | | 161 dias | | | | | |
| Coleta 20 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 21 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 22 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 23 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | |
| L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | |
| 834,00 | 695,00 | 764,50 | 10,5448 | | 896,00 | 766,00 | 831,00 | 11,4621 | | 720,00 | 700,00 | 710,00 | 9,7931 | | 797,50 | 721,50 | 759,50 | 33,7556 | | |
| 208,00 | 206,00 | 207,00 | 2,8552 | 8,0023 | 267,00 | 273,00 | 270,00 | 3,7241 | 8,9310 | 298,00 | 296,00 | 297,00 | 4,0966 | 8,5264 | 288,00 | 282,00 | 285,00 | 3,9310 | 16,5139 | |
| 760,00 | 778,00 | 769,00 | 10,6069 | | 845,00 | 838,00 | 841,50 | 11,6069 | | 855,00 | 840,00 | 847,50 | 11,6897 | | 857,00 | 862,00 | 859,50 | 11,8552 | | |
| | | | 168 dias | | | | 175 dias | | | | 182 dias | | | | 189 dias | | | | | |
| Coleta 24 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 25 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 26 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 27 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | |
| L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | |
| 836,25 | 732,25 | 784,25 | 34,8556 | | 875,00 | 743,00 | 809,00 | 11,1586 | | 757,00 | 755,00 | 756,00 | 10,4276 | | 852,00 | 808,00 | 830,00 | 11,4483 | | |
| 283,00 | 275,00 | 279,00 | 3,8483 | 16,8806 | 278,00 | 268,00 | 273,00 | 3,7655 | 8,9816 | 300,00 | 294,00 | 297,00 | 4,0966 | 9,0161 | 340,00 | 329,00 | 334,50 | 4,6138 | 9,7333 | |
| 858,00 | 873,00 | 865,50 | 11,9379 | | 859,00 | 884,00 | 871,50 | 12,0207 | | 909,00 | 907,00 | 908,00 | 12,5241 | | 959,00 | 946,00 | 952,50 | 13,1379 | | |
| | | | 196 dias | | | | 203 dias | | | | | | | | | | | | | |
| Coleta 28 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 29 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | | | | | | | | | | | |
| L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | | | | | | | | | | | |
| 803,00 | 797,00 | 800,00 | 11,0345 | | 843,00 | 826,00 | 834,50 | 11,5103 | | | | | | | | | | | | |
| 324,00 | 314,00 | 319,00 | 4,4000 | 9,5448 | 345,00 | 319,00 | 332,00 | 4,5793 | 9,6460 | | | | | | | | | | | |
| 958,00 | 956,00 | 957,00 | 13,2000 | | 934,00 | 929,00 | 931,50 | 12,8483 | | | | | | | | | | | | |

Amostras fissuradas – 2 ciclos de molhagem/secagem
Cristalizante X

| Aditivo cristalizante X | Data início | Amostra | 7 dias | | | | | 14 dias | | | | | 21 dias | | | | | | |
|-------------------------|-------------|---------|--------------------------|-----------------|-----------|--------------------------|-----------------|--------------------------|-----------------|-----------|--------------------------|-----------------|--------------------------|-----------------|-----------|--------------------------|-----------------|--------------------------|-----------------|
| | | | Coleta 1 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 2 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 3 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | | |
| | | | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | | |
| | 17.05.19 | 1-F-2C | 16,10 | 14,80 | 15,45 | 0,2207 | | | | | | | | | | | | | |
| | | 2-F-2C | 42,10 | 44,30 | 43,20 | 0,6171 | 0,3268 | 17,00 | 16,60 | 16,80 | 0,2400 | | | 64,20 | 78,80 | 71,50 | 1,0214 | | |
| | | 3-F-2C | 10,20 | 9,74 | 9,97 | 0,1424 | | 53,40 | 57,70 | 55,55 | 0,7936 | 0,8179 | | 97,00 | 111,00 | 104,00 | 1,4857 | 1,5667 | |
| | | | | | | | | 88,80 | 110,00 | 99,40 | 1,4200 | | 144,00 | 163,00 | 153,50 | 2,1929 | | | |
| 28 dias | | | | 35 dias | | | | 42 dias | | | | 49 dias | | | | | | | |
| Coleta 4 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 5 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 6 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 7 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total |
| L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | |
| 74,40 | 85,30 | 79,85 | 1,1407 | | 94,50 | 69,10 | 81,80 | 1,0225 | | 104,00 | 110,00 | 107,00 | 1,5286 | | 82,10 | 81,30 | 81,70 | 1,1269 | |
| 123,00 | 140,00 | 131,50 | 1,8786 | 1,9636 | 114,00 | 122,00 | 118,00 | 1,6857 | 1,7980 | 156,00 | 170,00 | 163,00 | 2,3286 | 2,5833 | 129,00 | 135,00 | 132,00 | 1,8207 | |
| 190,00 | 212,00 | 201,00 | 2,8714 | | 184,00 | 192,00 | 188,00 | 2,6857 | | 300,00 | 245,00 | 272,50 | 3,8929 | | 172,00 | 186,00 | 179,00 | 2,4690 | |
| 56 dias | | | | 63 dias | | | | 70 dias | | | | 77 dias | | | | | | | |
| Coleta 8 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 9 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 10 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 11 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total |
| L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | |
| 63,70 | 69,10 | 66,40 | 0,9159 | | 67,30 | 73,70 | 70,50 | 0,9724 | | 98,70 | 105,00 | 101,85 | 1,4048 | | 108,00 | 109,00 | 108,50 | 1,4966 | |
| 101,00 | 104,00 | 102,50 | 1,4138 | 1,5490 | 108,00 | 111,00 | 109,50 | 1,5103 | 1,7586 | 134,00 | 143,00 | 138,50 | 1,9103 | 2,5993 | 183,00 | 183,00 | 183,00 | 2,5241 | |
| 166,00 | 170,00 | 168,00 | 2,3172 | | 196,00 | 209,00 | 202,50 | 2,7931 | | 320,00 | 330,00 | 325,00 | 4,4828 | | 307,00 | 298,00 | 302,50 | 4,1724 | |
| 84 dias | | | | 91 dias | | | | 98 dias | | | | 105 dias | | | | | | | |
| Coleta 12 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 13 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 14 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 15 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total |
| L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | |
| 118,00 | 121,00 | 119,50 | 1,6483 | | 125,00 | 129,00 | 127,00 | 1,7517 | | 130,00 | 136,00 | 133,00 | 1,8345 | | 114,00 | 118,00 | 116,00 | 1,6000 | |
| 202,00 | 205,00 | 203,50 | 2,8069 | 2,9494 | 211,00 | 217,00 | 214,00 | 2,9517 | 3,0805 | 259,00 | 257,00 | 258,00 | 3,5586 | 3,2874 | 220,00 | 218,00 | 219,00 | 3,0207 | |
| 318,00 | 319,00 | 318,50 | 4,3931 | | 332,00 | 326,00 | 329,00 | 4,5379 | | 326,00 | 322,00 | 324,00 | 4,4690 | | 322,00 | 318,00 | 320,00 | 4,4138 | |
| 112 dias | | | | 119 dias | | | | 126 dias | | | | 133 dias | | | | | | | |
| Coleta 16 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 17 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 18 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 19 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total |
| L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | |
| 112,00 | 112,00 | 112,00 | 1,5448 | | 108,00 | 109,00 | 108,50 | 1,4966 | | 107,00 | 104,00 | 105,50 | 1,4552 | | 121,00 | 116,00 | 118,50 | 1,6345 | |
| 203,00 | 202,00 | 202,50 | 2,7931 | 2,7839 | 225,00 | 227,00 | 226,00 | 3,1172 | 3,0736 | 222,00 | 214,00 | 218,00 | 3,0069 | 2,9770 | 170,00 | 183,00 | 176,50 | 2,4345 | |
| 294,00 | 288,00 | 291,00 | 4,0138 | | 338,00 | 330,00 | 334,00 | 4,6069 | | 328,00 | 320,00 | 324,00 | 4,4690 | | 344,00 | 342,00 | 343,00 | 4,7310 | |
| 168 dias | | | | 175 dias | | | | 182 dias | | | | 189 dias | | | | | | | |
| Coleta 24 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 25 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 26 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 27 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total |
| L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | |
| 104,00 | 108,00 | 106,00 | 1,4621 | | 100,00 | 102,00 | 101,00 | 1,3931 | | 107,00 | 106,00 | 106,50 | 1,4690 | | 108,00 | 110,00 | 109,00 | 1,5034 | |
| 206,00 | 213,00 | 209,50 | 2,8897 | 2,9954 | 224,00 | 222,00 | 223,00 | 3,0759 | 3,1011 | 218,00 | 220,00 | 219,00 | 3,0207 | 3,1540 | 234,00 | 237,00 | 235,50 | 3,2483 | |
| 331,00 | 341,00 | 336,00 | 4,6345 | | 349,00 | 352,00 | 350,50 | 4,8345 | | 360,00 | 361,00 | 360,50 | 4,9724 | | 364,00 | 376,00 | 370,00 | 5,1034 | |
| 140 dias | | | | 147 dias | | | | 154 dias | | | | 161 dias | | | | | | | |
| Coleta 20 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 21 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 22 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 23 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total |
| L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | |
| 111,00 | 108,00 | 100,50 | 1,3862 | | 101,00 | 100,00 | 100,50 | 1,3862 | | 104,00 | 105,00 | 104,50 | 1,4414 | | 100,00 | 102,00 | 101,00 | 1,3931 | |
| 194,00 | 201,50 | 219,00 | 3,0207 | 2,9931 | 218,00 | 220,00 | 219,00 | 3,0207 | 2,9931 | 230,00 | 224,00 | 227,00 | 3,1310 | 3,1034 | 228,00 | 227,00 | 227,50 | 3,1379 | |
| 337,50 | 337,00 | 331,50 | 4,5724 | | 331,00 | 332,00 | 331,50 | 4,5724 | | 346,00 | 341,00 | 343,50 | 4,7379 | | 340,00 | 344,00 | 342,00 | 4,7172 | |
| 196 dias | | | | 203 dias | | | | | | | | | | | | | | | |
| Coleta 28 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 29 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | | | | | | | | | | |
| L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | | | | | | | | | | |
| 104,00 | 104,00 | 104,00 | 1,4345 | | 108,00 | 110,00 | 109,00 | 1,5034 | | | | | | | | | | | |
| 233,00 | 234,00 | 233,50 | 3,2207 | 3,3264 | 240,00 | 243,00 | 241,50 | 3,3310 | 3,4069 | | | | | | | | | | |
| 388,00 | 384,00 | 386,00 | 5,3241 | | 380,00 | 401,00 | 390,50 | 5,3862 | | | | | | | | | | | |

