



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Tamiko Goto Rodrigues

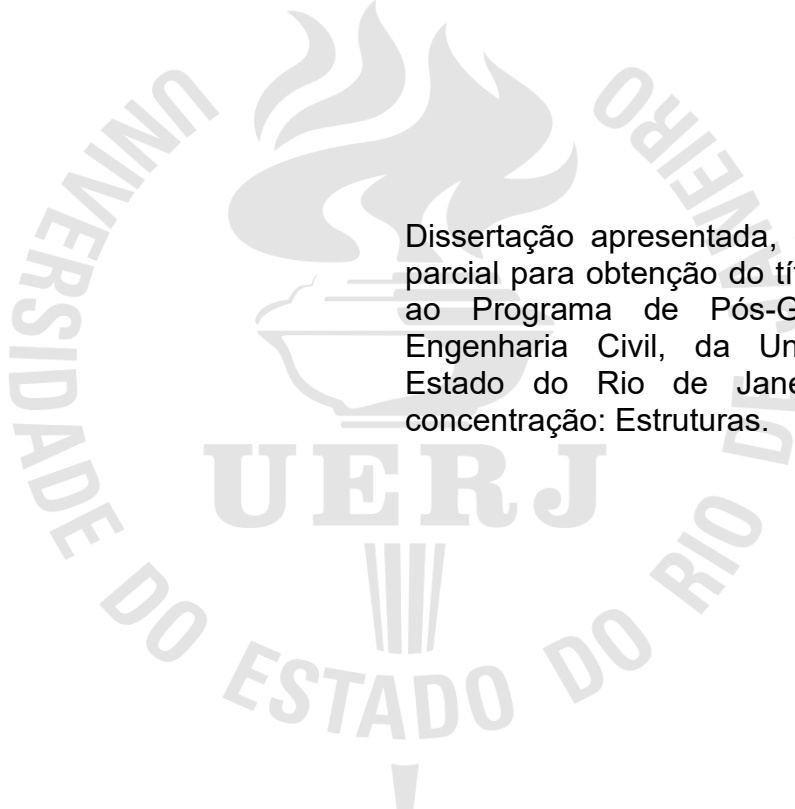
**Avaliação do uso de aditivos biológico e químico no processo de
cicatrização de fissuras no concreto**

Rio de Janeiro

2023

Tamiko Goto Rodrigues

**Avaliação do uso de aditivos biológico e químico no processo de cicatrização
de fissuras no concreto**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Orientadoras: Profa. Dra. Margareth da Silva Magalhães

Profa. Dra. Kíssila Botelho Goliath

Rio de Janeiro

2023

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

R696 Rodrigues, Tamiko Goto.

Avaliação do uso de aditivos biológico e químico no processo de cicatrização de fissuras no concreto / Tamiko Goto Rodrigues. – 2023.
142 f.

Orientadoras: Margareth da Silva Magalhães, Kíssila Botelho Goliath.

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Recalque de estruturas - Teses. 3. Concreto - Aditivos - Teses. 4. Análise estrutural (Engenharia) - Teses. I. Magalhães, Margareth da Silva. II. Goliath, Kíssila Botelho. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. IV. Título.

CDU 624.012.4

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Tamiko Goto Rodrigues

**Avaliação do uso de aditivos biológico e químico no processo de cicatrização
de fissuras no concreto**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Aprovado em: 14 de dezembro de 2023.

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Margareth da Silva Magalhães (Orientadora)
Faculdade de Engenharia – UERJ

Profa. Dra. Kíssila Botelho Goliath (Orientadora)
Faculdade de Engenharia – UERJ

Profa. Dra. Regina Helena Ferreira de Souza
Faculdade de Engenharia - UERJ

Profa. Dra. Camila Aparecida Abelha Rocha
Escola de Engenharia - UFF

Rio de Janeiro

2023

DEDICATÓRIA

À minha família, que por muitas vezes me apoiou e torceram para o meu sucesso. Em especial aos meus pais que me ensinaram a caminhar. Saudades.

AGRADECIMENTO

Agradeço às orientadoras Margareth e Kíssila pela ajuda, orientação, apoio e paciência na elaboração desse trabalho. Aos professores que plantaram sementes de conhecimento ao “longo” desses meses, que me ajudaram nessa jornada tão difícil, o mestrado. À equipe do laboratório: André, Danilo, Flávio e Viviane que estavam sempre dispostos a ajudar nas atividades laboratoriais. À equipe da Unifeso que me disponibilizou alguns equipamentos do laboratório. À minha prima Haina e ao tio Sérgio que contribuíram com o conhecimento e revisão textual. À Penetron pela doação do aditivo utilizado na pesquisa. À minha família pela compreensão das constantes ausências, principalmente, ao meu marido José Carlos e à minha neta Nykolli.

Agradeço aos meus pais que sempre me apoiaram e me ensinaram, são as minhas bases.

RESUMO

RODRIGUES, Tamiko Goto. **Avaliação do uso de aditivos biológico e químico no processo de cicatrização de fissuras no concreto**. 2023. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

As fissuras são patologias frequentes nas edificações e devem ser tratadas para evitar o surgimento de problemas secundários. A necessidade de manutenção periódica para o tratamento dessas fissuras pode ter um custo elevado. A autocicatrização do concreto pode ser uma forma econômica para reduzir a necessidade de intervenções externas. As adições químicas e biológicas de agentes autocicatrizantes podem ser incorporadas ao concreto no momento da dosagem. Este trabalho tem por finalidade avaliar a adição da bactéria *Bacillus Subtilis* e do aditivo cristalizante Penetron ao concreto fresco. Após o surgimento das fissuras no concreto e ao entrarem em contato com a água gera o produto de cicatrização do concreto. O estudo foi realizado com o intuito de identificar a eficiência do uso de *Bacillus Subtilis* em diferentes concentrações e do uso do Penetron na fabricação do concreto. Também foi avaliada a aplicação das adições após o processo de fissuração do concreto no estado endurecido. Os corpos de prova do concreto foram fissurados em equipamentos de ensaio vertical, diametral e tração na flexão. Após o processo de cicatrização, foram verificadas as propriedades físicas e mecânicas e a cicatrização foi avaliada de forma visual. Após a obtenção e análise dos resultados foi possível concluir a eficiência do uso de bactérias e suas concentrações, assim como o uso do aditivo cristalizante.

Palavras-chave: Concreto autocicatrizante; Fissuração; *Bacillus Subtilis*; Aditivo cristalizante.

ABSTRACT

RODRIGUES, Tamiko Goto. **Evaluation of the use of biological and chemical additives in the concrete crack healing process**. 2023. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

Cracks are common pathologies in buildings and must be treated to avoid the emergence of secondary problems. The need for periodic maintenance to treat these cracks can be costly. Self-healing concrete can be an economical way to reduce the need for external interventions. Chemical and biological additions of self-healing agents can be incorporated into the concrete at the time of dosing. This work aims to evaluate the addition of the bacteria *Bacillus Subtilis* and the crystallizing additive Penetron to fresh concrete, which, after the crack appears and when it comes into contact with water, generates the concrete healing product. The study was carried out with the aim of identifying the efficiency of using *Bacillus Subtilis* with different concentrations and the use of Penetron in the manufacture of concrete. The application of additions after the concrete cracking process in the hardened state was also evaluated. The concrete specimens were cracked using compression, flexural traction and diametrical compression resistance equipment. After the healing process, the physical and mechanical properties were checked and the healing was visually evaluated. After obtaining and analyzing the results, it was possible to conclude the efficiency of using bacteria and their concentrations, as well as the use of the crystallizing additive.

Keywords: Self-healing concrete; *Bacillus Subtilis*; Crystallizing addition.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Amostra com corte mecânico a) 28 dias. b) 56 dias c) 84 dias	27
Figura 2 – Amostra de ensaio tração na flexão a) 28 dias b) 56 dias c) 84 dias	28
Figura 3 – Amostra fissuração por meio de tração na flexão a) 7 dias b) 28 dias c) 56 dias.....	28
Figura 4 - <i>Bacillus Pseudofirmus</i>	34
Figura 5 - Identificação da formação de carbonato de cálcio e selagem da fissura em microscópio.	42
Figura 6 – Fissura gerada no corpo de prova.....	43
Figura 7 – Ensaio em campo, fissura n.º 1) Spray de água; 2) Material umedecido com solução nutritiva; 3) Material umedecido com água.....	44
Figura 8 – Fluxograma do planejamento experimental.	46
Figura 9 – Fluxograma das etapas realizadas.....	46
Figura 10 – Produto Penetron Admix	49
Figura 11 – Produto Serenade e Lactato de cálcio	49
Figura 12 – Hidrogel utilizado para o encapsulamento das bactérias.	50
Figura 13 – a) diluição do lactato de cálcio; b) adição à bactéria; c) adição do hidrogel; d) encapsulamento; e) adição ao concreto	53
Figura 14 – a) Ensaio à compressão axial; b) Ensaio à compressão axial instrumentado; c) Ensaio de tração na flexão	55
Figura 15 – Fissuração dos corpos de prova	56
Figura 16 – a) corte em disco; b) amostra sem fissuração; c) amostra fissurada;	56
Figura 17 – corpo de prova prismático fissurado.....	57
Figura 18 – Cristalizante e água.....	58
Figura 19 – a) Aplicação da mistura com a seringa; b) amostra com aplicação da mistura.	58
Figura 20 – Lactato de cálcio, <i>Bacillus Subtilis</i> e água.....	59
Figura 21 – Resistência à compressão ao longo do tempo.....	65
Figura 22 – Hidrogel na superfície da amostra.....	66
Figura 23 - Resistência máxima a compressão aos 88 dias dos CPs fissurados e tratados	68
Figura 24 – Resistência máxima a tração aos 88 dias dos dos CPs recuperados.	70

Figura 25 – Detalhamento das fissuras da amostra CS aos 48 dias após a fissuração	72
Figura 26 – Amostra CS-3.....	73
Figura 27 - Amostra CSC-1	74
Figura 28 – Amostra CSB-2	75
Figura 29 – Detalhamento das fissuras da amostra CSB-2 aos 48 dias após a fissuração.....	76
Figura 30 – Amostra CC-1.....	77
Figura 31 – Fissura autocicatrizada entre F1 e F3 no lado 2	78
Figura 32 - Detalhamento das fissuras da amostra CC aos 48 dias após a fissuração	79
Figura 33 – Amostra CB1-3.....	80
Figura 34 - Detalhamento das fissuras da amostra CB1 aos 31 dias após a fissuração.....	80
Figura 35 – Amostra CB2-4.....	81
Figura 36 – Detalhamento das fissuras da amostra CB2 aos 43 dias após a fissuração	82
Figura 37 – Amostra CB3-4.....	83
Figura 38 – Fissura CB3 – 1 – F8	84
Figura 39 – Detalhamento das fissuras da amostra CB3 aos 31 dias após a fissuração.....	85
Figura 40 - Tamanho das fissuras das amostras CS.	95
Figura 41 - Amostra CS – 1.....	96
Figura 42 - Detalhamento das fissuras da amostra CS-1 aos 48 dias após a fissuração.....	97
Figura 43 - Amostra CS-2.....	97
Figura 44 – Detalhamento das fissuras da amostra CS-2 aos 48 dias após a fissuração.....	98
Figura 45 – Amostra CS-3.....	99
Figura 46 – Detalhamento das fissuras da amostra CS-3 aos 48 dias após a fissuração.....	100
Figura 47 – Amostra CS-4.....	101
Figura 48 – Detalhamento das fissuras da amostra CS-4 aos 48 dias após a fissuração.....	102

Figura 49 - Amostra CSC-1.....	104
Figura 50 – Amostra CSC-2.....	105
Figura 51 - Amostra CSC-3.....	105
Figura 52 – Amostra CSC-4.....	106
Figura 53 – Amostra CSB-1	108
Figura 54 – Detalhamento das fissuras da amostra CSB-1 aos 48 dias após a fissuração.....	109
Figura 55 – Amostra CSB-2	109
Figura 56 – Detalhamento das fissuras da amostra CSB-2 aos 48 dias após a fissuração.....	110
Figura 57 – Amostra CSB-3.....	111
Figura 58 – Detalhamento das fissuras da amostra CSB-3 aos 48 dias após a fissuração.....	112
Figura 59 – Amostra CC-1.....	115
Figura 60 – Detalhamento das fissuras da amostra CC-1 aos 48 dias após a fissuração.....	116
Figura 61 – Amostra CC-2.....	116
Figura 62 – Detalhamento das fissuras da amostra CC-2 aos 48 dias após a fissuração.....	118
Figura 63 – Amostra CC-3.....	118
Figura 64 – Detalhamento das fissuras da amostra CC-3 aos 48 dias após a fissuração.....	119
Figura 65 – Amostra CB1-1.....	122
Figura 66 – Detalhamento das fissuras da amostra CB1-1 aos 31 dias após a fissuração.....	123
Figura 67 – Amostra CB1-2.....	123
Figura 68 – Detalhamento das fissuras da amostra CB1-2 aos 31 dias após a fissuração.....	124
Figura 69 – Amostra CB1-3.....	125
Figura 70 – Detalhamento das fissuras da amostra CB1-3 aos 31 dias após a fissuração.....	126
Figura 71 – Amostra CB1-4.....	126
Figura 72 – Detalhamento das fissuras da amostra CB1-4 aos 31 dias após a fissuração.....	127

Figura 73 – Amostra CB2-1.....	129
Figura 74 – Detalhamento das fissuras da amostra CB2-01 aos 43 dias após a fissuração.....	130
Figura 75 - Amostra CB2-2.....	130
Figura 76 – Detalhamento das fissuras da amostra CB2-2 aos 43 dias após a fissuração.....	131
Figura 77 – Amostra CB2-3.....	132
Figura 78 – Detalhamento das fissuras da amostra CB2-3 aos 43 dias após a fissuração.....	132
Figura 79 – Amostra CB2-4.....	133
Figura 80 – Detalhamento das fissuras da amostra CB2-4 aos 43 dias após a fissuração.....	134
Figura 81 – Amostra CB3-1.....	137
Figura 82 – Detalhamento das fissuras da amostra CB3-1 aos 31 dias após a fissuração.....	138
Figura 83 – Amostra CB3-2.....	138
Figura 84 – Detalhamento das fissuras da amostra CB3-2 aos 31 dias após a fissuração.....	139
Figura 85 – Amostra CB3-3.....	140
Figura 86 – Detalhamento das fissuras da amostra CB3-3 aos 31 dias após a fissuração.....	141
Figura 87 – Amostra CB3-4.....	141
Figura 88 – Detalhamento das fissuras da amostra CB3-4 aos 31 dias após a fissuração.....	142

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Concreto armado estrutural de obra enterrada exposta por sulfatos: dosagem do aditivo cristalizante sobre o peso do cimento (S.P.C) e consumo mínimo de cimento no traço.....	31
Tabela 2 - Concreto armado estrutural exposto às classes de agressividade ambiental (CAA): dosagem do aditivo cristalino sobre o peso de cimento (S.P.C.) e consumo mínimo de cimento no traço.....	32
Tabela 3 – Propriedades da areia.....	47
Tabela 4 - Propriedades do agregado graúdo.....	48
Tabela 5 - Traço para produção de 1m ³ de concreto	50
Tabela 6 - Tipos de concreto.....	51
Tabela 7 – Quantidade de amostras fissuradas por concreto	51
Tabela 8 – Composição da mistura química	57
Tabela 9 – Composição da mistura biológica.....	59
Tabela 10 - Abatimento do concreto	60
Tabela 11 – Propriedades físicas aos 28 dias.....	60
Tabela 12 - Propriedades físicas das amostras não fissurados e fissurados aos 88 dias.....	62
Tabela 13 – Resistência à compressão e módulo de elasticidade.....	63
Tabela 14 – Ensaio de tração na flexão.....	67
Tabela 15 – Maior fissura cicatrizada.....	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Ca (OH) ₂	hidróxido de cálcio
C ₃ S	Alita ou Silicato Tricálcico
C ₂ S	Belita
C ₃ A	Aluminato
CO ₂	dióxido de carbono
CB1	Concreto com adição biológica na concentração de 10 ⁶
CB2	Concreto com adição biológica na concentração de 10 ⁷
CB3	Concreto com adição biológica na concentração de 10 ⁸
CS	Concreto simples
CSB	Concreto simples com aplicação biológica
CSC	Concreto simples com aplicação de cristalizante
C-S-H	silicato de cálcio hidratada
C ₆ AS ₃ H ₃₂	etringita
CaCO ₃	carbonato de cálcio
CSA	sulfoaluminato de cálcio
CAA	classes de agressividade ambiental
CO ₃ ²⁻	carbonato
CaC ₆ H ₁₀ O ₆	lactato de cálcio
CaCl ₂	cloreto de cálcio
CH ₄ N ₂ O	uréia
CP	corpo de prova
EAF	Escória de Alto forno
H ₂ CO ₃	ácido carbônico
H ₂ O	Água
PRAH	<i>Permeability-Reducing Admixtures exposed to Hydrostatic Conditions</i> – Aditivos redutores de permeabilidade expostos a condições hidrostáticas
PRA	adição redutora de permeabilidade
PRAN	permeabilidade submetidos a condições não hidrostáticas
pH	indica grau da acidez ou alcalinidade
MCP	precipitação microbiana de carbonato

MCCP	precipitação de carbonato controlada micro biologicamente
MICP	precipitação de carbonato induzida por microbiota
NH_3	amônia
NH_2COOH	ácido carbâmico

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	16
1. DURABILIDADE DO CONCRETO.....	21
1.1 FISSURAS NO CONCRETO.....	23
1.2 AUTOCICATRIZAÇÃO.....	25
1.2.1 AUTOCICATRIZAÇÃO AUTÓGENA DO CONCRETO.....	25
1.2.2 AUTOCICATRIZAÇÃO DO CONCRETO COM ADIÇÕES MINERAIS.....	26
ADIÇÃO CRISTALIZANTE REDUTORA DE POROSIDADE (PRAH).....	30
1.2.3 AUTOCICATRIZAÇÃO DO CONCRETO COM ADIÇÃO BIOLÓGICA.....	34
HIDRÓLISE DE UREIA.....	36
OXIDAÇÃO DE COMPONENTES ORGÂNICOS.....	37
ADIÇÃO DA BACTÉRIA NO CONCRETO.....	39
PELO MÉTODO DIRETO.....	39
PELO MÉTODO INDIRETO.....	39
2. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	45
2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	47
2.1.1 CIMENTO.....	47
2.1.2 AREIA.....	47
2.1.3 BRITA.....	48
2.1.4 ADIÇÕES.....	48
QUÍMICA.....	48
BIOLÓGICA.....	49
2.2 DESCRIÇÃO DOS CONCRETOS.....	50
2.2.1 CONCRETO SIMPLES.....	51
2.2.2 CONCRETO COM ADIÇÃO QUÍMICA À BASE DE CRISTALIZANTES.....	52
2.2.3 CONCRETO COM ADIÇÃO BIOLÓGICA <i>BACILLUS SUBTILIS</i>	52
2.3 MOLDAGEM DAS MISTURAS.....	52
2.4 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS, FISSURAÇÃO E TRATAMENTO.....	54
2.4.1 CONSISTÊNCIA.....	54
2.4.2 ÍNDICE DE VAZIOS, ABSORÇÃO DE ÁGUA E MASSA ESPECÍFICA.....	54
2.4.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, À FLEXÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	54

2.4.4 FISSURAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	55
2.4.5 TRATAMENTO APÓS A FISSURAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA E ACOMPANHAMENTO DAS FISSURAS.....	57
CONCRETO COM A ADIÇÃO NA MISTURA E CONCRETO SIMPLES (REFERÊNCIA).....	57
CONCRETO SIMPLES TRATADO PÓS FISSURAÇÃO.....	57
2.4.6 VERIFICAÇÃO DAS FISSURAS.....	59
3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	60
3.1 PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO.....	60
3.1.1 CONSISTÊNCIA.....	60
3.2 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO.....	60
3.2.1 ÍNDICE DE VAZIOS, ABSORÇÃO DE ÁGUA E MASSA ESPECÍFICA.....	60
3.2.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	63
3.2.3 RESISTÊNCIA À FLEXÃO.....	67
3.2.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO RESIDUAL.....	68
3.2.5 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO RESIDUAL.....	69
3.3 ANÁLISE VISUAL.....	70
3.3.1 CONCRETO SIMPLES (CS).....	71
3.3.2 CONCRETO SIMPLES COM ADIÇÃO DE CRISTALIZANTE PÓS FISSURAÇÃO (CSC).....	73
3.3.3 CONCRETO SIMPLES COM ADIÇÃO DE MISTURA BIOLÓGICA PÓS FISSURAÇÃO (CSB).....	74
3.3.4 CONCRETO COM ADITIVO CRISTALIZANTE (CC).....	76
3.3.5 CONCRETO COM ADITIVO BIOLÓGICO 10^6 CFU/ML (CB1).....	79
3.3.6 CONCRETO COM ADITIVO BIOLÓGICO 10^7 CFU/ML (CB2).....	81
3.3.7 CONCRETO COM ADITIVO BIOLÓGICO 10^8 CFU/ML (CB3).....	82
4. CONCLUSÕES.....	87
4.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	88
REFERÊNCIAS.....	89
APÊNDICE.....	94

INTRODUÇÃO

Segundo Isaias (2005), a durabilidade dos materiais é a capacidade desses se conservarem, em um determinado estado, com características similares ao longo de um período de tempo. Ou seja, é a capacidade que o material ou elemento da construção tem de resistir à deterioração ou degradação, preservando o seu desempenho.

A NBR 6118 (2014) classifica os requisitos de qualidade da estrutura em: a) capacidade resistente na segurança à ruptura; b) desempenho em serviço, onde é a capacidade da estrutura em se manter em condições de utilização durante sua vida útil. Não havendo danos que possam comprometer em parte ou totalmente o uso para qual a estrutura foi projetada e c) a durabilidade é a capacidade da estrutura de resistir às influências ambientais previstas em projeto. Aos quais foram definidas pelo autor do projeto e pelo contratante, no início da elaboração.

De acordo com Neville (2008) o que deve ser buscado é a vida útil desejada, de acordo com a função da estrutura, sendo assim, a durabilidade não significa maior vida útil possível e sim, a durabilidade adequada. A durabilidade inadequada se manifesta pela deterioração. De acordo com a NBR 15575 (2013), a durabilidade é compatível com a vida útil do projeto.

A água é um agente importante, tanto para o desenvolvimento quanto para destruição dos elementos, sendo um fator central para a maioria dos problemas de deterioração do concreto. Nos materiais porosos, como o concreto, a água causa vários tipos de processos de degradação. Reduzir a porosidade do concreto é uma forma de reduzir sua deterioração (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

De acordo com Nodehi *et al.* (2021), a fissuração é uma das principais causas de deterioração do concreto, pois permite a entrada de produtos químicos e pode levar à perda das propriedades físico-mecânicas e, conseqüentemente, da durabilidade das estruturas de concreto. Para proteger, reparar e reabilitar estruturas de concreto, tem sido comumente praticada a aplicação de resinas poliméricas (por exemplo: epóxi, poliéster e éster vinílico), adesivos, produtos químicos impermeabilizantes, agentes ligantes alternativos (por exemplo: materiais ativados por álcalis), diferentes agentes de revestimento de superfície e selantes, agentes de ligação, bem como adesivos. Porém tais técnicas requerem cuidados na aplicação,

pois em vários casos podem ocorrer problemas de laminação (principalmente em materiais à base de polímeros), falta de zona de transição intersticial, problemas devido à dificuldade de aplicação (locais de difícil acesso). Além da relação custo-benefício e as altas implicações ambientais são itens que precisam ser levados em consideração. Resultando assim, na busca de métodos alternativos de vedação de fissuras ou autocicatrização.

As fissuras e microfissuras surgem e se propagam quando expostas ao ambiente. Ao se propagar, podem gerar canais e se interconectar possibilitando a movimentação da água e do oxigênio na estrutura. (MEHTA; MONTEIRO, 2014)

Materiais autocicatrizantes são aqueles que possuem a capacidade de reparar autonomamente pequenos danos ou fissuras. A principal razão para investigar as propriedades dos materiais autorreparáveis é que as construções construídas com eles terão maior vida útil. Além disso, o concreto autorregenerativo levará a um aumento da sustentabilidade das estruturas construídas com este material (ROIG-FLORES; MOSCATO; FERRARA, 2014).

Conforme Esteves *et al.* (2021), a tecnologia de autocura indica ser a maneira mais propícia de enfrentar o desafio das fissuras no concreto. Dentre as inúmeras abordagens, o método microbiano é considerado o mais promissor. Como um método ecologicamente correto, a tecnologia de autocura permite reparar fissuras em locais de difícil acesso.

O processo de autocura reduz as fissuras e poros. Sendo assim, reduz a permeabilidade do concreto (ESTEVES, 2021).

Os concretos com adição biológica são concretos que possuem em sua formulação um agente capaz de induzir a formação de carbonato de cálcio nos espaços vazios. As bactérias inseridas, quando surgem as fissuras, entram em contato com água e começam a reagir e fechar as aberturas geradas (VIEIRA, 2017).

Um outro produto utilizado para reduzir a permeabilidade do concreto é o aditivo cristalizante. Têm-se a adição de materiais denominados aditivos redutores de permeabilidade, que são materiais hidrofílicos que ao reagirem com a água presente na estrutura de concreto, iniciam um processo de cristalização capilar, diminuindo o tamanho dos poros e fissuras, ou seja, funcionando como um mecanismo de autocicatrização do concreto, devido a formação de depósitos insolúveis de carbonato de cálcio. A indústria da construção apresenta grande

interesse na difusão do uso desses aditivos como estimuladores de cicatrização, pois representam uma oportunidade para o desenvolvimento de tecnologias de cicatrização. Além disso, devido à variedade de composições dos mesmos representam um vasto campo de conhecimento a ser explorado pela comunidade científica. (ARAÚJO, 2020)

O concreto é o material de construção mais utilizado no mundo, uma vida útil longa para estruturas de concreto é sinônimo de durabilidade (MEHTA, 2008). A estrutura de concreto armado deve continuar a desempenhar as funções previstas, manter a resistência necessária e sua condição durante o tempo. Se o concreto for capaz de suportar o processo de deterioração ao qual está exposto, pode ser considerado durável (NEVILLE, 2008). A durabilidade do material está ligada à capacidade desse em se conservar em um determinado estado, com características similares ao longo do tempo (ISAIA, 2005).

Mehta (2014) relatou a importância da não formação de uma rede conectada entre microfissuras e poros, pois esta conexão pode gerar caminhos no interior do concreto e chegar até o meio externo. Após o surgimento das primeiras fissuras elas podem ser responsáveis pelo surgimento de novas fissuras, gerando assim, um ciclo.

Há vários métodos de restauração para correção de fissuras. Porém, a maioria dos procedimentos pode ser cara e demorada. Através do processo de autocura do concreto, é possível mitigar as fissuras sem o auxílio da intervenção humana. Além disso, devido ao processo de autorregeneração, o concreto pode selar as fissuras iniciais do concreto, quebrando assim o ciclo descrito por Mehta e Monteiro (2014).

A motivação desse trabalho é avaliar a capacidade de autocicatrização dos dois tipos de materiais, aplicadas em dosagem de concreto similares, diferenciando somente o tipo de adição autocicatrizante: aditivo cristalizante e aditivo biológico. Mas, principalmente, avaliar a aplicação do material autocicatrizante em concreto simples.

O uso do concreto é, na maior parte das vezes, sem adição. Estudos sobre a aplicação do material em concretos sem adição no estado endurecido, foram poucos. Sendo assim, foram realizados ensaios com aplicação dos aditivos cicatrizantes após o concreto endurecido, avaliando a possibilidade da cicatrização e o tamanho da cicatrização atingida por esse procedimento.

Objetivo Geral

Esse trabalho, tem como objetivo geral, avaliar a capacidade da autocicatrização dos concretos produzidos com agentes cicatrizantes biológicos e químicos, utilizando os materiais encontrados no Estado do Rio de Janeiro, através da análise da eficácia do concreto com incorporação de bactérias *Bacillus Subtilis* encapsulados no hidrogel (descrição no item 2.1.4) e a eficácia do concreto com incorporação do aditivo químico Penetron, a fim de verificar o preenchimento de fissuras.

Objetivos Específicos

- Verificar o processo de cicatrização do concreto no estado endurecido após a incorporação de dois materiais: biológico e químico;
- Avaliar no processo de mitigação de fissuras, a influência do teor da concentração de bactérias usadas no traço de concreto;
- Analisar a influência do grau de fissuração no processo de autocicatrização do concreto;
- Avaliar as propriedades mecânicas e físicas das amostras;
- Avaliar as resistências residuais: compressão e flexão após a fissuração e o tratamento.

Sendo assim, foi avaliado o processo de autocicatrização e suas propriedades dos concretos simples, com aditivo cristalizante e com aditivo biológico incorporado ao concreto fresco. E, no estado endurecido, aplicação do aditivo cristalizante e biológico.

Estrutura da dissertação

O trabalho se iniciará evidenciando a importância do processo de autocicatrização do concreto, no capítulo 1, a partir de uma breve revisão da literatura. Serão apresentados os tipos de processo de autocicatrização do concreto.

No capítulo 2 será apresentado o programa experimental que irá mostrar a caracterização dos materiais utilizados nos concretos, a descrição dos concretos e a descrição dos ensaios.

No capítulo 3 será apresentada a avaliação dos resultados obtidos nos ensaios.

No capítulo 4 será apresentada a conclusão do trabalho.

1. DURABILIDADE DO CONCRETO

De acordo com Mehta; Monteiro (2014), uma vida útil longa é considerada sinônimo de durabilidade. A durabilidade nada mais é do que o desempenho ao longo do tempo, expressa quantitativamente por meio da vida útil (Bolina *et al.*, 2022). As propriedades do material e a microestrutura mudam com o tempo como resultado da interação com o ambiente. Um material chega ao fim quando suas propriedades se deterioram a tal ponto, que seu uso seja considerado inseguro ou antieconômico. Mehta; Monteiro (2014) também citam que concretos mais duráveis estão sendo usados atualmente na construção de estruturas, com uma vida útil de 100 a 150 anos, enquanto que os concretos convencionais têm vida útil de 40 a 50 anos.

Segundo Thomaz (2020), os termos utilizados para classificar os materiais como bons ou ruins, duráveis ou não duráveis, resistentes ou não resistentes são muito relativos, pois a durabilidade do material está relacionada diretamente às condições de aplicação, de exposição, de uso e de manutenção. Por outro lado, não existe nenhum material infinitamente resistente; todos eles irão fissurar ou romper sob ação de um dado carregamento.

As estruturas de concreto sofrem degradação não só por falhas humanas cometidas nas etapas de concepção dos projetos e execução das obras, mas também por causas naturais intrínsecas ao concreto e pela interação da estrutura no meio ambiente. (DE SOUZA; RIPPER, 1998)

O concreto tem apresentado deterioração prematura, geralmente por exposições a ambientes agressivos, mesmo sendo construído de acordo com os requisitos de conformidade aos preconizados pelas normas vigentes da sua época de produção. (ISAIA, 2005)

Segundo Fusco (2008), os mecanismos de agressão podem ser de diversos tipos, alguns de natureza física e outros de natureza química. Os agentes de agressão química, em quase sua totalidade, dependem da presença do meio de transporte que os levam do lado externo da agressão, para o lado interno da estrutura, através dos poros e fissuras. Os meios de transporte são, principalmente, a água no interior da massa de concreto e o oxigênio.

De acordo com Mehta; Burrows (2001), a degradação prematura das estruturas se deve à crescente busca por aumento de resistência, não respeitando às regras relacionadas à durabilidade e à fissuração. Com base em pesquisas de campo, as obras que foram executadas a partir de 1930 (período em que as resistências dos cimentos e do concreto aumentaram) apresentaram maiores problemas com degradação. Com o aumento da finura do cimento e do teor de Silicato Tricálcico (C_3S), houve o aumento de resistência nas idades iniciais, tendendo assim, ao aumento da fissuração nessa idade, devido ao aumento de retração autógena, por secagem e pelo calor de hidratação. Eles também observaram que a fissuração está relacionada com as dimensões das peças, com o processo de cura e com as condições ambientais, além de haver uma relação direta entre a fissuração e a deterioração do concreto exposto às condições ambientais severas. Devemos levar em consideração, que em 1930 as estruturas eram calculadas pelo método da verificação das tensões, ou seja, as peças estruturais tinham dimensões maiores.

Mehta; Monteiro (2014), propuseram um modelo holístico de deterioração do concreto a partir dos efeitos ambientais mais frequentes. O modelo propõe que um concreto constituído por materiais selecionados, adequadamente adensado e curado se mantém impermeável enquanto os poros e as microfissuras não formarem uma rede interconectada de caminhos em seu interior e chegarem à superfície do concreto. Após o surgimento das primeiras fissuras, inicia-se um ciclo, em que as próprias são responsáveis pelo surgimento de novas fissuras.

Com o carregamento estrutural e sob os efeitos de intempéries (exposição aos ciclos de aquecimento-resfriamento, molhagem e secagem), há a propagação de microfissuras pré-existent na zona de transição interfacial entre a argamassa e as partículas do agregado gráúdo. Uma vez perdida a estanqueidade do concreto, seu interior passa a ser saturado. Consequentemente, água e íons passam a ser transportados para o interior, aumentando o processo de deterioração. A deterioração do concreto se dá através de sucessivos ciclos de expansão, fissuração, perda de massa e aumento da permeabilidade. É relevante notar que o surgimento das primeiras fissuras pode ser indefinidamente prolongado através de manutenções e impermeabilidade do material. Caso contrário, reparos sucessivos deverão ser feitos na estrutura até sanar a falha (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Mehta; Monteiro (2014) ressaltam que os custos com reparo e substituição de estruturas decorrentes de falhas de materiais se tornaram parte substancial no custo da edificação. Por exemplo, estima-se que, nos países industrialmente desenvolvidos, cerca de 40% dos recursos totais da indústria da construção sejam aplicados na reparação e manutenção de estruturas existentes e apenas 60% em novas instalações.

O custo para a manutenção de uma estrutura deteriorada pode ser elevado. A autocicatrização do concreto pode ser uma das possibilidades de redução de custo com manutenção das estruturas, pois ela é capaz de fechar os espaços decorrentes das fissuras formadas na estrutura.

1.1 Fissuras no concreto

As fissuras são as manifestações patológicas mais comuns em estruturas de concreto. Podemos considerá-las como porta de entrada, pois através das fissuras, agentes agressivos e a água podem penetrar na estrutura, ocasionando a deterioração do concreto e outras manifestações patológicas.

De acordo com Neville (2016), a fissuração pode diminuir a durabilidade do concreto, afetar a estanqueidade à água ou à transmissão de sons na estrutura, além de prejudicar a aparência. Existem três fluidos que podem penetrar no concreto: a água (pura ou com íons agressivos), o gás carbônico e o oxigênio. O transporte desses fluidos depende da qualidade da pasta hidratada. A durabilidade do concreto depende da facilidade com que os fluidos podem penetrar e se movimentar no interior do concreto.

Diversos fatores podem gerar fissuração nas estruturas: erros de projeto, a falta de qualidade dos materiais, falhas na execução ou uso indevido, e a ação do tempo. As causas mais comuns da fissuração no concreto são as movimentações térmicas, higroscópicas, pela sobrecarga da estrutura, por deformidade excessiva da estrutura, pelo recalque da fundação ou pela ação de elementos químicos. (NEVILLE, 2016)

As fissurações sem carregamento podem ocorrer antes da pega e depois da pega do concreto (SOUZA, 2021).

A fissuração antes da pega - Após a adição da água no concreto, o início da pega é evidenciada pelo aumento da viscosidade da pasta e pela elevação da

temperatura. A exsudação é a tendência da água de amassamento ir a superfície do concreto, gerando canais, deixando o concreto mais poroso e menos resistente, além disso, quando a água sobe a superfície pode carregar finas partículas de cimento. A fissuração pode ocorrer: a) por retração plástica (propriedade do concreto fresco) ocorre devido à: a.1) exsudação, a água da mistura evapora pela superfície mais rapidamente do que a capacidade de percolação até a superfície; a.2) pela sucção da água do concreto seco na parte de baixo da peça estrutural; b) por assentamento plástico (consolidação do concreto), ocorre após o lançamento, vibração e acabamento. O concreto ainda na condição plástica é impedido de assentar na peça estrutural, isso pode ocorrer devido as condições de montagem da fôrma e da quantidade e diâmetro das armaduras. (SOUZA, 2021).

A fissuração após a pega - O fim da pega ocorre quando a pasta deixa de ser deformável (plástica) para pequenas cargas e se torna um bloco rígido, sendo o início do endurecimento. A fissuração pode ocorrer: a) pela retração por secagem devido a perda de umidade do concreto endurecido, isso se deve à hidratação contínua do cimento (retração autógena). O concreto, durante o período de secagem, reduz o volume; b) pela variações de temperatura, devido às variações de temperatura, das condições ambientais ou devida à hidratação do cimento ou ambas, como por exemplo os ciclos de congelamento e descongelamento, em localidades muito frias, a água interna da estrutura, presente nos poros, congela e aumenta o volume podendo gerar fissuração na estrutura; c) pelo recalque de fundações que podem gerar fissuração na estrutura. Os recalques diferenciais são os mais graves, pois provocam fissuras e cisalhamento; d) por corrosão das armaduras pois o aumento do volume do aço devido a oxidação e a corrosão avançada pode gerar fissuras no concreto; e) por corrosão do concreto (álcali-agregado) que pode gerar fissuração e ruptura do concreto por aumento de volume devido ao ataque por sulfato ou à reação álcali-agregado; f) por outras ações. (SOUZA, 2021).

As fissuras devidas ao carregamento ocorre pelo carregamento na estrutura. A forma da fissuração depende do esforço: flexão, tração, cortante, etc (SOUZA, 2021).

1.2 Autocicatrização

Autocicatrização é a capacidade do concreto, após fissuração, em selar parcial ou completamente as fissuras. Huang *et al.* (2016) dividem o fenômeno de autocicatrização em quatro tipos: autocicatrização autógena, autocicatrização baseada em adições minerais, autocicatrização baseada no uso de bactérias e autocicatrização baseada em agentes adesivos.

1.2.1 Autocicatrização autógena do concreto

O concreto tem a capacidade de mitigar as fissuras em até 0,2 mm, processo conhecido como colmatação autógena. Pode ocorrer devido a três principais fatores: 1) devido a hidratação contínua dos materiais cimentícios não hidratados no processo de produção; 2) formação do carbonato de cálcio devido a presença de dióxido de carbono e 3) devido a recristalização da portlandita.