Amostras fissuradas – 6 ciclos de molhagem/secagem
Cristalizante Y

| Aditivo cristalizante y | Data início | Amostra | 7 dias | | | | | 14 dias | | | | | 21 dias | | | | | | | |
|-------------------------|-------------|---------|--------------------------|-----------------|-----------|--------------------------|-----------------|--------------------------|-----------------|-----------|--------------------------|-----------------|--------------------------|-----------------|-----------|--------------------------|-----------------|--------------------------|-----------------|--|
| | | | Coleta 1 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 2 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 3 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | | | |
| | | | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | | | |
| 02.08.18 | 1-F-6C | 3,85 | 4,34 | 4,10 | 0,0565 | 0,0711 | 14,00 | 15,10 | 14,55 | 0,2007 | 0,2540 | 32,60 | 35,60 | 34,10 | 0,4703 | | | | | |
| | 2-F-6C | 6,35 | 7,14 | 6,75 | 0,0930 | | 24,50 | 27,40 | 25,95 | 0,3579 | | 62,20 | 66,30 | 64,25 | 0,8862 | | | | | |
| | 3-F-6C | 4,36 | 4,91 | 4,64 | 0,0639 | | 13,90 | 15,60 | 14,75 | 0,2034 | | 44,80 | 49,60 | 47,20 | 0,6510 | | | | | |
| 28 dias | | | 35 dias | | | | | 42 dias | | | | | 49 dias | | | | | | | |
| Coleta 4 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 5 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 6 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 7 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | |
| L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | |
| 60,70 | 45,70 | 53,20 | 0,7338 | 0,8572 | 60,10 | 63,00 | 61,55 | 0,8490 | 1,0234 | 98,20 | 101,00 | 99,60 | 1,3738 | 1,6786 | 90,30 | 96,00 | 93,15 | 1,2848 | 1,8972 | |
| 71,60 | 75,60 | 73,60 | 1,0152 | | 92,00 | 90,90 | 91,45 | 1,2614 | | 152,00 | 155,00 | 153,50 | 2,1172 | | 195,00 | 196,00 | 195,50 | 2,6966 | | |
| 58,00 | 61,30 | 59,65 | 0,8228 | | 68,30 | 70,90 | 69,60 | 0,9600 | | 111,00 | 113,00 | 112,00 | 1,5448 | | 123,00 | 125,00 | 124,00 | 1,7103 | | |
| 56 dias | | | 63 dias | | | | | 70 dias | | | | | 77 dias | | | | | | | |
| Coleta 8 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 9 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 10 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 11 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | |
| L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | |
| 113,00 | 115,00 | 114,00 | 1,5724 | 2,2437 | 143,00 | 142,00 | 142,50 | 1,9655 | 2,8207 | 154,00 | 151,00 | 152,50 | 2,1034 | 2,9747 | 215,00 | 201,00 | 208,00 | 2,8690 | 3,6391 | |
| 228,00 | 226,00 | 227,00 | 3,1310 | | 298,00 | 289,00 | 293,50 | 4,0483 | | 297,00 | 290,00 | 293,50 | 4,0483 | | 350,00 | 344,00 | 347,00 | 4,7862 | | |
| 147,00 | 147,00 | 147,00 | 2,0276 | | 177,00 | 178,00 | 177,50 | 2,4483 | | 206,00 | 196,00 | 201,00 | 2,7724 | | 237,00 | 236,00 | 236,50 | 3,2621 | | |
| 84 dias | | | 91 dias | | | | | 98 dias | | | | | 105 dias | | | | | | | |
| Coleta 12 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 13 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 14 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 15 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | |
| L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | |
| 315,00 | 301,00 | 308,00 | 4,2483 | 5,3333 | 338,00 | 313,00 | 325,50 | 4,4897 | 5,3862 | 328,00 | 322,00 | 325,00 | 4,4828 | 5,4138 | 333,00 | 334,00 | 333,50 | 4,6000 | 5,5379 | |
| 586,00 | 562,00 | 574,00 | 7,9172 | | 562,00 | 540,00 | 551,00 | 7,6000 | | 576,00 | 562,00 | 569,00 | 7,8483 | | 589,00 | 583,00 | 586,00 | 8,0828 | | |
| 278,00 | 278,00 | 278,00 | 3,8345 | | 302,00 | 288,00 | 295,00 | 4,0690 | | 284,00 | 283,00 | 283,50 | 3,9103 | | 287,00 | 283,00 | 285,00 | 3,9310 | | |
| 112 dias | | | 119 dias | | | | | 126 dias | | | | | 133 dias | | | | | | | |
| Coleta 16 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 17 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 18 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 19 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | |
| L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | |
| 336,00 | 335,00 | 335,50 | 4,6276 | 5,5977 | 348,00 | 380,00 | 364,00 | 5,0207 | 6,0437 | 358,00 | 363,00 | 360,50 | 4,9724 | 6,5954 | 442,00 | 394,00 | 418,00 | 5,7655 | 7,2759 | |
| 603,00 | 598,00 | 600,50 | 8,2828 | | 621,00 | 627,00 | 624,00 | 8,6069 | | 713,00 | 686,00 | 699,50 | 9,6483 | | 744,00 | 717,00 | 730,50 | 10,0759 | | |
| 281,00 | 282,00 | 281,50 | 3,8828 | | 326,00 | 327,00 | 326,50 | 4,5034 | | 363,00 | 386,00 | 374,50 | 5,1655 | | 439,00 | 429,00 | 434,00 | 5,9862 | | |
| 140 dias | | | 147 dias | | | | | 154 dias | | | | | 161 dias | | | | | | | |
| Coleta 20 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 21 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 22 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 23 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | |
| L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | |
| 406,00 | 384,00 | 395,00 | 5,4483 | 7,3149 | 416,00 | 396,50 | 406,25 | 5,6034 | 7,4276 | 421,00 | 402,75 | 411,88 | 5,6810 | 7,4839 | 426,00 | 409,00 | 417,50 | 5,7586 | 7,5402 | |
| 748,00 | 735,00 | 741,50 | 10,2276 | | 744,50 | 730,50 | 737,50 | 10,1724 | | 742,75 | 728,25 | 735,50 | 10,1448 | | 741,00 | 726,00 | 733,50 | 10,1172 | | |
| 466,00 | 443,00 | 454,50 | 6,2690 | | 476,50 | 467,00 | 471,75 | 6,5069 | | 481,75 | 479,00 | 480,38 | 6,2559 | | 487,00 | 491,00 | 489,00 | 6,7448 | | |
| 168 dias | | | 175 dias | | | | | 182 dias | | | | | 189 dias | | | | | | | |
| Coleta 24 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 25 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 26 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 27 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | |
| L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | |
| 436,00 | 419,00 | 427,50 | 5,8966 | 7,8667 | 479,00 | 442,00 | 460,50 | 6,3517 | 8,6529 | 416,00 | 416,00 | 416,00 | 5,7379 | 8,1747 | 462,00 | 452,00 | 457,00 | 6,3034 | 8,4598 | |
| 796,00 | 790,00 | 793,00 | 10,9379 | | 858,00 | 811,00 | 834,50 | 11,5103 | | 834,00 | 800,00 | 817,00 | 11,2690 | | 822,00 | 824,00 | 823,00 | 11,3517 | | |
| 495,00 | 486,00 | 490,50 | 6,7655 | | 593,00 | 581,00 | 587,00 | 8,0966 | | 548,00 | 542,00 | 545,00 | 7,5172 | | 563,00 | 557,00 | 560,00 | 7,7241 | | |
| 196 dias | | | 203 dias | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Coleta 28 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | Coleta 29 | | Média | Méd. real unitária (4ml) | Méd. real total | | | | | | | | | | | |
| L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | L1 (mg/L) | L2 (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | | | | | | | | | | | |
| 445,00 | 435,00 | 440,00 | 6,0690 | 8,7034 | 497,00 | 505,00 | 501,00 | 6,9103 | 9,6851 | | | | | | | | | | | |
| 831,00 | 820,00 | 825,50 | 11,3862 | | 849,00 | 871,00 | 860,00 | 11,8621 | | | | | | | | | | | | |
| 639,00 | 616,00 | 627,50 | 8,6552 | | 729,00 | 762,00 | 745,50 | 10,2828 | | | | | | | | | | | | |

Coeficientes de difusão de cloreto – Amostras fissuradas – 2 e 6 ciclos de molhagem/secagem

| 2 Ciclos com fissura | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|-------------|---------|------------|-----------|-----------|---------|-----|----------|----------|---------|------------------------|------------------------------|-------------------------|--------|
| Material | Data início | Amostra | Ccl (mg/L) | Cs (mg/L) | C0 (mg/L) | erf(z) | z | Ecl (cm) | t (dias) | t (s) | D (cm ² /s) | D médio (cm ² /s) | DP (cm ² /s) | CV (%) |
| REFERÊNCIA | 19.07.19 | 1-F-2C | 3,94 | 58420 | 0 | 0,99993 | 2,8 | 3 | 56 | 4838400 | 5,9E-08 | 5,82E-08 | 1,02E-08 | 17,56 |
| | | 2-F-2C | 2,32 | 58420 | 0 | 0,99996 | 2,8 | 3 | 70 | 6048000 | 4,75E-08 | 6,78E-08 | | |
| | | 3-F-2C | 2,39 | 58420 | 0 | 0,99996 | 2,8 | 3 | 49 | 4233600 | 6,78E-08 | | | |
| Cristalizante (X) | 17.05.19 | 1-F-2C | 1,60 | 58420 | 0 | 0,99997 | 2,8 | 3 | 105 | 9072000 | 3,2E-08 | 4,07E-08 | 8,18E-09 | 20,07 |
| | | 2-F-2C | 1,91 | 58420 | 0 | 0,99997 | 2,8 | 3 | 70 | 6048000 | 4,75E-08 | | | |
| | | 3-F-2C | 4,17 | 58420 | 0 | 0,99993 | 2,8 | 3 | 77 | 6652800 | 4,31E-08 | | | |
| Cristalizante (Y) | 31.05.19 | 1-F-2C | 4,24 | 58420 | 0 | 0,99993 | 2,8 | 3 | 42 | 3628800 | 7,9E-08 | 8,96E-08 | 9,13E-09 | 10,19 |
| | | 2-F-2C | 4,22 | 58420 | 0 | 0,99993 | 2,8 | 3 | 35 | 3024000 | 9,49E-08 | | | |
| | | 3-F-2C | 4,42 | 58420 | 0 | 0,99992 | 2,8 | 3 | 35 | 3024000 | 9,49E-08 | | | |
| Cristalizante (Z) | 07.06.19 | 1-F-2C | 2,77 | 58420 | 0 | 0,99995 | 2,8 | 3 | 91 | 7862400 | 3,7E-08 | 3,56E-08 | 1,51E-09 | 4,22 |
| | | 2-F-2C | 5,11 | 58420 | 0 | 0,99991 | 2,8 | 3 | 91 | 7862400 | 3,65E-08 | | | |
| | | 3-F-2C | 4,19 | 58420 | 0 | 0,99993 | 2,8 | 3 | 98 | 8467200 | 3,39E-08 | | | |
| SILICAATIVA | 09.08.19 | 1-F-2C | 5,94 | 58420 | 0 | 0,99990 | 2,8 | 3 | 49 | 4233600 | 6,8E-08 | 8,47E-08 | 2,94E-08 | 34,64 |
| | | 2-F-2C | 2,12 | 58420 | 0 | 0,99996 | 2,8 | 3 | 49 | 4233600 | 6,78E-08 | | | |
| | | 3-F-2C | 3,09 | 58420 | 0 | 0,99995 | 2,8 | 3 | 28 | 2419200 | 1,19E-07 | | | |
| 6 Ciclos com fissura | | | | | | | | | | | | | | |
| Material | Data início | Amostra | Ccl (mg/L) | Cs (mg/L) | C0 (mg/L) | erf(z) | z | Ecl (cm) | t (dias) | t (s) | D (cm ² /s) | D médio (cm ² /s) | DP (cm ² /s) | CV (%) |
| REFERÊNCIA | 13.09.19 | 1-F-6C | 2,09 | 58420 | 0 | 0,99996 | 2,8 | 3 | 70 | 6048000 | 4,7E-08 | 6,48E-08 | 1,60E-08 | 24,75 |
| | | 2-F-6C | 8,12 | 58420 | 0 | 0,99986 | 2,8 | 3 | 42 | 3628800 | 7,91E-08 | 6,78E-08 | | |
| | | 3-F-6C | 6,06 | 58420 | 0 | 0,99990 | 2,8 | 3 | 49 | 4233600 | 6,78E-08 | | | |
| Cristalizante (X) | 12.07.19 | 1-F-6C | 5,92 | 58420 | 0 | 0,99990 | 2,8 | 3 | 112 | 9676800 | 3,0E-08 | 3,10E-08 | 1,14E-09 | 3,69 |
| | | 2-F-6C | 4,56 | 58420 | 0 | 0,99992 | 2,8 | 3 | 105 | 9072000 | 3,16E-08 | | | |
| | | 3-F-6C | 5,17 | 58420 | 0 | 0,99991 | 2,8 | 3 | 105 | 9072000 | 3,16E-08 | | | |
| Cristalizante (Y) | 26.07.19 | 1-F-6C | 4,25 | 58420 | 0 | 0,99993 | 2,8 | 3 | 84 | 7257600 | 4,0E-08 | 4,07E-08 | 2,08E-09 | 5,09 |
| | | 2-F-6C | 7,92 | 58420 | 0 | 0,99986 | 2,8 | 3 | 84 | 7257600 | 3,95E-08 | | | |
| | | 3-F-6C | 3,26 | 58420 | 0 | 0,99994 | 2,8 | 3 | 77 | 6652800 | 4,31E-08 | | | |
| Cristalizante (Z) | 02.08.18 | 1-F-6C | 4,19 | 58420 | 0 | 0,99993 | 2,8 | 3 | 84 | 7257600 | 4,0E-08 | 4,19E-08 | 2,08E-09 | 4,95 |
| | | 2-F-6C | 3,44 | 58420 | 0 | 0,99994 | 2,8 | 3 | 77 | 6652800 | 4,31E-08 | | | |
| | | 3-F-6C | 2,70 | 58420 | 0 | 0,99995 | 2,8 | 3 | 77 | 6652800 | 4,31E-08 | | | |
| SILICAATIVA | 04.10.19 | 1-F-6C | 6,75 | 58420 | 0 | 0,99988 | 2,8 | 3 | 35 | 3024000 | 9,5E-08 | 7,46E-08 | 3,52E-08 | 47,24 |
| | | 2-F-6C | 10,41 | 58420 | 0 | 0,99982 | 2,8 | 3 | 35 | 3024000 | 9,49E-08 | | | |
| | | 3-F-6C | 4,57 | 58420 | 0 | 0,99992 | 2,8 | 3 | 98 | 8467200 | 3,39E-08 | | | |

Estimativa de vida útil – Amostras fissuradas – 2 ciclos de molhagem/secagem

| Ccl (mg/L) | Cs (mg/L) | erf(z) | z | Ecl (cm) | REFERÊNCIA | | Cristalizante (X) | | Cristalizante (Y) | | Cristalizante (Z) | | SILICA ATIVA | | | | | | |
|------------|-----------|----------|----------|----------|------------|-----------|-------------------|----------|-------------------|-----------|-------------------|-----------|--------------|----------|-----------|-----------|----------|-------|----------|
| | | | | | VU (s) | VU (dias) | VU (anos) | VU (s) | VU (dias) | VU (anos) | VU (s) | VU (dias) | VU (anos) | VU (s) | VU (dias) | VU (anos) | | | |
| 4000 | 6300 | 0,37 | 0,34 | 0,00 | 0 | 0,00E+00 | 0,00 | 0,00 | 0 | 0,00 | 0,00 | 0 | 0,00 | 0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | | |
| | | | 0,34 | 0,25 | 2379988 | 27,55 | 3,40E+06 | 39,34 | 0,11 | 1544992 | 17,88 | 0,05 | 3886346 | 44,98 | 0,12 | 1634258 | 18,92 | 0,05 | 18,92 |
| | | | 0,34 | 0,50 | 9519952 | 110,18 | 1,36E+07 | 157,36 | 0,44 | 6179969 | 71,53 | 0,20 | 15545385 | 179,92 | 0,50 | 6537034 | 75,66 | 0,21 | 75,66 |
| | | | 0,34 | 0,75 | 21419892 | 247,92 | 3,06E+07 | 354,06 | 0,98 | 13904930 | 160,94 | 0,45 | 34977117 | 404,83 | 1,12 | 14708326 | 170,24 | 0,47 | 170,24 |
| | | | 0,34 | 1,00 | 38079808 | 440,74 | 5,44E+07 | 629,44 | 1,75 | 24719876 | 286,11 | 0,79 | 62181541 | 719,69 | 2,00 | 26148135 | 302,64 | 0,84 | 302,64 |
| | | | 0,34 | 1,25 | 59499700 | 688,65 | 8,50E+07 | 983,50 | 2,73 | 38624805 | 447,05 | 1,24 | 97158657 | 1124,52 | 3,12 | 40856461 | 472,88 | 1,31 | 472,88 |
| | | | 0,34 | 1,50 | 85679569 | 991,66 | 1,22E+08 | 1416,24 | 3,93 | 55619720 | 643,75 | 1,79 | 1,4E+08 | 1619,31 | 4,50 | 58833304 | 680,94 | 1,89 | 680,94 |
| | | | 0,34 | 1,75 | 1,17E+08 | 1349,76 | 1,67E+08 | 1927,66 | 5,35 | 75704619 | 876,21 | 2,43 | 1,9E+08 | 2204,06 | 6,12 | 80078663 | 926,84 | 2,57 | 926,84 |
| | | | 0,34 | 2,00 | 1,52E+08 | 1762,95 | 2,18E+08 | 2517,77 | 6,99 | 98879502 | 1144,44 | 3,18 | 2,49E+08 | 2878,78 | 8,00 | 1,05E+08 | 1210,56 | 3,36 | 1210,56 |
| | | | 0,34 | 2,25 | 1,93E+08 | 2231,24 | 2,75E+08 | 3186,55 | 8,85 | 1,25E+08 | 1448,43 | 4,02 | 3,15E+08 | 3643,45 | 10,12 | 1,32E+08 | 1532,12 | 4,26 | 1532,12 |
| | | | 0,34 | 2,50 | 2,38E+08 | 2754,62 | 3,40E+08 | 3934,01 | 10,93 | 1,54E+08 | 1788,19 | 4,97 | 3,89E+08 | 4498,09 | 12,49 | 1,63E+08 | 1891,50 | 5,25 | 1891,50 |
| | | | 0,34 | 2,75 | 2,88E+08 | 3333,09 | 4,11E+08 | 4760,15 | 13,22 | 1,87E+08 | 2163,70 | 6,01 | 4,7E+08 | 5442,68 | 15,12 | 1,98E+08 | 2288,72 | 6,36 | 2288,72 |
| | | | 0,34 | 3,00 | 3,43E+08 | 3966,65 | 4,89E+08 | 5664,97 | 15,74 | 2,22E+08 | 2574,99 | 7,15 | 5,6E+08 | 6477,24 | 17,99 | 2,35E+08 | 2723,76 | 7,57 | 2723,76 |
| | | | 0,34 | 3,25 | 4,02E+08 | 4655,30 | 5,74E+08 | 6648,47 | 18,47 | 2,61E+08 | 3022,03 | 8,39 | 6,57E+08 | 7601,77 | 21,12 | 2,76E+08 | 3196,64 | 8,88 | 3196,64 |
| | | | 0,34 | 3,50 | 4,66E+08 | 5399,05 | 6,66E+08 | 7710,66 | 21,42 | 3,03E+08 | 3504,84 | 9,74 | 7,62E+08 | 8816,25 | 24,49 | 3,2E+08 | 3707,35 | 10,30 | 3707,35 |
| | | | 0,34 | 3,75 | 5,35E+08 | 6197,89 | 7,65E+08 | 8851,52 | 24,59 | 3,48E+08 | 4023,42 | 11,18 | 8,74E+08 | 10120,69 | 28,11 | 3,68E+08 | 4255,88 | 11,82 | 4255,88 |
| | | | 0,34 | 4,00 | 6,09E+08 | 7051,82 | 8,70E+08 | 10071,06 | 27,98 | 3,96E+08 | 4577,75 | 12,72 | 9,95E+08 | 11515,10 | 31,99 | 4,18E+08 | 4842,25 | 13,45 | 4842,25 |
| | | | 0,34 | 4,25 | 6,88E+08 | 7960,84 | 9,82E+08 | 11369,28 | 31,58 | 4,47E+08 | 5167,86 | 14,36 | 1,12E+09 | 12999,47 | 36,11 | 4,72E+08 | 5466,44 | 15,18 | 5466,44 |
| | | | 0,34 | 4,50 | 7,71E+08 | 8924,96 | 1,10E+09 | 12746,19 | 35,41 | 5,01E+08 | 5793,72 | 16,09 | 1,26E+09 | 14573,80 | 40,48 | 5,29E+08 | 6128,47 | 17,02 | 6128,47 |
| | | | 0,34 | 4,75 | 8,59E+08 | 9944,16 | 1,23E+09 | 14201,77 | 39,45 | 5,58E+08 | 6455,35 | 17,93 | 1,4E+09 | 16238,09 | 45,11 | 5,9E+08 | 6828,33 | 18,97 | 6828,33 |
| | | | 0,34 | 5,00 | 9,52E+08 | 11018,46 | 1,36E+09 | 15736,03 | 43,71 | 6,18E+08 | 7152,74 | 19,87 | 1,55E+09 | 17992,34 | 49,98 | 6,54E+08 | 7566,01 | 21,02 | 7566,01 |
| | | | 0,34 | 5,25 | 1,05E+09 | 12147,86 | 1,50E+09 | 17348,98 | 48,19 | 6,81E+08 | 7885,90 | 21,91 | 1,71E+09 | 19836,56 | 55,10 | 7,21E+08 | 8341,53 | 23,17 | 8341,53 |
| | | | 0,34 | 5,50 | 1,15E+09 | 13332,34 | 1,65E+09 | 19040,60 | 52,89 | 7,48E+08 | 8654,82 | 24,04 | 1,88E+09 | 21770,74 | 60,47 | 7,91E+08 | 9154,87 | 25,43 | 9154,87 |
| | | | 0,34 | 5,75 | 1,26E+09 | 14571,92 | 1,80E+09 | 20810,90 | 57,81 | 8,17E+08 | 9459,50 | 26,28 | 2,06E+09 | 23794,87 | 66,10 | 8,65E+08 | 10006,05 | 27,79 | 10006,05 |
| | | | 0,34 | 6,00 | 1,37E+09 | 15866,59 | 1,96E+09 | 22659,89 | 62,94 | 8,9E+08 | 10299,95 | 28,61 | 2,24E+09 | 25908,98 | 71,97 | 9,41E+08 | 10895,06 | 30,26 | 10895,06 |
| | | | 0,34 | 6,25 | 1,49E+09 | 17216,35 | 2,12E+09 | 24587,55 | 68,30 | 9,66E+08 | 11176,16 | 31,04 | 2,43E+09 | 28113,04 | 78,09 | 1,02E+09 | 11821,89 | 32,84 | 11821,89 |
| | | | 0,34 | 6,50 | 1,61E+09 | 18621,20 | 2,30E+09 | 26593,89 | 73,87 | 1,04E+09 | 12088,13 | 33,58 | 2,63E+09 | 30407,06 | 84,46 | 1,1E+09 | 12786,56 | 35,52 | 12786,56 |
| | | | 0,34 | 6,75 | 1,74E+09 | 20081,15 | 2,48E+09 | 28678,92 | 79,66 | 1,13E+09 | 13035,87 | 36,21 | 2,83E+09 | 32791,05 | 91,09 | 1,19E+09 | 13789,06 | 38,30 | 13789,06 |
| | | | 0,34 | 7,00 | 1,87E+09 | 21596,19 | 2,66E+09 | 30842,62 | 85,67 | 1,21E+09 | 14019,37 | 38,94 | 3,05E+09 | 35264,99 | 97,96 | 1,28E+09 | 14829,38 | 41,19 | 14829,38 |
| | | | 0,34 | 7,25 | 2E+09 | 23166,32 | 2,86E+09 | 33085,01 | 91,90 | 1,3E+09 | 15038,64 | 41,77 | 3,27E+09 | 37828,90 | 105,08 | 1,37E+09 | 15907,54 | 44,19 | 15907,54 |
| | | | 0,34 | 7,50 | 2,14E+09 | 24791,54 | 3,06E+09 | 35406,07 | 98,35 | 1,39E+09 | 16093,67 | 44,70 | 3,5E+09 | 40482,77 | 112,45 | 1,47E+09 | 17023,53 | 47,29 | 17023,53 |
| | | | 0,34 | 7,75 | 2,29E+09 | 26471,86 | 3,27E+09 | 37805,82 | 105,02 | 1,48E+09 | 17184,46 | 47,73 | 3,73E+09 | 43226,61 | 120,07 | 1,57E+09 | 18177,34 | 50,49 | 18177,34 |
| | | | 0,34 | 8,00 | 2,44E+09 | 28207,27 | 3,48E+09 | 40284,24 | 111,90 | 1,58E+09 | 18311,02 | 50,86 | 3,98E+09 | 46060,40 | 127,95 | 1,67E+09 | 19368,99 | 53,80 | 19368,99 |
| | | | 0,34 | 8,25 | 2,59E+09 | 29997,77 | 3,70E+09 | 42841,35 | 119,00 | 1,68E+09 | 19473,34 | 54,09 | 4,23E+09 | 48984,16 | 136,07 | 1,78E+09 | 20598,47 | 57,22 | 20598,47 |
| | | | 0,34 | 8,50 | 2,75E+09 | 31843,36 | 3,93E+09 | 45477,13 | 126,33 | 1,79E+09 | 20671,42 | 57,42 | 4,49E+09 | 51997,87 | 144,44 | 1,89E+09 | 21865,77 | 60,74 | 21865,77 |
| | | | 0,34 | 8,75 | 2,92E+09 | 33744,04 | 4,16E+09 | 48191,60 | 133,87 | 1,89E+09 | 21905,27 | 60,85 | 4,76E+09 | 55101,55 | 153,06 | 2E+09 | 23170,91 | 64,36 | 23170,91 |
| 0,34 | 9,00 | 3,08E+09 | 35699,82 | 4,41E+09 | 50984,74 | 141,62 | 2E+09 | 23174,88 | 64,37 | 5,04E+09 | 58295,19 | 161,93 | 2,12E+09 | 24513,88 | 68,09 | 24513,88 | | | |
| 0,34 | 9,25 | 3,26E+09 | 37710,69 | 4,65E+09 | 53856,57 | 149,60 | 2,12E+09 | 24480,26 | 68,00 | 5,32E+09 | 61578,80 | 171,05 | 2,24E+09 | 25894,67 | 71,93 | 25894,67 | | | |
| 0,34 | 9,50 | 3,44E+09 | 39776,65 | 4,91E+09 | 56807,08 | 157,80 | 2,23E+09 | 25821,40 | 71,73 | 5,61E+09 | 64952,36 | 180,42 | 2,36E+09 | 27313,30 | 75,87 | 27313,30 | | | |
| 0,34 | 9,75 | 3,62E+09 | 41897,71 | 5,17E+09 | 59836,26 | 166,21 | 2,35E+09 | 27198,30 | 75,55 | 5,91E+09 | 68415,89 | 190,04 | 2,49E+09 | 28769,76 | 79,92 | 28769,76 | | | |
| 0,34 | 10,00 | 3,81E+09 | 44073,85 | 5,44E+09 | 62944,13 | 174,84 | 2,47E+09 | 28610,97 | 79,47 | 6,22E+09 | 71969,38 | 199,91 | 2,61E+09 | 30264,05 | 84,07 | 30264,05 | | | |