Após o concreto endurecer, parte das partículas de cimento pode não ter sido hidratada no processo de produção. A água do meio externo infiltra no concreto endurecido através dos poros ou fissuras, reagindo com as partículas inertes. De acordo com Helene *et al.* (2018), já foram observadas muitas fissuras cicatrizadas em concretos, as quais foram preenchidas com cristais de silicato de cálcio hidratados (C-S-H), com etringita (C_6ASH_{32}), e/ou com o carbonato de cálcio ($CaCO_3$). Os autores citam que esses produtos são formados pela hidratação contínua de partículas não hidratadas de cimento contidas no concreto.

De acordo com Neville (2016), em fissuras úmidas, quando não há uma movimentação tangencial, pode ocorrer o processo de autocicatrização. Para que isso ocorra, o concreto deverá estar em condições necessárias de umidade com molhagem periódica e frequente.

Na autocicatrização por carbonatação. Quando um concreto endurecido é exposto ao ambiente, aos gases da atmosfera e à água, o dióxido de carbono (CO_2), se infiltra através dos poros e fissuras do concreto endurecido e reage com o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) formando carbonato de cálcio, que é depositado nas fissuras, causando a cicatrização delas. De acordo com Helene *et al.* (2018), a colmatação autógena por carbonatação já foi reportada em 1836 pela Academia Francesa de Ciências.

Segundo Tittelboom; Belie (2013), em estruturas em contato direto com a água, como barragens e dutos, a autocicatrização pode também ocorrer pelo bloqueio físico por carreamento de sedimentos externos ao concreto, ou até mesmo pelas partículas do próprio material.

Pacheco (2020), em sua pesquisa avaliou a cicatrização autógena do concreto fabricado com somente cimento, como material cimentício, utilizando dois tipos de tratamento: úmido e submerso. Foram utilizados dois métodos para a abertura de fissuras: através de um equipamento de corte mecânico e através do ensaio de flexão. No corpo de prova com tratamento úmido, e fissuras formadas com o equipamento mecânico, houve, aos 28 dias, uma cicatrização pontual no trecho de 1,8 mm. Foi constatado que em idades maiores (56 e 84 dias) não houve alteração na cicatrização. No corpo de prova com o mesmo consumo de cimento e tratamento submerso, não se percebeu a formação de produtos de cicatrização.

Com as fissuras formadas no ensaio de flexão, a amostra com tratamento submerso, aos 28 dias, apresentou um acúmulo de produtos brancos na superfície das fissuras e aos 84 dias, as fissuras com abertura de 0,193 mm foram cicatrizadas. No corpo de prova com tratamento úmido, aos 7 dias, houve a formação dos produtos de cicatrização.

1.2.2 Autocicatrização do concreto com adições minerais

Autocicatrização de fissuras também pode ser consequência da reação de adições minerais que são adicionadas ao concreto durante a mistura para esta finalidade. Após o concreto fissurar, e na presença da água, as partículas das adições que não reagiram, começam a reagir com a água, colmatando as fissuras com os produtos da reação.

Vários tipos de adições têm sido utilizadas com a finalidade de cicatrização das fissuras, tais como, adições expansivas, cristalizantes e pozolanas e materiais cimentantes.

Hosada *et al.* (2007), Kishi *et al.* (2007) e Sisomphon; Copuroglu (2010) investigaram o potencial de autocicatrização de materiais cimentícios quando aditivos expansivos à base de sulfoaluminato de cálcio foram usados como material de substituição do cimento. Jaroenratanapirom e Sahamitmongkol (2010) avaliaram a autocicatrização de argamassas com adição de cinza volante, sílica ativa e um

aditivo cristalizante. Qian *et al.* (2010) relataram a capacidade de autocicatrização de compósitos cimentícios de alto desempenho incorporando pó de calcário, escória de alto-forno e argila calcinada.

Segundo Huang *et al.* (2015), as adições minerais para autocicatrização relatadas na literatura são: 1) Adições expansivas - Sulfoaluminato de cálcio ($4\text{CaO}\cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot \text{SO}_3$), cal livre, anidrita, agente expensor unido, bentonita e compósitos de dióxido de silício, hidróxido de silicato de alumínio e sódio e argila montmorilonita. 2) Carbonatos - NaHCO_3 , Na_2CO_3 ; pó de talco e silicato de sódio.

Pacheco (2020) também avaliou a autocicatrização do concreto com adição de pozolana. As pozolanas utilizadas nas misturas foram cinza volante e sílica ativa. Após 28 dias de idade, as amostras foram submetidas a dois processos de formação de fissuras: por corte mecânico e por ensaio de flexão. Para estimular o processo de autocicatrização, os corpos de prova foram expostos a água por dois métodos de tratamento: úmido e submerso. A amostra com fissuras pelo método de corte mecânico e submetida ao método úmido, apresentou a formação de uma lamina de cicatrização aos 28 dias, mas sem avanço até os 84 dias, conforme Figura 1.

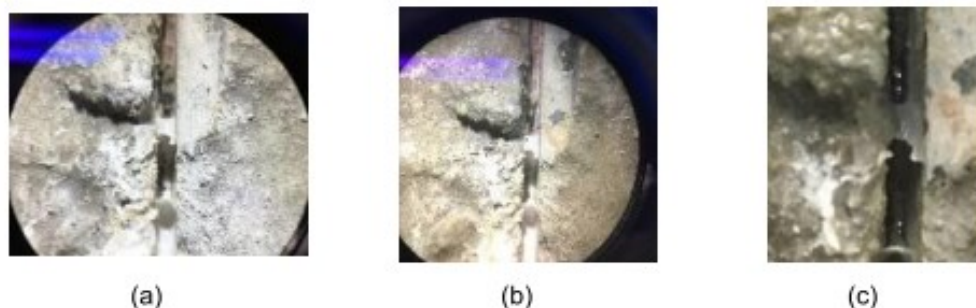


Figura 1 - Amostra com corte mecânico a) 28 dias. b) 56 dias c) 84 dias

Fonte : Pacheco (2020)

Na amostra com abertura de fissura na flexão e com método submerso (Figura 2), houve um acúmulo de produtos brancos na superfície aos 28 dias, uma característica de possível autocicatrização. Aos 56 dias foi verificado, em alguns pontos, fechamento da fissura e aos 84 dias verificou-se trechos cicatrizados. A abertura da fissura cicatrizada era de 0,193 mm.

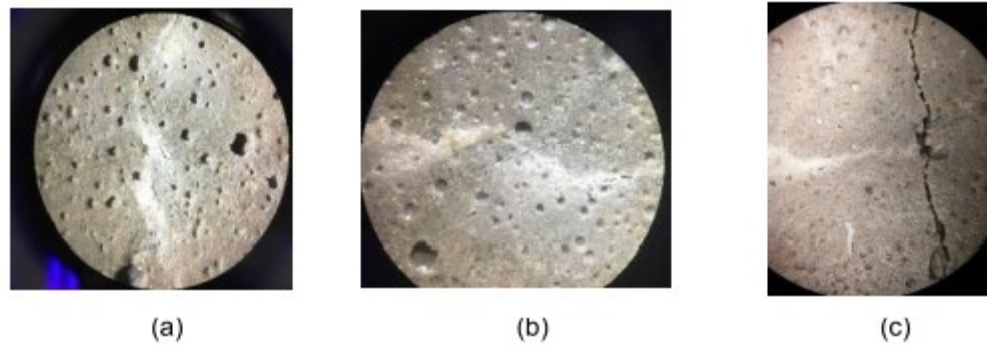


Figura 2 – Amostra de ensaio tração na flexão a) 28 dias b) 56 dias c) 84 dias

Fonte: Pacheco (2020)

A amostra com a fissura formada na flexão e com método úmido, aos 7 dias apresentou a formação de produtos de cicatrização (C-S-H, etringita ou carbonato de cálcio) na fissura com uma tendência de estagnação da cicatrização, conforme Figura 3.

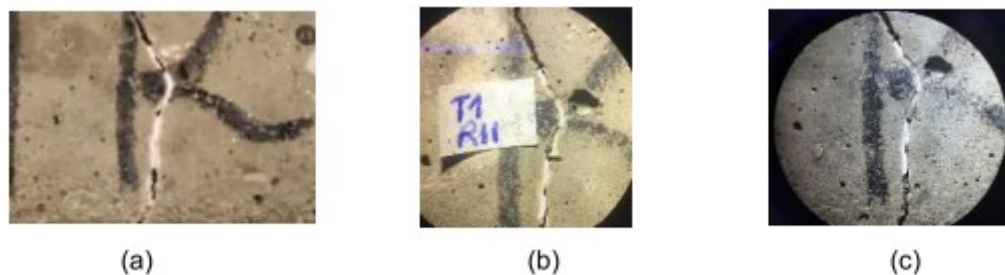


Figura 3 – Amostra fissuração por meio de tração na flexão a) 7 dias b) 28 dias c) 56 dias

Fonte: Pacheco (2020)

Ao comparar todas as situações, o autor concluiu que a fissura formada no ensaio de flexão, a eficácia da autocicatrização foi melhor do que quando a fissura foi formada por corte mecânico, provavelmente devido a estrutura em torno da fissura gerada na flexão ter sido menos invasiva do que pelo corte mecânico.

Em relação pelo método, o submerso (ver Figura 2) apresentou maior eficácia na autocicatrização comparado com o método úmido. Ou seja, no corpo de prova, quando mantido mais tempo em contato com a água, a reação é mais eficaz.

De acordo com Takagi *et al.* (2019), na autocicatrização com o uso do aditivo cristalizante, um aditivo cristalino ativa os componentes presentes no concreto, como

partículas de cimento e adições minerais não reagidas. Este método tem capacidade de reparar fissuras passivas com abertura de até 0,5 mm.

Conforme relatado pelo Comitê ACI 212 (2010), adição cristalizante é um tipo especial de adição redutora de permeabilidade (PRA). Já a norma Europeia EN 934-2 (2001) classifica as adições cristalizantes como aditivos resistentes à água e estabelece três propriedades específicas a serem medidas em concretos para testar seus efeitos e eficácia: absorção capilar, resistência à compressão e teor de ar no estado fresco. Ao contrário dos produtos repelentes à água ou hidrofóbicos, esses materiais são hidrofílicos (tem a capacidade de absorver a água), o que faz com que reajam facilmente com a água. Quando esta reação ocorre, ela forma depósitos de produtos insolúveis nos poros e fissuras, aumentando a densidade dos silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) e a resistência à penetração da água. A reação ocorre com a água e o silicato tricálcico (C_3S), presente nas matrizes cimentícias.

Esses produtos são formados por substâncias químicas ativas contidas no cimento e na areia que formam C-S-H modificado, dependendo do promotor cristalino, e um precipitado formado a partir de moléculas de cálcio e água.

Segundo Oliveira *et al.* (2013), PRAs são subdivididos de acordo com sua capacidade de reduzir a penetração de água com ou sem pressão hidrostática, em duas subcategorias: aditivos redutores de permeabilidade submetidos a condições não hidrostáticas (sigla em inglês - PRAN) e aditivos redutores de permeabilidade expostos a condições hidrostáticas (sigla em inglês-PRAH).

Os PRAN são recomendados para retardar, sem bloquear totalmente, a entrada e passagem de água na forma de líquido ou vapor, em condições de pressão menos severas causadas por ação capilar. Seus efeitos tornam a superfície do concreto impermeável à água e sua utilização tem sido mais para manter a estética e qualidade do concreto a longo prazo, evitando a entrada de águas pluviais e subterrâneas (OLIVEIRA *et al.*, 2013).

As adições cristalizantes pertencentes à categoria dos PRAHs, por sua vez, são indicados para impedir a passagem da água sob pressão hidrostática, reduzindo, desta forma, a permeabilidade do concreto e microfissuras em condições hidrostáticas (OLIVEIRA *et al.*, 2013)

Adição cristalizante redutora de porosidade (PRAH)

Adições cristalizantes são produtos comerciais, fabricados e vendidos por diferentes empresas. Seus desempenhos em concretos estão relacionados a composição química de cada produto. Segundo Oliveira *et al.* (2021), essa condição dificulta a previsão do comportamento global dessas misturas, no entanto, algumas informações são comuns a todos.

De acordo com Helene *et al.* (2017) e Takagi *et al.* (2019), o PRAH é uma mistura de cimento, areia de sílica e carbonato. Há 4 gerações de PRAH, cada uma com propriedades específicas.

Na primeira geração, os PRAHs eram partículas não pozolânicas, de sílica e de carbonato de cálcio muito finas e hidraulicamente inativas. Essas partículas eram utilizadas somente como fillers, com o objetivo de controlar a exsudação em concretos com baixo consumo de cimento. Estudos mostraram que essas partículas estimulavam as reações de hidratação por constituírem centros de nucleação para o hidróxido de cálcio.

A segunda Geração do PRAH (2G) tem uma maior capacidade “quelante” para cristalização e maior capacidade de dispersão das partícula do PRAH 2G nos poros do concreto. Nessa segunda geração, o PRAG 2G precipita uma reação química para provocar um efeito de dissolução e recristalização dos subprodutos da hidratação do cimento, formando uma nova estrutura de cristais não solúveis de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), etringita ($C_6AS_3H_{32}$) e carbonato de cálcio ($CaCO_3$), nas fissuras e porosidade do concreto.

Na terceira geração do PRAH (3G) foram acrescentados agentes químicos expansores a base sulfoaluminato de calcio (CSA), obtendo assim uma capacidade de autocicatrização para fissuras até 0,5 mm (Helene, 2017). Os produtos da autocicatrização são compostos por $CaCO_3$, C-S-H e etringita

A quarta geração do PRAH (4G) é acrescido de propriedades antimicrobianas. O PRAH (4G), de forma molecular, se liga aos produtos de hidratação do cimento rompendo a membrana celular de bactérias aeróbicas e anaeróbicas. De acordo com Helene *et al.* (2017), forma uma camada protetora contra a deterioração biológica.

Helene *et al.* (2017), avaliaram concretos com três tipos de cimentos, CP III, CP II-E e CP V, e o aditivo PRAH. Os cimentos continham percentuais de escória de alto forno (EAF) de, respectivamente, 55%, 34% e 0%. Para gerar microfissuras,

corpos de prova cilíndricos foram carregados em compressão até 90% da carga de ruptura. Posteriormente foram imersos em água saturada com cal, com o objetivo de desencadear o mecanismo da autocicatrização. Testes de compressão, para avaliar a recuperação mecânica e a permeabilidade, foram realizados após 28, 56 e 84 dias. A autocicatrização foi mais evidente nas amostras fabricadas com o cimento CPIII, com 55% de EAF. Além disso, o processo de autocicatrização foi maior nas amostras com cimento CPV, sem escória de alto forno (EAF), comparado ao resultado das amostras com CPII, com 34% de EAF, evidenciando que a reação de autocicatrização não é função do simples aumento do teor de EAF. Os cristais de silicato de cálcio hidratados (C-S-H) produzidos durante a hidratação do CPIII e do CPII-E podem cicatrizar fissuras finas da mesma forma que o C-S-H produzido pela hidratação das partículas do cimento CPV, que não reagiram no processo de produção do concreto. A velocidade da reação hidráulica dos cimentos CPIII e do CPII-E é função do pH, e é mais lenta que a hidratação contínua do cimento CPV.

Em relação ao teor de PRAH no concreto, Helene *et al.* (2017) sugere que a dosagem do PRAH é de acordo com o tipo de estrutura, como mostrado nas Tabelas 1, 2 e 3.

Tabela 1 - Concreto armado estrutural de obra enterrada exposta por sulfatos: dosagem do aditivo cristalizante sobre o peso do cimento (S.P.C) e consumo mínimo de cimento no traço.

Tipo de concreto estrutural	Dosagem do PRAH	Consumo mínimo de cimento	Mecanismos de deterioração do concreto	Requisitos técnicos conferidos ao concreto
Fundação direta acima do lençol freático (<0,10% SO ₄)	0,5% (s.p.c) do PRAH 3G	>300kg/m ³ CPIII ou CPII-E	Ataque fraco de sulfato por difusão e capilaridade	Proteção química à penetração e ataques por sulfatos
Fundação e estaca abaixo do lençol freático (<0,10% SO ₄)	0,8% (s.p.c) do PRAH 3G	>350kg/m ³ CPIII ou CPII-E	Ataque fraco de sulfato por difusão e pressão hidrostática	Proteção química à penetração e ataques por sulfatos e redução da permeabilidade
Fundação e estaca abaixo do lençol freático (>0,20% SO ₄)	1% (s.p.c) do PRAH 3G	>400kg/m ³ CPIII ou CPII-E	Ataque moderado de sulfato por difusão e pressão hidrostática	Proteção química à sulfatos, redução da permeabilidade e passivação de armadura e autocicatrização.
Fundação e estaca abaixo do lençol freático (>0,20% SO ₄)	1% (s.p.c) do PRAH 3G	>400kg/m ³ CPIII ou CPII-E +SA (>6% s.p.c.)	Ataque severo de sulfato por difusão e pressão hidrostática (H ₂ S>20 ppm)	Proteção química à sulfatos, passivação da armadura, redução da permeabilidade, autocicatrização e ação antimicrobiana.

Fonte: Helene *et al.* (2017)

Tabela 2 - Concreto armado estrutural exposto às classes de agressividade ambiental (CAA): dosagem do aditivo cristalino sobre o peso de cimento (S.P.C.) e consumo mínimo de cimento no traço.

Tipo de concreto estrutural	Dosagem do PRAH	Consumo mínimo de cimento	Mecanismos de deterioração do concreto	Requisitos técnicos conferidos ao concreto
Concreto 20 MPa de obra geral (superestrutura) CAAI	-	>260kg/m ³	-	-
Concreto 25 MPa de obra geral (superestrutura) CAAIL	0,5% de PRAH 3G	>280kg/m ³ CPIII ou CPII-E	Ataque por sulfato por difusão e capilaridade (carbonatação)	Proteção contra penetração e ataques químicos e redução da permeabilidade
Concreto 30 MPa de obra geral (superestrutura) CAAILI	0,8% de PRAH 3G (>3 kg/m ³)	>320kg/m ³	Ataque moderado de sulfato, cloreto por difusão e capilaridade (carbonatação)	Proteção contra penetração e ataques químicos, passivação da armadura e redução da permeabilidade
Concreto 40 MPa de obra industrial em área litorânea (superestrutura) CAAIV	1% (s.p.c) do PRAH 3G ou PRAH 4G	>360kg/m ³	Ataque intenso por sulfato, cloreto por difusão e capilaridade (biodegradação)	Proteção química, passivação da armadura, redução da permeabilidade, autocicatrização e ação antimicrobiana.

Fonte: Helene *et al.* (2017)

Tabela 3 - Concreto armado estrutural de obra enterrada exposto ao ataque por sulfatos: dosagem do aditivo cristalino sobre o peso de cimento (S.P.C.) e consumo mínimo de cimento no traço.

Tipo de concreto estrutural	Dosagem do PRAH	Consumo mínimo de cimento	Mecanismos de deterioração do concreto	Requisitos técnicos conferidos ao concreto
Concreto 35 MPa de estrutura hidráulica: cisterna, piscina, reservatório	1% de PRAH 3G	>340kg/m ³	Ataque moderado por sulfato, cloreto por difusão e pressão hidrostática (carbonatação)	Proteção contra penetração e ataques químicos, passivação da armadura e redução da permeabilidade.
Concreto 40 MPa de infraestrutura de ponte, túnel e barragem	1% de PRAH 3G	>360kg/m ³ + adição mineral (>6% s.p.c.)	Ataque intenso por sulfato, cloreto por difusão e pressão hidrostática (carbonatação)	Proteção química, passivação da armadura e redução da permeabilidade e autocicatrização.
Concreto de laje de subpressão 40 MPa com acabamento polido	1% de PRAH 3G	>360kg/m ³ CPIII +SA(> 6% s.p.c)	Ataque intenso por sulfato, cloreto por difusão e pressão hidrostática (carbonatação)	Proteção química, passivação da armadura e redução da permeabilidade e autocicatrização.
Estrutura de saneamento em contato com H ₂ S (ácido sulfúrico biogênico)	1% (s.p.c) do PRAH 4G	>360kg/m ³ CPIII +SA(> 6% s.p.c)	Corrosão induzida por microorganismos (H ₂ S>20 ppm), ataque por sulfatos e pressão hidrostática	Proteção química, passivação da armadura, redução da permeabilidade, autocicatrização e ação antimicrobiana.

Fonte: Helene *et al.* (2017)

Takagi *et al.* (2019), avaliaram os efeitos, após 1 ano, do uso do aditivo cristalizante PRAH de quarta geração em um pavimento de concreto armado do viaduto Kitagashira, no Japão. No lado inferior do pavimento de concreto havia muitas fissuras devido ao carregamento repetitivo do tráfego médio diário de 40.000 caminhões. Foram extraídos testemunhos com o diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm do concreto do pavimento em duas seções. Foram realizados ensaios de resistência à compressão e permeabilidade. Os resultados do ensaio de compressão constatou que houve um aumento médio de 28% na resistência em comparação às amostras não tratadas com o aditivo cristalizante. O teste de permeabilidade identificou que houve uma tendência à diminuição do volume de água passante das amostras tratadas com o aditivo cristalizante, o que evidencia a sua capacidade de autocicatrização do concreto nos vazios das fissuras das amostras tratadas.

Roig-flores *et al.* (2015) estudaram a autocicatrização do concreto reforçado com fibras, após aplicação de um aditivo cristalizante, em quatro tipos diferentes de tratamento (imersão em água, contato com a água, câmara úmida e exposição ao ar em condições de laboratório). As fibras têm como objetivo, restringir a largura das fissuras e, geralmente, potencializam a cicatrização autógena. Corpos de prova moldados com concreto contendo aditivos cristalizante e armazenados em imersão em água obtiveram as maiores taxas de autocicatrização, com valores em torno de 0,95 mm mesmo para aberturas de fissuras iniciais maiores (em torno de 0,25 mm). As quatro exposições em ordem decrescente de taxa de cura da permeabilidade são: imersão em água (cerca de 0,90 mm), contato com água (cerca de 0,80 mm), câmara úmida (cerca de 0,15), exposição ao ar (cerca de 0,15 mm).

Qian *et al.* (2010), em sua pesquisa, estudaram 4 diferentes tipos de condições de tratamento e do tempo de pré-fissuração: tratamento ao ar, tratamento com 3% de CO₂, tratamento cíclico úmido/seco, e tratamento com água. Também foram adicionadas fibras na mistura e na nanoargila. A nanoargila foi adicionada com o objetivo de investigar a viabilidade de utilizar sua capacidade de retenção de água para melhorar o comportamento de autocicatrização. Os autores concluíram que, amostras curadas ao ar mostraram uma recuperação da capacidade de deflexão de forma razoável, ou seja, as amostras com nanoargila, comparadas às amostras de referência, obtiveram capacidade de deflexão maiores. O que indica

que pode ser possível utilizar a nanoargila para reter a água internamente e corrigir os danos ao longo das microfissuras.

1.2.3 Autocicatrização do concreto com adição biológica

A autocicatrização também pode ocorrer com a adição de bactérias ao concreto. Na Figura 4 mostra um exemplo da bactéria *Bacillus Pseudofirmus*, comumente utilizada nesse processo. No processo são utilizadas bactérias resistentes a altas e baixas temperaturas e que se mantêm em estado vegetativo durante o tempo até surgirem fissuras na estrutura. Com a fissuração do concreto, a água e o ar passam a infiltrá-la. As bactérias deixam o estado vegetativo, passando a se alimentar e consumir o oxigênio disponível, reproduzindo-se e consumindo mais alimento. A produção de minerais por microorganismos, como cristais de carbonato de cálcio, é conhecida como precipitação microbiana de carbonato (MCP).



Figura 4 - *Bacillus Pseudofirmus*

Fonte: Inova Civil

De acordo com Alsharlif *et al.* (2016), a utilização de bactérias ou soluções bacterianas imersas no concreto têm a função de produzir carbonato de cálcio. Jogi; Lakshmi (2021) informam que os agentes de cicatrização podem viver no concreto por até 200 anos. Como a superfície do concreto é porosa, e com o surgimento de fissuras, a água e os nutrientes entram em contato com os esporos da bactéria que germinam. Após a ativação, as bactérias começam a se alimentar do lactato de cálcio, também adicionado ao concreto. Quando as bactérias consomem oxigênio, o lactato de cálcio solúvel é convertido em carbonato de cálcio, preenchendo as fissuras. O consumo do oxigênio dos poros minimiza a corrosão da armadura.

Tang; Xu (2020) dizem que, tecnicamente, a precipitação microbiana de carbonato pode ser categorizado em precipitação de carbonato controlada micro

biologicamente (MCCP) e precipitação de carbonato induzida por microbiota (MICP) por diferentes mecanismos. No MCCP, o processo é estritamente controlado pelos genes microbianos e as condições ambientais afetam esse processo em um grau muito limitado; microorganismos produzem cristais de carbonato em uma forma que depende de espécies únicas. No MICP, no entanto, o carbonato de cálcio é sintetizado por bactérias como um subproduto na maioria dos casos. Ainda, segundo os autores, a precipitação microbiana de carbonato é atraente quando a bioprecipitação possa ser ativada, após a formação de fissuras sem qualquer interferência humana.

Madigan *et al.* (2016) apontam que todas as células apresentam metabolismo, ou seja, retiram nutrientes do ambiente em que estão, os transformam, e excretam este produto de volta ao ambiente. A precipitação de carbonato de cálcio pode ser causada por várias vias metabólicas, como a hidrólise da ureia e a oxidação de ácidos orgânicos. Em comparação com as outras vias de geração de carbonato, a hidrólise da ureia apresenta diversas vantagens. Por exemplo, pode ser facilmente controlado e tem potencial para produzir grandes quantidades de carbonato em um curto espaço de tempo. Catalisada por meio da urease, a ureia é degradada a carbonato e amônio e, conseqüentemente, aumenta o valor do pH, bem como a concentração de carbonato no ambiente bacteriano. (Huang *et al.*, 2015)

As bactérias autotróficas tem metabolismo metanogênese não-metilotróficas, produzem gás metano. Fotossíntese anoxigênica e oxigênica, o metabolismo que não gera oxigênio molecular e que gera oxigênio molecular quando converte a energia da luz em energia química. Mas, para a autocura do concreto, não há estudos com o uso dessas bactérias.

No caso das bactérias heterotróficas, o processo se divide em metabolismo assimilativo e dissimilativo. No processo assimilativo, há as que decompõem a ureia e a amonificação de aminoácidos. Já no dissimilativo, as bactérias oxidam o carbono orgânico de forma aeróbica (oxidam o metano) e anaeróbica, reduz o sulfato

De acordo com Tutikian *et al.* (2019), existem muitos processos que levam à MICP, dependendo da espécie utilizada e seu metabolismo. A precipitação de carbonato de cálcio aparece em maior número, pelas bactérias heterotróficas. Há três metabolismos autotróficos para MICP, porém, não foram encontrados estudos que fizessem proveito destas bactérias. As pesquisas concentram-se nos seguintes processos: hidrólise de ureia e oxidação de componentes orgânicos

De acordo com Reddy *et al.* (2020), o processo de autocicatrização do concreto com adição biológica está relacionado a produção de carbonato de cálcio, como já mencionado anteriormente, e, para que isso ocorra, depende de diversos fatores, como o pH do concreto, o carbono inorgânico dissolvido, locais de nucleação e presença de íons de cálcio em toda a mistura. Os íons de cálcio presentes na mistura atraem as células de bactérias carregadas negativamente, decompondo a ureia em amônio e carbono inorgânico. Na hidrólise da ureia e na oxidação de ácidos orgânicos ocorre a precipitação de CaCO_3 . Metabolicamente as bactérias convertem 1 mol de lactato de cálcio em 1 mol de carbonato de cálcio.

Hidrólise de Ureia

Madigan *et al.* (2016) apontam que uma bactéria é composta por cerca de 13% de nitrogênio, obtendo-o através de diversas moléculas, como, por exemplo, a amônia. Abaixo é possível visualizar o processo químico de precipitação de carbonato induzida por microbiota (MICP) por hidrólise de ureia:

Alguns microrganismos produzem uma enzima chamada urease, que está envolvida no ciclo do nitrogênio e pode ser usada para produzir CaCO_3 via ureólise (hidrólise da ureia). As bactérias na presença de ureia ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) é hidrolisada em amônia (NH_3) e ácido carbâmico (NH_2COOH). A presença da urease serve como agente catalizador, reduzindo a energia necessária para ativar a reação, e, assim, aumentando sua velocidade, conforme equação 1.



O ácido carbâmico é espontaneamente hidrolisado em ácido carbônico (H_2CO_3) e amônia, conforme Equação 2.



A amônia equilibra-se com a água gerando íons hidróxido (OH^-), que por sua vez reagem com o ácido carbônico gerando carbonato (CO_3^{2-}), como mostrado na equação 3 e 4.



Quando há a presença de íons de cálcio, há a precipitação do carbonato de cálcio (CaCO_3), como indicado na equação 5.

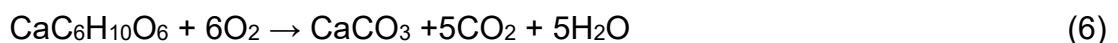


A MICP por hidrólise de ureia é o método mais simples e rápido para a precipitação dos biominerais (Madigan *et al.*, 2016). Exemplo de espécies utilizadas para MICP por hidrólise de ureia: *Bacillus Sp*, *Bacillus sphaericus*, *Sporosarcina Pasteuri*, *Pseudomonas Aeruginosa*, *Bacillus Megaterium*, *Bacillus Licheniformis* e *Bacillus Flexus* (Tutikian *et al.*, 2019).

Tutikian *et al.* (2019) observou que há um maior uso das bactérias do gênero *Bacillus* para MICP através da hidrólise da ureia e isso é devido à sua extrema compatibilidade com matrizes cimentícias, que é explicada através dos aspectos fisiológicos dos microrganismos.

Oxidação de Componentes Orgânicos

Madigan *et al.* (2016) apresentam uma classe de microrganismos, chamados quimiorganotróficos, que obtêm sua energia através da oxidação de compostos orgânicos. Esta reação é mais simples quando comparamos à hidrólise de ureia. Segundo o autor, quando na presença do lactato de cálcio ($\text{CaC}_6\text{H}_{10}\text{O}_6$), como nutriente, ocorre sua oxidação em carbonato de cálcio (CaCO_3), gerando também o dióxido de carbono (CO_2) e água. O dióxido de carbono produzido reage então com o hidróxido de cálcio que já é presente no concreto, como um produto da hidratação do cimento, gerando mais carbonato de cálcio. A síntese do processo é mostrada nas equações 6 e 7.



Tutikian *et al.* (2019) observaram que a última equação é um processo muito similar à carbonatação natural do concreto, porém muito mais rápida devido à intervenção bacteriana. Este processo é muito eficaz, pois para cada 1 mol de lactato de cálcio, são produzidos 6 mols de carbonato de cálcio. Além do lactato de cálcio, outros nutrientes podem ser utilizados como fonte de cálcio para as reações. As amostras estudadas pelos autores cujo metabolismo é por oxidação de componentes orgânicos são: *Bacillus Sp.*, *Bacillus Pseudofirmus*, *Bacillus Cohnii* e *Bacillus Alkalinitrilicus*.

De acordo com Jogi; Lakshmi (2021), devido a distribuição de nutrientes de cálcio e das bactérias no concreto, o ciclo de autocura do concreto é muito mais eficiente, pois, o carbonato de cálcio é formado através de processos metabólicos microbianos e também indiretamente através de processos curativos autógenos.

Jogi; Lakshmi (2020) descrevem diferentes tipos de bactérias e suas atuações:

- *Bacillus Subtilis* – Concentração de bactérias $2,8 \times 10^8$ células/ml – Melhoria da resistência à compressão em 12%;
- *Sporosarcina Pasteurii* - 10^5 células/ml - Resistência à compressão 35% maior que o concreto de controle;
- *Bacillus Sp. CT-5* - 5×10^7 células/ml - Melhoria da resistência à compressão em 40% em comparação com o concreto de controle;
- *AKKR5* - 10^5 células/ml - Melhoria da resistência à compressão em 10% em comparação com o concreto de controle;
- *Bacillus Megaterium* - 30×10^5 células/ml - Melhoria da resistência à compressão em 24% em comparação com o concreto de controle;
- *Bacillus Aerius* - 10^5 células/ml - Melhoria de resistência à compressão em 11,8%;
- *Espécie Shewanella* - 10^5 células/ml - Melhoria da resistência à compressão em 25%.

Nodehi *et al.* (2022) informaram que a maioria das bactérias cresce e sobrevivem em pH neutro, em torno de 7, e essas são chamadas de neutrófilas. Os microorganismos que crescem em pH inferior a 5,5 são conhecidos como acidófilos. Já os alcalófilos, são as bactérias que crescem melhor em pH entre 8 e 10. Alcalófilos extremos adaptam-se ao ambiente hostil através da modificação evolutiva de lipídios, estrutura de proteínas e mecanismos para manter a força motriz do próton em um ambiente alcalino.

De acordo com Tang; Xu (2020), o ambiente do concreto é hostil para as bactérias. O primeiro obstáculo é a alcalinidade. Após a hidratação do cimento Portland comum, o pH do concreto fica em torno de 13. O pH ideal para sobrevivência da bactéria varia de acordo com o tipo de cepa. Com o aumento da alcalinidade ocorre a diminuição da atividade bacteriana.

Nodehi *et al.* (2022) citam que o pH no concreto é definido como o logaritmo negativo da concentração de íons de hidrogênio ativos, revelando o nível de alcalinidade do concreto. Para o processo de hidratação de materiais cimentícios, geralmente é necessária uma alta alcalinidade para dissolver os materiais

misturados. A alta alcalinidade do concreto pode aumentar a dissolução de cálcio e silicato, o que permite iniciar o processo de hidratação de forma eficiente, reduzindo a necessidade de cura térmica devido ao aumento da reatividade química dos materiais. A origem dessa alcalinidade é o hidróxido de cálcio, que é produzido através do processo de hidratação do cimento. Sendo assim, considera-se que se o pH estiver na faixa de 7 a 9, o concreto estará em um estágio inicial de decomposição, em que, em alguns casos, danos à superfície podem ser vistos claramente neste nível de pH. Quando o pH está próximo a 6, observa-se uma forte deterioração do concreto, e em pH igual ou inferior a 4, torna-se necessária a reparação ou substituição dos elementos ou estruturas de concreto.

Adição da bactéria no concreto

No momento do preparo do concreto são adicionadas as colônias de bactérias. As bactérias formam esporos para se protegerem, em um ambiente propício a não sobrevivência. Existem 2 formas de adição da bactéria no concreto no seu estado fresco, como descritas a seguir:

Pelo método direto

Neste método as bactérias são adicionadas diretamente ao concreto, onde uma parte das bactérias adicionadas pode não sobreviver.

De acordo com Tang; Xu (2020), uma condição adversa é o tamanho relativamente pequeno dos poros devido à hidratação do cimento. Estudo realizado por Jonkers *et al.* (2010) indicou que a perda da viabilidade dos esporos parece estar ligada à diminuição contínua do diâmetro dos poros. Os esporos bacterianos podem ser esmagados até a morte das bactérias no concreto envelhecido. Além disso, os esporos devem ser capazes de suportar altas tensões de cisalhamento durante a mistura, altas temperaturas durante a hidratação do cimento e tensões de desidratação após o endurecimento.

Pelo método indireto

As bactérias são encapsuladas com o objetivo de proteger a bactéria e garantir que uma quantidade maior sobreviva ao ambiente do concreto. As bactérias juntamente com uma solução alimentícia são encapsuladas antes de serem adicionadas ao concreto fresco, gerando um núcleo protetor em torno das bactérias.

Elas podem ser encapsuladas em argila expandida, sílica gel, cápsulas a base de melanina, hidrogel, fibras de celulose, poliuretano, entre outros.

Tang; Xu (2020) chamam de imobilização como uma maneira de proteger os esporos bacterianos do cisalhamento e esmagamento durante e após o endurecimento do concreto. Uma vez que um transportador sólido (cápsula) pode atuar como um escudo para os esporos e ajudar a manter a viabilidade microbiana no concreto. A cepa da bactéria também precisa ser biocompatível com o material utilizado para o encapsulamento.

Uma outra forma de proteger as bactérias do ambiente hostil do concreto é adicionar à mistura agentes incorporadores de ar. De acordo com pesquisa realizada por Tang; Xu (2020), o uso de incorporadores de ar pode criar microporos isolados na matriz de concreto onde os esporos podem sobreviver.

Neste assunto, diferentes técnicas têm sido estudadas, como a forma de encapsulamento: argila expandida com lactato de cálcio e *Bacillus alcalintrilicus* (Xu *et al.* 2018) e hidrogel com extrato de levedura, ureia e *Bacillus sphaericus* (Wang *et al.*, 2014); o tipo de alimento: ágar, extrato de levedura, extrato de carne bovina, entre outros; e o tipo de bactéria utilizada: *Bacillus Subtilis*, *Bacillus Sphaericus*, *Bacillus Pasteurii*, *Bacillus Magaterium*, entre outros.

Segundo Reddy *et al.* (2022) a resistência à compressão e tração do concreto aumenta quando bactérias do tipo *Bacillus Subtilis*, *Bacillus Sphaericus*, *Bacillus Pasteurii* e *Bacillus Magaterium* são incorporadas ao concreto. Os autores também citam que o uso do *Bacillus Subtilis* com uma concentração celular de 10^5 células/ml apresentou uma boa melhora nas propriedades mecânicas.

Segundo Nodehi *et al.* (2021), a bactéria *Bacillus Subtilis* é uma cepa formadora de esporos tolerante a álcalis com alta atividade de urease. Ela mostra uma formação constante de CaCO_3 pesado. Mais comumente, bactérias de base alcalina da cepa do *Bacillus* são usadas para produzir concreto bacteriano. Ao contrário de outras cepas, as bactérias *Bacillus* são bem conhecidas por não serem patogênicas, serem capazes de crescer em temperaturas moderadas (mesófilas) e permanecerem dormentes por anos enquanto suportam temperaturas extremas.

Zakrzewski (2022) em sua pesquisa avaliou a introdução da bactéria *Bacillus Subtilis* no concreto por meio de encapsulamento em argila expandida. Foram estudados 3 diferentes misturas: uma mistura foi fabricada sem adição de bactéria (traço de referência); a segunda mistura foi fabricada sem adição de bactérias e

parte da brita foi substituída por argila expandida; e a terceira mistura com adição de bactérias encapsuladas na argila expandida (parte da brita foi substituída pela argila expandida). Foram realizados ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade e avaliação visual da autocicatrização. O autor concluiu que o uso de bactérias no concreto aumentou a resistência à compressão em comparação com a mistura que continha a argila expandida sem a adição da bactéria. Esse comportamento tem relação com a precipitação do carbonato de cálcio pelas bactérias. Além disso, o módulo de elasticidade do concreto de referência e o concreto com bactérias encapsuladas obtiveram resultados maiores do que os que foram fabricados com argila expandida sem a adição da bactéria. Esse estudo também comprovou, em âmbito experimental, a eficiência das bactérias *Bacillus Subtilis* na autocicatrização das fissuras geradas na matriz e também a melhora nas propriedades do concreto. Ao compararmos as amostras: Argila e Argila+bactéria (a única variável entre as amostras é a adição das bactérias), aos 7 dias a resistência à compressão da amostra com bactéria foi 25% maior do que a amostra sem bactéria e aos 99 dias a resistência a compressão foi 29% a mais do que a amostra sem bactéria. Aumentando em 4% em comparação aos 7 e 99 dias. A resistência à compressão do concreto da amostra Argila+bactéria teve um resultado próximo ao do concreto de referência tanto aos 7 dias quanto aos 99 dias, tendo uma diferença de apenas 2% entre os tipos de concreto. Na análise visual, as bactérias influenciaram positivamente. Na Figura 5 é possível ver a evolução da autocicatrização. Houve uma melhoria na resistência a compressão e a selagem completa ocorreu após 45 dias. Além disso, ocorreu uma redução na infiltração de água para o interior da estrutura.

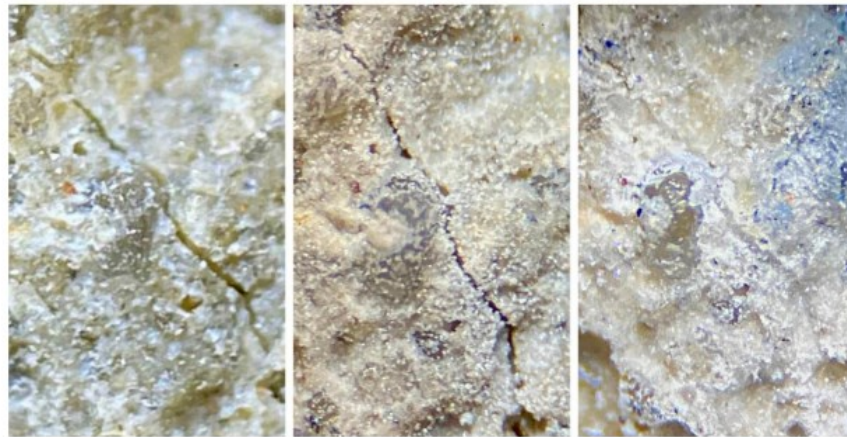


Figura 5 - Identificação da formação de carbonato de cálcio e selagem da fissura em microscópio.

Fonte: Zakrzewski (2022).

Zulfikar *et al.* (2020) estudaram o efeito do uso de soja como catalisador no método de precipitação do carbonato de cálcio por enzimas, através da aplicação da enzima urease derivada de plantas para catalisar a reação entre cloreto de cálcio (CaCl_2) e ureia ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$). Foram ensaiadas amostras cilíndricas de concreto, com diâmetro de 5 cm e altura de 10 cm. As fissuras, com abertura de aproximadamente 0,2 e 0,3 mm, foram geradas através do ensaio de compressão diametral (na Figura 6, é possível visualizar o corpo de prova com a fissura). Foram preparados 4 tipos de soluções com as seguintes concentrações de farinha de soja: 0, 1, 5 e 10 g/L. A solução foi adicionada ao concreto endurecido pelo método de percolação até o período em que a altura da solução estava a 5 mm acima da superfície do concreto, permanecendo durante 28 dias. O efeito nas fissuras do concreto foi avaliado por meio de testes de permeabilidade. Os resultados mostraram que o cálcio formado na amostra após a 4ª aplicação foi de 18,3% da área superficial total da fissura e foi capaz de reduzir o valor da permeabilidade do concreto em 95,43%, comprovando a eficácia do ensaio.

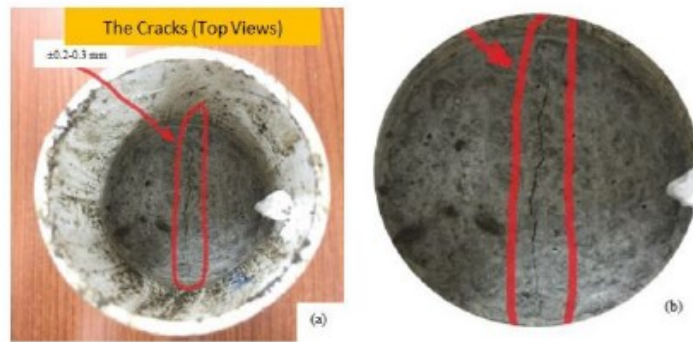


Figura 6 – Fissura gerada no corpo de prova

Fonte: Zulfikar *et al.* (2020)

A maioria dos estudos sobre o concreto autocicatrizante biológico foi realizada em laboratório. Porém, o estudo realizado por Qian *et al.* (2021), analisou os resultados da autocicatrização em campo e em laboratório. A pesquisa foi realizada em um projeto da ferrovia intermunicipal na China. Foi utilizado na construção da ferrovia um concreto com adição de bactérias em pó e um concreto misto com bactérias encapsuladas.

Em relação ao concreto com adição biológica em pó, quando o concreto fissurou, apenas as bactérias na superfície da fissura puderam entrar na área da fissura. Para o concreto com adição biológica encapsulada, quando a cápsula foi descompactada devido a tensão gerada pela abertura da fissura, todos os ingredientes ativos carregados entraram na fissura, e a liberação dos componentes de cicatrização foi mais concentrada. À medida que o tempo de tratamento aumentou, ocorreu uma precipitação maior de brancos (minerais induzidos por bactérias pré adicionadas ao concreto) na superfície do concreto com adição biológica em pó. No caso do concreto com cápsulas, o aparecimento de brancos na superfície foi menor.

Para o teste em campo foram incorporados sensores para monitorar a temperatura e a deformação do concreto. Também foi utilizado o método ultrassônico para avaliar quantitativamente o grau de autocicatrização das fissuras. Nos ensaios realizados em laboratório, foi observado que a medida que o tempo passava, a taxa de reparo da área da fissura do concreto autocicatrizante aumentava gradualmente. Ao mesmo tempo, a infiltração da água foi reduzindo e o coeficiente de permeabilidade relativo das fissuras reduziu gradualmente chegando a zero.

Nos ensaios em campo, logo após a retirada das fôrmas, foram identificadas fissuras e infiltração de água. Duas fissuras foram observadas na parede lateral do concreto com adição biológica. No local da aplicação, foram adotadas o tratamento por spray com água, tratamento com material umedecido com água (estopa), e o tratamento com material umedecido com solução nutritiva (ver Figura 7). Foram realizadas coletas de dados e a observação dessas fissuras diariamente por 10 dias. A largura das fissuras era de 0,2 mm e 0,5 mm. Após 41 dias, foi identificada nas bordas inferiores das fissuras, com largura de 0,2 mm, uma grande quantidade de material branco precipitados, além disso não havia mais infiltração de água. Este mesmo fenômeno ocorreu também na fissura de 0,5 mm, porém exigiu mais tempo para ser reparada (60 dias após a identificação). Os resultados também mostraram que o efeito autocicatrizante das fissuras tratadas com o material umedecido por solução nutritiva foi o melhor, seguido do material umedecido por água e tratamento por spray de água, respectivamente. Foi comprovada autocicatrização das fissuras e a eficiência da adição microbiana no concreto.

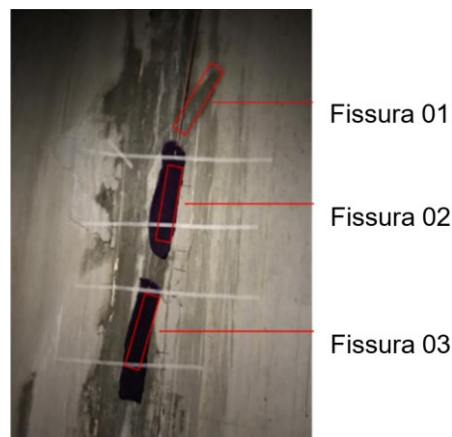


Figura 7 – Ensaio em campo, fissura n.º1) Spray de água; 2) Material umedecido com solução nutritiva; 3) Material umedecido com água.

Fonte: Qian *et al.* (2021). Imagem adaptada

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Ao longo desse capítulo serão apresentados os detalhes do programa experimental desenvolvido, de forma a atender os objetivos propostos e especificados no trabalho.

Foram realizados ensaios comparativos da capacidade de cicatrização do concreto com adição de aditivo cristalizante e com adição biológica, em diferentes concentrações. Com essa finalidade foram confeccionados cinco tipos de concretos: um concreto sem adição, o segundo concreto foi fabricado com o aditivo cristalizante, Penetron, e o terceiro, quarto e quinto concretos foram fabricados com a adição de uma solução formada pela bactéria *Bacillus Subtilis* e lactato de cálcio encapsulada no hidrogel, em diferentes dosagens. Todos os concretos foram fissurados após 28 dias de cura úmida. Após a fissuração, uma parte dos corpos de prova do concreto sem adição foi separada e utilizada como concreto referência (não foi tratada com adições biológica e química). Uma outra parte do concreto sem adição recebeu tratamento pós fissuração, foram aplicadas as adições (química e biológica) de forma separadas, ou seja, o aditivo cristalizante foi aplicado nas fissuras de alguns corpos de prova, e uma solução de bactéria com lactato de cálcio foi aplicada nas fissuras dos outros corpos de prova. Posteriormente, foi feita o tratamento em água de todos os corpos de prova.

O acompanhamento do processo de cicatrização de todas as fissuras foi feito por 60 dias. Na Figura 8 é apresentado um fluxograma do planejamento experimental.

Após o processo de cicatrização, foram realizados ensaios para obtenção das propriedades residuais. Para melhor clareza da metodologia do trabalho, um fluxograma mostrado na Figura 9, foi montado para que seja possível visualizar as etapas realizadas. As propriedades mecânicas verificadas foram as resistências à compressão e à flexão. As propriedades físicas verificadas foram a absorção de água, índice de vazios, massa específica da amostra seca e da amostra saturada e a análise visual da autocicatrização.

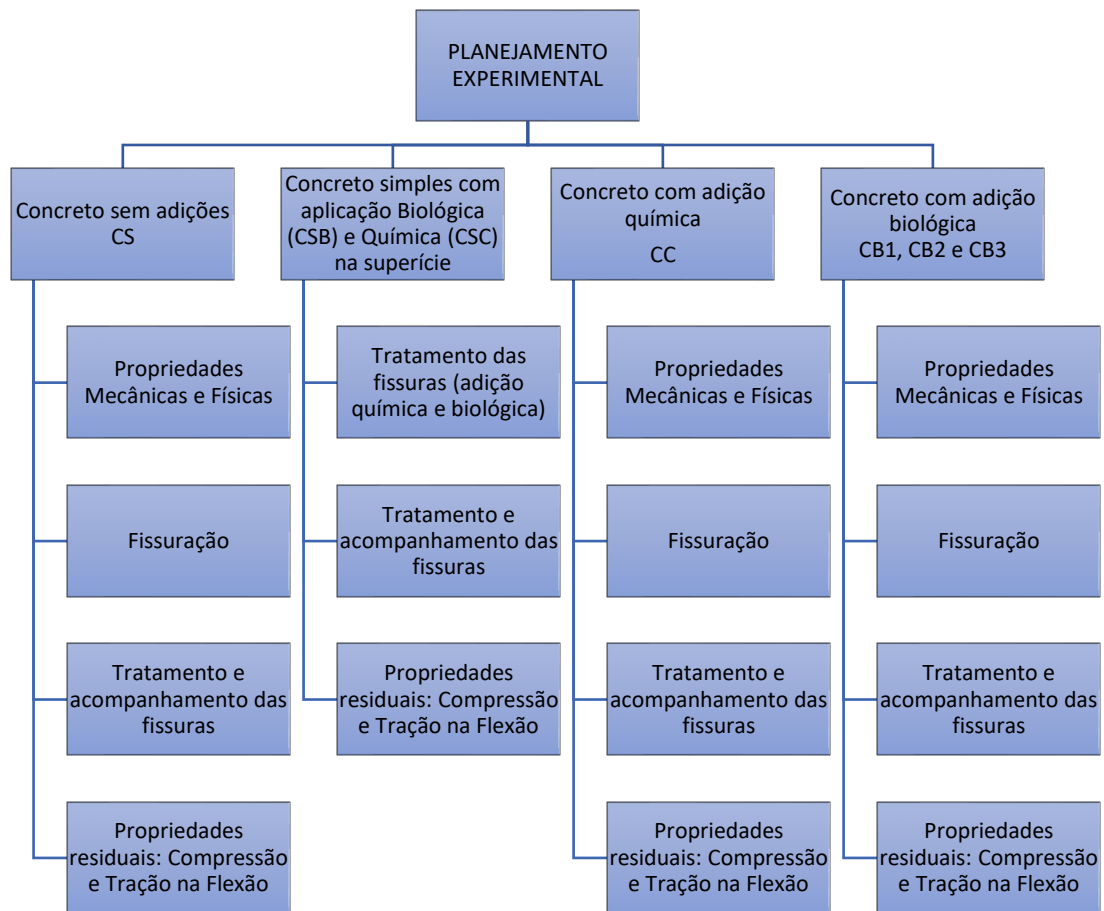


Figura 8 – Fluxograma do planejamento experimental.

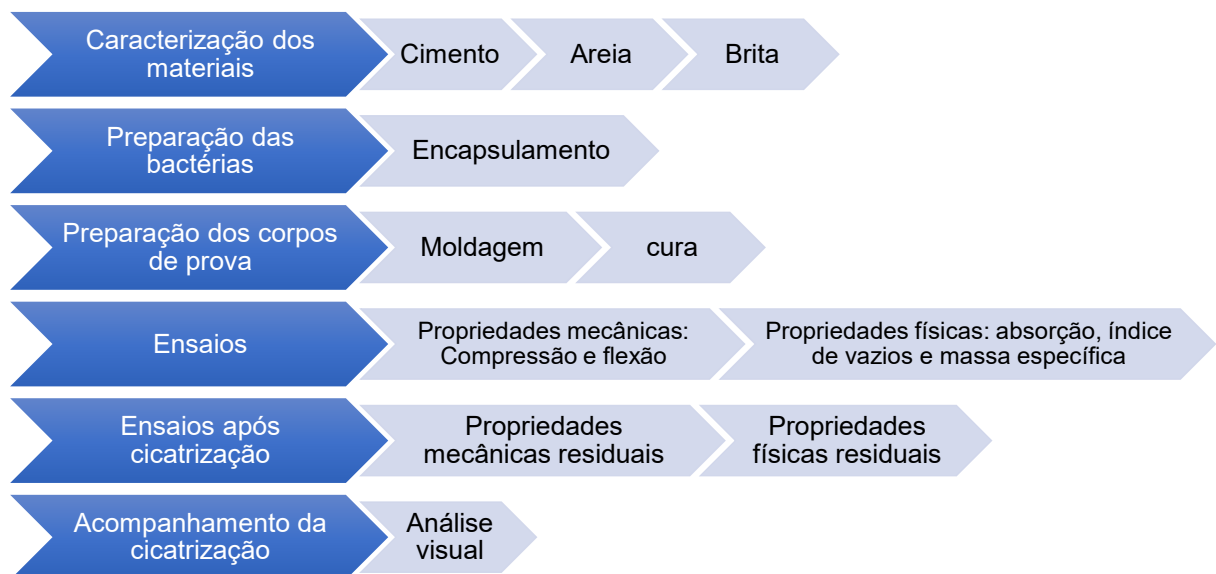


Figura 9 – Fluxograma das etapas realizadas.

Fonte: o Autor

2.1 Caracterização dos materiais

Os materiais utilizados para a produção do concreto foram caracterizados em laboratório a fim de identificar suas propriedades, cada um deles seguindo suas respectivas normativas.

2.1.1 Cimento

O cimento utilizado foi o CII-F, com resistência de 32 MPa. A massa específica do cimento é de 3,03 g/cm³ e foi determinada pelo procedimento da NBR 16605 (2017). O índice de finura é de 0,64 e foi determinada pela NBR 11579 (2012).

2.1.2 Areia

Na fabricação dos concretos foi utilizada areia natural. A caracterização da areia foi realizada por meio de ensaios de granulometria para determinação do módulo de finura e distribuição granulométrica (NBR NM 248/2003), da densidade e absorção de água (NBR 16.916/2021). As propriedades da areia são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades da areia.

Parâmetro	
Densidade na condição seca (g/cm ³)	2,59
Densidade na condição saturada superfície seca (g/cm ³)	2,61
Absorção de água	0,72 %
Módulo de finura	2,24
Diâmetro máximo (mm)	4,75

Fonte: Autor

2.1.3 Brita

A brita utilizada na fabricação dos concretos passou pelo mesmo processo de caracterização utilizado para a areia, em relação a granulometria. Para a determinação das densidades e absorção de água, utilizou-se o procedimento estabelecido na norma NBR 16.917 (2021). As características físicas da brita são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades do agregado graúdo.

Parâmetro	
Densidade na condição seca (g/cm^3)	2,69
Densidade na condição saturada superfície seca (g/cm^3)	2,71
Absorção de água (%)	0,60
Módulo de finura	8,31
Diâmetro máximo (mm)	19

Fonte: Autor

2.1.4 Adições

Química

Como adição química foi utilizado o produto Penetron Admix fabricado pela empresa Penetron (Figura 10). Ele consiste de cimento Portland, compostos químicos ativos e rastreador químico. Estes compostos químicos ativos reagem com a água no concreto fresco e com os produtos da hidratação do cimento, formando uma estrutura cristalina insolúvel nos poros e capilares do concreto.



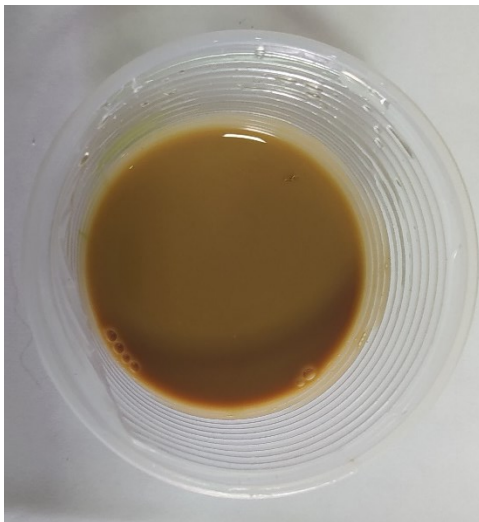
Figura 10 – Produto Penetron Admix

Fonte: Autor

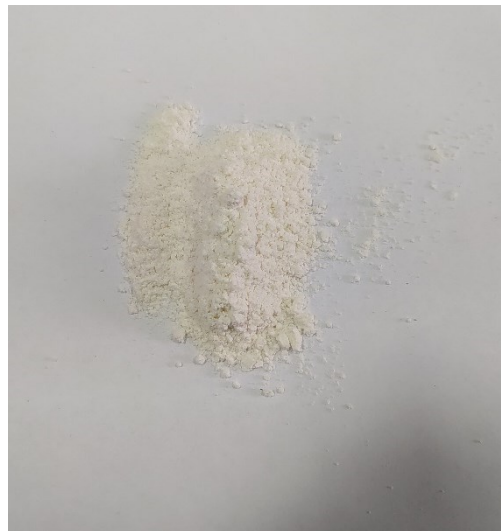
Biológica

Como adição biológica foi utilizada bactéria da espécie *Bacillus Subtilis*, linhagem QST713. O produto é comercializado com o nome de Serenade pela Bayer e possui uma concentração de 13,68 g/L, com mínimo de 1×10^9 UFC/g de ativo (Figura 11 a).

Como alimento para a bactéria foi utilizado o lactato de cálcio comercializado pela Bianquímica (Figura 11 b).



a) Serenade



b) Lactato de cálcio

Figura 11 – Produto Serenade e Lactato de cálcio

Fonte: Autor

2.1.5 Hidrogel

O material utilizado para o encapsulamento foi o hidrogel (Figura12). Um polímero hidro retentor comercializado pela fabricante Forth.



Figura 12 – Hidrogel utilizado para o encapsulamento das bactérias.

Fonte: Autor

2.2 Descrição dos concretos

Foi adotado um traço de concreto com resistência característica à compressão aos 28 dias de 25 MPa. A partir desse traço, quatro novas variáveis foram incorporadas ao concreto, com o intuito de avaliar as influências das soluções de bactéria e de aditivo cristalizante nas propriedades. Sendo assim, o primeiro concreto se refere ao concreto simples, usado como referência, sem adições. O segundo concreto foi produzido com 1% de aditivo cristalizante Penetron Admix e os três últimos concretos foram confeccionados com três diferentes teores de bactérias (Tabela 5). Os materiais, assim como suas proporções, para produção de 1m³ de concreto, são apresentados na Tabela 5. As proporções de cimento:areia:brita e o fator água/cimento foram iguais em todos os concretos. O volume dos concretos CB2 e CB3 ficaram acima de 1m³, pois após a absorção da mistura bacteriana, o hidrogel aumentou de volume.

Tabela 5 - Traço para produção de 1m³ de concreto

Materiais	Quantidades em Kg/m ³				
	CS	CB1	CB2	CB3	CC
Cimento CII – F 32 (Kg)	421,31	421,31	421,31	421,31	421,31
Areia (Kg)	708,41	708,41	708,41	708,41	708,41

Brita I (Kg)	940,92	940,92	940,92	940,92	940,92
Água (Kg)	247,20	247,20	242,00	195,20	247,20
<i>Bacillus Subtilis</i> (L)	-	0,52	5,21	52,00	-
Lactato de Cálcio (Kg)	-	0,07	0,70	7,00	-
Hidrogel (Kg)	-	0,1	1,00	10,00	-
Aditivo cicatrizante (Kg)	-	-	-	-	4,21

Fonte: Autor

Na Tabela 6 estão descritas as variáveis estudadas e as respectivas nomenclaturas adotadas.

Tabela 6 - Tipos de concreto

Nomeclatura	Descrição	Quantidade de bactérias (cfu/ml)	% da massa de cimento
CS	Concreto simples (referência)	-	
CSC	Concreto simples com tratamento cristalizante pós fissuração	-	
CSB	Concreto simples com tratamento biológico pós fissuração	-	
CC	Concreto com adição de cristalizante	-	1
CB1	Concreto com aditivo biológico	10^6	
CB2	Concreto com aditivo biológico	10^7	
CB3	Concreto com aditivo biológico	10^8	

Fonte: Autor

2.2.1 Concreto Simples

Foram produzidos concretos sem adição, os quais uma quantidade dos corpos de prova foi separado para referência (CS) e outros dois foram tratados pós fissuração com material químico cristalizante (CSC) e biológico (CSB). Na Tabela 7 mostra a quantidade de amostras separadas. No item 2.4 explica sobre o método de fissuração das amostras descritas na tabela.

Tabela 7 – Quantidade de amostras fissuradas por concreto

Concreto/Amostra	Cilíndrico (un.)	Prismático (un.)	Cilíndrico Cortado (un.)
Simples (Referência) - CS	2	3	4
Simples tratado com cristalizante - CSC	3	3	4
Simples tratado com mistura biológica - CSB	3	3	3

Fonte: Autor

2.2.2 Concreto com adição química à base de cristalizantes

Foi fabricado um concreto com adição do aditivo cristalizante Penetron Admix. O teor de Penetron Admix foi o equivalente a 1% (em massa) do cimento.

2.2.3 Concreto com adição biológica *Bacillus Subtilis*

O concreto com adição biológica foi fabricado com o uso de uma solução formada pela bactéria *Bacillus Subtilis* e lactato de cálcio, a qual foi adicionada na forma encapsulada ao concreto.

Foram feitas três misturas de concreto com diferentes dosagens do *Bacillus Subtilis*: Concentração de bactérias 10^8 células/ml, 10^7 células/ml e 10^6 células/ml.

2.3 Moldagem das misturas

Para execução do concreto simples, foram adicionadas na betoneira a brita, areia, cimento. Foram moldados 48 corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm, e 12 corpos de prova prismáticos com altura e largura de 10 cm e comprimento de 42 cm.

Para a execução do concreto com adição mineral à base de cristalizantes, foram adicionados na betoneira e misturado, a brita, areia, cimento. Após a mistura foi adicionado o aditivo cristalizante e água, e misturado novamente. Foram moldados 33 corpos de prova cilíndricos e 9 corpos de prova prismáticos, ambos com as mesmas dimensões descritas acima.

Para a execução do concreto com adição biológica, inicialmente foi diluído o lactato de cálcio em uma pequena fração de água (Figura 13 a). Após esse

processo, o lactato diluído foi adicionado à bactéria *Bacillus Subtilis* (Figura 13 b)). Posteriormente, foi adicionado à mistura, o hidrogel (Figura 13 c)). Após alguns minutos houve o encapsulamento da mistura no hidrogel, como mostrado na Figura 13 d).

Para a concretagem desta mistura, inicialmente se procedeu da mesma forma do concreto simples, e, ao final adicionado a mistura bacteriana (Figura 13 e)), pois, conforme observado por Wang *et al.* (2014), há risco de as células e esporos bacterianos serem danificados durante a etapa de mistura na betoneira. Isso ocorre porque a matriz à base de cimento gradualmente se torna uma estrutura densa durante a hidratação contínua, sendo assim, após a adição da bactéria encapsulada ao concreto, foi tomado um cuidado maior para misturar somente o essencial. Foram moldados 33 corpos de prova cilíndricos e 9 corpos de prova prismáticos, com as dimensões já descritas anteriormente.

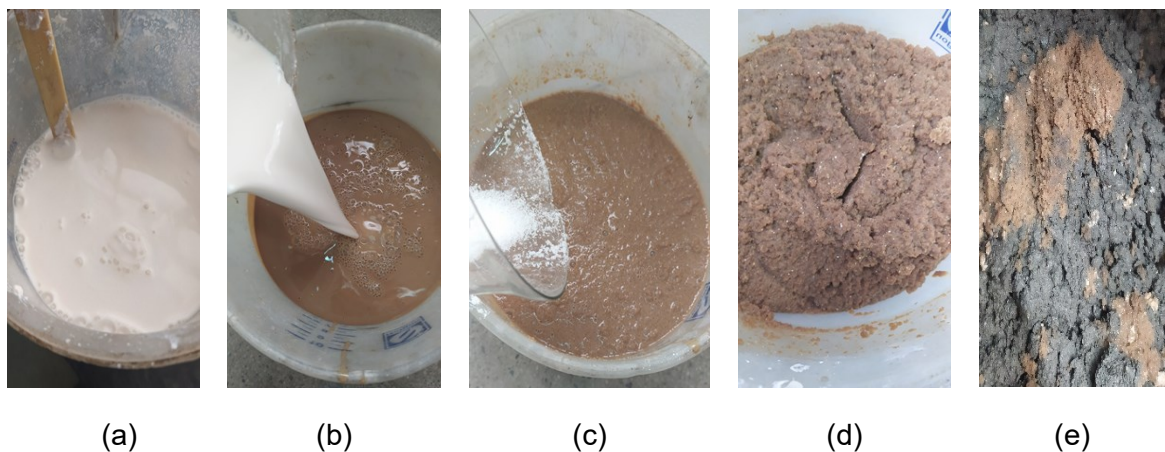


Figura 13 – a) diluição do lactato de cálcio; b) adição à bactéria; c) adição do hidrogel; d) encapsulamento; e) adição ao concreto

Fonte: Autor

Após 24 horas da moldagem dos corpos de prova, os mesmos foram retirados dos moldes e colocados na água, para cura, até a data dos ensaios ou fissuração.

Foi observado, no momento da desforma, que o concreto com a maior concentração de bactérias encapsuladas (CB3), uma demora no seu endurecimento, sendo necessário um atraso de um dia na desforma, em comparação com os demais concretos. Conforme relatado por Luo; Qian (2016), o lactato de cálcio pode atrasar a hidratação do cimento, resultando em um aumento do tempo de pega.

2.4 Descrição dos ensaios, fissuração e tratamento

2.4.1 Consistência

O ensaio de consistência, também conhecido como “*slump test*” avalia a trabalhabilidade e/ou fluidez no concreto no estado fresco a partir do assentamento do mesmo. Com base na NBR 16889 (2020) foram realizados os procedimentos para a determinação do abatimento, de forma que o tronco de cone foi preenchido com três camadas de aproximadamente um terço da altura e compactadas com 25 golpes utilizando a haste metálica de socamento. De imediato, a superfície foi rasada e a base limpa para a retirada do molde.

2.4.2 Índice de vazios, absorção de água e massa específica

Foram realizados ensaios de índice de vazios, absorção de água e massa específica, aos 28 dias de idade, seguindo-se a norma NBR 9778 (2009). Foram utilizadas três amostras por mistura com as dimensões de 10 x 20 cm (diâmetro x altura).

Alguns corpos de provas cilíndricos, aos 28 dias de idade, foram cortados, conforme mencionado no item 2.4.4. Uma parte foi fissurada e outra não, e as duas partes receberam o mesmo tratamento. Aos 88 dias (60 dias de tratamento), foram verificados os índices de vazios, a absorção de água e a massa específica das amostras fissuradas e não fissuradas.

2.4.3 Resistência à compressão, à flexão e Módulo de Elasticidade

A adição dos produtos de autocicatrização pode alterar as propriedades do concreto. Sendo assim, foram verificados a resistência à compressão e à flexão dos 5 tipos de concretos. Foram realizados ensaios de compressão axial aos 7, 28, 88, 133 e 175 dias. O módulo de elasticidade do material foi realizado aos 35 dias e, tração na flexão aos 28 dias e aos 88 dias. Para todos os ensaios realizados foram utilizados 3 corpos de prova para cada variável. Os resultados que serão apresentados refletem a média das amostras ensaiadas com seus respectivos desvios padrão.

O ensaio de resistência à compressão axial do concreto foi realizado seguindo os procedimentos descrito na NBR 5739 (2018). O ensaio realizado apenas para averiguação da resistência do concreto, e realizado por controle de carga em um equipamento com a capacidade de 100 T (Figura 14 a). Para a determinação do módulo de elasticidade do material, o ensaio de compressão foi realizado através de controle de carga, de acordo com a NBR 8522 (2017), em uma máquina com capacidade de 2000 kN. Foram utilizados dois transdutores de deslocamento, onde a variação de deslocamento foi obtida através da média dos dois transdutores (Figura 14 b). Também foi realizado ensaio de flexão em quatro pontos até à ruptura, segundo a NBR 12142 (2010). Os ensaios foram conduzidos em uma máquina INSTRON, servo controlada, com capacidade de 100 kN (Figura 14 c).



(a)



(b)



(c)

Figura 14 – a) Ensaio à compressão axial; b) Ensaio à compressão axial instrumentado; c) Ensaio de tração na flexão

Fonte: Autor

2.4.4 Fissuração dos corpos de prova

A fissuração do concreto foi realizada através dos equipamentos para ensaios de compressão, flexão e compressão diametral, os mesmos descritos anteriormente. Após 28 dias da cura, os corpos de prova foram fissurados através dos 3 métodos:

Método 1 – Os corpos de prova cilíndricos foram fissurados por compressão axial, levados até a carga de ruptura.



Figura 15 – Fissuração dos corpos de prova

Fonte: Autor

Método 2 - Foram realizados cortes em disco em alguns corpos de prova, com o objetivo de fracionar em pequenas amostras cilíndricas (Figura 16a).

Através do ensaio de compressão diametral, os cilindros foram fissurados. Pela natureza frágil do concreto e baixa resistência à tração, houve dificuldade no controle da fissuração, uma vez que os cilindros chegavam ao rompimento e separação das partes. Após alguns testes, foi utilizada fita adesiva larga na lateral dos discos, antes da aplicação da carga, para conter o corpo de prova, mantendo íntegro. A Figura 16b apresenta a amostra cilíndrica antes da fissuração, no perímetro do corpo de prova (ou seja, ao longo da circunferência) foi colado fita adesiva transparente. Na Figura 16c é mostrado a amostra fissurada.



(a)



(b)



(c)

Figura 16 – a) corte em disco; b) amostra sem fissuração; c) amostra fissurada;

Fonte: Autor

Método 3 - Os corpos de prova prismáticos foram fissurados pelo ensaio de tração na flexão. Antes da aplicação da carga, o corpo de prova, também foi “envelopado” com fita adesiva larga para auxiliar no controle da fissuração (Figura 17).

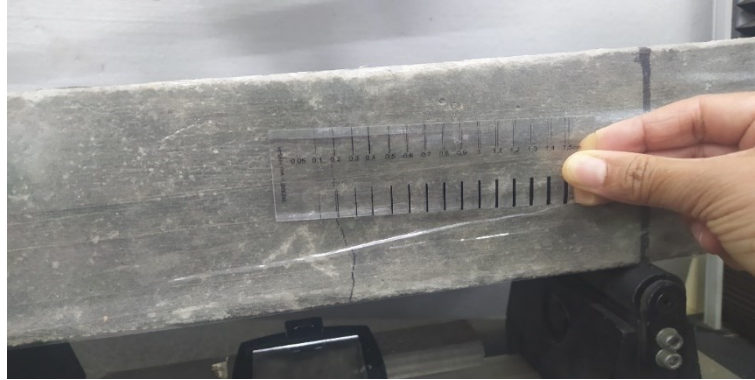


Figura 17 – corpo de prova prismático fissurado

Fonte: Autor

2.4.5 Tratamento após a fissuração dos corpos de prova e acompanhamento das fissuras

Concreto com a adição na mistura e concreto simples (referência)

Após a fissuração, os corpos de prova (CP) passaram pelo tratamento por 60 dias. O processo foi feito em ciclos. Um ciclo é formado pela saturação dos corpos de prova em água por 7 dias e 1 dia exposto ao ambiente. Repetindo o ciclo até completar os 60 dias. Os corpos de prova submetidos a esse processo foram das misturas: CS, CC, CB1, CB2, CB3.

Concreto simples tratado pós fissuração

Em relação aos corpos de prova dos seguintes concretos: CSB e CSC, o processo foi diferente. Após a fissuração, receberam a aplicação do cristalizante (CSC) e, da solução de bactéria com lactato de cálcio (CSB).

A Tabela 8 apresenta a composição da mistura aplicada no CSC. A solução foi aplicada de 7 em 7 dias, da seguinte forma: primeiro dia, aplicação da mistura cristalizante, 6 dias aplicação de água borrifada diariamente, repetindo o ciclo.

Tabela 8 – Composição da mistura química

Descrição	Quantidade (kg)
Aditivo cristalizante	0,030
Água	0,060

Fonte: Autor

A Figura 18 mostra os materiais utilizados para a confecção da solução com o aditivo cristalizante, CSC.

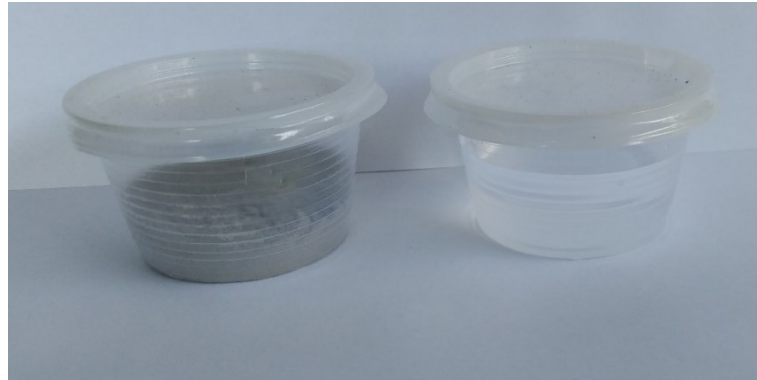
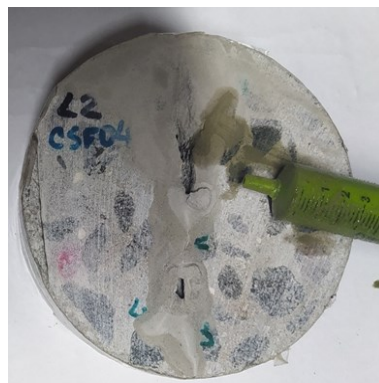


Figura 18 – Cristalizante e água

Fonte: Autor

Após a mistura do produto cristalizante com a água, este foi aplicado no corpo de prova através de uma seringa, um preenchimento por gravidade. Foi utilizado a seringa com o objetivo de preencher melhor as fissuras. Na Figura 19 é possível visualizar esse processo.



(a)



(b)

Figura 19 – a) Aplicação da mistura com a seringa; b) amostra com aplicação da mistura.

Fonte: Autor

A Tabela 9, mostra a proporção da mistura aplicada no CSB. Foi aplicada da seguinte forma: 1º dia - aplicação da mistura biológica, 3 dias de aplicação de água. Repetindo novamente o ciclo.

Tabela 9 – Composição da mistura biológica

	Quantidade (kg)
<i>Bacillus Subtilis</i>	0,102
Lactato de Cálcio	0,013
Água	0,085

Fonte: Autor

A Figura 20 mostra os materiais utilizados para a fabricação e aplicação da solução de bactérias na amostra CSB



Figura 20 – Lactato de cálcio, *Bacillus Subtilis* e água

Fonte: Autor

2.4.6 Verificação das fissuras

A análise do processo de cicatrização foi feita através de observações visuais e medição da abertura das fissuras. Ao final do processo de cicatrização foram realizados ensaios para determinação das propriedades residuais e a pesagem dos corpos de prova. Foram realizados ensaios físicos de massa específica, porosidade e absorção de água e mecânicos de compressão axial e flexão.

3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1 Propriedades no estado fresco

3.1.1 Consistência

Na Tabela 10, é apresentado o abatimento de cada mistura confeccionada. É possível observar que a adição mineral e biológica não alterou a consistência comparado ao traço de referência, onde todos os concretos confeccionados ficaram entre 20-22 mm de abatimento.

Tabela 10 - Abatimento do concreto

Referência	Concreto	Abatimento (mm)
CS	Simplex	21
CC	Cristalizante	22
CB1	Biológico 01	21
CB2	Biológico 02	21
CB3	Biológico 03	20

Fonte: Autor

3.2 Propriedades no estado endurecido

3.2.1 Índice de vazios, absorção de água e massa específica

A Tabela 11 apresenta os resultados para cada concreto aos 28 dias.

Tabela 11 – Propriedades físicas aos 28 dias

	CS	CC	CB1	CB2	CB3
Absorção (%)	8,28 ±0,09	6,56 ±0,11	7,15 ±0,17	8,22 ±0,13	9,10 ±0,41
Índice de Vazios (%)	18,12 ±0,11	14,53 ±0,20	15,55 ±0,34	16,91 ±0,26	18,74 ±0,71
Massa específica da amostra seca (g/cm³)	2,19 ±0,01	2,21 ±0,01	2,17 ±0,01	2,06 ±0,00	2,06 ±0,02
Massa específica da amostra saturada (g/cm³)	2,37 ±0,01	2,36 ±0,01	2,33 ±0,00	2,23 ±0,00	2,25 ±0,01

Fonte: Autor

Em relação ao concreto de referência (CS), que teve absorção de água de 8,28%, a média da absorção de água do concreto CC e CB1 foi o menor de todos os concretos estudados, cerca de 21% e 14% a menos, respectivamente; enquanto o concreto CB3 teve 10% a mais de absorção. O concreto CB2 teve praticamente o mesmo resultado que o concreto de referência. Isso ocorreu porque o concreto CC e CB1 é menos poroso que o concreto de referência (CS) e o concreto CB3 é mais poroso que o concreto CS.