2 CICLOS COM FISSURA

Estimativa de vida útil – Amostras fissuradas – 6 ciclos de molhagem/secagem

| Cicl (mg/L) | | Cs (mg/L) | erf(z) | z | Ecl (cm) | REFERÊNCIA | | Cristalizante (X) | | Cristalizante (Y) | | Cristalizante (Z) | | SILICA ATIVA | | | | |
|-------------|----------|-----------|--------|----------|----------|------------|-----------|-------------------|----------|-------------------|-----------|-------------------|-----------|--------------|-----------|--------|----------|----------|
| mg/L | mg/L | mg/L | | | | VU (s) | VU (dias) | VU (anos) | VU (s) | VU (dias) | VU (anos) | VU (s) | VU (dias) | VU (anos) | VU (anos) | | | |
| 4000 | 6300 | 0,37 | | 0,34 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | | | |
| | | | | 0,34 | 2137838 | 24,74 | 0,07 | 4,47E+06 | 51,74 | 0,14 | 3398983 | 39,34 | 0,11 | 3301869 | 38,22 | 0,11 | 1857112 | 21,49 |
| | | | | 0,34 | 8551352 | 98,97 | 0,27 | 1,79E+07 | 206,97 | 0,57 | 13595932 | 157,36 | 0,44 | 13207476 | 152,86 | 0,42 | 7428447 | 85,98 |
| | | | | 0,34 | 19240543 | 222,69 | 0,62 | 4,02E+07 | 465,69 | 1,29 | 30590846 | 354,06 | 0,98 | 29716822 | 343,94 | 0,96 | 16714007 | 193,45 |
| | | | | 0,34 | 34205409 | 395,90 | 1,10 | 7,15E+07 | 827,89 | 2,30 | 54383726 | 629,44 | 1,75 | 52829905 | 611,46 | 1,70 | 29713790 | 343,91 |
| | | | | 0,34 | 53445952 | 618,59 | 1,72 | 1,12E+08 | 1293,58 | 3,59 | 84974572 | 983,50 | 2,73 | 82546727 | 955,40 | 2,65 | 46427797 | 537,36 |
| | | | | 0,34 | 76962171 | 890,77 | 2,47 | 1,61E+08 | 1862,76 | 5,17 | 1,22E+08 | 1416,24 | 3,93 | 1,19E+08 | 1375,78 | 3,82 | 66856027 | 773,80 |
| | | | | 0,34 | 1,05E+08 | 1212,43 | 3,37 | 2,19E+08 | 2535,42 | 7,04 | 1,67E+08 | 1927,66 | 5,35 | 2,11E+08 | 1872,59 | 5,20 | 90998481 | 1053,22 |
| | | | | 0,34 | 1,37E+08 | 1583,58 | 4,40 | 2,86E+08 | 3311,57 | 9,20 | 2,18E+08 | 2517,77 | 6,99 | 2,11E+08 | 2445,83 | 6,79 | 1,19E+08 | 1375,64 |
| | | | | 0,34 | 1,73E+08 | 2004,22 | 5,57 | 3,62E+08 | 4191,20 | 11,64 | 2,75E+08 | 3186,55 | 8,85 | 2,67E+08 | 3095,50 | 8,60 | 1,5E+08 | 1741,04 |
| | | | | 0,34 | 2,14E+08 | 2474,35 | 6,87 | 4,47E+08 | 5174,32 | 14,37 | 3,4E+08 | 3934,01 | 10,93 | 3,3E+08 | 3821,61 | 10,62 | 1,86E+08 | 2149,44 |
| | | | | 0,34 | 2,59E+08 | 2993,96 | 8,32 | 5,41E+08 | 6260,93 | 17,39 | 4,11E+08 | 4760,15 | 13,22 | 4E+08 | 4624,15 | 12,84 | 2,25E+08 | 2600,82 |
| | | | | 0,34 | 3,08E+08 | 3563,06 | 9,90 | 6,44E+08 | 7451,03 | 20,70 | 4,89E+08 | 5664,97 | 15,74 | 4,75E+08 | 5503,12 | 15,29 | 2,67E+08 | 3095,19 |
| | | | | 0,34 | 3,61E+08 | 4181,65 | 11,62 | 7,56E+08 | 8744,61 | 24,29 | 5,74E+08 | 6648,47 | 18,47 | 5,58E+08 | 6458,52 | 17,94 | 3,14E+08 | 3632,55 |
| | | | | 0,34 | 4,19E+08 | 4849,73 | 13,47 | 8,76E+08 | 10141,67 | 28,17 | 6,66E+08 | 7710,66 | 21,42 | 6,47E+08 | 7490,35 | 20,81 | 3,64E+08 | 4212,89 |
| | | | | 0,34 | 4,81E+08 | 5567,29 | 15,46 | 1,01E+09 | 11642,23 | 32,34 | 7,65E+08 | 8851,52 | 24,59 | 7,43E+08 | 8598,62 | 23,89 | 4,18E+08 | 4836,23 |
| | | | | 0,34 | 5,47E+08 | 6334,34 | 17,60 | 1,14E+09 | 13246,27 | 36,80 | 8,7E+08 | 10071,06 | 27,98 | 8,45E+08 | 9783,32 | 27,18 | 4,75E+08 | 5502,55 |
| | | | | 0,34 | 6,18E+08 | 7150,87 | 19,86 | 1,29E+09 | 14953,80 | 41,54 | 9,82E+08 | 11369,28 | 31,58 | 9,54E+08 | 11044,45 | 30,68 | 5,37E+08 | 6211,87 |
| | | | | 0,34 | 6,93E+08 | 8016,89 | 22,27 | 1,45E+09 | 16764,81 | 46,57 | 1,1E+09 | 12746,19 | 35,41 | 1,07E+09 | 12382,01 | 34,39 | 6,02E+08 | 6964,17 |
| | | | | 0,34 | 7,72E+08 | 8932,40 | 24,81 | 1,61E+09 | 18679,31 | 51,89 | 1,23E+09 | 14201,77 | 39,45 | 1,19E+09 | 13796,00 | 38,32 | 6,7E+08 | 7759,46 |
| | | | | 0,34 | 8,55E+08 | 9897,40 | 27,49 | 1,79E+09 | 20697,30 | 57,49 | 1,36E+09 | 15736,03 | 43,71 | 1,32E+09 | 15286,43 | 42,46 | 7,43E+08 | 8597,74 |
| | | | | 0,34 | 9,43E+08 | 10911,88 | 30,31 | 1,97E+09 | 22818,77 | 63,39 | 1,5E+09 | 17348,98 | 48,19 | 1,46E+09 | 16853,29 | 46,81 | 8,19E+08 | 9479,01 |
| | | | | 0,34 | 1,03E+09 | 11975,85 | 33,27 | 2,16E+09 | 25043,73 | 69,57 | 1,65E+09 | 19040,60 | 52,89 | 1,6E+09 | 18496,58 | 51,38 | 8,99E+08 | 10403,27 |
| | | | | 0,34 | 1,13E+09 | 13089,31 | 36,36 | 2,36E+09 | 27372,17 | 76,03 | 1,8E+09 | 20810,90 | 57,81 | 1,75E+09 | 20216,30 | 56,16 | 9,82E+08 | 11370,51 |
| | | | | 0,34 | 1,23E+09 | 14252,25 | 39,59 | 2,58E+09 | 29804,11 | 82,79 | 1,96E+09 | 22659,89 | 62,94 | 1,9E+09 | 22012,46 | 61,15 | 1,07E+09 | 12380,75 |
| | | | | 0,34 | 1,34E+09 | 15464,69 | 42,96 | 2,79E+09 | 32339,52 | 89,83 | 2,12E+09 | 24587,55 | 68,30 | 2,06E+09 | 23885,05 | 66,35 | 1,16E+09 | 13433,97 |
| | | | | 0,34 | 1,45E+09 | 16726,60 | 46,46 | 3,02E+09 | 34978,43 | 97,16 | 2,3E+09 | 26593,89 | 73,87 | 2,23E+09 | 25834,07 | 71,76 | 1,26E+09 | 14530,18 |
| | | | | 0,34 | 1,56E+09 | 18038,01 | 50,11 | 3,26E+09 | 37720,82 | 104,78 | 2,48E+09 | 28678,92 | 79,66 | 2,41E+09 | 27859,52 | 77,39 | 1,35E+09 | 15669,38 |
| | | | | 0,34 | 1,68E+09 | 19398,90 | 53,89 | 3,50E+09 | 40566,70 | 112,69 | 2,66E+09 | 30842,62 | 85,67 | 2,59E+09 | 29961,40 | 83,23 | 1,46E+09 | 16851,57 |
| | | | | 0,34 | 1,8E+09 | 20809,28 | 57,80 | 3,76E+09 | 43516,06 | 120,88 | 2,86E+09 | 33085,01 | 91,90 | 2,78E+09 | 32139,72 | 89,28 | 1,56E+09 | 18076,75 |
| | | | | 0,34 | 1,92E+09 | 22269,15 | 61,86 | 4,02E+09 | 46568,91 | 129,36 | 3,06E+09 | 35406,07 | 98,35 | 2,97E+09 | 34394,47 | 95,54 | 1,67E+09 | 19344,92 |
| | | | | 0,34 | 2,05E+09 | 23778,50 | 66,05 | 4,30E+09 | 49725,25 | 138,13 | 3,27E+09 | 37805,82 | 105,02 | 3,17E+09 | 36725,65 | 102,02 | 1,78E+09 | 20656,07 |
| | | | | 0,34 | 2,19E+09 | 25337,34 | 70,38 | 4,58E+09 | 52985,08 | 147,18 | 3,48E+09 | 40284,24 | 111,90 | 3,38E+09 | 39133,26 | 108,70 | 1,9E+09 | 22010,21 |
| | | | | 0,34 | 2,33E+09 | 26945,67 | 74,85 | 4,87E+09 | 56348,39 | 156,52 | 3,7E+09 | 42841,35 | 119,00 | 3,6E+09 | 41617,31 | 115,60 | 2,02E+09 | 23407,35 |
| | | | | 0,34 | 2,47E+09 | 28603,48 | 79,45 | 5,17E+09 | 59815,18 | 166,15 | 3,93E+09 | 45477,13 | 126,33 | 3,82E+09 | 44177,79 | 122,72 | 2,15E+09 | 24847,47 |
| | | | | 0,34 | 2,62E+09 | 30310,78 | 84,20 | 5,48E+09 | 63385,47 | 176,07 | 4,16E+09 | 48191,60 | 133,87 | 4,04E+09 | 46814,69 | 130,04 | 2,27E+09 | 26330,58 |
| | | | | 0,34 | 2,77E+09 | 32067,57 | 89,08 | 5,79E+09 | 67059,24 | 186,28 | 4,41E+09 | 50984,74 | 141,62 | 4,28E+09 | 49528,04 | 137,58 | 2,41E+09 | 27856,68 |
| | | | | 0,34 | 2,93E+09 | 33873,85 | 94,09 | 6,12E+09 | 70836,49 | 196,77 | 4,65E+09 | 53856,57 | 149,60 | 4,52E+09 | 52317,81 | 145,33 | 2,54E+09 | 29425,77 |
| | | | | 0,34 | 3,09E+09 | 35729,61 | 99,25 | 6,46E+09 | 74717,24 | 207,55 | 4,91E+09 | 56807,08 | 157,80 | 4,77E+09 | 55184,02 | 153,29 | 2,68E+09 | 31027,84 |
| | | | | 0,34 | 3,25E+09 | 37634,86 | 104,54 | 6,80E+09 | 78701,47 | 218,62 | 5,17E+09 | 59836,26 | 166,21 | 5,02E+09 | 58126,65 | 161,46 | 2,82E+09 | 32692,91 |
| 0,34 | 3,42E+09 | 39589,59 | 109,97 | 7,15E+09 | 82789,18 | 229,97 | 5,44E+09 | 62944,13 | 174,84 | 5,28E+09 | 61145,72 | 169,85 | 2,97E+09 | 34390,96 | | | | |