Ao compararmos os resultados do índices de vazios com o concreto referência (18,12%), os índices de vazios de CC, CB1 e CB2 foram reduzidos de 20%, 14% e 7%, respectivamente. O concreto CB3 obteve um resultado próximo, somente 3% maior. A adição de cristalizante e bactérias no concreto reduziu os poros dos concretos CC, CB1 e CB2. Araújo (2020) comparou o índices de vazios de concretos com adição de cristalizante com o concreto sem adição e obteve valores de 8 a 15% de índice de vazios a menos do que o concreto sem adição.

A massa específica seca e saturada do concreto de referência (2,19 e 2,37 g/cm³, respectivamente) foram próximas as amostras CC e CB1, variando entre 1-2% para essas propriedades. O concreto CB2 e CB3 obteve valores entre 5-6 % menores tanto para massa específica seca quanto para saturada comparado ao CS. Vale ressaltar que as duas amostras, CB2 e CB3, receberam um número maior de bactéria encapsulada. No momento do encapsulamento, o hidrogel tem a função de absorver o líquido e expandir, podendo ocasionar maior quantidade de vazios do que o concreto referência. Isso pode explicar a proporção de a massa específica do concreto CB3 ser menor entre todos os concretos e o CB2 ser menor que o concreto referência.

Na Tabela 12 é apresentado os resultados do cálculo da absorção, índice de vazios, massa específica seca e saturada, aos 88 dias, das amostras não fissuradas e fissuradas.

Não restou amostra fissurada do concreto CS para o ensaios, pois no processo as partes se separaram. O concreto CB2 restou somente duas amostras.

Tabela 12 - Propriedades físicas das amostras não fissurados e fissurados aos 88 dias.

	CS	CC	CB1	CB2	CB3
Absorção (%) – não fissurado	8,06 ±0,72	8,03 ±0,46	9,49 ±0,97	7,93 ±0,86	8,78 ±1,00
Absorção (%) - fissurado		8,29 ±1,41	7,80 ±2,54	9,08 ±0,27	10,54 ±2,23
Índice de Vazios (%) - não fissurado	18,13 ±0,92	17,83 ±0,79	19,81 ±1,19	17,05 ±1,41	18,28 ±1,45
Índice de Vazios (%) - fissurado		18,33 ±2,58	16,88 ±4,85	18,82 ±0,44	21,29 ±3,50
Massa específica da amostra seca - não fissurado	2,33 ±0,59	2,22 ±0,03	2,10 ±0,08	2,16 ±0,06	2,09 ±0,08
Massa específica da amostra seca - fissurado		2,22 ±0,07	2,21 ±0,13	2,07 ±0,01	2,04 ±0,09
Massa específica da amostra saturada – não fissurado	2,52 ±0,62	2,40 ±0,02	2,29 ±0,07	2,33 ±0,04	2,27 ±0,07
Massa específica da amostra saturada - fissurado		2,41 ±0,04	2,38 ±0,08	2,26 ±0,01	2,25 ±0,06

Fonte: Autor

Analisando as amostras contendo agentes cicatrizantes na mistura, o concreto com cristalizante (CC) fissurado teve 3% de aumento na absorção e no índice de vazios comparado a sua amostra não fissurada. O concreto biológico contendo solução de bactéria de 10^6 (CB1) fissurado teve redução de 18% na absorção e redução de 15% no índice de vazios em comparação a amostra CB1 não fissurado. O concreto biológico contendo solução de bactéria de 10^7 (CB2) fissurado teve um aumento de 14% na absorção e aumento de 10% no índice de vazios em comparação com a amostra CB2 não fissurado. A amostra do concreto biológico 10^8 (CB3) fissurado teve um aumento de 20% na absorção e aumento de 16% no índice de vazios em comparação com o CB3 não fissurado. O aumento na absorção e no índice de vazios das amostras, se deve a abertura das fissuras, pois poucas fissuras foram seladas, como observado visualmente. O tamanho e quantidade de fissuras podem ter influenciado neste resultado, pois foi obtido valores mais altos que os

demaís para o desvio padrão do concreto CB1 e CB3 fissurados, indicando uma variação considerável entre os resultados das amostras pesquisadas.

3.2.2 Resistência à compressão e módulo de elasticidade

A adição dos produtos de autocicatrização pode alterar as propriedades do concreto, como já relatado pela literatura (vide Capítulo 1). Sendo assim, foram verificados a resistência à compressão e à flexão dos 5 tipos de concretos estudados neste trabalho. Foram realizados ensaios de compressão axial aos 28, 35, 88, 133, 175 e aos 35 dias, sendo este último apenas para averiguar o módulo de elasticidade do material. E, tração na flexão aos 28 e 88 dias. Para todos os ensaios realizados foram utilizados 3 corpos de prova para cada variável. Os resultados que serão apresentados refletem a média das amostras ensaiadas com seus respectivos desvios padrão.

Na Tabela 13 é apresentada a resistência a compressão e o módulo de elasticidade obtidas nos ensaios realizados e descritos anteriormente, assim como os respectivos desvios padrão.

Tabela 13 – Resistência à compressão e módulo de elasticidade.

	CS	CC	CB1	CB2	CB3
Resistência à compressão aos 7 dias (MPa)	19,75 ±0,88	19,36 ±0,59	18,24 ±0,86	15,02 ±0,15	15,24 ±0,86
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	25,52 ±0,97	23,09 ±0,54	24,13 ±1,79	19,14 ±0,60	20,51 ±0,19
Resistência à compressão aos 35 dias (MPa)	26,87 ±2,98	25,55 ±1,12	24,30 ±1,25	19,50 ±0,55	21,06 ±1,11
Módulo de Elasticidade aos 35 dias (GPa)	30,61 ±2,73	25,68 ±1,61	24,04 ±1,61	18,34 ±2,72	20,22 ±0,90
Deformação Máxima aos 35 dias (mm/mm)	0,31 % ± 0,03 %	0,30 % ± 0,04 %	0,26 % ±0,03 %	0,26 % ± 0,04 %	0,33 % ± 0,05 %
Resistência à compressão aos 88 dias (MPa)	30,19 ±2,58	26,59 ±0,74	27,21 ±1,34	19,90 ±1,63	20,63 ±0,03

Resistência à compressão aos 133 dias (MPa)	29,89 ±2,19	27,28 ±0,48	27,13 ±1,58	20,18 ±0,66	22,67 ±0,15
Resistência à compressão aos 175 dias (MPa)	29,41 ±1,11	28,72 ±0,72	28,10 ±0,84	21,28 ±0,41	21,44 ±0,79

Fonte: Autor

Aos 7 dias, as amostras do concreto de referência, do concreto CC e do concreto CB1 obtiveram valores de resistência à compressão bem próximos: 19,75, 19,36 e 18,24 MPa. Já os concretos biológicos, CB2 e CB3, obtiveram resultados inferiores ao concreto de referência, alcançando 76% e 77% da resistência do CS, respectivamente. O encapsulamento da bactéria pode ter sido responsável pela menor resistência dos concretos CB2 e CB3 com redução de cerca de 23%, comparado ao concreto sem adição. Conforme pesquisado por Tang; Xu (2020), o uso de microcápsulas podem resultar em uma perda de resistência do concreto até certo ponto, a resistência à compressão pode diminuir entre 15 e 34 % com a adição de 1 a 5% de microcápsulas.

Aos 28 dias, o concreto referência obteve a resistência de 25,52 Mpa. CB1 teve a maior resistência à compressão comparado as quatro adições: CB1, CC, CB3 e CB2, 95%, 90%, 80% e 75% em relação ao concreto CS.

Aos 35 dias, a relação das resistências obtidas foram: o concreto CS, 26,87 MPa, o concreto CC teve 95% em relação ao concreto CS, CB1 obteve 90% da resistência, CB3 78% e CB2 73% da resistência em comparação com o concreto referência CS.

Aos 88 dias, o concreto referência teve 30,19 Mpa, os concretos CC e CB1 atingiram 88 e 90% da resistência do concreto CS, o CB3 e CB2, 68 e 63% da resistência.

Aos 133 dias, as amostras do concreto referência atingiram 29,89 MPa as amostras: CC e CB1 tiveram 91% da resistência comparado com o CS, o CB3 e o CB2, 76% e 68% da resistência do CS.

Aos 175 dias, as amostras CC obteve um resultado próximo ao concreto referência (CC 28,72 e CS 29,41 MPa). O concreto CB1 teve 96% da resistência do concreto referência e os concretos CB3 e CB2, 73 e 72% da resistência.

Foi realizado a análise de variância (ANOVA) para verificar se houve variância entre as resistências à compressão das amostras. Através da análise foi constatado

que no mínimo uma das médias é diferente das demais. Para identificar qual amostra se difere uma da outra foi realizado o teste de Tukey.

Ao comparar os resultados dos ensaios através da análise estatística, aos 7 dias, os concretos referência (CS), com adição de cristalizante (CC) e o biológico CB1 foram considerados estaticamente iguais, não existindo variância significativa entre as resistências à compressão destes concretos. Os três concretos (CS, CC e CB1) foram considerados estaticamente diferentes dos concretos CB2 e CB3, havendo assim, variância significativa. E, os concretos biológicos CB2 e CB3 são estaticamente iguais. Isso se repetiu nas idades de 88 dias, 113 dias e 175 dias.

Aos 28 dias, os concretos CS, CC e CB1 também foram considerados estaticamente iguais, não havendo variância significativa entre as resistências à compressão dos concretos. Os concretos CC, CB2 e CB3 foram considerados estaticamente iguais, ao compararmos diferença da média dos resultados dos concretos, foi acima da diferença mínima significativa (D.M.S.), sendo assim, os três concretos CC, CB2 e CB3 não tiveram diferença considerável nas resistências à compressão. Porém, os concretos CS e CB1 foram considerados estaticamente diferentes dos concretos CB2 e CB3, aos 28 dias.

Na Figura 21 é mostrado a relação da resistência à compressão ao longo do tempo das amostras.

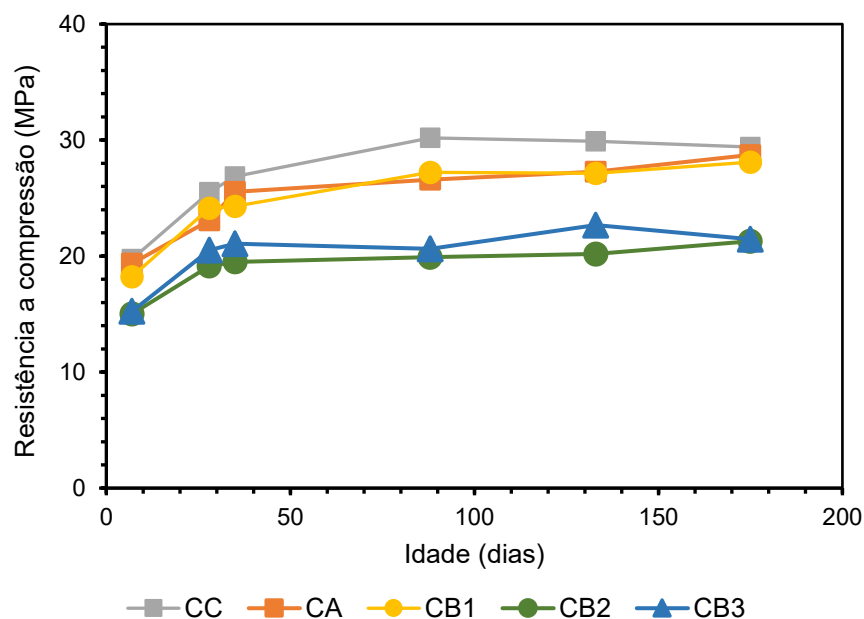


Figura 21 – Resistência à compressão ao longo do tempo

Fonte: Autor

A Figura 22 mostra o hidrogel saindo da amostra logo após a retirada do corpo de prova da água. O hidrogel da superfície, em contato com a água, absorve a água, expande e se torna mais visível. Sendo assim, é questionável se o conteúdo do hidrogel (bactéria e lactato de cálcio) é absorvido pelo concreto logo em seguida, após a secagem do concreto ou se devido a mistura ser mais densa que a água, a água passa a penetrar no hidrogel “expulsando” a mistura, pois o hidrogel absorve mais fácil e mais rápido a água do que a mistura. Tang; Xu (2021) informaram que o uso do hidrogel tem como benefício secundário o fornecimento contínuo de água para a atividade bacteriana, como se fosse um reservatório de água. Araújo (2020) em sua pesquisa verificou que o hidrogel após liberar a água, pode deixar vazios na matriz cimentícia, gerando assim, a redução das propriedades mecânicas e a capacidade de carga estrutural.

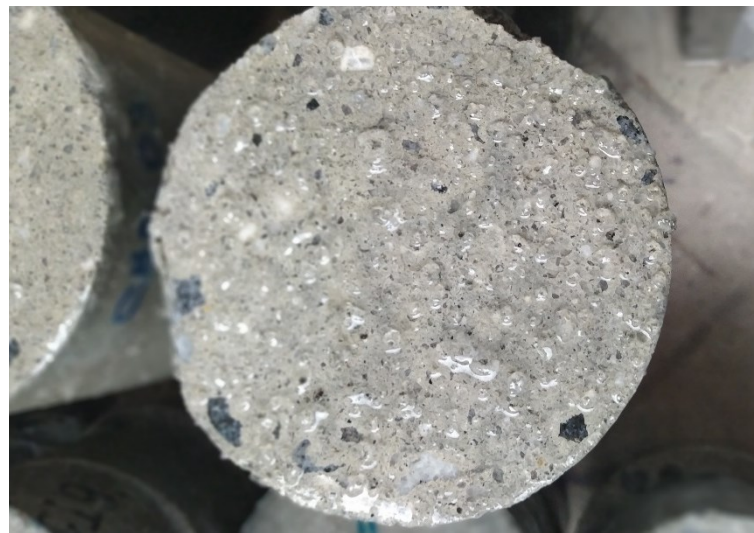


Figura 22 – Hidrogel na superfície da amostra

Fonte: Autor

A adição do aditivo cristalizante no concreto não proporcionou aumento na resistência comparado ao concreto simples. Conforme observado por Oliveira *et al.* (2021), a inclusão de 0,8% a 1,2% não altera a resistência à compressão aos 28 dias.

O módulo de elasticidade é a capacidade do concreto de se deformar dentro da região elástica do gráfico tensão vs deformação. As fissuras da zona da transição na interface permanecem estáveis no concreto até a carga de 30% da carga última

(METHA; MONTEIRO, 2014). Geralmente, a elasticidade do material de concreto depende do tipo e distribuição de tamanho do agregado, duração e tipo de cura.

Todos os concretos com adição tiveram menor rigidez em comparação ao concreto de referência, demonstrado através dos menores valores de módulo de elasticidade, como observado na Tabela 13. A amostra CS obteve o maior módulo de elasticidade, de 30,61 GPa, seguido do concreto CC, o CB1, o CB2 e o CB3, com módulo de 25,68, 24,04, 18,34 e 20,22 GPa, respectivamente. O concreto CC, com base o concreto referência, reduziu 16% do módulo. O CB1 reduziu 21%, CB2 reduziu 40% e CB3 reduziu 34% em relação ao módulo do concreto CS.

De acordo com Nodehi *et al.* (2021), o concreto bacteriano afeta significativamente o módulo de elasticidade, aumentando o valor. Os resultados obtidos foram diferentes da análise feita por Nodehi *et al.* (2021). O uso do hidrogel para encapsulamento pode ter afetado o módulo de elasticidade.

3.2.3 Resistência à flexão

Na Tabela 14 é possível verificar a média dos resultados dos ensaios de tração na flexão. Aos 28 dias as amostras CS e CC tiveram um resultado bem próximo. Já os CB1, CB2 e CB3 tiveram resistência à tração menores do que os demais concretos, com redução de 5%, 23% e 18% respectivamente, comparados ao concreto de referência, como esperado, uma vez que tais variáveis também apresentaram redução na resistência à compressão na mesma ordem de grandeza. Aos 88 dias essa tendência também se manteve, o resultado das amostras CS e CC tiveram resultados próximos. Os concretos CB1 teve uma redução na resistência de 3%, CB2 – 12% e o CB3 – 23% em relação ao CS.

Tabela 14 – Ensaio de tração na flexão.

	CS	CC	CB1	CB2	CB3
Resistência a flexão aos 28 dias (MPa)	3,78 ± 0,12	3,73 ± 0,19	3,57 ± 0,18	2,89 ± 0,09	3,10 ± 0,15
Resistência a flexão aos 88 dias (MPa)	4,10 ± 0,26	4,17 ± 0,16	3,96 ± 0,14	3,61 ± 0,22	3,15 ± 0,18

Fonte: Autor

Ao compararmos os resultados médios do CS aos 88 dias e aos 28 dias houve um aumento médio de 9% da resistência a flexão entre as datas. Do concreto com adição de cristalizante (CC) aos 88 dias e aos 28 dias houve um aumento médio de 12% da resistência a flexão entre as datas. Os concretos biológicos CB1 houve um aumento médio de 11% da resistência a flexão entre as datas. O CB2 houve um aumento médio de 24% da resistência a flexão entre as datas. E o CB3, a resistência aumentou somente 2% da resistência a flexão entre as datas.

3.2.4 Resistência à compressão residual

Aos 28 dias de moldagem dos corpos de prova, 3 amostras cilíndricas de cada concreto foram fissuradas (exceto para a variável CS, com somente 2 amostras). No momento da fissuração, o equipamento foi levado até a tensão de ruptura do concreto. Durante 60 dias, após a fissuração, os corpos de prova receberam tratamento conforme descrito anteriormente. Após os 60 dias (88 dias de concretagem) de fissuração, os corpos de prova foram ensaiados com o objetivo de verificar a resistência residual.

Na Figura 23 apresenta o resultado do ensaio a compressão dos corpos de prova fissurados e não fissurados com a mesma idade e o percentual comparativo.

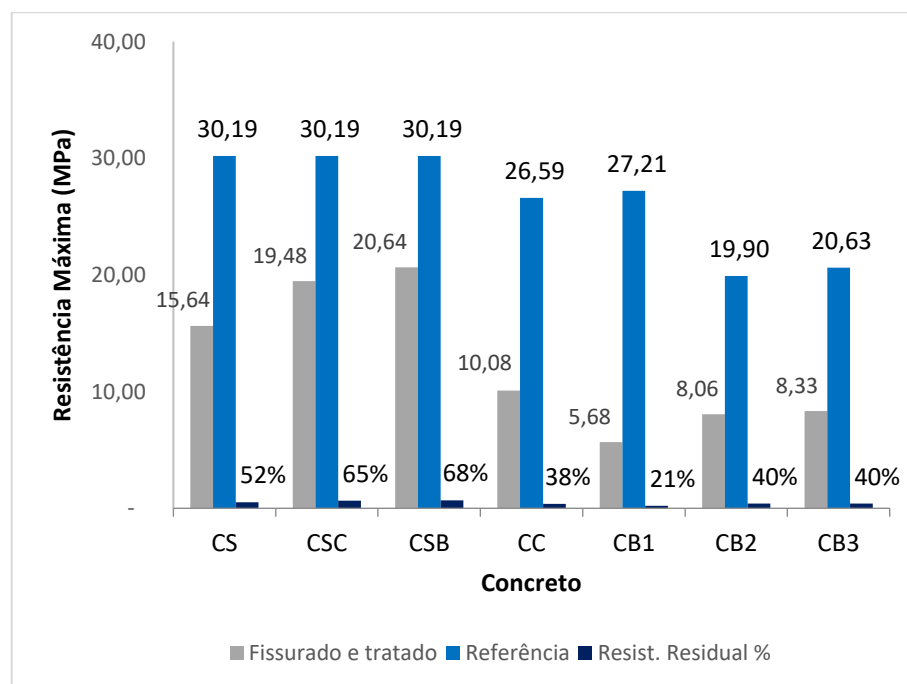


Figura 23 - Resistência máxima a compressão aos 88 dias dos CPs fissurados e tratados

Fonte: Autor

Ao compararmos os resultados das amostras dos concreto fissurados e tratados com o do concreto sem fissuração, o concreto simples (CS) obteve resistência residual de 52% da resistência a compressão aos 88 dias. O resultado dos concretos CSC e CSB foram comparados com o resultado do concreto simples, por ser um concreto simples tratado com a mistura cristalizante e biológica depois da fissuração. O concreto CSC teve 65% da resistência a compressão, o CSB teve 68%. O concreto CC fissurado e tratado obteve 38% da resistência do concreto CC aos 88 dias, o CB1 obteve 21% da resistência aos 88 dias do concreto CB1, o CB2 e o CB3 obteve 40% da resistência a compressão aos 88 dias do concreto. É importante observar o resultado dos concretos CSC e CSB em comparação com o CS. Pois as amostras que receberam tratamento com os produtos cristalizante e biológico pós fissuração tiveram o resultado 13% e 17% maior do que os que não receberam tratamento com adições (CS).

3.2.5 Resistência à Tração na Flexão Residual

Durante os 60 dias de tratamento os corpos de prova foram mantidos com a fita adesiva utilizada para controlar a fissuração no momento do rompimento, durante os 60 dias os corpos de prova foram envolvidos com mais fita adesiva com objetivo de reforçá-los e minimizar os impactos da manipulação nos corpos de prova.

Aos 60 foram ensaiados os corpos de prova fissurados. Ao retirarmos a fita alguns corpos de prova se separaram, o concreto CS não restou amostra para ensaiar, o concreto CSB restou 1 amostra, o CC e o CB2, 2 amostras e os demais mantiveram intactos as 3 amostras.

Na Figura 24 é possível visualizar a média da resistência residual das amostras para cada concreto e corpos de prova não fissurados com a mesma idade, 88 dias após a concretagem.

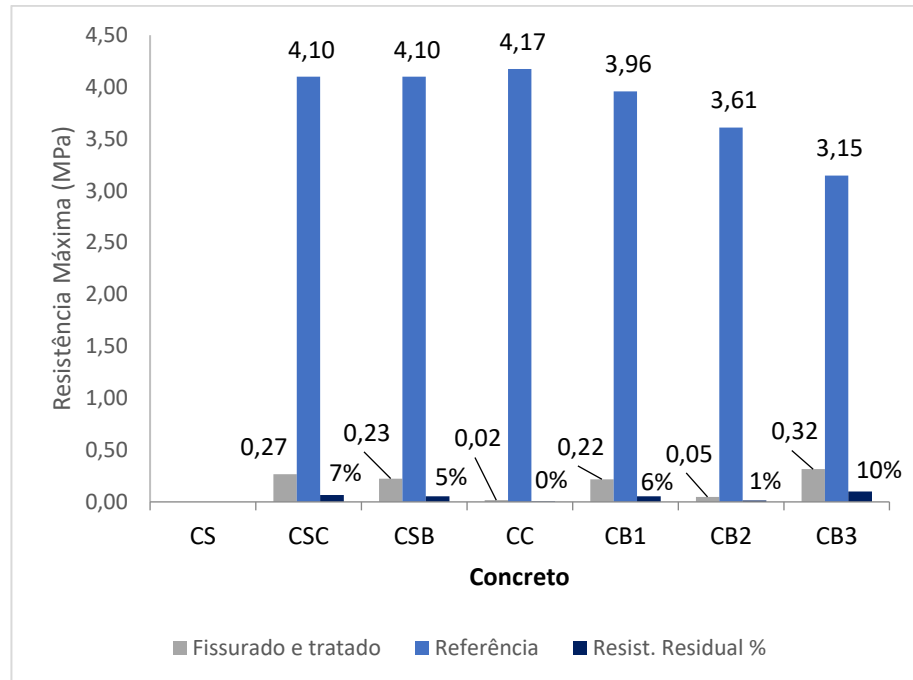


Figura 24 – Resistência máxima a tração aos 88 dias dos dos CPs recuperados.

Fonte: Autor

Foi comparado os resultados dos fissurados e tratados com os não fissurados. As amostras CSC e CSB, por ser um concreto simples tratado com a mistura cristalizante e biológica, respectivamente, depois da fissuração foi comparado com o resultado do concreto simples. O concreto CSC teve 7% da resistência em comparação ao não fissurado com a mesma idade, o CSB teve 5%, o CC não teve resistência residual, CB1 teve 6%, CB2 teve 1%, CB3 teve 10%.

3.3 Análise Visual

Conforme mencionado anteriormente, foram preparadas várias amostras cilíndricas e fissuradas pelo método de compressão diametral após 28 dias da dosagem do concreto. As amostras de concreto simples CS receberam os tratamentos descritos na Figura 8. A nomenclatura adotada para cada amostra, onde no primeiro item é o tipo de concreto/tratamento: CS, CSC, CSB, CB1, CB2 e CB3; o segundo item é o número da amostra: 1, 2, 3 e 4; o terceiro item é o lado da amostra: L1 e L2. Por exemplo: CS – 1 – L1.

Todas as amostras foram fotografadas durante os 60 dias para acompanhamento da autocicatrização. Entre todas as fotos, foram separadas as fotos de 30 dias e 60 dias. Para o dimensionamento da fissura foi colocada uma régua no momento da fotografia e a fissura foi medida através do programa *ImageJ* (utilizada as medidas da régua como referência).

Tendo em vista a grande quantidade de fotos as imagens foram dispostas em Apêndices e também tabelas com todos os dados detalhados.

3.3.1 Concreto Simples (CS)

A abertura da menor fissura medida foi 0,15 mm e a maior 6,60 mm.

Na Figura 25 é possível visualizar as fissuras das amostras CS. A imagem foi tirada 48 dias após a fissuração. Nas fotos é possível visualizar uma pequena formação de brancos nas fissuras, sendo estes indícios de produtos de cicatrização. Na foto 25h mostra o início da formação de uma “ponte” de brancos. Conforme mencionado no item 1.2.1., os produtos de cicatrização (C-S-H e/ou carbonato de cálcio) foram formados pela hidratação de partículas não hidratadas de cimento, resíduos da não hidratação no momento da concretagem (HELENE, 2018).

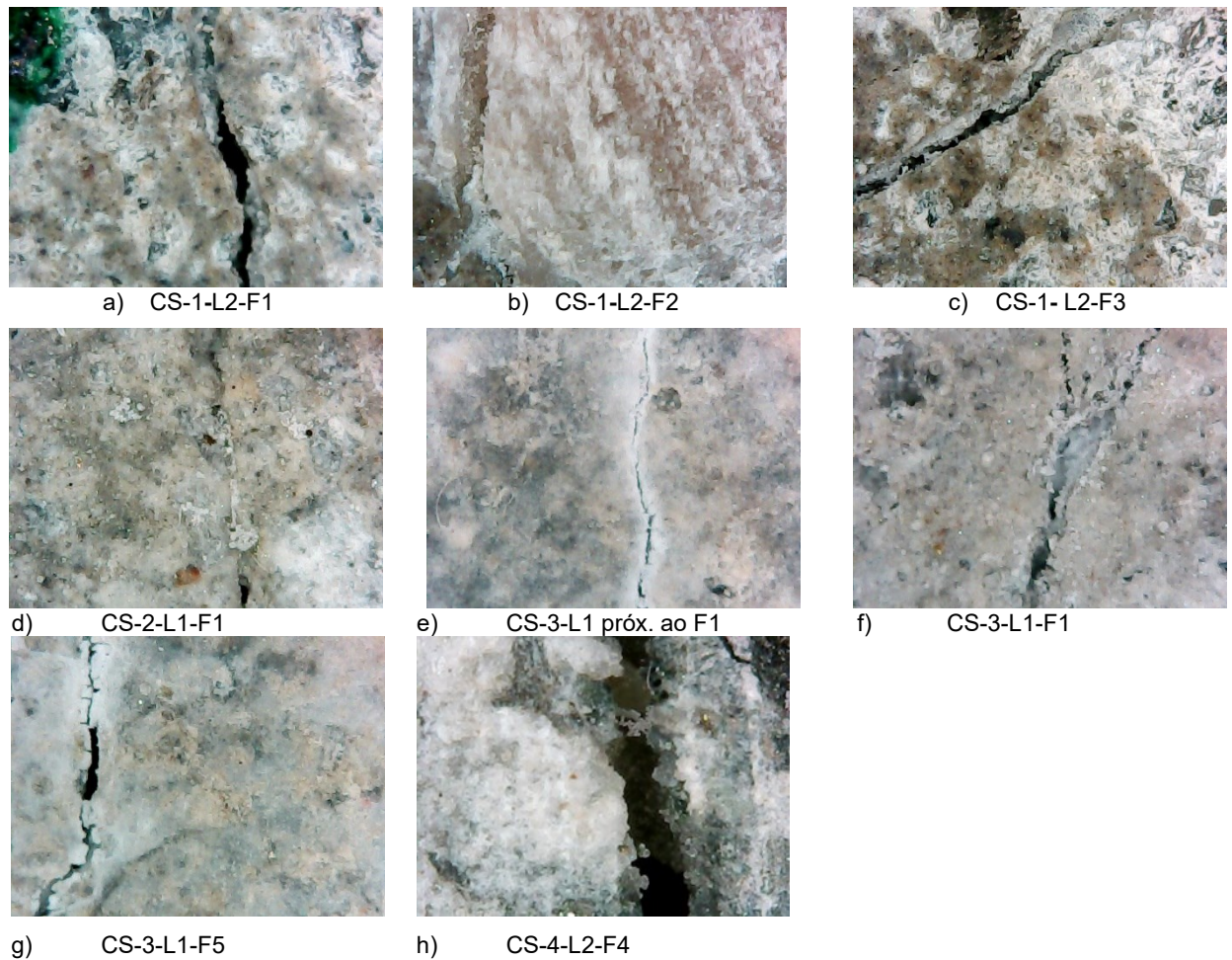


Figura 25 – Detalhamento das fissuras da amostra CS aos 48 dias após a fissuração

Fonte: Autor

Aparentemente, aos 60 dias não houve cicatrização total de fissuras no lado CS – 1 – L1. No lado CS – 1 – L2, aos 60 dias, mostra uma cicatrização total ou próximo ao total na F3 (tamanho da fissura antes do tratamento: 0,31 mm).

Na CS – 2 – prox. F1 no trecho com aproximadamente 0,25 mm houve a autocicatrização.

Houve uma selagem completa na fissura no lado da amostra CS – 2 próx. ao F3, com 0,20 mm, após 60 dias de tratamento.

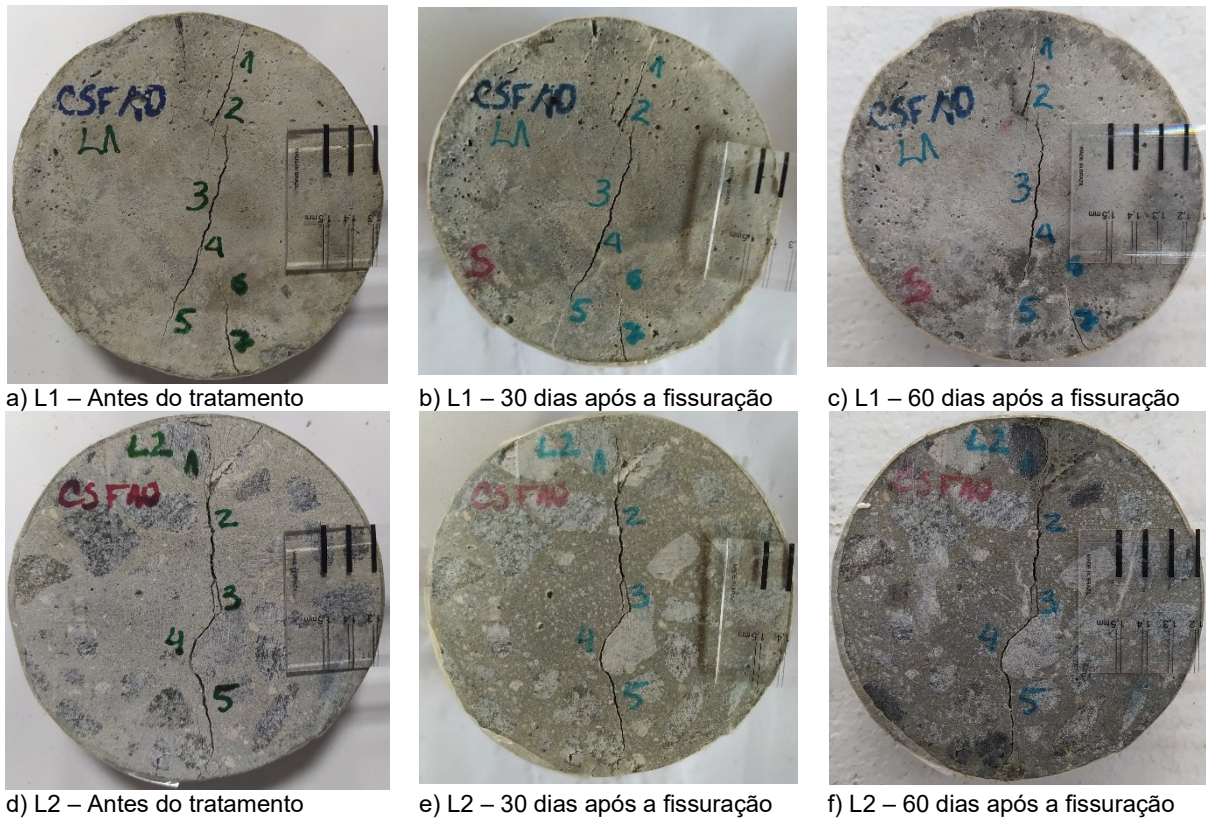


Figura 26 – Amostra CS-3

Fonte: Autor

Na Figura 26, é possível visualizar amostra CS-3. As fotos 26a) e 26d) são os lados 1 e 2 antes do tratamento, As fotos 26b) e 26e) 30 dias após fissuração e tratamento e as fotos 26c) e 26f) 60 dias após fissuração e tratamento. No lado da amostra CS – 3 – L1 houve a cicatrização completa próximo ao F1 com o tamanho de 0,23 mm, próximo ao F5 com 0,21 mm e próximo ao F6 com 0,15. No lado da amostra CS – 3 – L2 houve a cicatrização completa próximo ao F1 com o tamanho de 0,12 mm e próximo ao F2 com 0,26 mm.

3.3.2 Concreto Simples com adição de cristalizante pós fissuração (CSC)

A abertura da menor fissura medida foi 0,18 mm e da maior 8,13 mm.

Na Figura 27 é possível visualizar a amostra CSC-1. No concreto CSC houve uma selagem completa após 3 aplicações do produto cristalizante, ou seja, após 21 dias. Esse prazo poderia ter sido reduzido caso o espaço entre as aplicações também fosse reduzido.

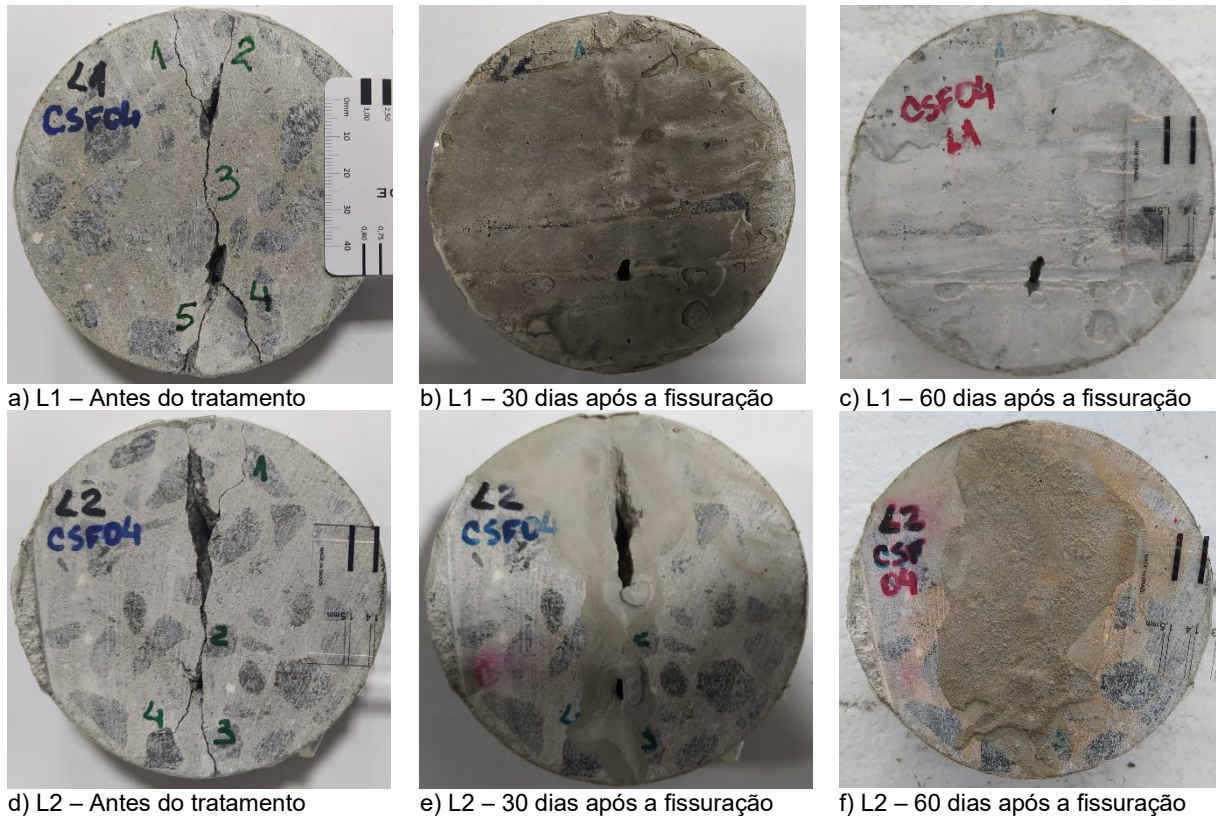


Figura 27 - Amostra CSC-1

Fonte: Autor

3.3.3 Concreto Simples com adição de mistura biológica pós fissuração (CSB)

A abertura da menor fissura medida foi 0,14 mm e da maior 4,18 mm.

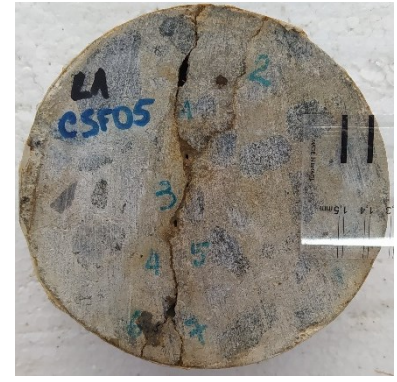
Na Figura 28 é possível visualizar a amostra CSB-2, a aplicação da mistura forma uma camada sobre o corpo de prova conforme a imagem 28e), antes de fotografar a imagem 28f) foi realizado uma lavagem superficial com o objetivo de limpar o corpo de prova.



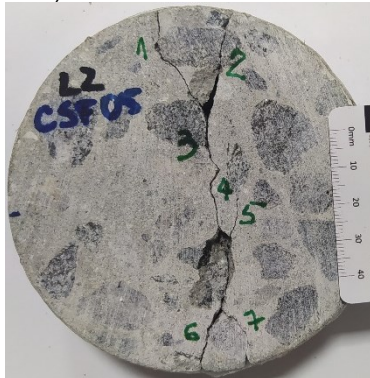
a) L1 – Antes do tratamento



b) L1 – 30 dias após a fissuração



c) L1 – 60 dias após a fissuração



d) L2 – Antes do tratamento



e) L2 – 30 dias após a fissuração



f) L2 – 60 dias após a fissuração

Figura 28 – Amostra CSB-2

Fonte: Autor

Na Figura 29 mostra o detalhamento das fissuras da amostra CSB – 2. A imagem foi tirada 48 dias após a fissuração. Não é possível afirmar pela análise visual se há produtos de cicatrização nas fissuras, pois os brancos encontrados podem ser partículas de lactato de cálcio e a cor das fissuras cicatrizadas podem ter sido alterada, acompanhando a cor do produto Serenade.



a) L1-F1



b) L1-F2



c) L1-F3

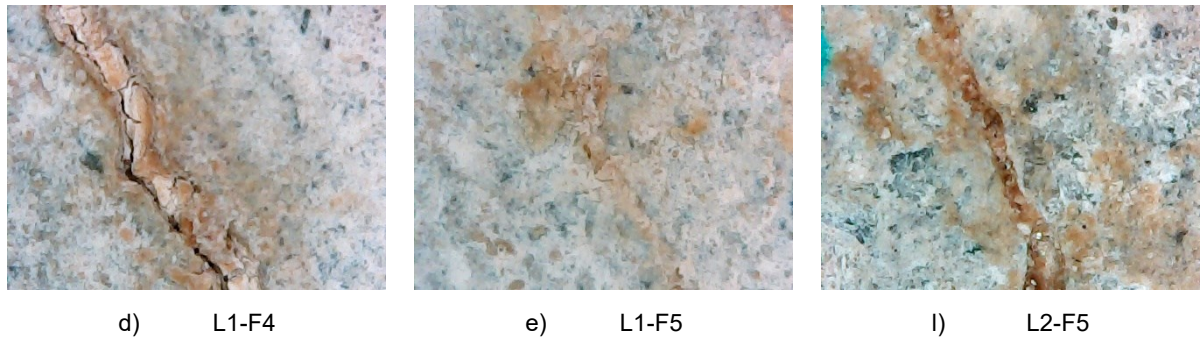


Figura 29 – Detalhamento das fissuras da amostra CSB-2 aos 48 dias após a fissuração

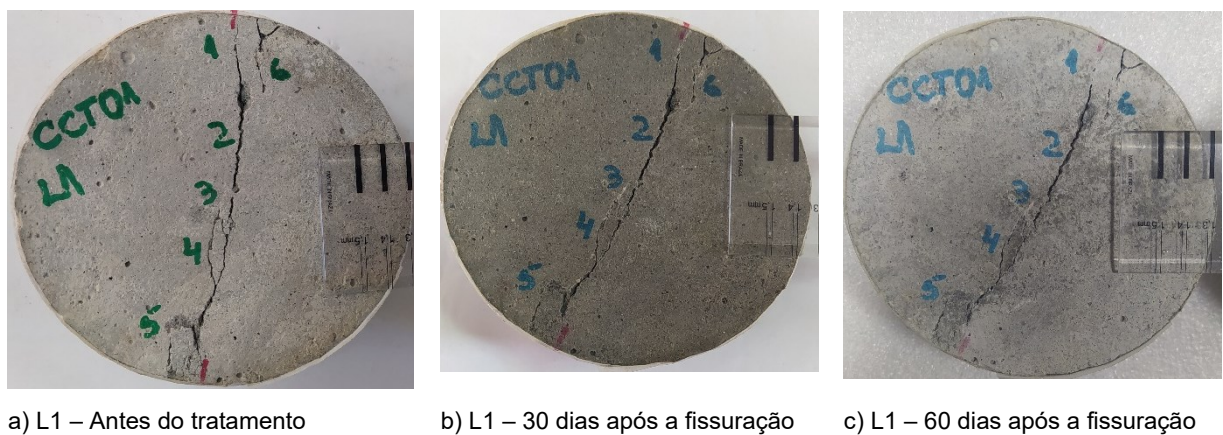
Fonte: Autor

Ao compararmos as amostras visuais dos dois métodos de aplicação pós fissuração: CSC e CSB. A que apresentou melhor eficácia na selagem das fissuras foi o CSC, pois o produto é um material com características cimentícias e preencheu fissuras com diversos tamanhos de forma imediata.

3.3.4 Concreto com aditivo Cristalizante (CC)

A abertura da menor fissura medida foi 0,15 mm e da maior 3,79 mm.

Na Figura 30 mostra a fissuras do corpo de prova CC – 1. Nas fissuras F1, F3 e F5, aos 30 dias, aparece brancos nas fissuras como indício de produtos de aut cicatrização.

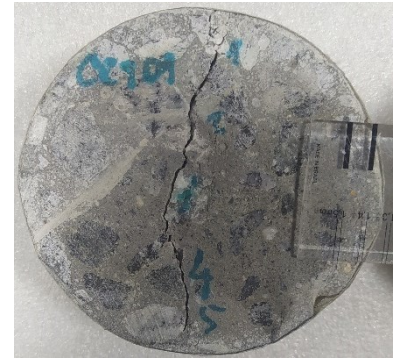




d) L2 – Antes do tratamento



e) L2 – 30 dias após a fissuração



f) L2 – 60 dias após a fissuração

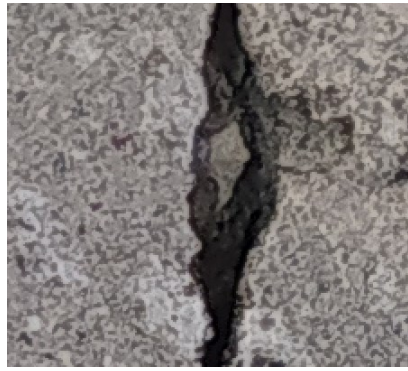
Figura 30 – Amostra CC-1

Fonte: Autor

No lado da amostra CC – 1 – L1 houve a cicatrização completa próximo ao F1 com o tamanho de 0,31 mm e próximo ao F3 com 0,40 mm. No lado da amostra CC – 1 – L2 houve a cicatrização completa próximo ao F1 com o tamanho de 0,48 mm.

No lado da amostra CC – 2 – L1 houve a cicatrização completa no F3 com o tamanho de 0,22 mm e no F8 com 0,33 mm. No lado da amostra CC – 2 – L2 houve a cicatrização completa próximo ao F1 com o tamanho de 0,35 mm. O trecho cicatrizado da fissura da Figura 31 tem 0,90 mm de largura. Conforme mencionado por Takagi *et al.* (2019) e de acordo com a informação técnica do fabricante a selagem ocorre até 0,50 mm. Tendo em vista a profundidade da fissura ser menos profunda, houve condições propícias para a autocicatrização acima de 0,50 mm.

No lado da amostra CC – 3 – L1 houve a cicatrização completa na F2 com o tamanho de 0,15 mm e na F5 com 0,17 mm. No lado da amostra CS – 3 – L2 houve a cicatrização completa na F2 com o tamanho de 0,77 mm, próximo ao F1 com 0,20 mm na F3 com 0,17mm.



a) Antes do tratamento



b) 60 dias após o tratamento

Figura 31 – Fissura autocicatrizada entre F1 e F3 no lado 2

Fonte: Autor

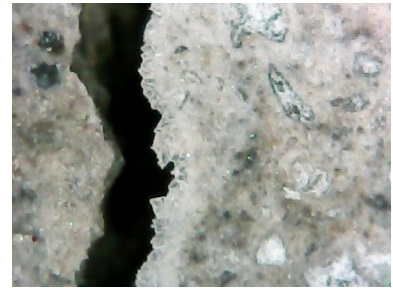
Na Figura 32 é possível visualizar algumas fissuras das amostras do concreto CC aos 48 dias. Há formação de brancos na parte interna da fissura nas imagens 32a), 32b) e 32e). Nas imagens 32c) e 32i) há formações de cristais na borda da fissura. Na imagem 32d) e 32j) a selagem completa.



a) CC-2-L1-F3



b) CC-2-L2-F1



c) CC-2-L2-F3



d) CC-2-L2-F5



e) CC-2-L2-F8



j) CS-3-L2-F3



l) CS-3-L2-F5

Figura 32 - Detalhamento das fissuras da amostra CC aos 48 dias após a fissuração

Fonte: Autor

Conforme mencionado no item 1.2.2. as adições cristalizantes são materiais hidrofílicos, sendo assim reagem facilmente com a presença de água formando depósitos de produtos insolúveis nos poros das fissuras, aumentando a densidade dos C-S-H e a resistência a penetração da água (TAKAJI *et al.*, 2019).

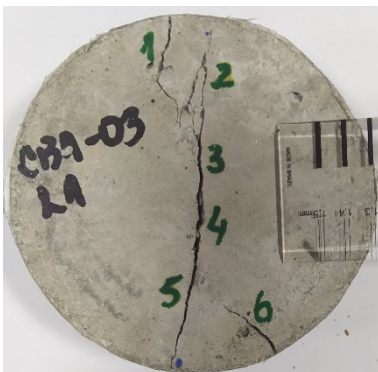
3.3.5 Concreto com aditivo Biológico 10^6 cfu/ml (CB1)

A abertura da menor fissura medida foi 0,10 mm e da maior 4,65 mm.

No lado da amostra CB1 – 1 – L1 houve a cicatrização completa próximo ao F1 com o tamanho de 0,23 mm, próximo ao F5 com 0,30 mm e depois ao F4 com 0,22.

No lado da amostra CB1 – 2 – L1 houve a cicatrização na F1 com o tamanho de 0,26 mm, próximo ao F2 com 0,21 mm. No lado da amostra CB1 – 2 – L2 houve a cicatrização completa na F5 com o tamanho de 0,16 mm, na F6 com 0,21 mm e na F8 com 0,26mm.

No lado da amostra CB1 – 3 – L1 houve a cicatrização completa próximo ao F2 com o tamanho de 0,21 mm e depois da F5 com 0,26 mm. Conforme Figura 33.



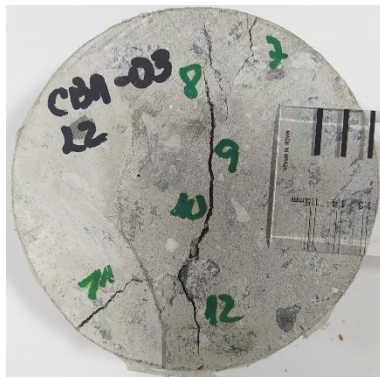
a) L1 – Antes do tratamento



b) L1 – 30 dias após a fissuração



c) L1 – 60 dias após a fissuração



d) L2 – Antes do tratamento



e) L2 – 30 dias após a fissuração



f) L2 – 60 dias após a fissuração

Figura 33 – Amostra CB1-3

Fonte: Autor

No lado da amostra CB1 – 4 – L1 houve a cicatrização completa próximo ao F1 com o tamanho de 0,18 mm e no F2 com 0,23 mm.

Na Figura 34 é possível visualizar as fissuras da amostra CB1. Aos 31 dias, após a fissuração, já era possível visualizar a cicatrização, data em que as fotos foram tiradas. Nas fotos aparecem a formação de brancos na fissura, são indícios de produto de cicatrização. Conforme mencionado no item 1.2.3, o processo de autocicatrização do concreto com adição biológica está relacionado a produção de carbonato de cálcio (REDDY *et al.*, 2020).



a) CB1-1-L1-F3



b) CB1-1-L2-F11



c) CB1-2-L2-F6



d) CB1-4-L1-F1



e) CB1-4-L1-F2

Figura 34 - Detalhamento das fissuras da amostra CB1 aos 31 dias após a fissuração.

Fonte: Autor

3.3.6 Concreto com aditivo Biológico 10^7 cfu/ml (CB2)

A abertura da menor fissura medida foi 0,14 mm e da maior 2,85 mm.

Na Figura 35 é possível visualizar a evolução da autocicatrização da amostra CB2-4, há formação de brancos aos 30 dias e 60 dias.

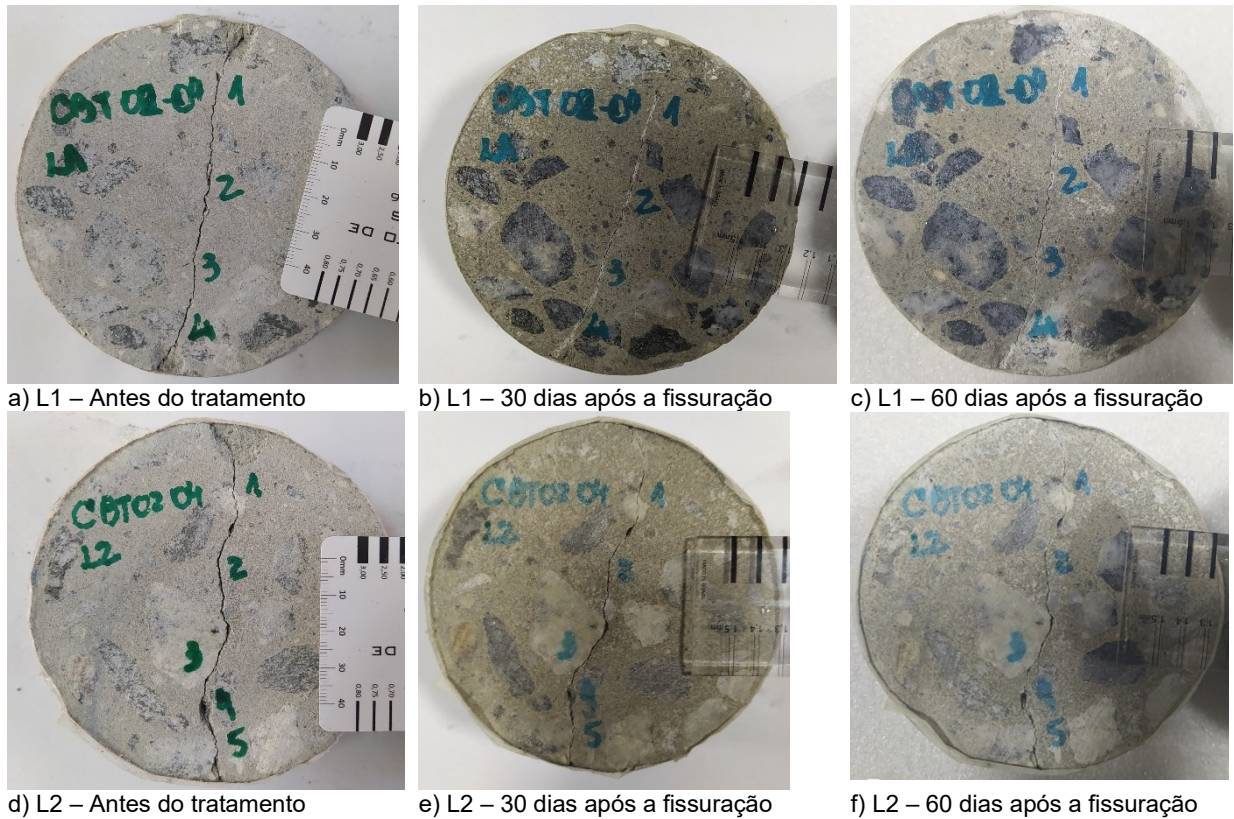


Figura 35 – Amostra CB2-4

Fonte: Autor

No lado da amostra CB2 – 3 – L1 houve a cicatrização completa na F3 com o tamanho de 0,26 mm, na F4 com 0,15 mm e antes ao F1 com 0,50 mm. No lado da amostra CB2 – 3 – L2 houve a cicatrização completa na F4 com o tamanho de 0,21 mm

Na Figura 36 é possível visualizar as fissuras das amostras CB2. A imagem foi tirada 43 dias após a fissuração. Nas fotos aparecem a formação de brancos na fissura, são indícios de produtos de cicatrização

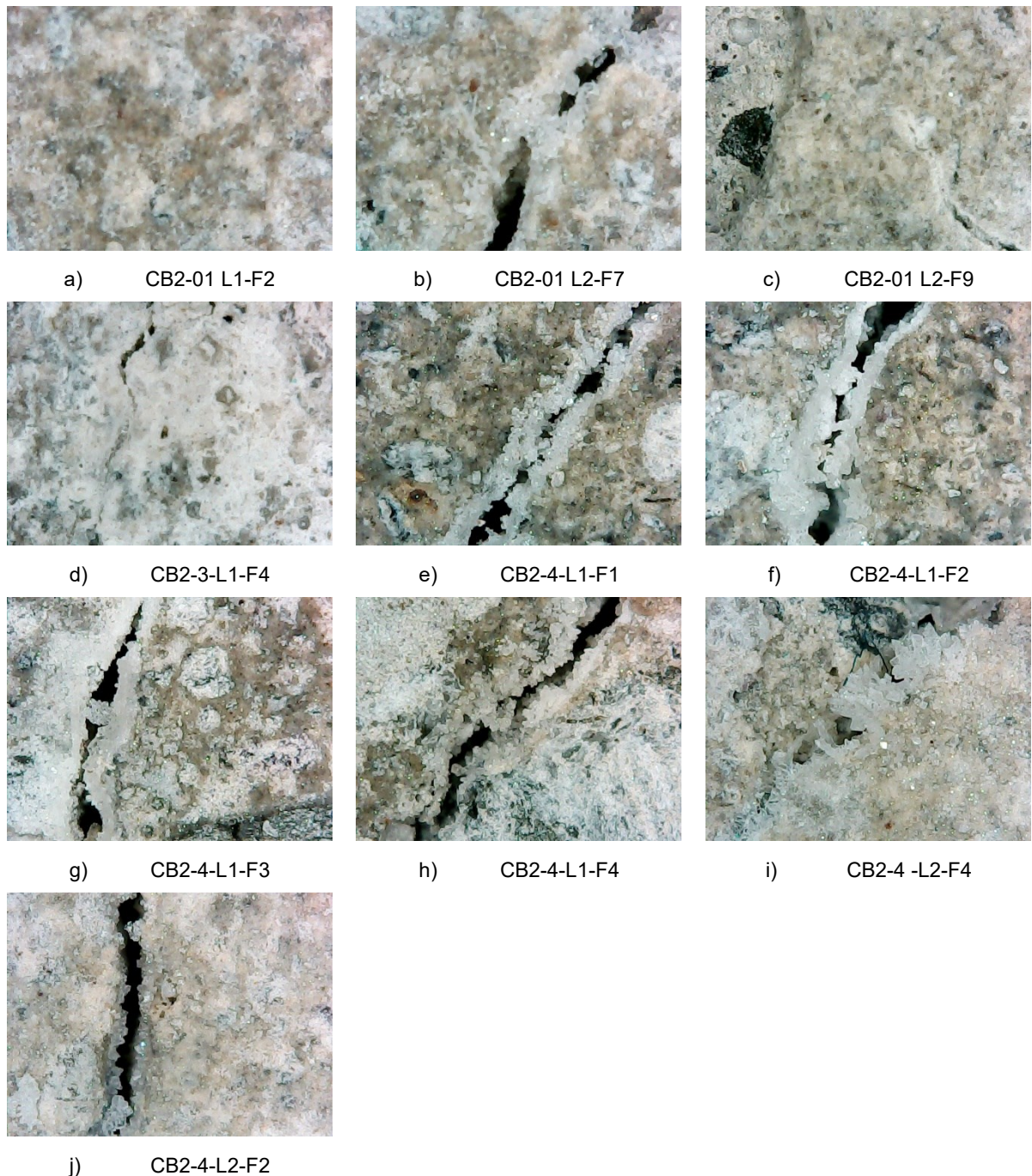


Figura 36 – Detalhamento das fissuras da amostra CB2 aos 43 dias após a fissuração

Fonte: Autor

3.3.7 Concreto com aditivo Biológico 10^8 cfu/ml (CB3)

A abertura da menor fissura medida foi 0,10 mm e da maior 5,98 mm.

No lado da amostra CB3 –1 – L1 houve a cicatrização completa no F7 com o tamanho de 0,42 mm, no F8 com 0,94 mm, no F10 com 0,22 e depois do F10 com 0,13. No lado da amostra CB3 – 1 – L2 houve a cicatrização completa próximo ao F1

com o tamanho de 0,28 mm e próximo ao F2 com 0,25 mm e abaixo da F2 com 0,22 mm.

No lado da amostra CB3 – 2 – L1 houve a cicatrização completa próximo ao F1 com o tamanho de 0,25 mm e próximo ao F2 com 0,42 mm e na F6 com 0,11 mm. No lado da amostra CB3 – 2 – L2 houve a cicatrização completa na F7 com o tamanho de 0,26 mm, na F8 com 0,15 mm, na F9 com 0,35 mm, na F10 com 0,42 mm, na F11 com 0,20 mm, na F11 com 0,11 mm

No lado da amostra CB3 – 3 – L2 houve a cicatrização completa na F7 com o tamanho de 0,22 mm e na F10 com 0,28 mm.

Na Figura 37 é possível visualizar a evolução da autocicatrização da amostra CB3-4, próximo a fissura 1 houve a selagem completa no lado CB3-4-L1 e próximo as fissuras 6 e 7 CB3-4-L2

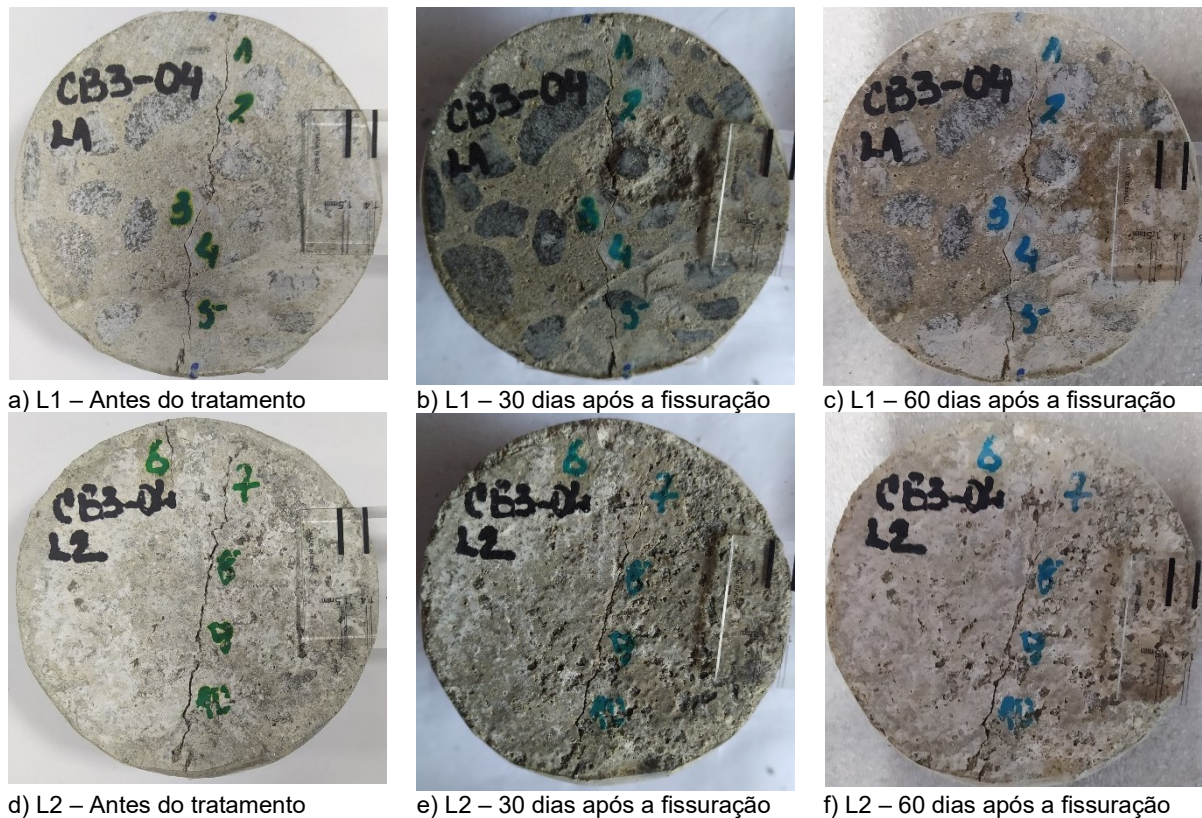


Figura 37 – Amostra CB3-4

Fonte: Autor

A autocicatrização da fissura pode variar de acordo com a profundidade da fissura. A Figura 38 mostra a autocicatrização da fissura F8 com 0,94 mm na parte interna da fissura, foi acima da 0,80 mm, pois em alguns trechos a fissura tem menor profundidade.



a) antes do tratamento



b) 60 dias após o tratamento

Figura 38 – Fissura CB3 – 1 – F8

Fonte: Autor

A Figura 39 mostra detalhes das fissuras das amostras do CB3: aos 31 dias após fissuração já haviam mais fissuras seladas: 39g), 39i), 39j), 39k) e 39l). Nas figuras 39m) e 39n) é possível visualizar nas fissuras maiores, indícios de cicatrização na borda das fissuras.



a) CB3-1-L1-F7



b) CB3-1-L1-F8



c) CB3-1-L1-F9



d) CB3-1-L2-F2



e) CB3-2-L1-F1



f) CB3-2-L1-F2

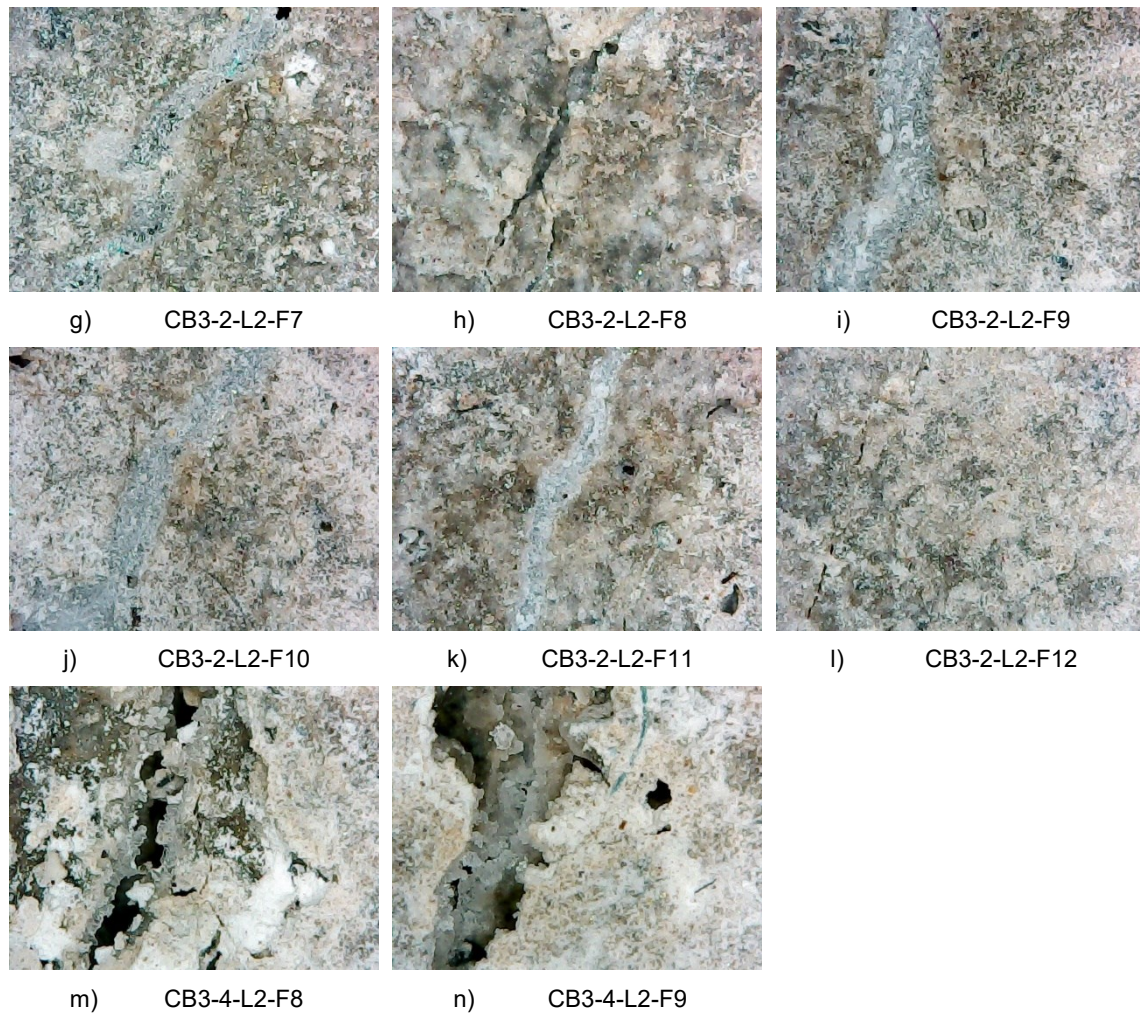


Figura 39 – Detalhamento das fissuras da amostra CB3 aos 31 dias após a fissuração

Fonte: Autor

A Tabela 15 mostra a maior fissura cicatrizada de cada tipo de concreto.

Tabela 15 – Maior fissura cicatrizada

	Fissura (mm)	Observação
CS	0,31	
CSC	8,13	
CSB		Não é possível afirmar o tamanho da maior fissura cicatrizada.
CC	0,90	Fissura com pouca profundidade
CB1	0,26	

CB2	0,50	
CB3	0,94	Fissura com pouca profundidade

Fonte: Autor

Ao compararmos a cicatrização das amostras CSC e CSB a que mostrou maior eficácia foi a cristalizante, devido a fácil aplicação e a selagem das fissuras maiores foram completas, as maiores fissuras medidas nas amostras foram 5,45mm, 8,13mm, 3,35 mm e 3,24mm, e em todos os tamanhos após 3 aplicações as fissuras foram seladas.

Dentre os corpos de provas com o objetivo de autocicatrização, ou seja a adição foi realizada no momento da concretagem, o concreto com a maior concentração de bactérias se mostrou mais promissor, CB3 com concentração de 10^8 cfu/ml, além da quantidade de fissuras autocicatrizadas ser maior do que as demais misturas o tamanho da fissura autocicatrizada chegou a 0,94 mm.

O concreto CC autocicatrizou uma fissura de 0,90 mm, porém, é importante mencionar que a profundidade da fissura era pequena, isso pode ter propiciado a autocicatrização.

4. CONCLUSÕES

A finalidade do uso de adições no concreto com a intenção de autocicatrização é minimizar as necessidades de vistoria e o custo com reparação de fissuras. Sendo assim, o uso de adições no concreto com o objetivo de autocicatrizar as fissuras se mostrou eficaz.

Ao avaliarmos a resistência à compressão dos concretos, as adições influenciaram de forma negativa, ou seja, reduziram a resistência do concreto, em comparação com o concreto de referência. O resultado dos concretos CC e CB1 ficaram mais próximos ao concreto de referência CS e os concretos CB2 e CB3 tiveram as menores resistências, isso se deve ao uso do hidrogel, pois o uso da bactéria *Bacillus Subtilis*, aumenta a resistência à compressão e a resistência à tração, isso de forma direta e o uso de microcápsulas podem reduzir a resistência do concreto.

Na análise da resistência à compressão residual dos corpos de prova fissurados e posteriormente tratados, o CSB teve a maior resistência, cerca de 66% da resistência do concreto simples, seguido do concreto CSC com 62% da resistência. Isso pode ter ocorrido devido à redução dos poros no concreto CSB e à selagem das fissuras no concreto CSC. Porém, é importante observar que o equipamento utilizado para a fissuração (28 dias após a concretagem), não era um equipamento eletrônico. Todos chegaram a ruptura, mas o quanto ultrapassou pós ruptura não pôde ser controlado, ou seja, se houve um número maior de fissuras em uma amostra do que em outra.

Na análise da resistência à flexão residual o concreto CB3 fissurado obteve o melhor resultado, 10% da resistência do concreto CB3 sem fissura. Seguido do CSC fissurado com 6,5% dos CS não fissurado.

As adições utilizadas nesse estudo potencializaram a colmatação autógena do concreto. Dentre as adições estudadas, o uso de bactérias no concreto mostrou ser mais promissor para selagem das fissuras, sendo a maior concentração utilizada, de 10^8 cfu/ml (CB3), obteve o melhor resultado.

O aditivo cristalizante também potencializou a autocicatrização, porém, a quantidade de cristalizante utilizada na mistura foi de 1% do peso do cimento,

conforme recomendado pelo fabricante. É questionável se o aumento da quantidade utilizada na mistura poderia potencializar ainda mais a autocicatrização do concreto.

Ao avaliarmos a aplicação das adições cicatrizantes após a fissuração, o concreto CSC se mostrou mais eficiente e eficaz na cicatrização, por ser um produto com base cimentícia, selando todas as fissuras com poucas aplicações. Porém, não é possível afirmar de forma visual o tamanho das fissuras seladas na amostra CSB, pois a deposição do material nas fissuras impediu a correta avaliação.

4.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Propõe-se avaliar a influência do uso de hidrogel nas propriedades físicas e mecânicas do concreto.
- Verificar o uso do *Bacillus Subtilis* pelo método direto e comparar os resultados obtidos com o uso do hidrogel.
- Avaliar as propriedades físicas e mecânicas do concreto com adição de diferentes percentuais de aditivos cristalizantes.
- Análise da microestrutura dos concretos avaliados, para correta verificação dos produtos de hidratação formado no selamento das fissuras.

REFERÊNCIAS

ALSHALIF, A. Faisal *et al.* *Isolation of sulphate reduction bacteria (SRB) to improve compress strength and water penetration of bio-concrete. In: MATEC web of conferences. EDP Sciences*, 2016. p. 01016.

ARAÚJO, Frank Albert Soares *et al.* Avaliação de propriedades físicas e mecânicas em concretos produzidos com materiais da cidade de Manaus com o uso de redutores de permeabilidade por cristalização. 2020.

ACI Committee 212, 2010. Report ACI 212-3R-10, 2010. *Report on chemical admixtures for concrete. American Concrete Institute (ACI)*, p 46–50

BOLINA, Fabricio Longhi; TUTIKIAN, Bernardo Fonseca; HELENE, Paulo. Patologia de estruturas. Oficina de Textos, 2019.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. *New Approach to Durability Design*, (Bulletin 238). Lausanne: CEB, 1997.

DE SOUZA OLIVEIRA, Aline *et al.* *An overview of a twofold effect of crystalline admixtures in cement-based materials: From permeability-reducers to self-healing stimulators. Journal of Building Engineering*, v. 41, p. 102400, 2021.

DE SOUZA, Vicente Custodio Moreira; RIPPER, Thomaz. Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto. Pini, 1998.

ESTEVES, IAN CESAR AMOS. Efeito da autocicatrização autógena na durabilidade dos concretos convencionais fissurados. 2019.

FUSCO, Péricles Brasiliense. Tecnologia do concreto estrutural: tópicos aplicados. Pini, 2008.

INOVA CIVIL - CONCRETO BIOLÓGICO: ENTENDA COMO ELE PODE MUDAR A CONSTRUÇÃO. Pinheiro, Igor. Disponível em:

<https://www.inovacivil.com.br/concreto-biologico/>

HELENE, Paulo. TAKAGI, Emilio. LIMA, Maryangela. MEDEIROS JUNIOR, Ronaldo A. Rumo ao concreto do amanhã. Concreto autocicatrizante ‘engenheirado’ com cimento de escoria de alto forno ativado por aditivo cristalino (PRAH 4G). Revista estrutura, ed. 5. p. 39, 2017.

HELENE, P. R.L. *La Agressividad del Medio y la Durabilidad del Hormigón. Hormigón, AATH*, n. 10 p. 25-35, ago. 1983.

HM JONKERS, A. THIJSSSEN, G. MUYZER, O. COPUROGLU, E. SCHLANGEN, Aplicação de bactérias como agente de autocura para o desenvolvimento de concreto sustentável, 2010.

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

ISAIA, Geraldo Cechella. E-MAT. Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil. v. 2, n. 2, p. 92-104, nov. 2005

JOGI, Pavan Kumar; LAKSHMI, TVS Vara. *Self healing concrete based on different bacteria: a review. Materials Today: Proceedings*, v. 43, p. 1246-1252, 2021.

LEVY, Salomon Mony. Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2001. p.194

LUO, Mian; QIAN, Chunxiang. *Influences of bacteria-based self-healing agents on cementitious materials hydration kinetics and compressive strength. Construction and Building Materials*, v. 121, p. 659-663, 2016MADIGAN, Michael T. *et al. Microbiologia de Brock-14ª Edição*. Artmed Editora, 2016.

MEHTA, P Kumar; MONTEIRO, Paulo J.M. *Concrete: microstructure, properties, and materials. McGraw-Hill Education*, 2014

MEHTA, P Kumar; MONTEIRO, Paulo J.M. *Materiais para concreto, dosagem e propriedades nas primeiras idades*, ed. 3, São Paulo: Editora Ibracon, 2008.

MEHTA, P. Kumar; BURROWS, Richard W. *Building durable structures in the 21st century. Concrete international*, v. 23, n. 3, p. 57-63, 2001.

MÜLLER, V; PACHECO, F.; TUTIKIAN, B. Técnicas e metodologias de biomineração na cicatrização de fissuras do concreto. *Anais do 61º Congresso Brasileiro*. 2019.

NBR, A. B. N. T. 6118 - Projeto de estruturas de concreto-Procedimento. Rio de Janeiro, v. 238, 2014.

NBR, A.B.N.T. 12655 – Concreto de cimento Portland – Preparo, controle recebimento e aceitação – Procedimento, 2015

NBR, A.B.N.T. 15575-1 – Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais, 2013

NBR A.B.N.T. 5739 - Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos, 2018

NBR A.B.N.T. 12142 - Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos, 2010

NBR A.B.N.T. 8522 - Concreto – Determinação dos módulos de elasticidade e deformação, 2017

NEVILLE, A. M. *Propriedades do Concreto* /A. M. Neville; Tradução: CREMONINI, Ruy Alberto. ed. 5. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NODEHI, Mehrab; OZBAKKALOGLU, Togay; GHOLAMPOUR, Aliakbar. *A systematic review of bacteria-based self-healing concrete: Biomineralization, mechanical, and durability properties. Journal of Building Engineering*, v. 49, p. 104038, 2022.