6 CICLOS COM FISSURA

ANEXO A – Granulometria do cimento



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1180 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 2500.00 mu / 100 Classes

Ref da amostra : IIF
 Type produit : Pó
 Client : UFRGS - LACER
 Comentários : Após calibração
 Líquido : Water (eau)
 Agente dispersante :
 Operador : Natália
 Empresa : UFRGS - LACER
 Localização : Porto Alegre - RS
 Data : 27/04/2018 Hora : 19:48:53
 Índice med. : 5011

Ultrasom : 60 s
 Concentração : 89
 Diâmetro a 10% : 0.34 mu
 Diâmetro a 50% : 2.13 mu
 Diâmetro a 90% : 35.78 mu
 Diâmetro médio : 12.84 mu
 Mie : 1.38-0.00/1.33
 Densidade/Fator : -----
 Superfície específica : -----
 Diluição automática : Sim / Não
 Medida./Limp. : 60/60/4
 SOP : UFRGS L

Valores cumulativos particulares

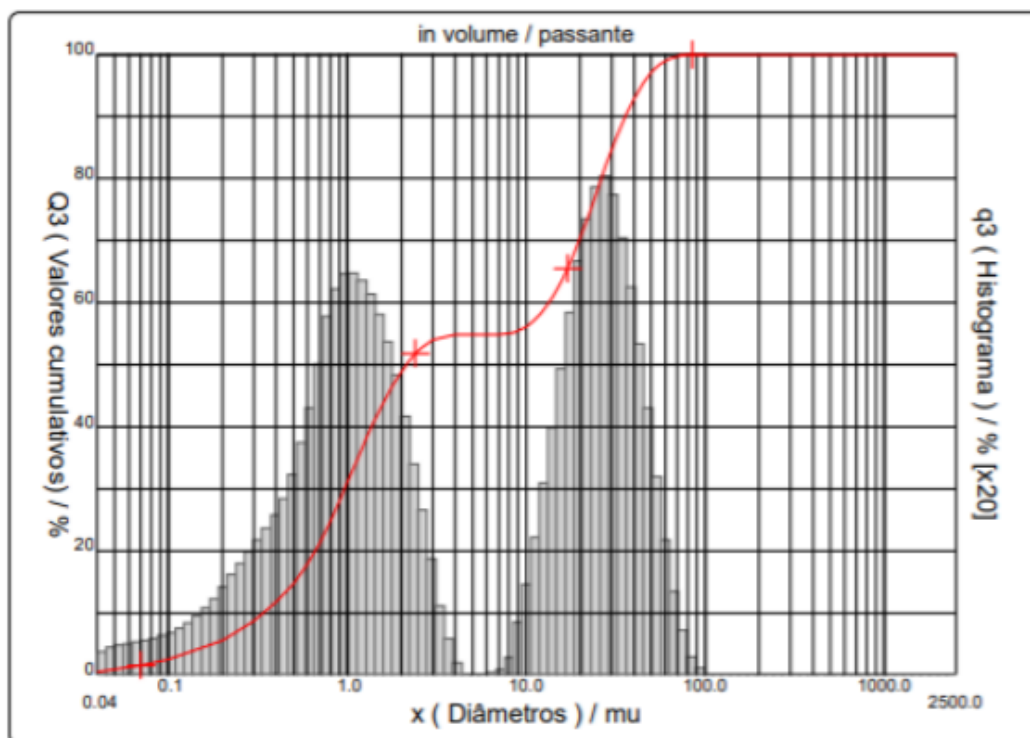
| | | | | | |
|----|------|-------|-------|--------|--------|
| x | 0.10 | 1.00 | 10.00 | 100.0 | 1000.0 |
| Q3 | 2.51 | 31.08 | 56.14 | 100.00 | 100.00 |

in volume / passante

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

Porcentagem do usuário

| | |
|----|-------|
| % | 100.0 |
| Q3 | 90.00 |





DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1180 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 2500.00 mu / 100 Classes

| | | | | |
|--------------------|---------------------|-----------------------|------------------|----|
| Ref da amostra | : IIF | Ultrasom | : 60 | s |
| Type produit | : Pó | Concentração | : 89 | |
| Client | : UFRGS - LACER | Diâmetro a 10% | : 0.34 | mu |
| Comentários | : Após calibração | Diâmetro a 50% | : 2.13 | mu |
| Líquido | : Water (eau) | Diâmetro a 90% | : 35.78 | mu |
| Agente dispersante | : | Diâmetro médio | : 12.84 | mu |
| Operador | : Natália | Mie | : 1.38-0.00/1.33 | |
| Empresa | : UFRGS - LACER | Densidade/Fator | : ----- | |
| Localização | : Porto Alegre - RS | Superfície específica | : ----- | |
| Data : 27/04/2018 | Hora : 19:48:53 | Diluição automática | : Sim / Não | |
| Índice med. | : 5011 | Medida./Limp. | : 60/60/4 | |
| | | SOP : UFRGS L | | |

Valores cumulados característicos

in volume / passante

| | | | | | | | | | | |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| x | 0.04 | 0.07 | 0.10 | 0.20 | 0.30 | 0.40 | 0.50 | 0.60 | 0.70 | 0.80 |
| Q3 | 0.43 | 1.58 | 2.51 | 5.49 | 8.71 | 11.77 | 14.75 | 17.90 | 21.22 | 24.69 |
| q3 | 0.16 | 0.22 | 0.28 | 0.46 | 0.85 | 1.14 | 1.43 | 1.85 | 2.31 | 2.78 |
| x | 0.90 | 1.00 | 1.10 | 1.20 | 1.30 | 1.40 | 1.60 | 1.80 | 2.00 | 2.20 |
| Q3 | 28.01 | 31.08 | 33.85 | 36.34 | 38.58 | 40.59 | 44.00 | 46.72 | 48.87 | 50.54 |
| q3 | 3.02 | 3.12 | 3.11 | 3.06 | 3.00 | 2.90 | 2.73 | 2.47 | 2.18 | 1.88 |
| x | 2.40 | 2.60 | 3.00 | 4.00 | 5.00 | 6.00 | 6.50 | 7.00 | 7.50 | 8.00 |
| Q3 | 51.81 | 52.78 | 54.00 | 54.84 | 54.84 | 54.84 | 54.85 | 54.87 | 54.92 | 55.01 |
| q3 | 1.56 | 1.30 | 0.91 | 0.31 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.03 | 0.08 | 0.15 |
| x | 8.50 | 9.00 | 10.00 | 11.00 | 12.00 | 13.00 | 14.00 | 15.00 | 16.00 | 17.00 |
| Q3 | 55.20 | 55.45 | 56.14 | 57.06 | 58.18 | 59.45 | 60.84 | 62.33 | 63.88 | 65.48 |
| q3 | 0.34 | 0.47 | 0.70 | 1.03 | 1.38 | 1.70 | 2.01 | 2.31 | 2.57 | 2.83 |
| x | 18.00 | 19.00 | 20.00 | 22.00 | 25.00 | 28.00 | 32.00 | 36.00 | 38.00 | 40.00 |
| Q3 | 67.10 | 68.74 | 70.37 | 73.57 | 78.13 | 82.21 | 86.69 | 90.18 | 91.63 | 92.90 |
| q3 | 3.03 | 3.25 | 3.40 | 3.59 | 3.82 | 3.85 | 3.59 | 3.17 | 2.87 | 2.65 |
| x | 45.00 | 50.00 | 53.00 | 56.00 | 63.00 | 71.00 | 75.00 | 80.00 | 85.00 | 90.00 |
| Q3 | 95.41 | 97.13 | 97.87 | 98.44 | 99.29 | 99.76 | 99.87 | 99.94 | 99.98 | 100.00 |
| q3 | 2.28 | 1.75 | 1.36 | 1.11 | 0.77 | 0.42 | 0.21 | 0.12 | 0.07 | 0.04 |
| x | 95.00 | 100.0 | 106.0 | 112.0 | 125.0 | 130.0 | 140.0 | 145.0 | 150.0 | 160.0 |
| Q3 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| q3 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| x | 170.0 | 180.0 | 190.0 | 200.0 | 212.0 | 242.0 | 250.0 | 300.0 | 400.0 | 500.0 |
| Q3 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| q3 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| x | 600.0 | 700.0 | 800.0 | 900.0 | 1000.0 | 1100.0 | 1200.0 | 1300.0 | 1400.0 | 1500.0 |
| Q3 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| q3 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| x | 1600.0 | 1700.0 | 1800.0 | 1900.0 | 2000.0 | 2100.0 | 2200.0 | 2300.0 | 2400.0 | 2500.0 |
| Q3 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| q3 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