PACHECO, F. Analise da eficácia dos mecanismos de autocicatrização do concreto. 2020. 350f Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em engenharia civil, Unisinos, São Leopoldo, 2020

QIAN, Chunxiang *et al.* *Application of microbial self-healing concrete: Case study. Construction and Building Materials*, v. 290, 2021.

QIAN, S. Z.; ZHOU, J.; SCHLANGEN, E. *Influence of curing condition and precracking time on the self-healing behavior of Engineered Cementitious Composites. Cement and concrete composites*, v. 32, n. 9, p. 686-693, 2010.

REDDY, PV Yatish; RAMESH, B.; KUMAR, L. Prem. *Influence of bacteria in self healing of concrete-a review. Materials Today: Proceedings*, v. 33, p. 4212-4218, 2020.

ROIG-FLORES, Marta *et al.* *Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments. Construction and Building Materials*, v. 86, p. 1-11, 2015.

SOUZA, R.H.F, Aula 3 – Processos físicos de deterioração. In: SOUZA, R.H.F. Processos físicos de deterioração (Deterioração das estruturas). Mestrado em estruturas. UERJ, Rio de Janeiro – RJ, 2021. 28 páginas. Notas de aula

TAKAGI, Emilio; LIMA, MARYANGELA G. HELENE, Paulo. MEDEIROS, Ronaldo A Junior. Rumo ao concreto do amanhã. *Revista estrutura*, abril 2018.

TAKAGI, Emilio Minoru; LIMA, Maryangela Geimba; LIMA, Francisco Carlos Mendes. Aditivo cristalino para a impermeabilização integral por cristalização de estruturas de concreto de pontes. *Revista Ibracon Concreto & Construções*, 2019, p. 90-96

TANG, Yihong; XU, Jing. *Application of microbial precipitation in self-healing concrete: A review on the protection strategies for bacteria. Construction and Building Materials*, v. 306, p. 124950, 2021.

THOMAZ, Ercio. Trincas em edifícios: causas, prevenção e recuperação. Oficina de Textos, 2020.

VAN TITTELBOOM, Kim; DE BELIE, Nele. *Self-healing in cementitious materials—A review. Materials*, v. 6, n. 6, p. 2182-2217, 2013.

VIEIRA, Juliana Aparecida. Biodeposição de CaCO_3 em materiais cimentícios: contribuição ao estudo da biomineralização induzida por *Bacillus subtilis*. 2017.

WANG, J. Y. et al. *Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete. Construction and building materials*, v. 68, p. 110-119, 2014.

XU, Jing et al. *Self-healing of concrete cracks by ceramsite-loaded microorganisms. Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2018, 2018.

ZAKRZEWSKI, Mariana Balvedi. Propriedades e autocicatrização do bioconcreto por meio da incorporação de bactérias do gênero *Bacillus subtilis* encapsuladas em argila expandida. 2022.

ZULFIKAR, Regina Aprilia; PUTRA, Heriansyah; YASUHARA, Hideaki. *Utilization of soybean as catalyst material in enzyme-mediated calcite precipitation (EMCP) for crack healing concrete. In: Journal of the Civil Engineering Forum. Petra Christian University*, 2021. p. 59-70.

APÊNDICE

APÊNDICE A

Amostra	Fissura	Fissura (mm)
CS-1-L1		0,11
CS-1-L1	1	0,18
CS-1-L1	3	0,24
CS-1-L1	2	0,42
CS-1-L1	5	0,69
CS-1-L1	6	0,78
CS-1-L1	4	1,66
CS-1-L1		3,89
CS-1-L2	1	0,18
CS-1-L2	2	0,21
CS-1-L2	3	0,31
CS-1-L2		1,03
CS-1-L2		1,05
CS-2-L1		0,25
CS-2-L1	2	0,47
CS-2-L1	5	0,48
CS-2-L1	4	0,58
CS-2-L1	3	0,74
CS-2-L1	1	2,99
CS-2-L1		4,90
CS-2-L2		0,20
CS-2-L2	4	0,52
CS-2-L2	3	0,62
CS-2-L2	2	0,68
CS-2-L2	1	1,10
CS-2-L2		1,53
CS-2-L2		6,60
CS-3-L1		0,15
CS-3-L1	5	0,17
CS-3-L1		0,21
CS-3-L1	6	0,21
CS-3-L1	4	0,22
CS-3-L1		0,23
CS-3-L1	1	0,30
CS-3-L1	7	0,42
CS-3-L1	2	0,47
CS-3-L1	3	0,51
CS-3-L2		0,12

CS-3-L2	1	0,12
CS-3-L2		0,13
CS-3-L2	3	0,46
CS-3-L2	4	0,61
CS-3-L2	2	0,70
CS-3-L2	5	0,94
CS-3-L3		0,26
CS-4-L1	2	0,47
CS-4-L1	1	0,59
CS-4-L1	5	0,60
CS-4-L1	7	0,65
CS-4-L1	3	0,72
CS-4-L1	4	0,94
CS-4-L1		1,32
CS-4-L1	6	1,85
CS-4-L2	5	0,42
CS-4-L2	1	0,47
CS-4-L2		0,56
CS-4-L2	3	1,04
CS-4-L2	4	1,14
CS-4-L2	2	1,18

Figura 40 - Tamanho das fissuras das amostras CS.

Fonte: Autor



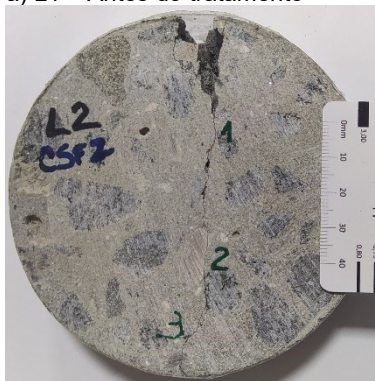
a) L1 – Antes do tratamento



b) L1 – 30 dias após a fissuração



c) L1 – 60 dias após a fissuração



d) L2 – Antes do tratamento



e) L2 – 30 dias após a fissuração



f) L2 – 60 dias após a fissuração

Figura 41 - Amostra CS – 1

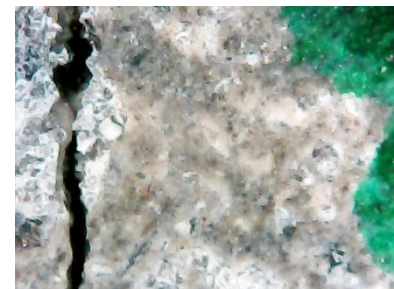
Fonte: Autor



i) L1-F1



j) L1-F2



k) L1-F3



l) L1-F4



m) L1-F5



n) L2-F1



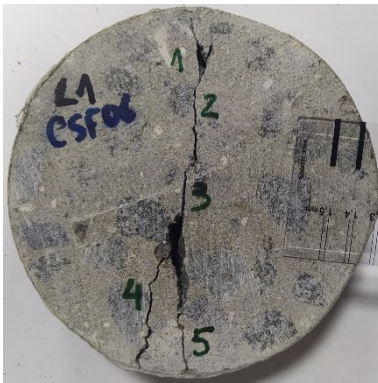
g) L2-F2



h) L2-F3

Figura 42 - Detalhamento das fissuras da amostra CS-1 aos 48 dias após a fissuração

Fonte: Autor



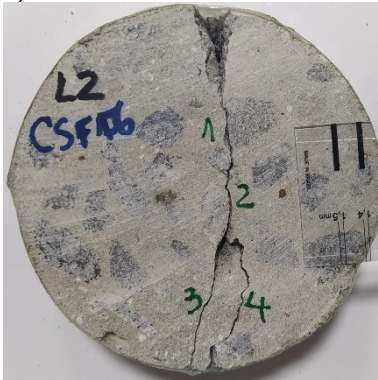
a) L1 – Antes do tratamento



b) L1 – 30 dias após a fissuração



c) L1 – 60 dias após a fissuração



d) L2 – Antes do tratamento



e) L2 – 30 dias após a fissuração



f) L2 – 60 dias após a fissuração

Figura 43 - Amostra CS-2.

Fonte: Autor

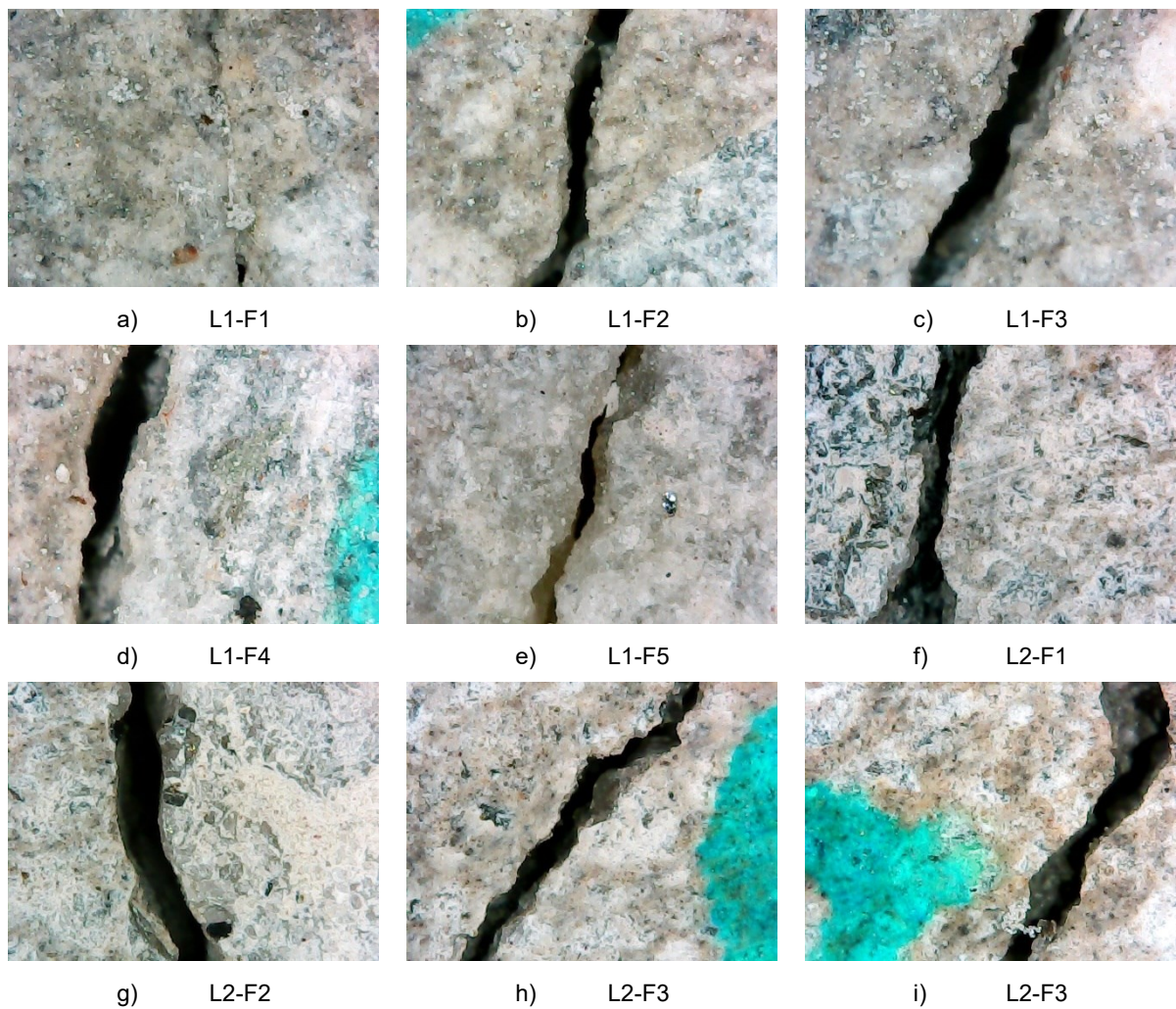


Figura 44 – Detalhamento das fissuras da amostra CS-2 aos 48 dias após a fissuração.

Fonte: Autor



a) L1 – Antes do tratamento



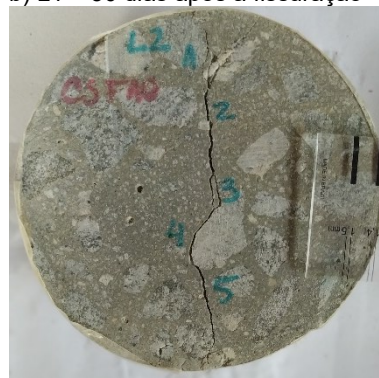
b) L1 – 30 dias após a fissuração



c) L1 – 60 dias após a fissuração



d) L2 – Antes do tratamento



e) L2 – 30 dias após a fissuração



f) L2 – 60 dias após a fissuração

Figura 45 – Amostra CS-3.

Fonte: Autor



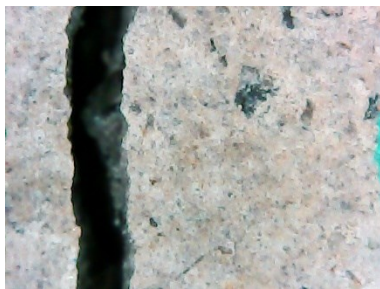
a) L1 proximo ao F1



b) L1-F1



c) L1-F2



d) L1-F3



e) L1-F4



f) L1-F5

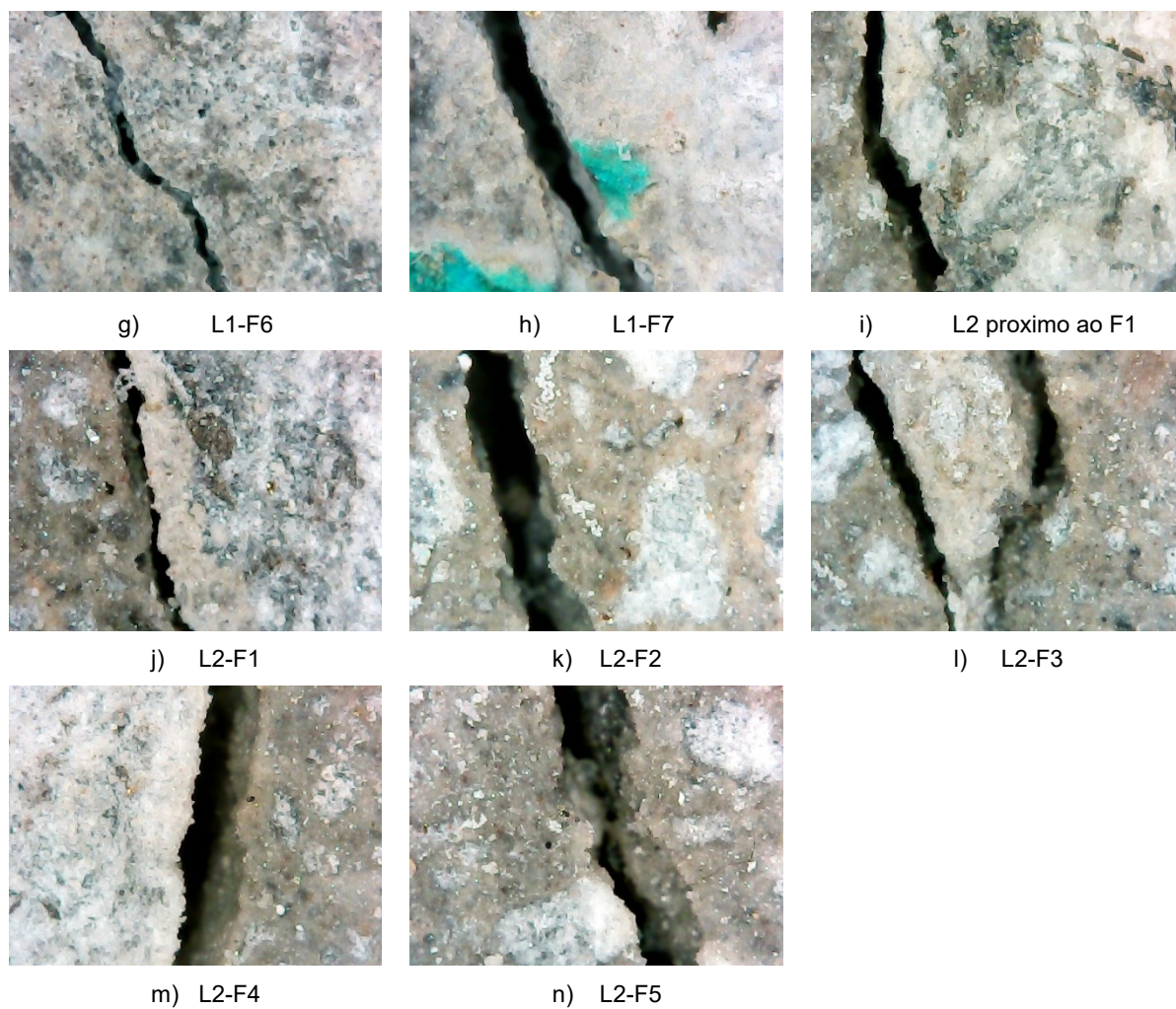
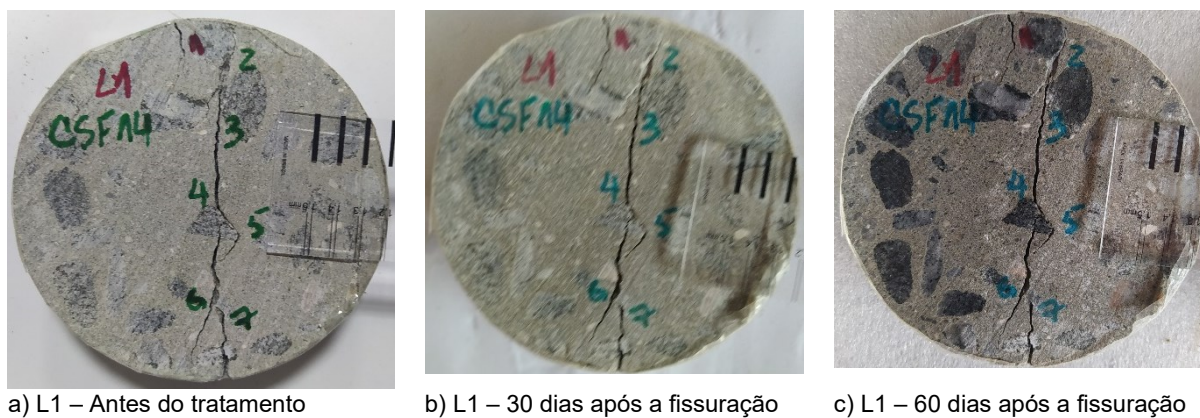
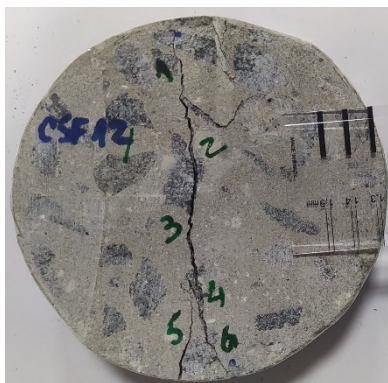


Figura 46 – Detalhamento das fissuras da amostra CS-3 aos 48 dias após a fissuração.

Fonte: Autor





d) L2 – Antes do tratamento



e) L2 – 30 dias após a fissuração



f) L2 – 60 dias após a fissuração

Figura 47 – Amostra CS-4.

Fonte: Autor



a) L1-F1



b) L1-F2



c) L1-F3



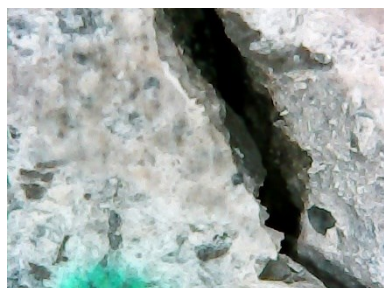
d) L1-F4



e) L1-F5



f) L1-F6



g) L1-F7



h) L2-F1



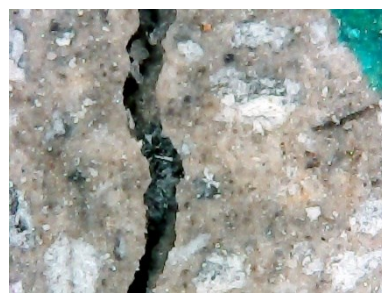
i) L2-F2



j) L2-F3



k) L2-F4



l) L2-F5



m) L2-F5

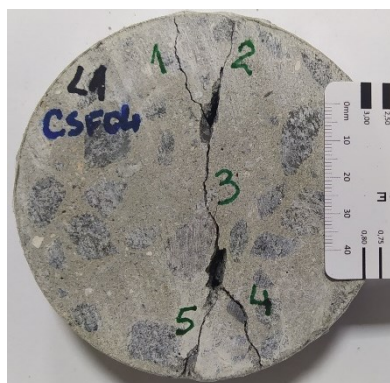
Figura 48 – Detalhamento das fissuras da amostra CS-4 aos 48 dias após a fissuração.

Fonte: Autor

APÊNDICE B – Tamanho das fissuras das amostras CSC.

Amostra	Fissura	Fissura (mm)
CSC-1-L1	2	0,20
CSC-1-L1	5	0,33
CSC-1-L1	1	0,43
CSC-1-L1	3	0,83
CSC-1-L1	4	0,93
CSC-1-L1		2,33
CSC-1-L1		5,45
CSC-1-L2		0,28
CSC-1-L2	3	0,33
CSC-1-L2	1	0,37
CSC-1-L2	4	0,51
CSC-1-L2	2	0,54
CSC-1-L2		8,13
CSC-2-L1	2	0,34
CSC-2-L1	1	0,45
CSC-2-L1		3,74
CSC-2-L2	4	0,20
CSC-2-L2	1	0,40
CSC-2-L2	2	0,44
CSC-2-L2	3	0,45
CSC-2-L2		3,35
CSC-3-L1	3	0,53
CSC-3-L1	2	0,86
CSC-3-L1	1	1,93
CSC-3-L2		0,18
CSC-3-L2	3	0,21
CSC-3-L2	2	0,64
CSC-3-L2	1	1,30
CSC-4-L1	6	0,35
CSC-4-L1	1	0,49
CSC-4-L1	5	0,70
CSC-4-L1	2	0,91
CSC-4-L1	4	1,12
CSC-4-L1	3	1,39
CSC-4-L2	6	0,27
CSC-4-L2	2	0,69
CSC-4-L2	1	0,74
CSC-4-L2	4	1,01
CSC-4-L2	3	1,01
CSC-4-L2	5	1,64
CSC-4-L2		2,40
CSC-4-L2		3,24

Fonte: Autor



a) L1 – Antes do tratamento



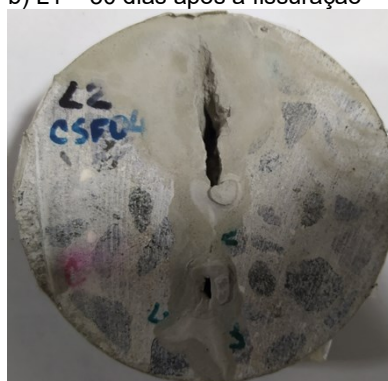
b) L1 – 30 dias após a fissuração



c) L1 – 60 dias após a fissuração



d) L2 – Antes do tratamento



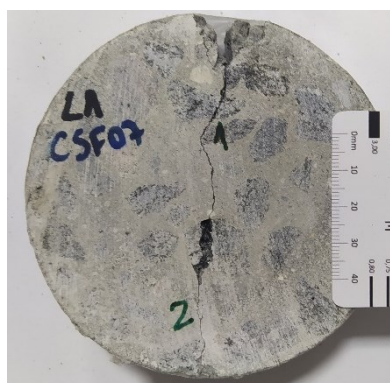
e) L2 – 30 dias após a fissuração



f) L2 – 60 dias após a fissuração

Figura 49 - Amostra CSC-1.

Fonte: Autor



a) L1 – Antes do tratamento



b) L1 – 30 dias após a fissuração



c) L1 – 60 dias após a fissuração



d) L2 – Antes do tratamento



e) L2 – 30 dias após a fissuração



f) L2 – 60 dias após a fissuração

Figura 50 – Amostra CSC-2.

Fonte: Autor



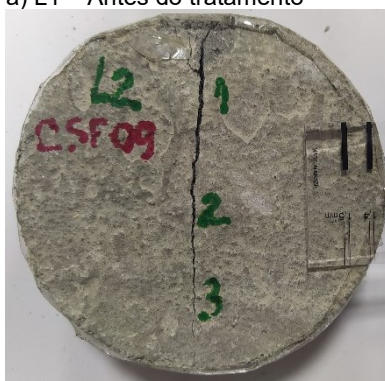
a) L1 – Antes do tratamento



b) L1 – 30 dias após a fissuração



c) L1 – 60 dias após a fissuração



d) L2 – Antes do tratamento



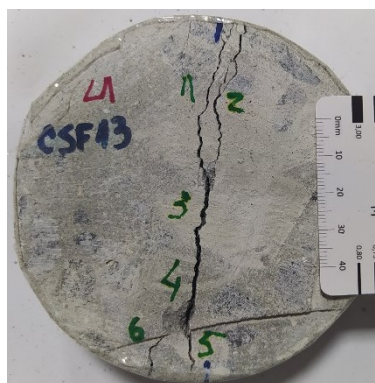
e) L2 – 30 dias após a fissuração



f) L2 – 60 dias após a fissuração

Figura 51 - Amostra CSC-3.

Fonte: Autor



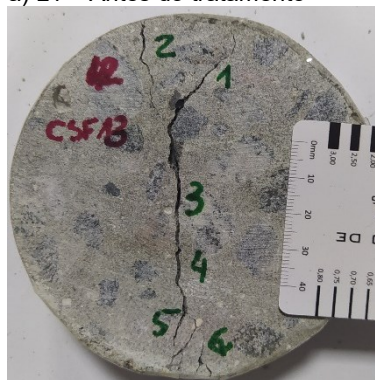
a) L1 – Antes do tratamento



b) L1 – 30 dias após a fissuração



c) L1 – 60 dias após a fissuração



d) L2 – Antes do tratamento



e) L2 – 30 dias após a fissuração



f) L2 – 60 dias após a fissuração

Figura 52 – Amostra CSC-4.

Fonte: Autor

APÊNDICE C – Tamanho das fissuras das amostras CSB.

Amostra	Fissura	Fissura (mm)
CSB-1-L1	1	0,43
CSB-1-L1	3	0,72
CSB-1-L1	2	0,86
CSB-1-L1		2,05
CSB-1-L2	3	0,35
CSB-1-L2	1	0,47
CSB-1-L2	4	0,69
CSB-1-L2	2	0,96
CSB-1-L2		1,89
CSB-1-L2		2,15
CSB-1-L2		2,19
CSB-1-L2		3,99
CSB-2-L1	5	0,20
CSB-2-L1	2	0,21
CSB-2-L1	6	0,31
CSB-2-L1	1	0,38
CSB-2-L1	4	0,45
CSB-2-L1	3	0,61
CSB-2-L1	7	0,63
CSB-2-L1		2,44
CSB-2-L1		4,18
CSB-2-L2	7	0,19
CSB-2-L2	5	0,24
CSB-2-L2	2	0,31
CSB-2-L2	4	0,37
CSB-2-L2	3	0,65
CSB-2-L2	6	0,68
CSB-2-L2	1	1,21
CSB-2-L2		3,34
CSB-3-L1	4	0,20
CSB-3-L1	3	0,26
CSB-3-L1	2	0,42
CSB-3-L1	1	0,66
CSB-3-L1	1	0,70
CSB-3-L2	5	0,14
CSB-3-L2		0,17
CSB-3-L2	4	0,25
CSB-3-L2	2	0,53
CSB-3-L2	3	1,12

Fonte: Autor



a) L1 – Antes do tratamento



b) L1 – 30 dias após a fissuração



c) L1 – 60 dias após a fissuração



d) L2 – Antes do tratamento



e) L2 – 30 dias após a fissuração



f) L2 – 60 dias após a fissuração

Figura 53 – Amostra CSB-1

Fonte: Autor



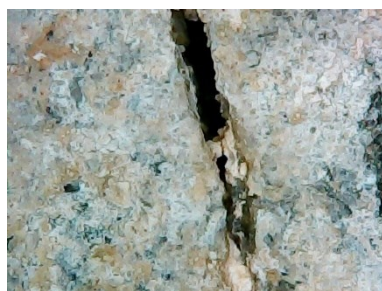
a) L1 – próximo do F1



b) L1



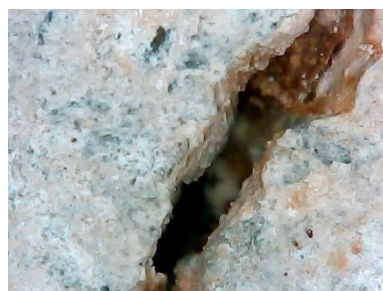
c) L1



e) L1-F1



f) L1-F2



g) L1-F3

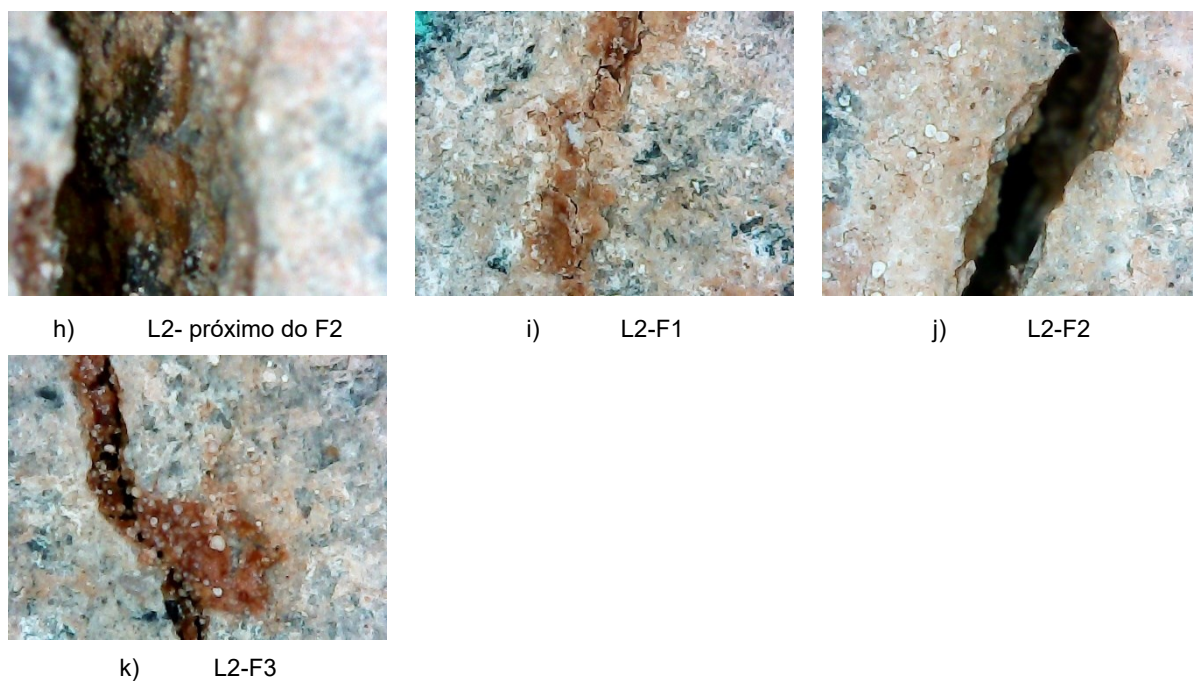


Figura 54 – Detalhamento das fissuras da amostra CSB-1 aos 48 dias após a fissuração

Fonte: Autor

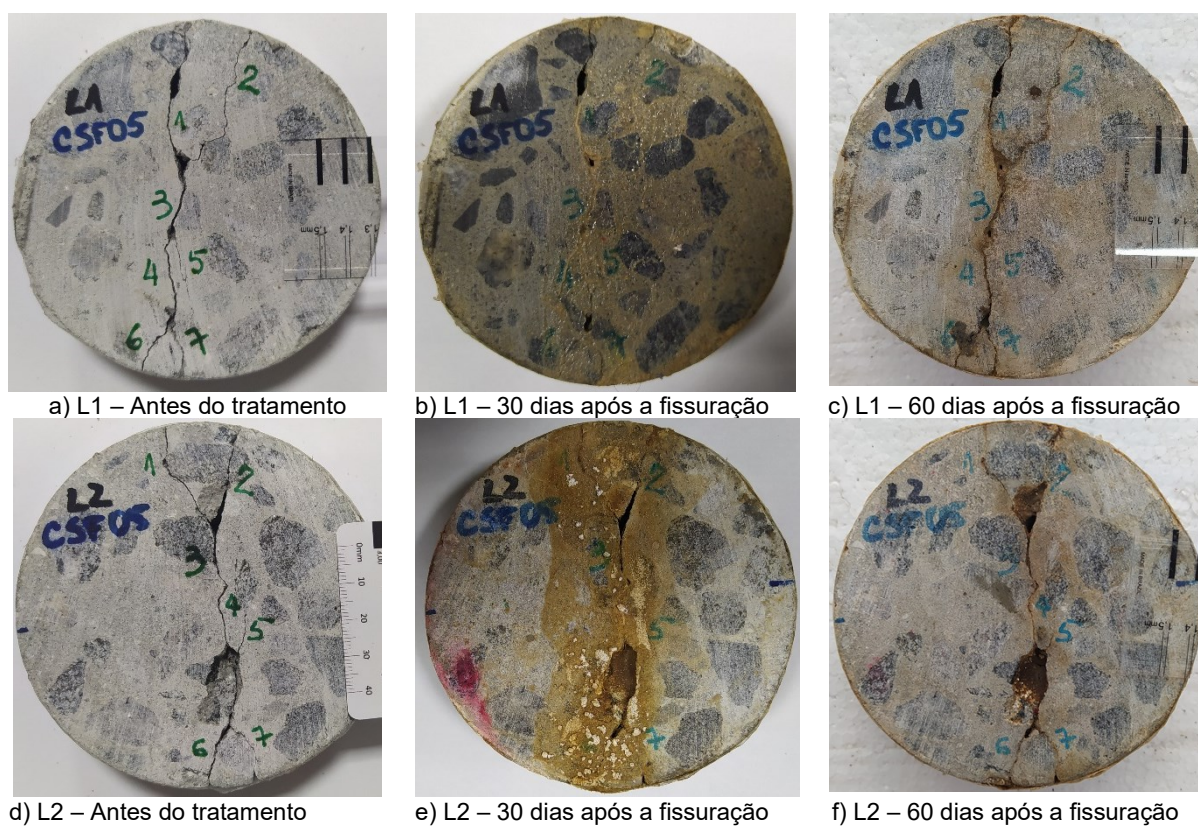


Figura 55 – Amostra CSB-2

Fonte: Autor

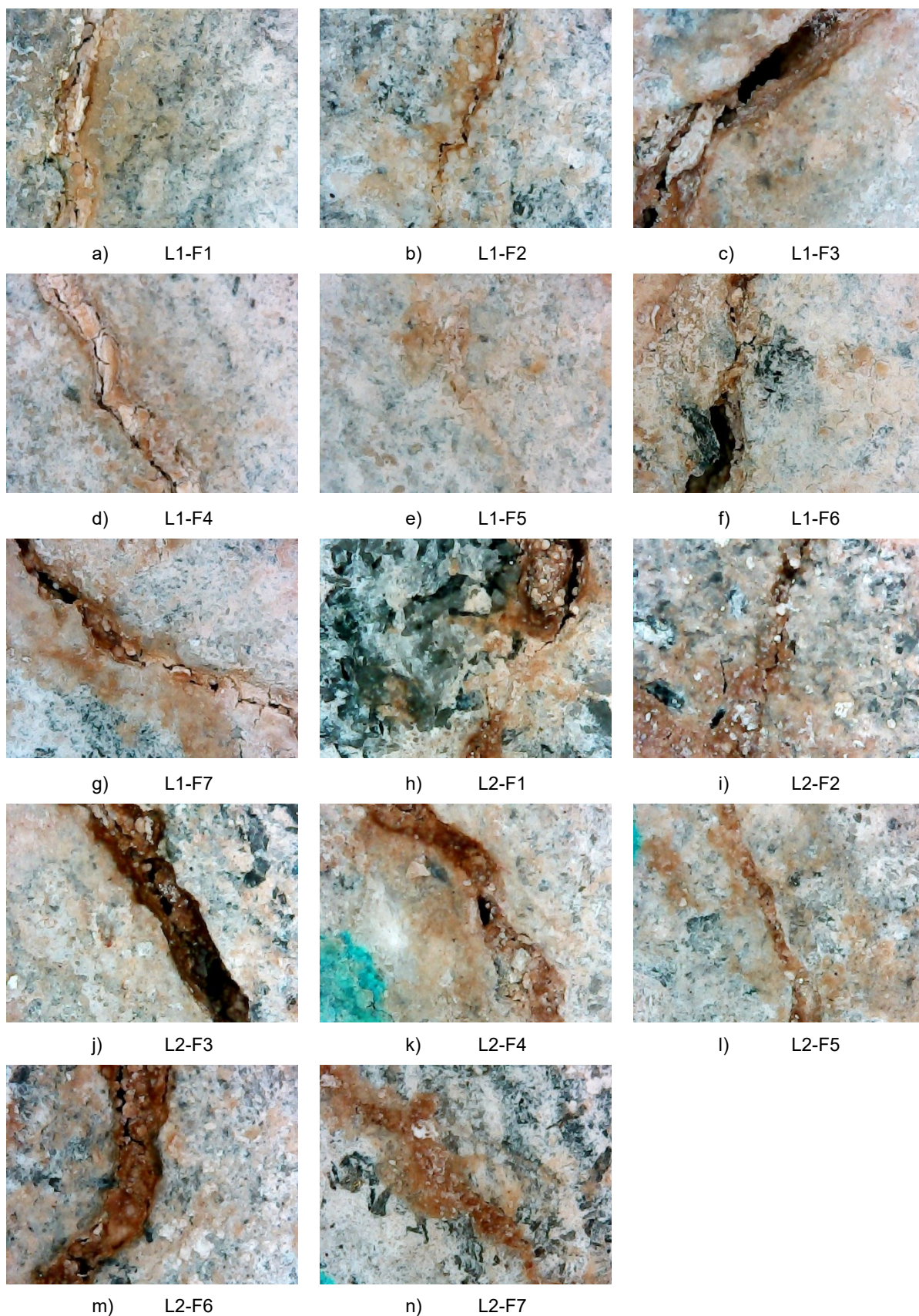
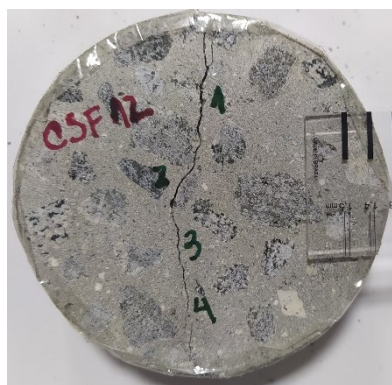


Figura 56 – Detalhamento das fissuras da amostra CSB-2 aos 48 dias após a fissuração

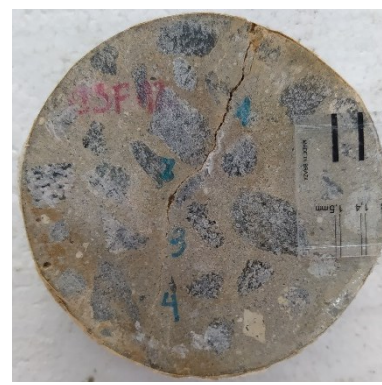
Fonte: Autor



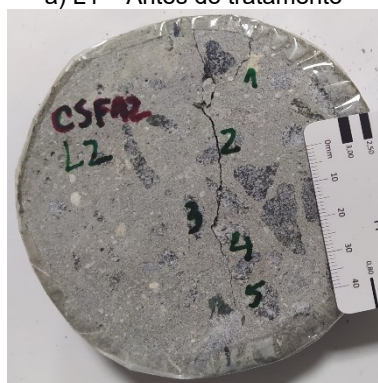
a) L1 – Antes do tratamento



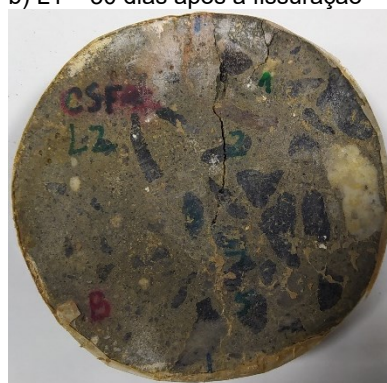
b) L1 – 30 dias após a fissuração



c) L1 – 60 dias após a fissuração



d) L2 – Antes do tratamento



e) L2 – 30 dias após a fissuração



f) L2 – 60 dias após a fissuração

Figura 57 – Amostra CSB-3.