ANEXO B – Granulometria dos aditivos cristalizantes



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1180 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 2500.00 mu / 100 Classes

| | | | | |
|--------------------|---------------------|-----------------------|-------------|----|
| Ref da amostra | X | Ultrasom | : 60 | s |
| Type produit | | Concentração | : 186 | |
| Client | : UFRGS - LACER | Diâmetro a 10% | : 0.92 | mu |
| Comentários | : Após calibração | Diâmetro a 50% | : 8.14 | mu |
| Líquido | : Water (eau) | Diâmetro a 90% | : 22.96 | mu |
| Agente dispersante | : | Diâmetro médio | : 10.11 | mu |
| Operador | : Aline | Fraunhofer | | |
| Empresa | : UFRGS - LACER | Densidade/Fator | ----- | |
| Localização | : Porto Alegre - RS | Superfície específica | ----- | |
| Data : 01/02/2019 | Hora : 10:55:59 | Diluição automática | : Sim / Não | |
| Índice med. | : 5312 | Medida/Limp. | : 60/60/4 | |
| | | SOP : UFRGS L | | |

Valores cumulativos particulares

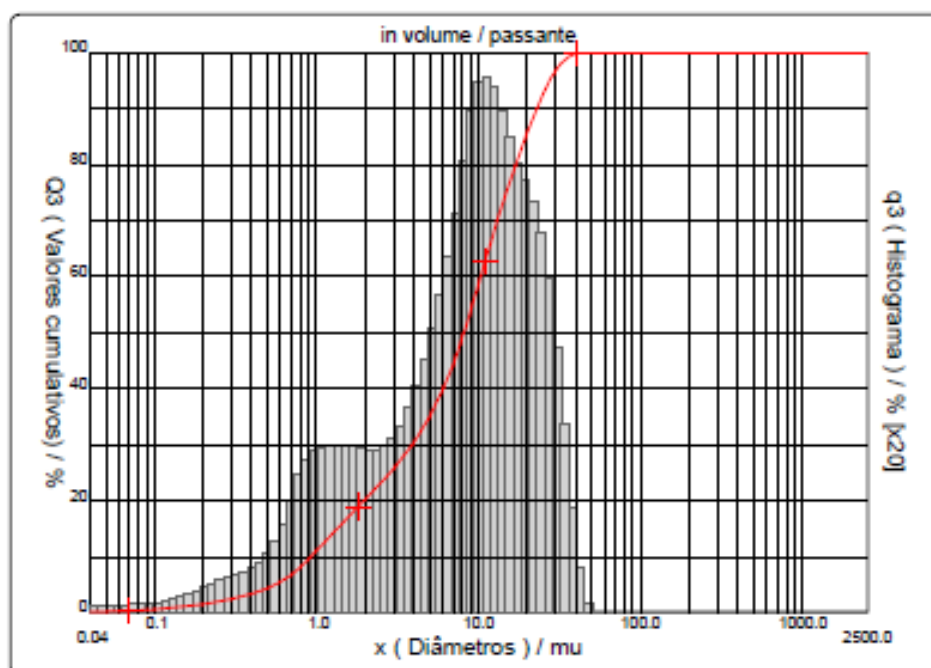
in volume / passante

| | | | | | |
|----|------|-------|-------|--------|--------|
| x | 0.10 | 1.00 | 10.00 | 100.0 | 1000.0 |
| Q3 | 0.63 | 11.10 | 58.60 | 100.00 | 100.00 |

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

Porcentagem do usuário

| | |
|----|-------|
| % | 100.0 |
| Q3 | 45.00 |





DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1180 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 2500.00 mu / 100 Classes

| | |
|---|---|
| Ref da amostra : X Type produit : Client : UFRGS - LACER Comentários : Após calibração Líquido : Water (eau) Agente dispersante : Operador : Aline Empresa : UFRGS - LACER Localização : Porto Alegre - RS Data : 01/02/2019 Hora : 10:55:59 Índice med. : 5312 | Ultrassom : 60 s Concentração : 186 Diâmetro a 10% : 0.92 mu Diâmetro a 50% : 8.14 mu Diâmetro a 90% : 22.96 mu Diâmetro médio : 10.11 mu Fraunhofer : Densidade/Fator : ----- Superfície específica : ----- Diluição automática : Sim / Não Medida./Limp. : 60/60/4 SOP : UFRGS L |
|---|---|

Valores cumulados característicos in volume / passante

| | | | | | | | | | | |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| x | 0.04 | 0.07 | 0.10 | 0.20 | 0.30 | 0.40 | 0.50 | 0.60 | 0.70 | 0.80 |
| Q3 | 0.11 | 0.40 | 0.63 | 1.48 | 2.51 | 3.45 | 4.39 | 5.49 | 6.78 | 8.26 |
| q3 | 0.04 | 0.05 | 0.06 | 0.12 | 0.24 | 0.31 | 0.40 | 0.58 | 0.80 | 1.06 |
| x | 0.90 | 1.00 | 1.10 | 1.20 | 1.30 | 1.40 | 1.60 | 1.80 | 2.00 | 2.20 |
| Q3 | 9.72 | 11.10 | 12.36 | 13.52 | 14.59 | 15.57 | 17.35 | 18.91 | 20.29 | 21.53 |
| q3 | 1.19 | 1.26 | 1.27 | 1.28 | 1.28 | 1.27 | 1.28 | 1.27 | 1.26 | 1.25 |
| x | 2.40 | 2.60 | 3.00 | 4.00 | 5.00 | 6.00 | 6.50 | 7.00 | 7.50 | 8.00 |
| Q3 | 22.66 | 23.73 | 25.72 | 30.44 | 35.11 | 39.81 | 42.17 | 44.54 | 46.92 | 49.32 |
| q3 | 1.24 | 1.28 | 1.33 | 1.57 | 2.01 | 2.47 | 2.83 | 3.07 | 3.31 | 3.56 |
| x | 8.50 | 9.00 | 10.00 | 11.00 | 12.00 | 13.00 | 14.00 | 15.00 | 16.00 | 17.00 |
| Q3 | 51.72 | 54.08 | 58.60 | 62.72 | 66.44 | 69.76 | 72.72 | 75.39 | 77.79 | 79.99 |
| q3 | 3.79 | 3.96 | 4.11 | 4.14 | 4.10 | 3.98 | 3.83 | 3.71 | 3.56 | 3.48 |
| x | 18.00 | 19.00 | 20.00 | 22.00 | 25.00 | 28.00 | 32.00 | 36.00 | 38.00 | 40.00 |
| Q3 | 82.00 | 83.88 | 85.62 | 88.73 | 92.55 | 95.43 | 97.92 | 99.25 | 99.58 | 99.80 |
| q3 | 3.37 | 3.33 | 3.25 | 3.13 | 2.86 | 2.44 | 1.79 | 1.08 | 0.59 | 0.41 |
| x | 45.00 | 50.00 | 53.00 | 56.00 | 63.00 | 71.00 | 75.00 | 80.00 | 85.00 | 90.00 |
| Q3 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| q3 | 0.16 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| x | 95.00 | 100.0 | 106.0 | 112.0 | 125.0 | 130.0 | 140.0 | 145.0 | 150.0 | 160.0 |
| Q3 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| q3 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| x | 170.0 | 180.0 | 190.0 | 200.0 | 212.0 | 242.0 | 250.0 | 300.0 | 400.0 | 500.0 |
| Q3 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| q3 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| x | 600.0 | 700.0 | 800.0 | 900.0 | 1000.0 | 1100.0 | 1200.0 | 1300.0 | 1400.0 | 1500.0 |
| Q3 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| q3 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| x | 1600.0 | 1700.0 | 1800.0 | 1900.0 | 2000.0 | 2100.0 | 2200.0 | 2300.0 | 2400.0 | 2500.0 |
| Q3 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| q3 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1180 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 2500.00 mu / 100 Classes

Ref da amostra : Y
 Type produit :
 Client : UFRGS - LACER
 Comentários : Após calibração
 Líquido : Water (eau)
 Agente dispersante :
 Operador : Aline
 Empresa : UFRGS - LACER
 Localização : Porto Alegre - RS
 Data : 01/02/2019 Hora : 10:37:53
 Índice med. : 5311

Ultrasom : 60 s
 Concentração : 156
 Diâmetro a 10% : 1.73 mu
 Diâmetro a 50% : 11.63 mu
 Diâmetro a 90% : 30.74 mu
 Diâmetro médio : 14.42 mu
 Fraunhofer :
 Densidade/Fator :
 Superfície específica :
 Diluição automática : Sim / Não
 Medida./Limp. : 60/60/4
 SOP : UFRGS L

Valores cumulativos particulares

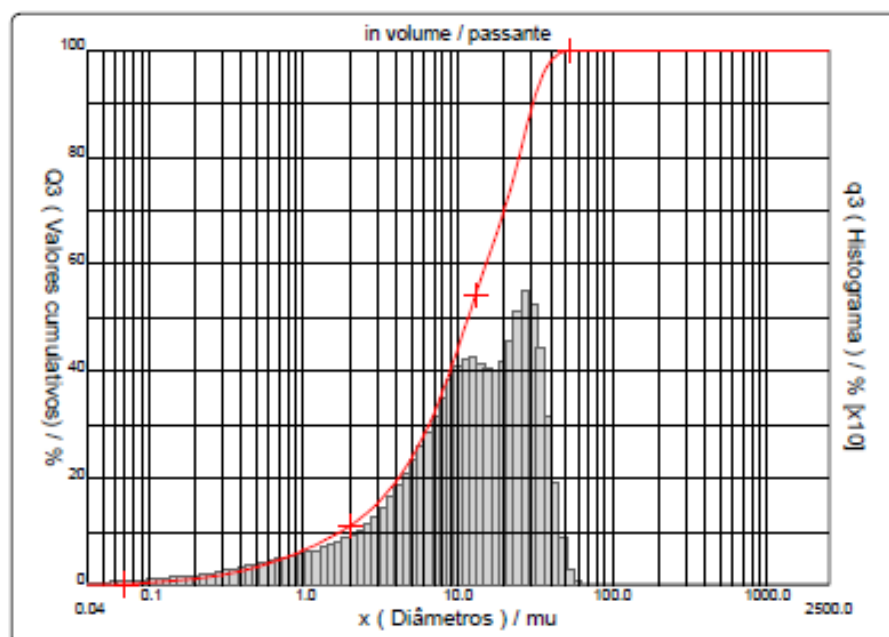
in volume / passante

| | | | | | |
|----|------|------|-------|--------|--------|
| x | 0.10 | 1.00 | 10.00 | 100.0 | 1000.0 |
| Q3 | 0.43 | 6.55 | 44.25 | 100.00 | 100.00 |

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

Porcentagem do usuário

| | |
|----|-------|
| % | 100.0 |
| Q3 | 56.00 |





DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1180 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 2500.00 mu / 100 Classes

| | |
|---|--|
| Ref da amostra : Y Type produit : Client : UFRGS - LACER Comentários : Após calibração Líquido : Water (eau) Agente dispersante : Operador : Aline Empresa : UFRGS - LACER Localização : Porto Alegre - RS Data : 01/02/2019 Hora : 10:37:53 Índice med. : 5311 | Ultrassom : 60 s Concentração : 156 Diâmetro a 10% : 1.73 mu Diâmetro a 50% : 11.63 mu Diâmetro a 90% : 30.74 mu Diâmetro médio : 14.42 mu Fraunhofer : Densidade/Fator : Superfície específica : Diluição automática : Sim / Não Medida./Limp. : 60/60/4 SOP : UFRGS L |
|---|--|