Fonte: Autor



a) L1-F1



b) L1-F2



c) L1-F3



d) L1-F4



e) L2 – próximo a F1



f) L2-F1



g) L2-F2



h) L2-F3



i) L2-F4



j) L2-F5

Figura 58 – Detalhamento das fissuras da amostra CSB-3 aos 48 dias após a fissuração.

Fonte: Autor

APÊNDICE D – Tamanho das fissuras das amostras CC

Amostra	Fissura	Tamanho (mm)
CC-1-L1	1	0,19
CC-1-L1	4	0,20
CC-1-L1	5	0,24
CC-1-L1	6	0,26
CC-1-L1		0,31
CC-1-L1		0,38
CC-1-L1		0,40
CC-1-L1	3	0,57
CC-1-L1		1,01
CC-1-L1	2	1,05
CC-1-L1		3,79
CC-1-L2	1	0,34
CC-1-L2	4	0,46
CC-1-L2		0,48
CC-1-L2	5	0,50
CC-1-L2	3	0,86
CC-1-L2	2	1,62
CC-1-L2		3,28
CC-2-L1	2	0,20
CC-2-L1	3	0,22
CC-2-L1	7	0,30
CC-2-L1	8	0,33
CC-2-L1		0,34
CC-2-L1	6	0,68
CC-2-L1	1	0,71
CC-2-L1	4	0,72
CC-2-L1	5	0,98
CC-2-L1		1,45
CC-2-L2	8	0,20
CC-2-L2		0,28
CC-2-L2	7	0,30
CC-2-L2		0,35
CC-2-L2	1	0,36
CC-2-L2	5	0,43
CC-2-L2	2	0,58
CC-2-L2	6	0,67
CC-2-L2	3	0,76
CC-2-L2		0,90
CC-2-L2	4	1,04
CC-2-L2		2,74
CC-3-L1	2	0,15
CC-3-L1	5	0,17
CC-3-L1	4	0,25

CC-3-L1	1	0,42
CC-3-L1	3	0,71
CC-3-L2	3	0,17
CC-3-L2		0,20
CC-3-L2	4	0,29
CC-3-L2	5	0,41
CC-3-L2	1	0,49
CC-3-L2	2	0,77
CC-3-L2		1,02

Fonte: Autor



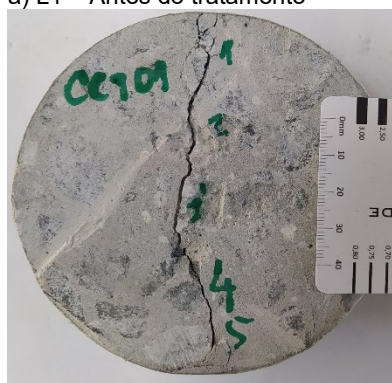
a) L1 – Antes do tratamento



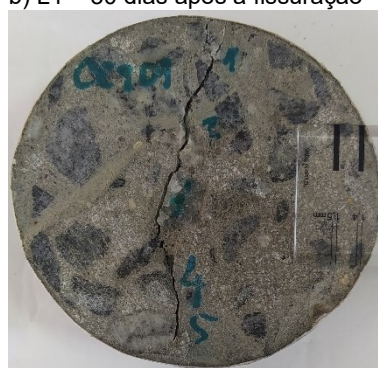
b) L1 – 30 dias após a fissuração



c) L1 – 60 dias após a fissuração



d) L2 – Antes do tratamento



e) L2 – 30 dias após a fissuração



f) L2 – 60 dias após a fissuração

Figura 59 – Amostra CC-1.

Fonte: Autor



a) L1-F1



b) L1-F2



c) L1-F3



e) L1-F4



f) L1-F5



g) L2-F1

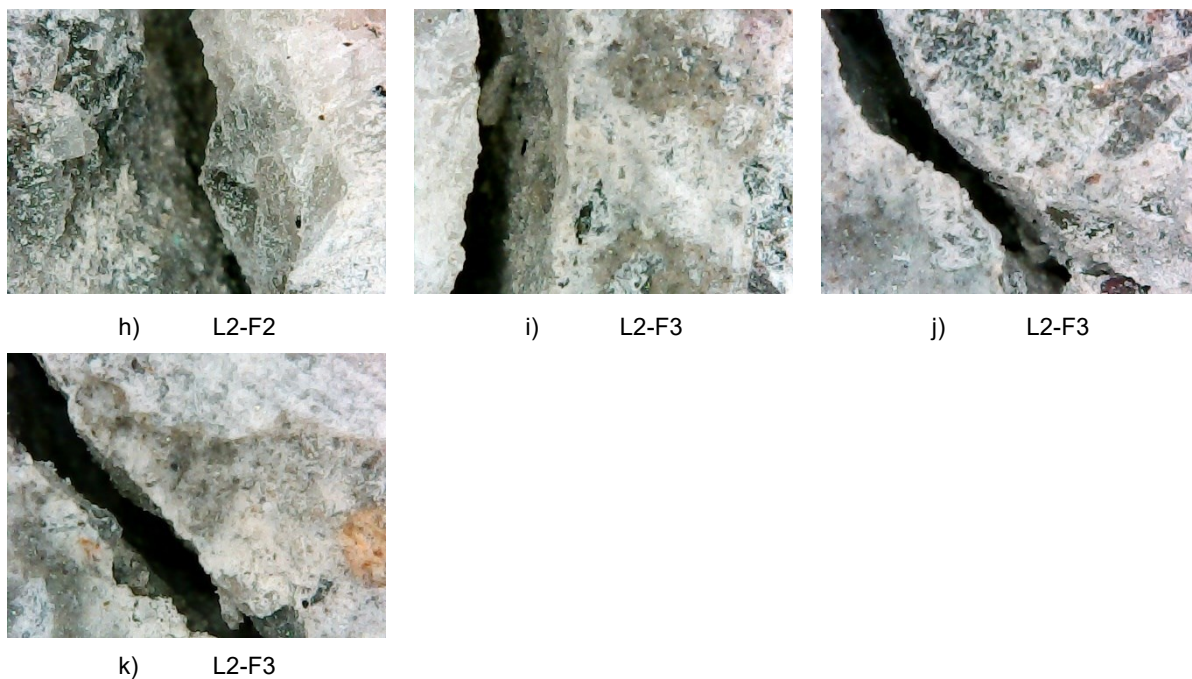


Figura 60 – Detalhamento das fissuras da amostra CC-1 aos 48 dias após a fissuração.

Fonte: Autor

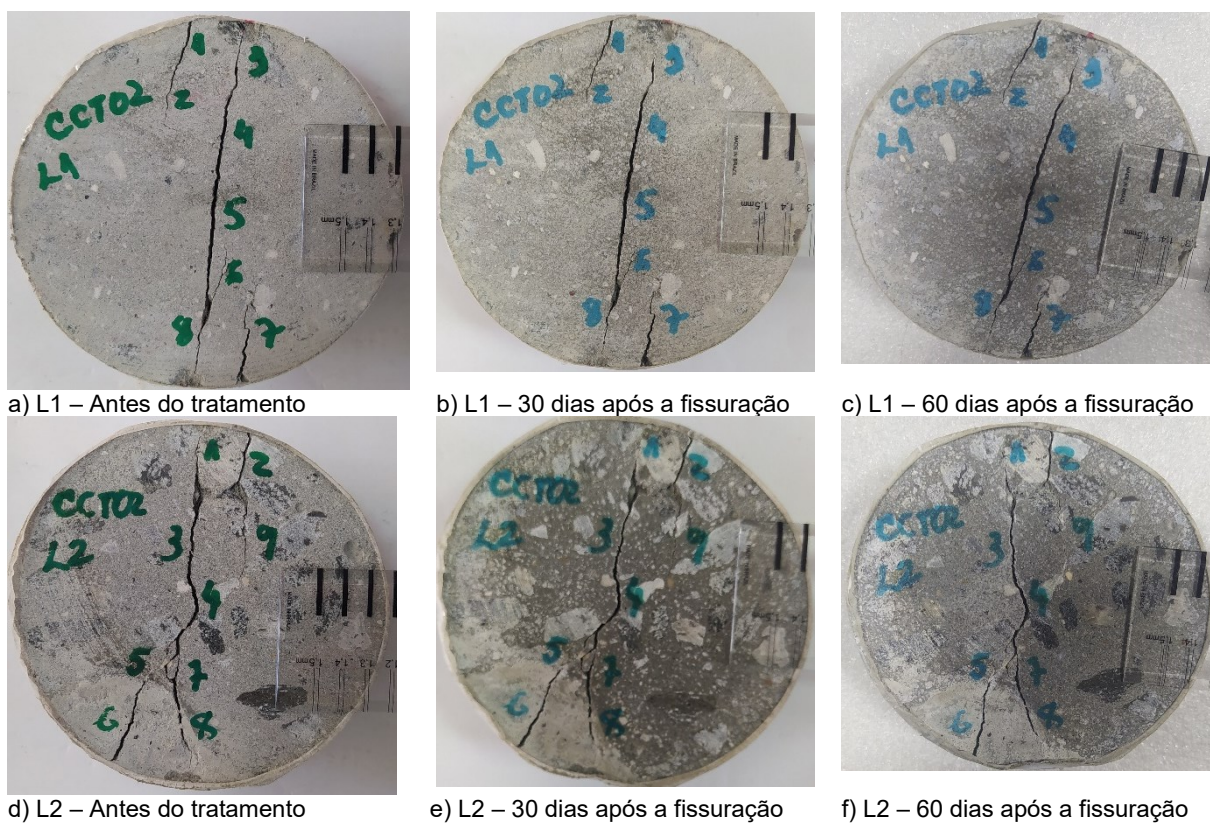
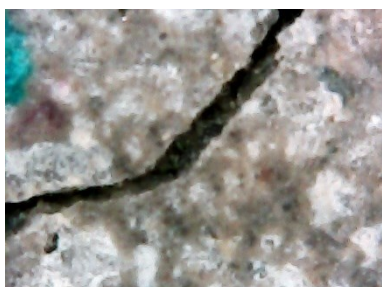


Figura 61 – Amostra CC-2

Fonte: Autor



a) L1-F1



b) L1-F2



c) L1-F3



e) L1-F4



f) L1-F5



g) L1-F6



h) L1-F7



i) L1-F8



j) L2-F1



k) L2-F2



l) L2-F3



m) L2-F4

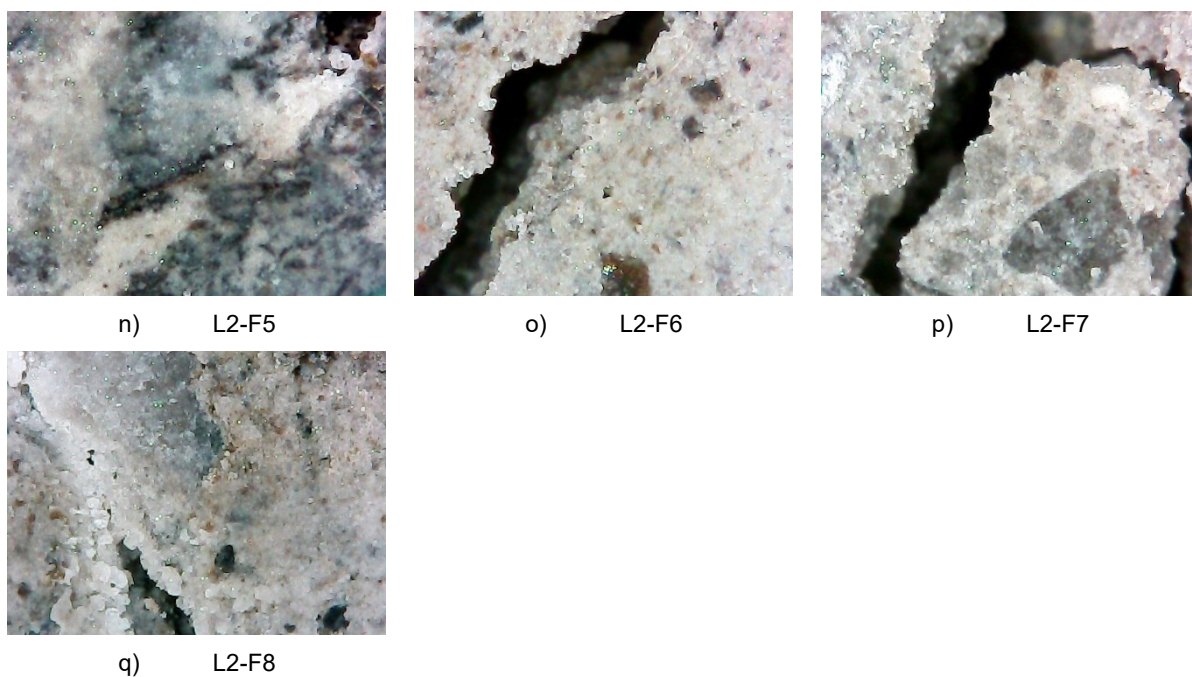


Figura 62 – Detalhamento das fissuras da amostra CC-2 aos 48 dias após a fissuração.

Fonte: Autor

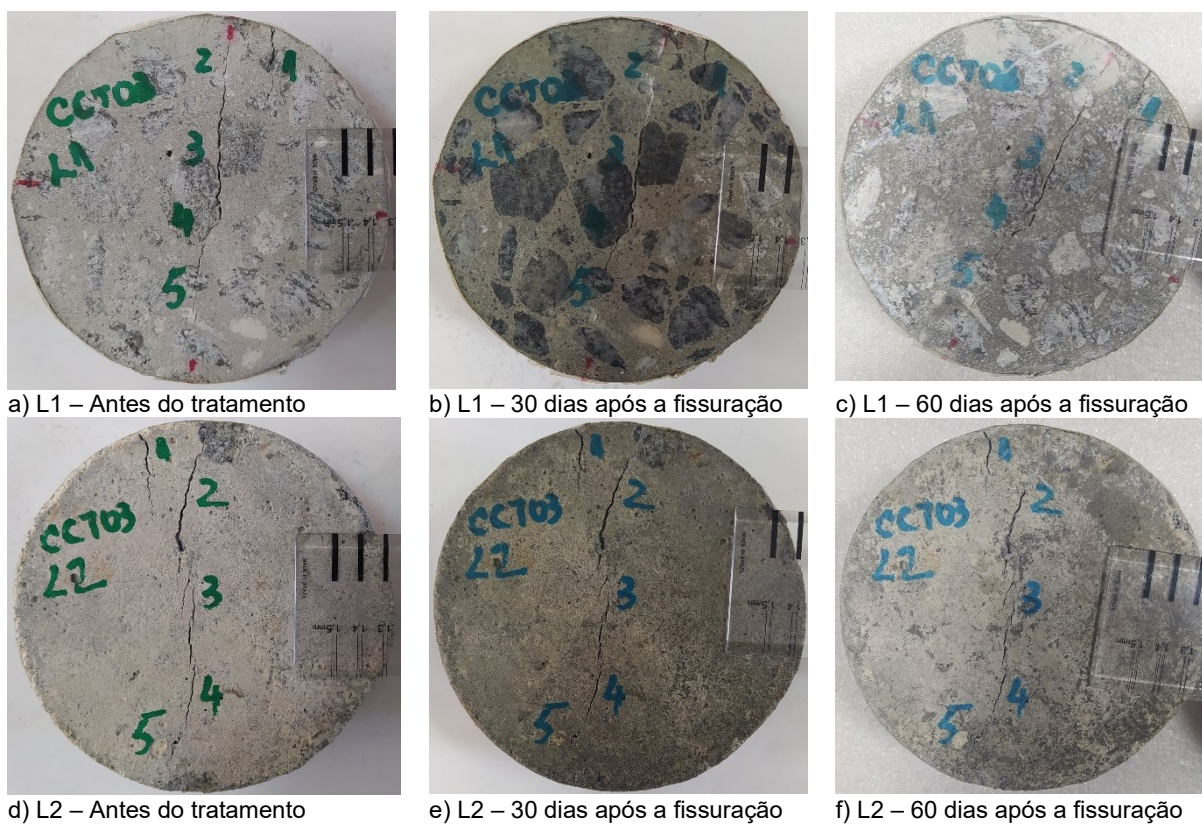


Figura 63 – Amostra CC-3.

Fonte: Autor

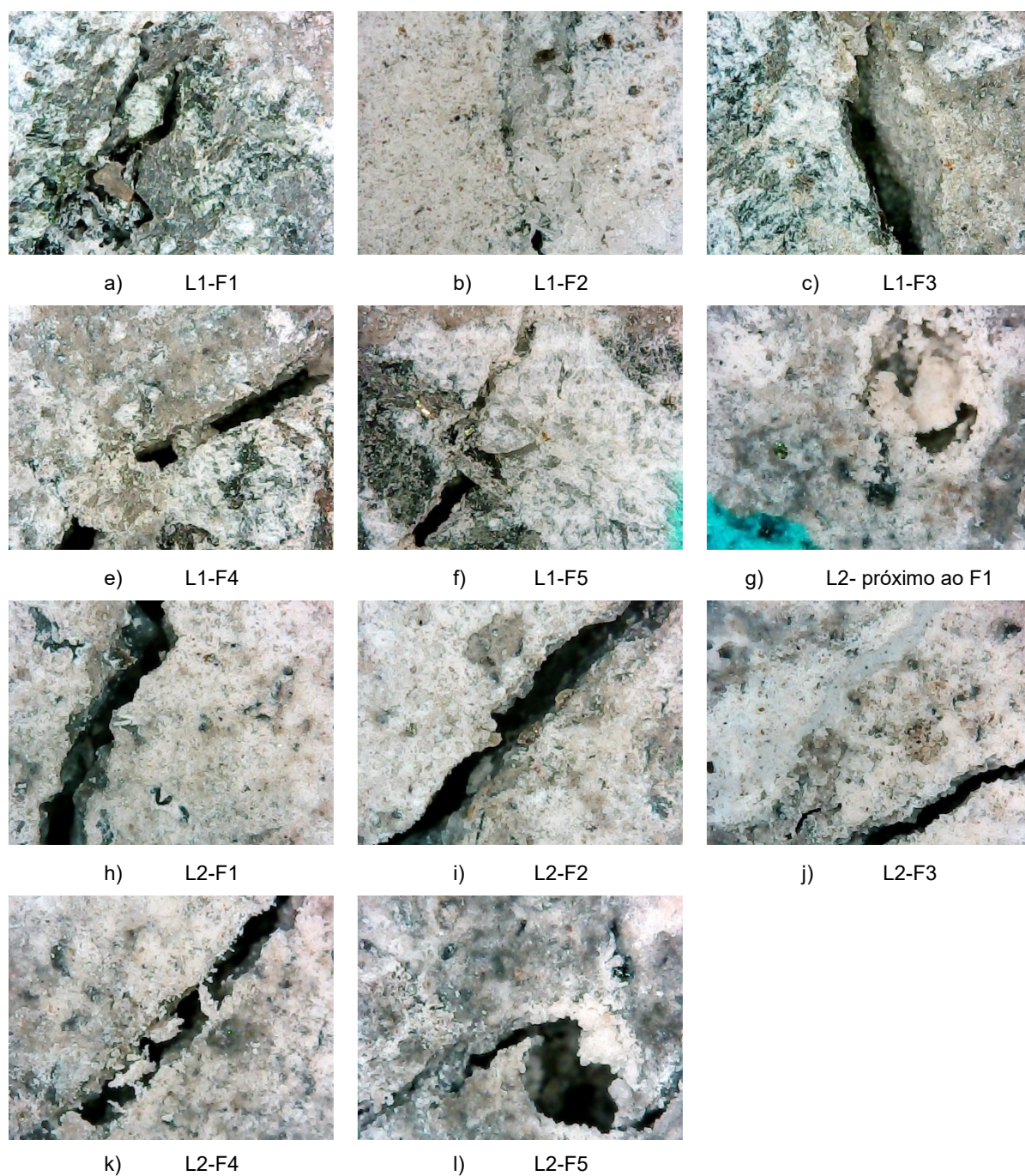


Figura 64 – Detalhamento das fissuras da amostra CC-3 aos 48 dias após a fissuração.

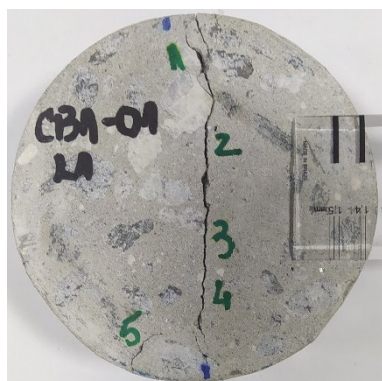
Fonte: Autor

APÊNDICE E – Tamanho das fissuras das amostras CB1.

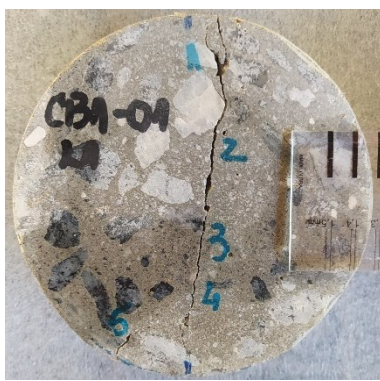
Identificação da amostra	Fissura	Tamanho (mm)
CB1-1-L1		0,22
CB1-1-L1		0,23
CB1-1-L1		0,30
CB1-1-L1	5	0,36
CB1-1-L1	4	0,64
CB1-1-L1	3	0,67
CB1-1-L1	2	0,70
CB1-1-L1	1	1,25
CB1-1-L1		1,98
CB1-1-L2		0,10
CB1-1-L2	6	0,32
CB1-1-L2		0,38
CB1-1-L2	10	0,46
CB1-1-L2	7	0,58
CB1-1-L2	9	0,62
CB1-1-L2	8	0,64
CB1-2-L1	3	0,10
CB1-2-L1	4	0,15
CB1-2-L1	2	0,21
CB1-2-L1	1	0,26
CB1-2-L1		0,41
CB1-2-L1		0,73
CB1-2-L2	5	0,16
CB1-2-L2	7	0,18
CB1-2-L2	6	0,21
CB1-2-L2	8	0,26
CB1-2-L2		0,26
CB1-3-L1		0,21
CB1-3-L1		0,26
CB1-3-L1	5	0,58
CB1-3-L1		0,62
CB1-3-L1		0,87
CB1-3-L1	3	0,88
CB1-3-L1	1	1,35
CB1-3-L1	2	1,49
CB1-3-L1	4	1,57
CB1-3-L2	7	0,18
CB1-3-L2	8	0,19
CB1-3-L2		0,19
CB1-3-L2	12	0,49
CB1-3-L2	11	0,54
CB1-3-L2	9	0,83

CB1-3-L2		0,88
CB1-3-L2	10	0,92
CB1-3-L2		2,50
CB1-3-L2		4,65
CB1-4-L1	4	0,11
CB1-4-L1	1	0,18
CB1-4-L1	2	0,23
CB1-4-L1	3	0,55
CB1-4-L1	6	0,74
CB1-4-L1	5	0,75
CB1-4-L2	8	0,11
CB1-4-L2	7	0,156
CB1-4-L2	12	0,319
CB1-4-L2	9	0,635
CB1-4-L2	11	0,657
CB1-4-L2	10	1,395

Fonte: Autor



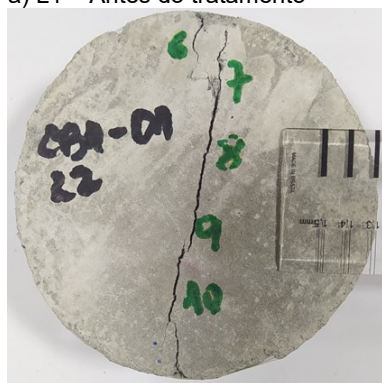
a) L1 – Antes do tratamento



b) L1 – 30 dias após a fissuração



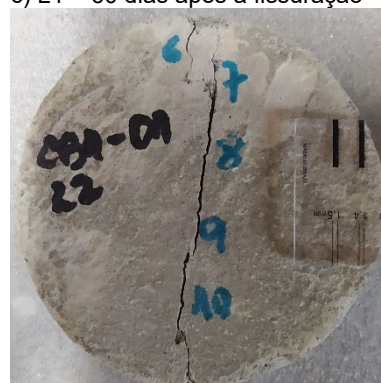
c) L1 – 60 dias após a fissuração



d) L2 – Antes do tratamento



e) L2 – 30 dias após a fissuração



f) L2 – 60 dias após a fissuração

Figura 65 – Amostra CB1-1

Fonte: Autor



a) L1-F1



b) L1-F2



c) L1-F3



d) L1-F4



e) L1-F5



f) L1-F6

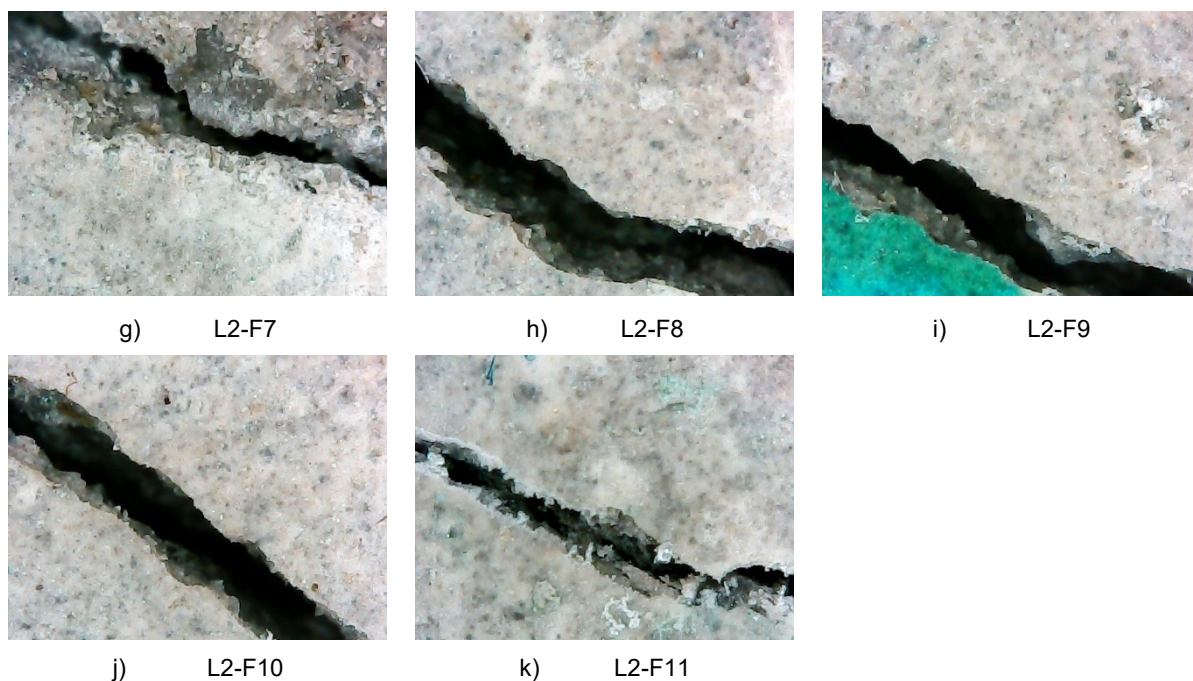


Figura 66 – Detalhamento das fissuras da amostra CB1-1 aos 31 dias após a fissuração.

Fonte: Autor

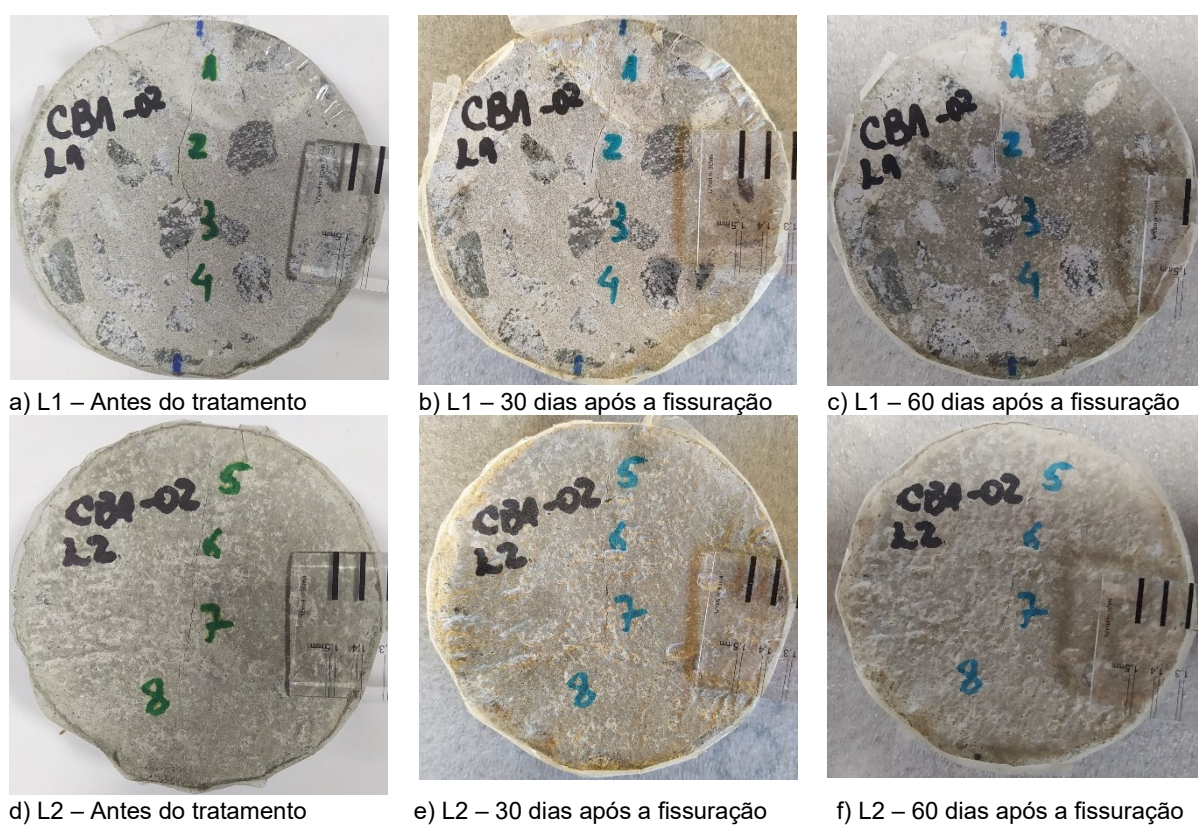


Figura 67 – Amostra CB1-2.

Fonte: Autor

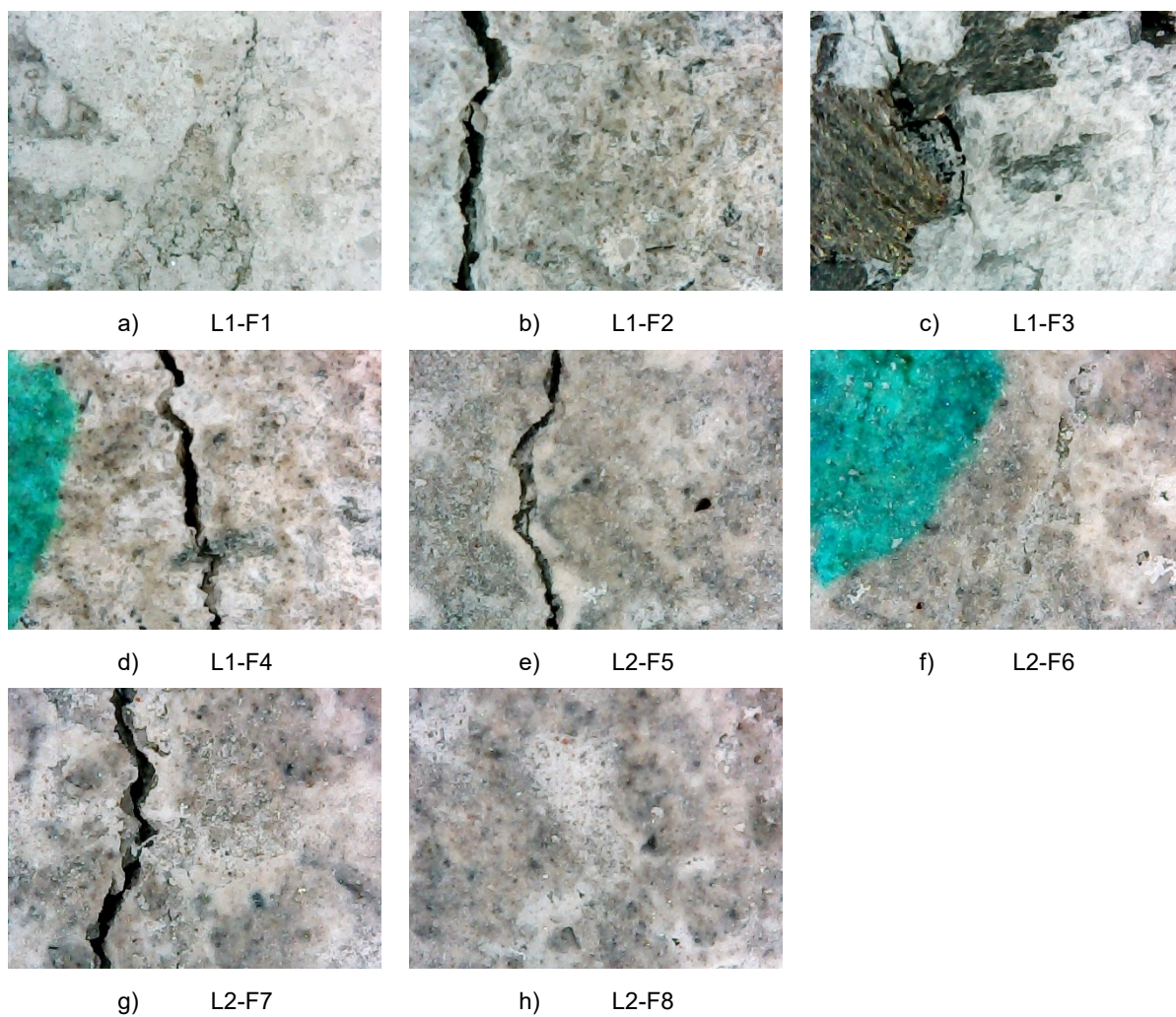


Figura 68 – Detalhamento das fissuras da amostra CB1-2 aos 31 dias após a fissuração.

Fonte: Autor





d) L2 – Antes do tratamento



e) L2 – 30 dias após a fissuração



f) L2 – 60 dias após a fissuração

Figura 69 – Amostra CB1-3.

Fonte: Autor



a) L1-F1



b) L1-F2



c) L1-F3



d) L1-F4



e) L1-F5



f) L1-F6



g) L2-F7



h) L2-F8



i) L2-F9

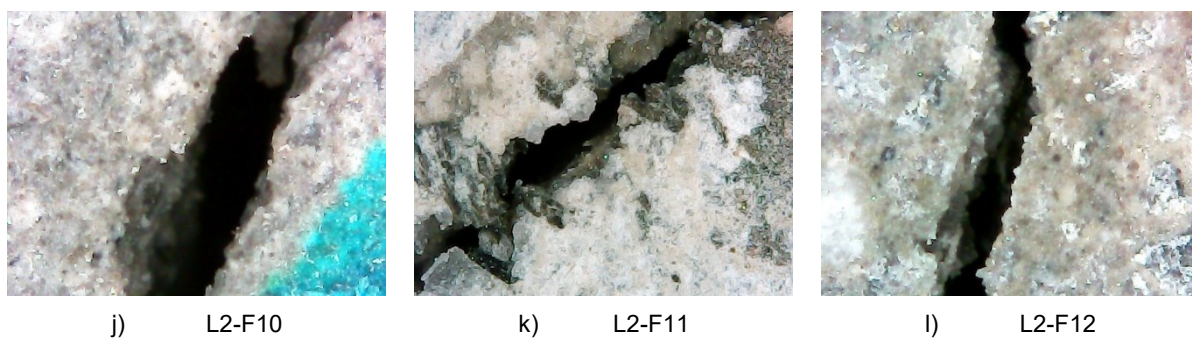


Figura 70 – Detalhamento das fissuras da amostra CB1-3 aos 31 dias após a fissuração.