Valores cumulados característicos in volume / passante

| | | | | | | | | | | |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| x | 0.04 | 0.07 | 0.10 | 0.20 | 0.30 | 0.40 | 0.50 | 0.60 | 0.70 | 0.80 |
| Q3 | 0.00 | 0.19 | 0.43 | 1.23 | 1.98 | 2.72 | 3.43 | 4.12 | 4.78 | 5.40 |
| q3 | 0.00 | 0.03 | 0.06 | 0.11 | 0.18 | 0.25 | 0.30 | 0.36 | 0.41 | 0.44 |
| x | 0.90 | 1.00 | 1.10 | 1.20 | 1.30 | 1.40 | 1.60 | 1.80 | 2.00 | 2.20 |
| Q3 | 5.99 | 6.55 | 7.08 | 7.58 | 8.07 | 8.54 | 9.44 | 10.31 | 11.16 | 11.98 |
| q3 | 0.48 | 0.51 | 0.53 | 0.55 | 0.58 | 0.60 | 0.64 | 0.70 | 0.77 | 0.82 |
| x | 2.40 | 2.60 | 3.00 | 4.00 | 5.00 | 6.00 | 6.50 | 7.00 | 7.50 | 8.00 |
| Q3 | 12.80 | 13.62 | 15.26 | 19.46 | 23.74 | 27.99 | 30.09 | 32.18 | 34.25 | 36.31 |
| q3 | 0.90 | 0.98 | 1.09 | 1.39 | 1.83 | 2.22 | 2.50 | 2.69 | 2.86 | 3.04 |
| x | 8.50 | 9.00 | 10.00 | 11.00 | 12.00 | 13.00 | 14.00 | 15.00 | 16.00 | 17.00 |
| Q3 | 38.36 | 40.37 | 44.25 | 47.87 | 51.21 | 54.25 | 57.01 | 59.54 | 61.86 | 64.04 |
| q3 | 3.22 | 3.35 | 3.51 | 3.62 | 3.66 | 3.62 | 3.55 | 3.49 | 3.42 | 3.43 |
| x | 18.00 | 19.00 | 20.00 | 22.00 | 25.00 | 28.00 | 32.00 | 36.00 | 38.00 | 40.00 |
| Q3 | 66.13 | 68.17 | 70.19 | 74.20 | 80.23 | 85.85 | 91.79 | 95.80 | 97.10 | 98.06 |
| q3 | 3.48 | 3.59 | 3.75 | 4.01 | 4.49 | 4.72 | 4.24 | 3.24 | 2.29 | 1.78 |
| x | 45.00 | 50.00 | 53.00 | 56.00 | 63.00 | 71.00 | 75.00 | 80.00 | 85.00 | 90.00 |
| Q3 | 99.42 | 99.86 | 99.96 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| q3 | 1.10 | 0.40 | 0.16 | 0.07 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| x | 95.00 | 100.0 | 106.0 | 112.0 | 125.0 | 130.0 | 140.0 | 145.0 | 150.0 | 160.0 |
| Q3 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| q3 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| x | 170.0 | 180.0 | 190.0 | 200.0 | 212.0 | 242.0 | 250.0 | 300.0 | 400.0 | 500.0 |
| Q3 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| q3 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| x | 600.0 | 700.0 | 800.0 | 900.0 | 1000.0 | 1100.0 | 1200.0 | 1300.0 | 1400.0 | 1500.0 |
| Q3 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| q3 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| x | 1600.0 | 1700.0 | 1800.0 | 1900.0 | 2000.0 | 2100.0 | 2200.0 | 2300.0 | 2400.0 | 2500.0 |
| Q3 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| q3 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1180 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 2500.00 mu / 100 Classes

| | | | | | |
|--------------------|---------------------|---|-----------------------|-------------|----|
| Ref da amostra | Z | I | Ultrasom | : 60 | s |
| Type produit | | | Concentração | : 161 | |
| Client | : UFRGS - LACER | | Diâmetro a 10% | : 1.00 | mu |
| Comentários | : Após calibração | | Diâmetro a 50% | : 9.06 | mu |
| Líquido | : Water (eau) | | Diâmetro a 90% | : 23.11 | mu |
| Agente dispersante | : | | Diâmetro médio | : 10.72 | mu |
| Operador | : Aline | | Fraunhofer | | |
| Empresa | : UFRGS - LACER | | Densidade/Fator | ----- | |
| Localização | : Porto Alegre - RS | | Superfície específica | ----- | |
| Data : 01/02/2019 | Hora : 11:14:01 | | Diluição automática | : Sim / Não | |
| Índice med. | : 5313 | | Medida./Limp. | : 60/60/4 | |
| | | | SOP : UFRGS L | | |

Valores cumulativos particulares

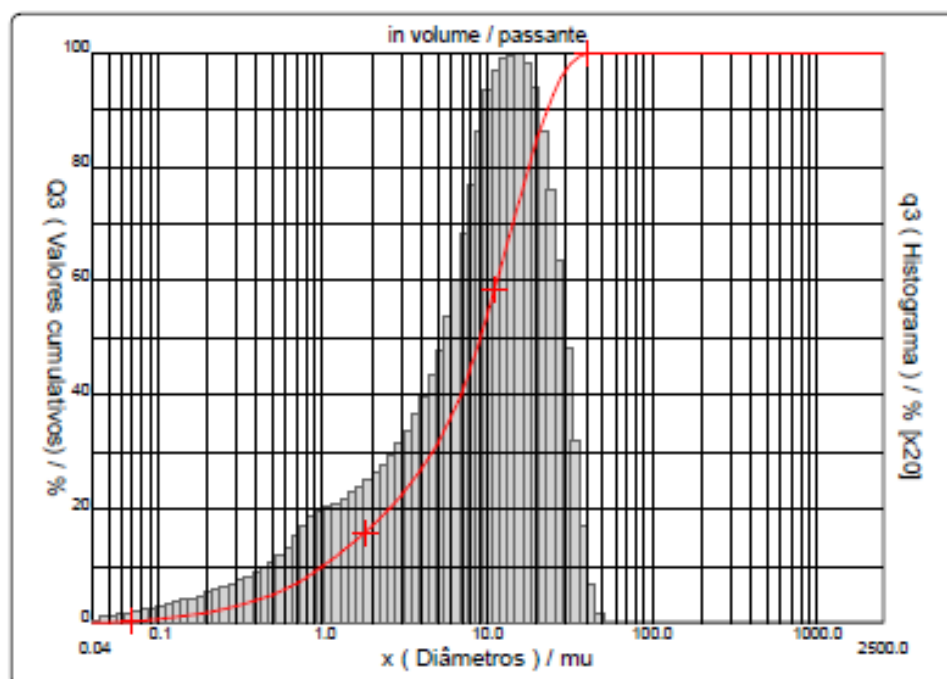
in volume / passante

| | | | | | |
|----|------|-------|-------|--------|--------|
| x | 0.10 | 1.00 | 10.00 | 100.0 | 1000.0 |
| Q3 | 0.66 | 10.00 | 54.16 | 100.00 | 100.00 |

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

Porcentagem do usuário

| | |
|----|-------|
| % | 100.0 |
| Q3 | 45.00 |





DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1180 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 2500.00 mu / 100 Classes

| | |
|---|---|
| Ref da amostra : Z 1 Type produit : Client : UFRGS - LACER Comentários : Após calibração Líquido : Water (eau) Agente dispersante : Operador : Aline Empresa : UFRGS - LACER Localização : Porto Alegre - RS Data : 01/02/2019 Hora : 11:14:01 Índice med. : 5313 | Ultrassom : 60 s Concentração : 161 Diâmetro a 10% : 1.00 mu Diâmetro a 50% : 9.08 mu Diâmetro a 90% : 23.11 mu Diâmetro médio : 10.72 mu Fraunhofer : Densidade/Fator : ----- Superfície específica : ----- Diluição automática : Sim / Não Medida./Limp. : 60/60/4 SOP : UFRGS L |
|---|---|

Valores cumulados característicos in volume / passante

| | | | | | | | | | | |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| x | 0.04 | 0.07 | 0.10 | 0.20 | 0.30 | 0.40 | 0.50 | 0.60 | 0.70 | 0.80 |
| Q3 | 0.01 | 0.30 | 0.66 | 1.86 | 3.00 | 4.05 | 5.05 | 6.05 | 7.06 | 8.08 |
| q3 | 0.00 | 0.05 | 0.10 | 0.16 | 0.27 | 0.34 | 0.42 | 0.52 | 0.62 | 0.72 |
| x | 0.90 | 1.00 | 1.10 | 1.20 | 1.30 | 1.40 | 1.60 | 1.80 | 2.00 | 2.20 |
| Q3 | 9.07 | 10.00 | 10.87 | 11.88 | 12.46 | 13.20 | 14.59 | 15.89 | 17.11 | 18.26 |
| q3 | 0.79 | 0.83 | 0.86 | 0.88 | 0.92 | 0.94 | 0.98 | 1.04 | 1.09 | 1.14 |
| x | 2.40 | 2.60 | 3.00 | 4.00 | 5.00 | 6.00 | 6.50 | 7.00 | 7.50 | 8.00 |
| Q3 | 19.36 | 20.42 | 22.44 | 27.14 | 31.60 | 36.04 | 38.28 | 40.54 | 42.82 | 45.11 |
| q3 | 1.19 | 1.25 | 1.33 | 1.54 | 1.89 | 2.30 | 2.64 | 2.88 | 3.12 | 3.35 |
| x | 8.50 | 9.00 | 10.00 | 11.00 | 12.00 | 13.00 | 14.00 | 15.00 | 16.00 | 17.00 |
| Q3 | 47.42 | 49.71 | 54.16 | 58.33 | 62.22 | 65.81 | 69.15 | 72.27 | 75.18 | 77.87 |
| q3 | 3.60 | 3.78 | 3.99 | 4.13 | 4.22 | 4.23 | 4.25 | 4.27 | 4.28 | 4.19 |
| x | 18.00 | 19.00 | 20.00 | 22.00 | 25.00 | 28.00 | 32.00 | 36.00 | 38.00 | 40.00 |
| Q3 | 80.36 | 82.65 | 84.73 | 88.37 | 92.61 | 95.63 | 98.10 | 99.34 | 99.64 | 99.82 |
| q3 | 4.11 | 4.00 | 3.83 | 3.60 | 3.13 | 2.51 | 1.75 | 0.99 | 0.52 | 0.33 |
| x | 45.00 | 50.00 | 53.00 | 56.00 | 63.00 | 71.00 | 75.00 | 80.00 | 85.00 | 90.00 |
| Q3 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| q3 | 0.14 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| x | 95.00 | 100.0 | 106.0 | 112.0 | 125.0 | 130.0 | 140.0 | 145.0 | 150.0 | 160.0 |
| Q3 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| q3 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| x | 170.0 | 180.0 | 190.0 | 200.0 | 212.0 | 242.0 | 250.0 | 300.0 | 400.0 | 500.0 |
| Q3 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| q3 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| x | 600.0 | 700.0 | 800.0 | 900.0 | 1000.0 | 1100.0 | 1200.0 | 1300.0 | 1400.0 | 1500.0 |
| Q3 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| q3 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| x | 1600.0 | 1700.0 | 1800.0 | 1900.0 | 2000.0 | 2100.0 | 2200.0 | 2300.0 | 2400.0 | 2500.0 |
| Q3 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| q3 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

ANEXO C – Granulometria da sílica ativa



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1180 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 2500.00 mu / 100 Classes

Ref da amostra : Silica Ativa
 Type produit : Pó
 Client : UFRGS - LACER
 Comentários : Após calibração
 Líquido : Water (eau)
 Agente dispersante :
 Operador : Nicollas
 Empresa : UFRGS - LACER
 Localização : Porto Alegre - RS
 Data : 09/03/2020 Hora : 12:22:24
 Índice med. : 5844

Ultrasom : 60 s
 Concentração : 127
 Diâmetro a 10% : 5.29 mu
 Diâmetro a 50% : 30.80 mu
 Diâmetro a 90% : 54.18 mu
 Diâmetro médio : 29.99 mu
 Fraunhofer
 Densidade/Fator : -----
 Superfície específica : -----
 Diluição automática : Sim / Não
 Medida./Limp. : 60/60/4
 SOP : UFRGS L

Valores cumulativos particulares

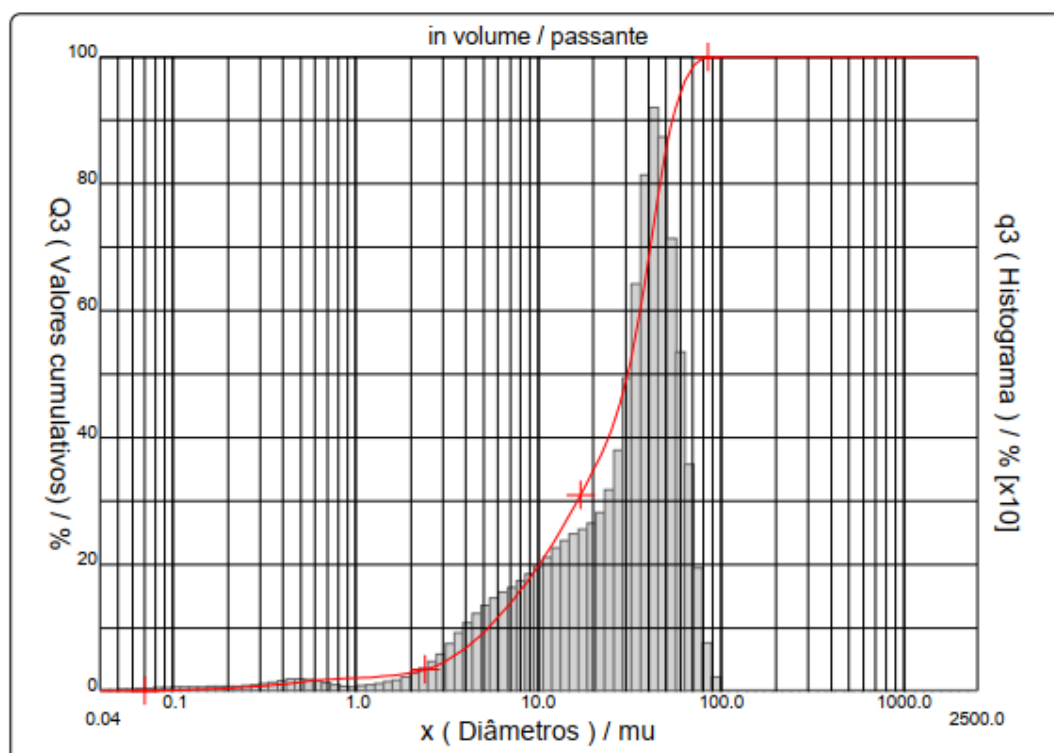
| | | | | | |
|----|------|------|-------|--------|--------|
| x | 0.10 | 1.00 | 10.00 | 100.0 | 1000.0 |
| Q3 | 0.18 | 2.07 | 19.75 | 100.00 | 100.00 |

in volume / passante

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

Porcentagem do usuário

| | |
|----|-------|
| % | 100.0 |
| Q3 | 90.00 |





DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1180 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 2500.00 mu / 100 Classes

Ref da amostra : Sílica Ativa
 Type produit : Pó
 Client : UFRGS - LACER
 Comentários : Após calibração
 Líquido : Water (eau)
 Agente dispersante :
 Operador : Nicollas
 Empresa : UFRGS - LACER
 Localização : Porto Alegre - RS
 Data : 09/03/2020 Hora : 12:22:24
 Índice med. : 5844

Ultrasom : 60 s
 Concentração : 127
 Diâmetro a 10% : 5.29 mu
 Diâmetro a 50% : 30.80 mu
 Diâmetro a 90% : 54.18 mu
 Diâmetro médio : 29.99 mu
 Fraunhofer
 Densidade/Fator : -----
 Superfície específica : -----
 Diluição automática : Sim / Não
 Medida./Limp. : 60/60/4
 SOP : UFRGS L

Valores cumulados característicos

in volume / passante

| | | | | | | | | | | |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| x | 0.04 | 0.07 | 0.10 | 0.20 | 0.30 | 0.40 | 0.50 | 0.60 | 0.70 | 0.80 |
| Q3 | 0.00 | 0.07 | 0.18 | 0.50 | 0.76 | 1.08 | 1.43 | 1.70 | 1.87 | 1.96 |
| q3 | 0.00 | 0.01 | 0.03 | 0.04 | 0.06 | 0.10 | 0.14 | 0.13 | 0.10 | 0.06 |
| x | 0.90 | 1.00 | 1.10 | 1.20 | 1.30 | 1.40 | 1.60 | 1.80 | 2.00 | 2.20 |
| Q3 | 2.02 | 2.07 | 2.13 | 2.19 | 2.25 | 2.33 | 2.49 | 2.68 | 2.90 | 3.15 |
| q3 | 0.05 | 0.04 | 0.06 | 0.06 | 0.07 | 0.10 | 0.11 | 0.15 | 0.19 | 0.24 |
| x | 2.40 | 2.60 | 3.00 | 4.00 | 5.00 | 6.00 | 6.50 | 7.00 | 7.50 | 8.00 |
| Q3 | 3.43 | 3.75 | 4.48 | 6.77 | 9.26 | 11.66 | 12.79 | 13.87 | 14.92 | 15.94 |
| q3 | 0.29 | 0.36 | 0.46 | 0.72 | 1.01 | 1.19 | 1.27 | 1.31 | 1.37 | 1.42 |
| x | 8.50 | 9.00 | 10.00 | 11.00 | 12.00 | 13.00 | 14.00 | 15.00 | 16.00 | 17.00 |
| Q3 | 16.92 | 17.89 | 19.75 | 21.55 | 23.29 | 24.96 | 26.56 | 28.09 | 29.54 | 30.93 |
| q3 | 1.46 | 1.53 | 1.59 | 1.70 | 1.80 | 1.88 | 1.95 | 2.00 | 2.02 | 2.07 |
| x | 18.00 | 19.00 | 20.00 | 22.00 | 25.00 | 28.00 | 32.00 | 36.00 | 38.00 | 40.00 |
| Q3 | 32.27 | 33.56 | 34.81 | 37.27 | 41.05 | 45.23 | 51.92 | 59.77 | 64.02 | 68.26 |
| q3 | 2.11 | 2.15 | 2.20 | 2.33 | 2.67 | 3.32 | 4.52 | 6.01 | 7.08 | 7.45 |
| x | 45.00 | 50.00 | 53.00 | 56.00 | 63.00 | 71.00 | 75.00 | 80.00 | 85.00 | 90.00 |
| Q3 | 77.99 | 85.43 | 88.88 | 91.68 | 96.13 | 98.73 | 99.31 | 99.72 | 99.92 | 100.00 |
| q3 | 7.45 | 6.36 | 5.34 | 4.58 | 3.41 | 1.96 | 0.95 | 0.57 | 0.30 | 0.13 |
| x | 95.00 | 100.0 | 106.0 | 112.0 | 125.0 | 130.0 | 140.0 | 145.0 | 150.0 | 160.0 |
| Q3 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| q3 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| x | 170.0 | 180.0 | 190.0 | 200.0 | 212.0 | 242.0 | 250.0 | 300.0 | 400.0 | 500.0 |
| Q3 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| q3 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| x | 600.0 | 700.0 | 800.0 | 900.0 | 1000.0 | 1100.0 | 1200.0 | 1300.0 | 1400.0 | 1500.0 |
| Q3 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| q3 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| x | 1600.0 | 1700.0 | 1800.0 | 1900.0 | 2000.0 | 2100.0 | 2200.0 | 2300.0 | 2400.0 | 2500.0 |
| Q3 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| q3 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

ANEXO D – FRX dos aditivos cristalizantes

RELATÓRIO DE ANÁLISES

FRX0007/19

Cliente: Vanessa Giaretton Cappellesso
Endereço: Av. Osvaldo Aranha, 99, Centro, Porto Alegre - CEP: 90035-190
Solicitante: Vanessa Giaretton Cappellesso

Data: 10/05/2019

Análise: Fluorescência de raio x
Descrição das amostras: Amostras em pó

Serviço: Análise por FRX semi quantitativa utilizando pacote Omnian
Equipamento: Epsilon 1
Fabricante: Panalytical

| | Na ₂ O | MgO | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | SO ₃ | Cl | K ₂ O | CaO | TiO ₂ | V ₂ O ₅ | MnO | Fe ₂ O ₃ | ZnO | SrO | ZrO ₂ | BaO | L.O.I | Total |
|------|-------------------|------|--------------------------------|------------------|-----------------|------|------------------|-------|------------------|-------------------------------|------|--------------------------------|------|------|------------------|------|-------|--------|
| Am B | 0,00 | 5,54 | 2,95 | 12,64 | 3,43 | 0,09 | 1,04 | 58,45 | 0,18 | 0,01 | 0,06 | 2,50 | N.D. | 0,24 | N.D. | N.D. | 12,87 | 100,00 |
| Am P | 0,00 | 4,81 | 3,80 | 13,07 | 4,43 | 0,11 | 1,22 | 60,61 | 0,24 | 0,02 | 0,07 | 2,81 | 0,05 | 0,14 | 0,01 | 0,02 | 8,57 | 100,00 |
| Am X | 0,00 | 0,55 | 2,67 | 8,94 | 2,44 | 0,15 | 0,56 | 64,07 | 0,19 | 0,01 | 0,06 | 2,24 | 0,02 | 0,28 | N.D. | N.D. | 17,81 | 100,00 |

Observações:

Os resultados estão expressos em percentuais em massa (%).
N.D.: não detectado.

Condições de análise:

Anodo de Ag
Detector: SDD5

kV: 50
µA: 100

Filtro: Cu-500
Atmosfera: ar

Técnico executor: Ms. Michele Goulart
Responsável Técnico: Dr. Gerson Fauth

ANEXO E – FRX da sílica ativa

RELATÓRIO DE ANÁLISES

FRX0008/19

Cliente: Vanessa Giaretton Cappelleso
Endereço: Av. Osvaldo Aranha, 99, Centro, Porto Alegre - CEP: 90035-190
Solicitante: Vanessa Giaretton Cappelleso

Data: 06/06/2019

Análise: Fluorescência de raio x
Descrição das amostras: Amostras em pó

Serviço: Análise por FRX semi quantitativa utilizando pacote Omnian
Equipamento: Epsilon 1
Fabricante: Panalytical

| | Na ₂ O | MgO | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | P ₂ O ₅ | SO ₃ | Cl | K ₂ O | CaO | TiO ₂ | Cr ₂ O ₃ | MnO | Fe ₂ O ₃ | ZnO | Eu ₂ O ₃ | L.O.I | Total |
|------|-------------------|------|--------------------------------|------------------|-------------------------------|-----------------|------|------------------|------|------------------|--------------------------------|------|--------------------------------|-------|--------------------------------|-------|-------|
| Am B | 0,00 | 4,30 | 1,72 | 88,35 | 0,57 | 0,13 | 0,23 | 0,91 | 0,68 | <0,01 | <0,01 | 0,05 | 0,10 | <0,01 | 0,01 | 2,91 | 99,96 |

Observações:

Os resultados estão expressos em percentuais em massa (%).
N.D.: não detectado.

Condições de análise:

Anodo de Ag
Detector: SDD5
KV: 50
µA: 100

Filtro: Cu-500
Atmosfera: ar

Técnico executor: Ms. Michele Goulart
Responsável Técnico: Dr. Gerson Fauth