Fonte: Autor

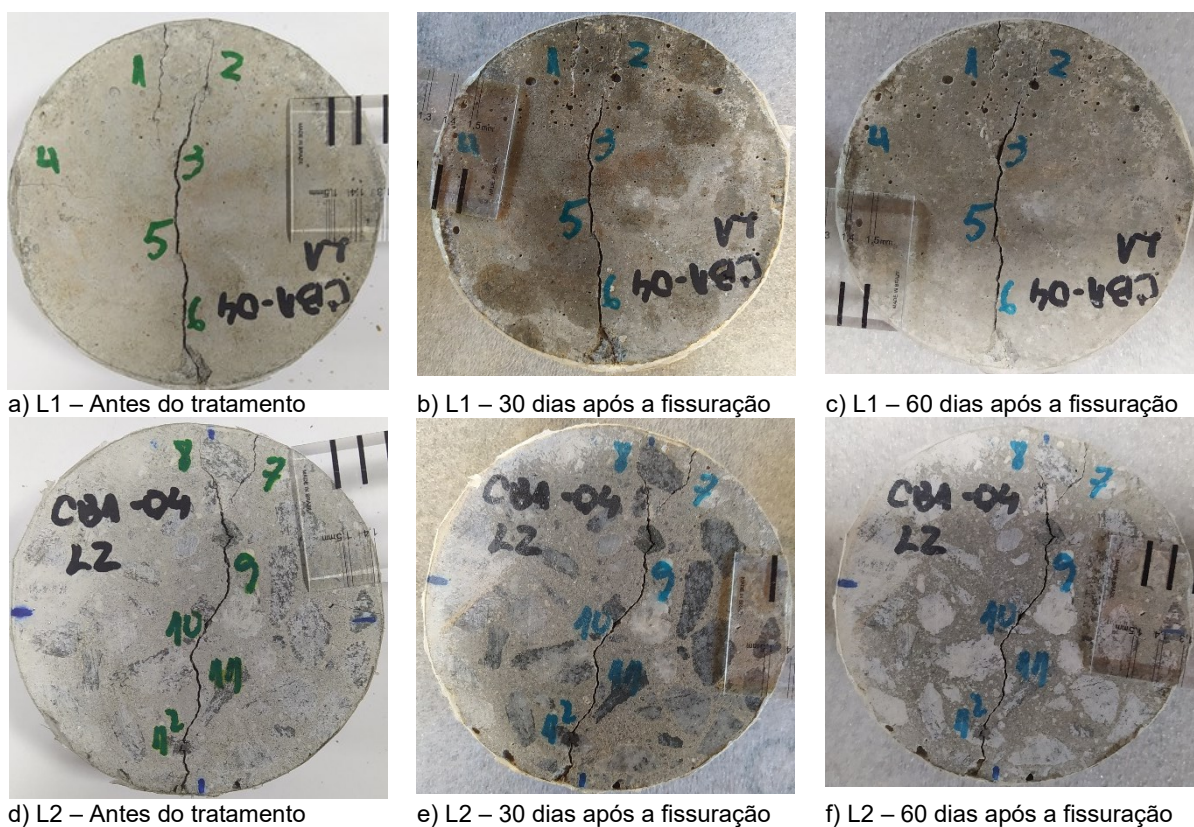


Figura 71 – Amostra CB1-4.

Fonte: Autor

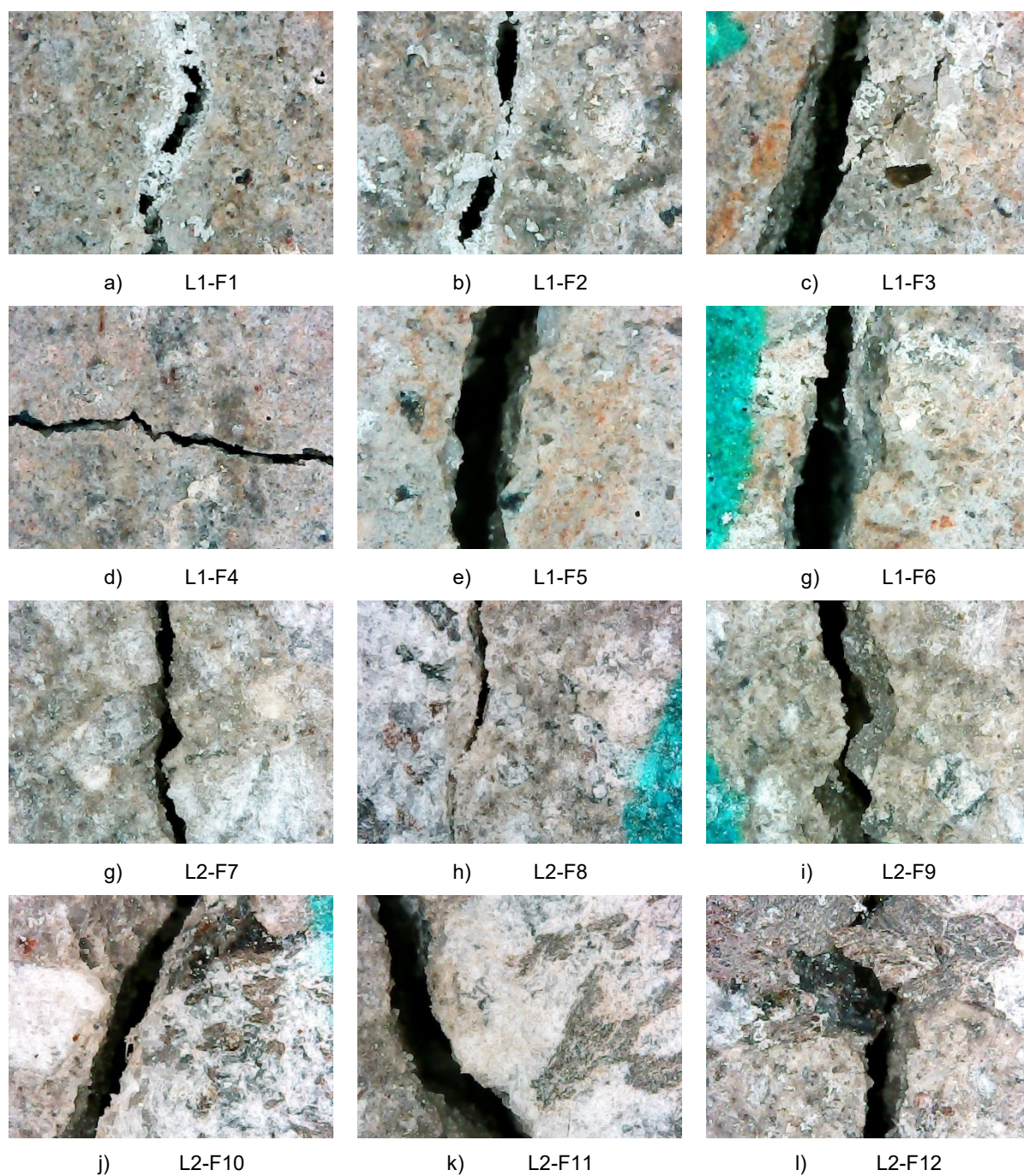


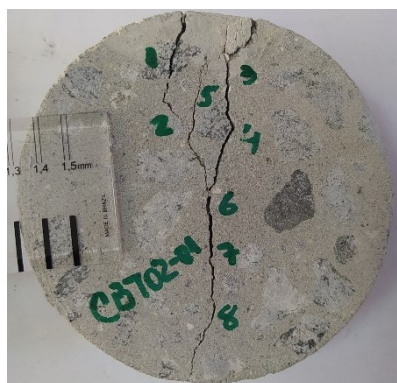
Figura 72 – Detalhamento das fissuras da amostra CB1-4 aos 31 dias após a fissuração.

Fonte: Autor

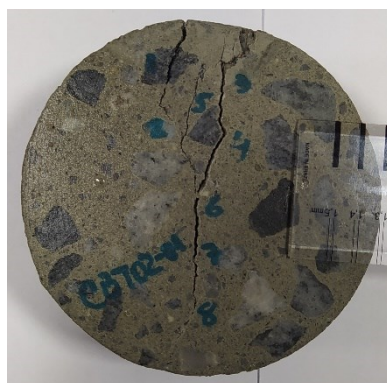
APÊNDICE F - Tamanho das fissuras das amostras CB2.

Identificação da amostra	Fissura	Tamanho (mm)
CB2-1-L1	2	0,15
CB2-1-L1	5	0,28
CB2-1-L1	8	0,46
CB2-1-L1	1	0,59
CB2-1-L1	3	0,65
CB2-1-L1	7	0,69
CB2-1-L1	4	0,83
CB2-1-L1	6	0,87
CB2-1-L2	12	0,42
CB2-1-L2	11	1,03
CB2-1-L2	10	1,46
CB2-1-L2	9	2,85
CB2-2-L1	1	0,29
CB2-2-L1	2	0,59
CB2-2-L1	4	0,68
CB2-2-L1	3	0,69
CB2-2-L2	1	0,25
CB2-2-L2	2	0,41
CB2-2-L2	3	1,12
CB2-3-L1	4	0,15
CB2-3-L1	3	0,26
CB2-3-L1	2	0,58
CB2-3-L1	1	0,75
CB2-3-L2	4	0,21
CB2-3-L2	3	0,33
CB2-3-L2	2	0,36
CB2-3-L2	1	0,47
CB2-3-L2		0,50
CB2-3-L2	5	1,26
CB2-4-L1	1	0,23
CB2-4-L1	4	0,30
CB2-4-L1	3	0,31
CB2-4-L1	2	0,70
CB2-4-L2	5	0,14
CB2-4-L2	1	0,28
CB2-4-L2	3	0,33
CB2-4-L2	2	0,37
CB2-4-L2	4	2,59

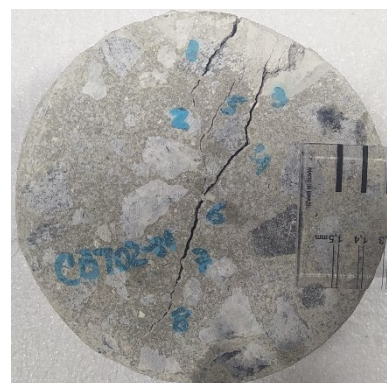
Fonte: Autor



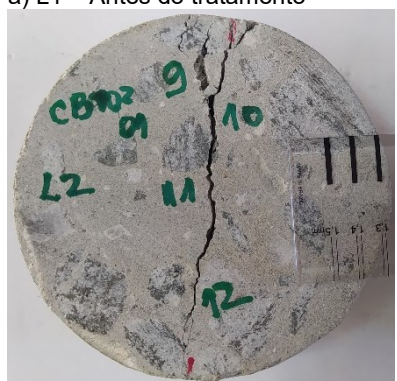
a) L1 – Antes do tratamento



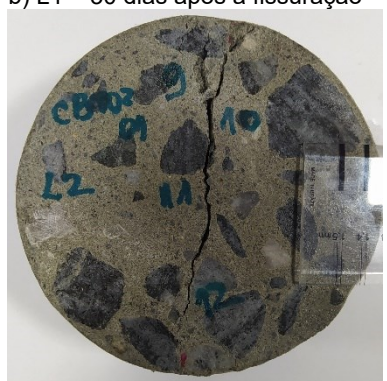
b) L1 – 30 dias após a fissuração



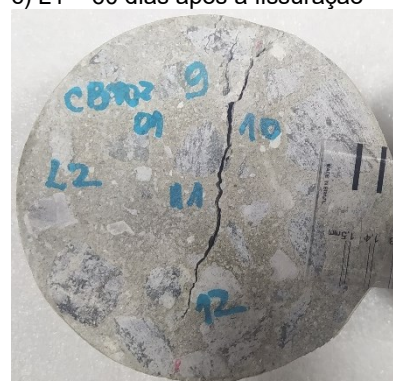
c) L1 – 60 dias após a fissuração



d) L2 – Antes do tratamento



e) L2 – 30 dias após a fissuração



f) L2 – 60 dias após a fissuração

Figura 73 – Amostra CB2-1.

Fonte: Autor



a) L1-F1



b) L1-F2



c) L1-F3



d) L1-F4



e) L1-F5



f) L1-F6

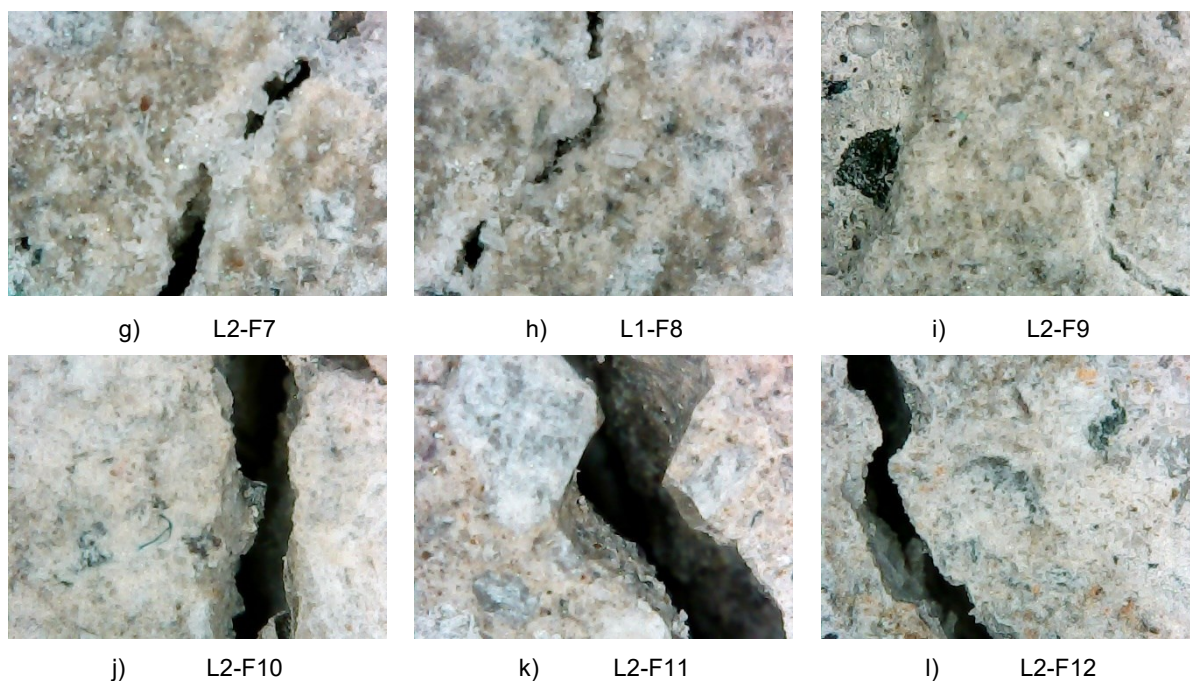


Figura 74 – Detalhamento das fissuras da amostra CB2-01 aos 43 dias após a fissuração.

Fonte: Autor

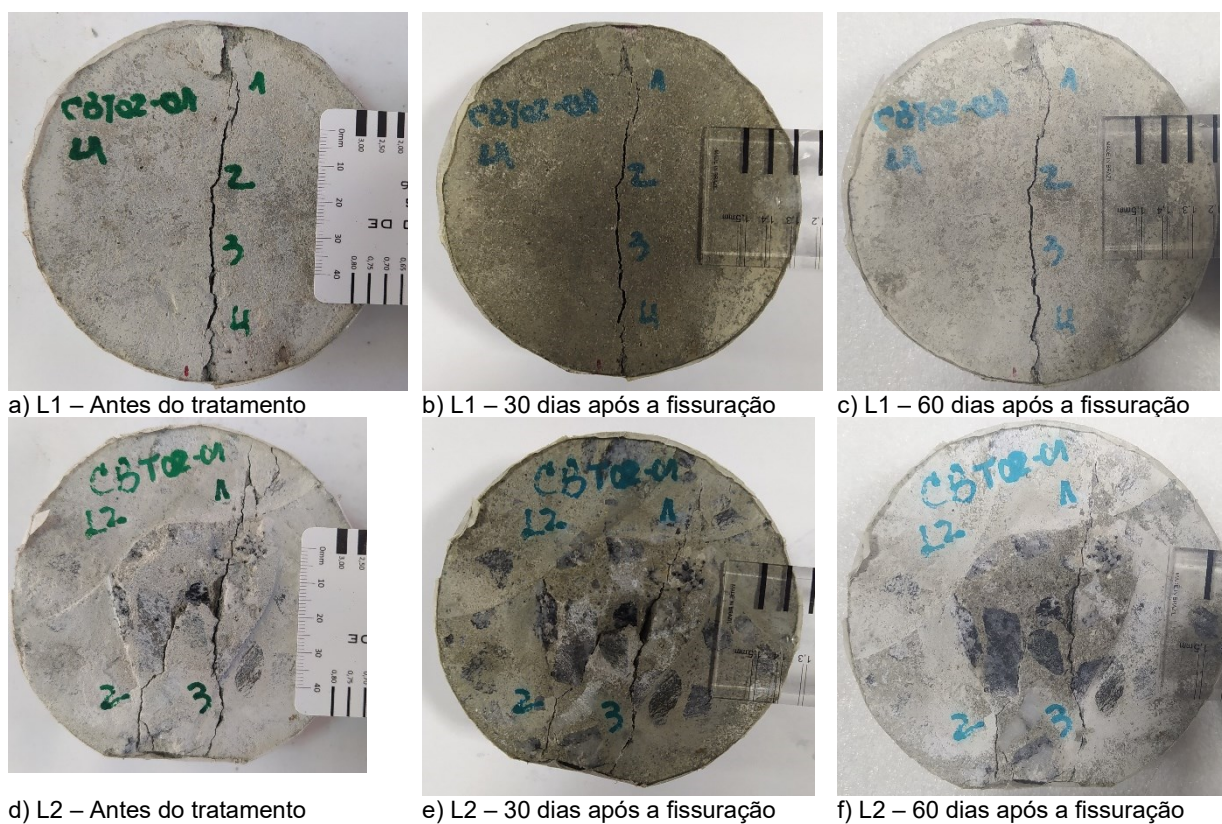


Figura 75 - Amostra CB2-2.

Fonte: Autor

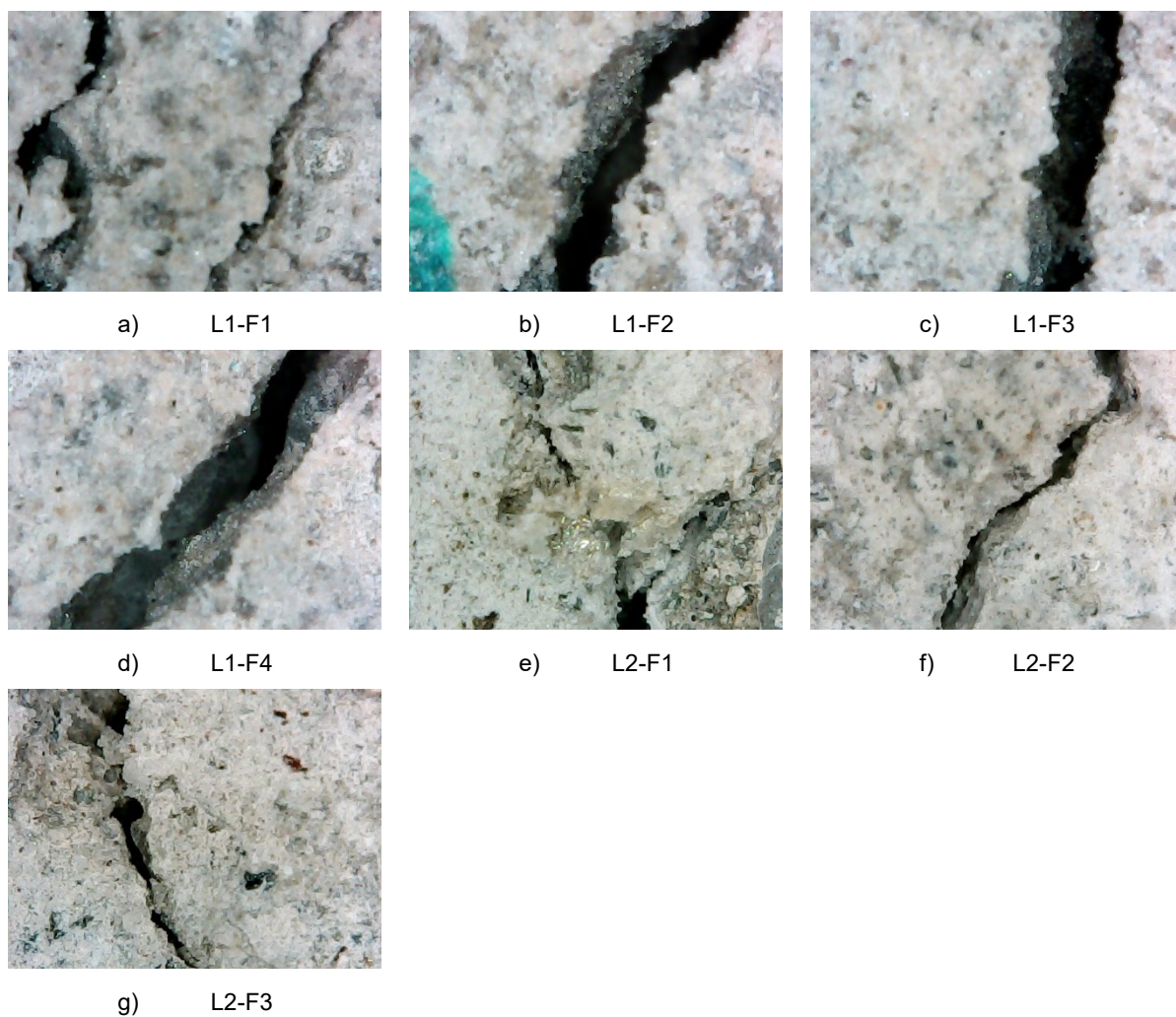
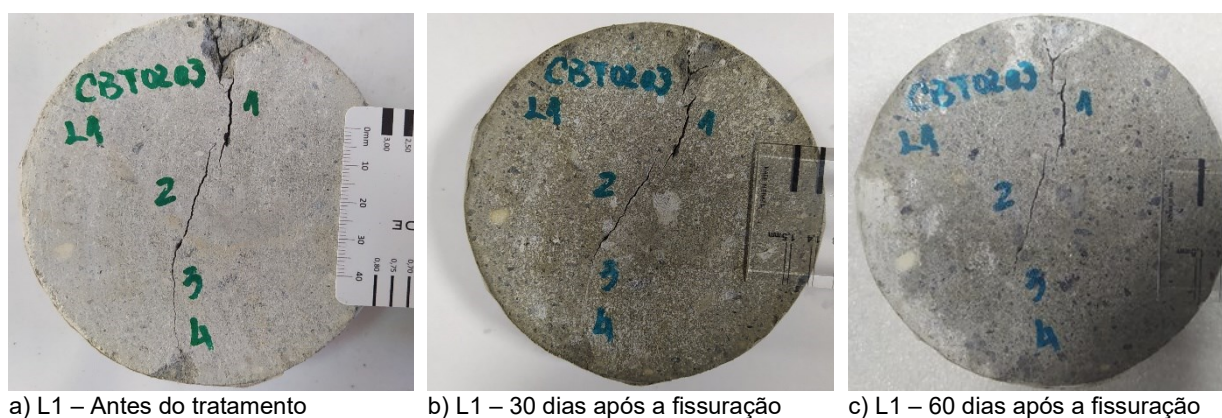
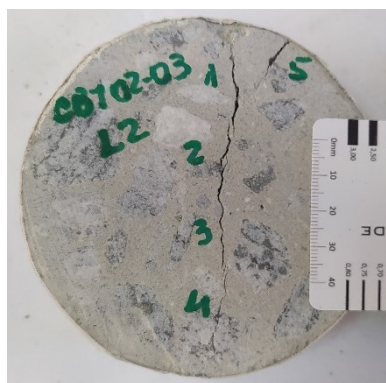


Figura 76 – Detalhamento das fissuras da amostra CB2-2 aos 43 dias após a fissuração.

Fonte: Autor





d) L2 – Antes do tratamento



e) L2 – 30 dias após a fissuração



f) L2 – 60 dias após a fissuração

Figura 77 – Amostra CB2-3.



a) L1-F1



b) L1-F2



c) L1-F3



d) L1-F4



e) L2-F1



f) L2-F2



g) L2-F3



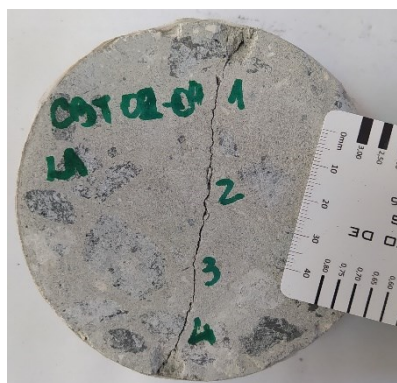
h) L2-F4



i) L2-F5

Figura 78 – Detalhamento das fissuras da amostra CB2-3 aos 43 dias após a fissuração.

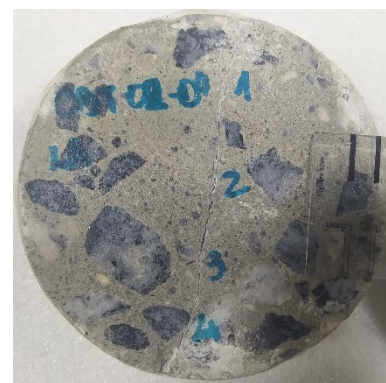
Fonte: Autor



a) L1 – Antes do tratamento



b) L1 – 30 dias após a fissuração



c) L1 – 60 dias após a fissuração



d) L2 – Antes do tratamento



e) L2 – 30 dias após a fissuração



f) L2 – 60 dias após a fissuração

Figura 79 – Amostra CB2-4.

Fonte: Autor



a) L1-F1



b) L1-F2



c) L1-F3



d) L1-F4



e) L2-F1



f) L2-F2



g) L2-F3

h) L2-F4

i) L2-F5

Figura 80 – Detalhamento das fissuras da amostra CB2-4 aos 43 dias após a fissuração.

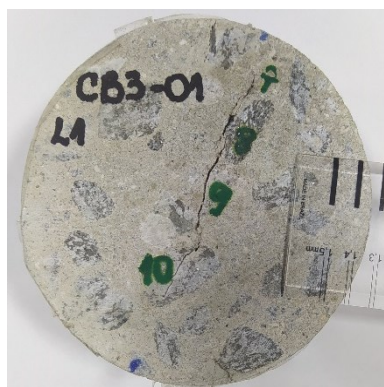
Fonte: Autor

APÊNDICE G – Tamanho das fissuras das amostras CB3.

Identificação da amostra	Fissura	Tamanho (mm)
CB3-1-L1		0,13
CB3-1-L1	10	0,22
CB3-1-L1	7	0,42
CB3-1-L1	9	0,52
CB3-1-L1		0,94
CB3-1-L1	8	1,96
CB3-1-L2	1	0,10
CB3-1-L2		0,22
CB3-1-L2	4	0,24
CB3-1-L2		0,25
CB3-1-L2		0,28
CB3-1-L2	2	0,50
CB3-1-L2	3	0,62
CB3-1-L2	6	0,82
CB3-1-L2	5	1,36
CB3-2-L1	6	0,11
CB3-2-L1	5	0,21
CB3-2-L1		0,25
CB3-2-L1	2	0,36
CB3-2-L1	1	0,37
CB3-2-L1		0,42
CB3-2-L1	4	0,57
CB3-2-L1	3	2,09
CB3-2-L2	12	0,11
CB3-2-L2	8	0,15
CB3-2-L2	11	0,20
CB3-2-L2	7	0,26
CB3-2-L2	9	0,35
CB3-2-L2	10	0,42
CB3-2-L2		5,98
CB3-3-L1	4	0,16
CB3-3-L1	5	0,18
CB3-3-L1	1	0,20
CB3-3-L1	3	0,30
CB3-3-L1	2	0,57
CB3-3-L1		1,24
CB3-3-L2	7	0,22
CB3-3-L2	9	0,22
CB3-3-L2	6	0,27
CB3-3-L2	10	0,28
CB3-3-L2	8	0,32
CB3-4-L1	5	0,25
CB3-4-L1	3	0,26

CB3-4-L1	1	0,30
CB3-4-L1	4	0,31
CB3-4-L1	2	0,85
CB3-4-L1		1,14
CB3-4-L2	6	0,13
CB3-4-L2	8	0,56
CB3-4-L2	10	0,57
CB3-4-L2	9	0,88
CB3-4-L2	7	0,95

Fonte: Autor



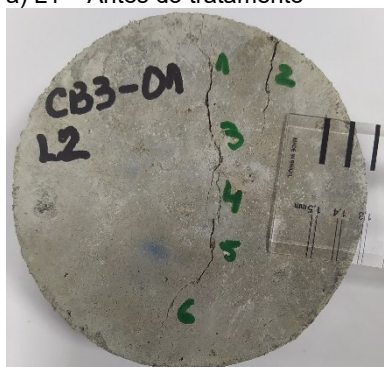
a) L1 – Antes do tratamento



b) L1 – 30 dias após a fissuração



c) L1 – 60 dias após a fissuração



d) L2 – Antes do tratamento



e) L2 – 30 dias após a fissuração



f) L2 – 60 dias após a fissuração

Figura 81 – Amostra CB3-1

Fonte: Autor



a) L1-F7



b) L1-F8



c) L1-F9



d) L1-F10



e) L2-F1



f) L2-F2

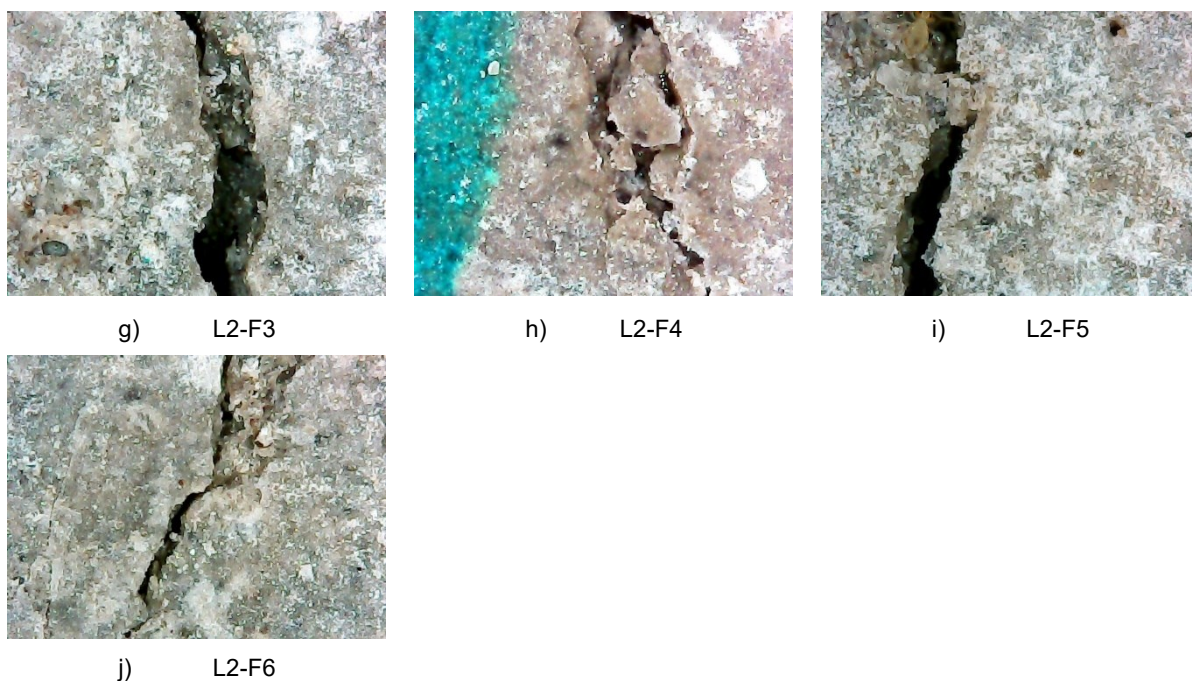


Figura 82 – Detalhamento das fissuras da amostra CB3-1 aos 31 dias após a fissuração.

Fonte: Autor

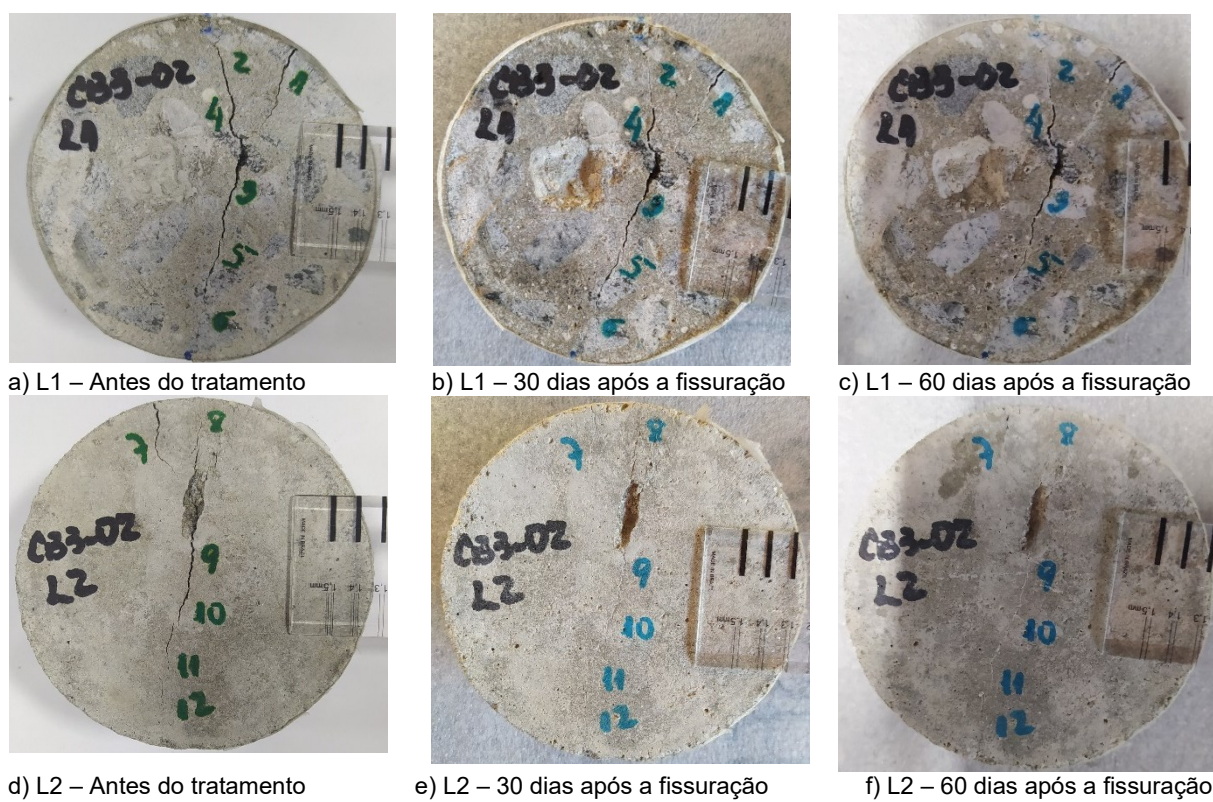


Figura 83 – Amostra CB3-2.

Fonte: Autor

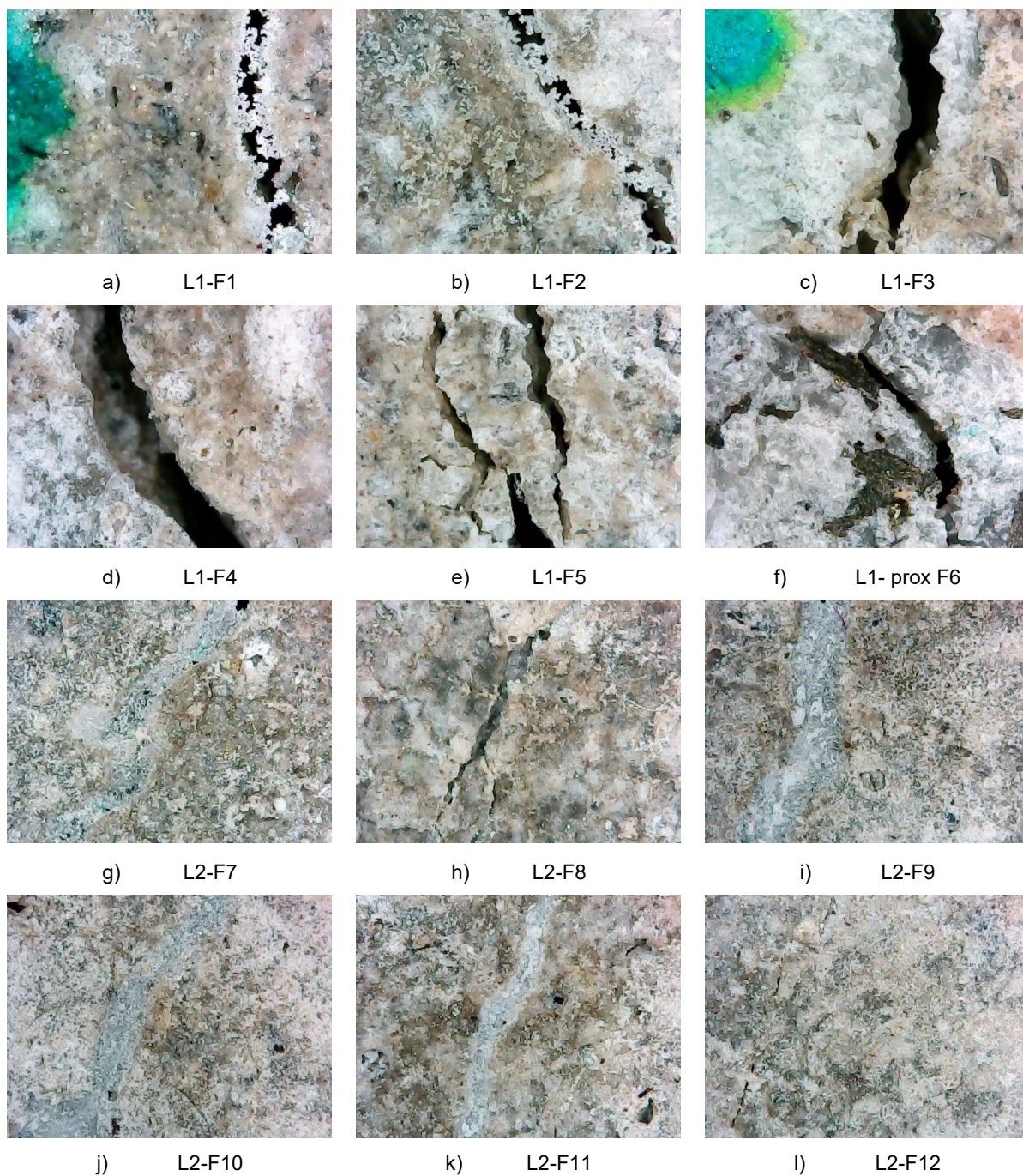


Figura 84 – Detalhamento das fissuras da amostra CB3-2 aos 31 dias após a fissuração.

Fonte: Autor



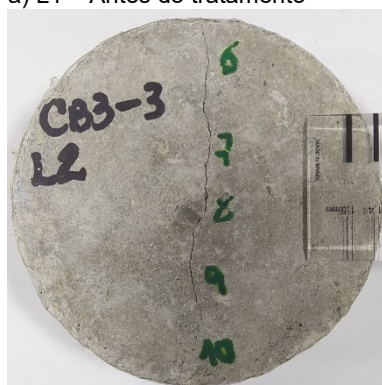
a) L1 – Antes do tratamento



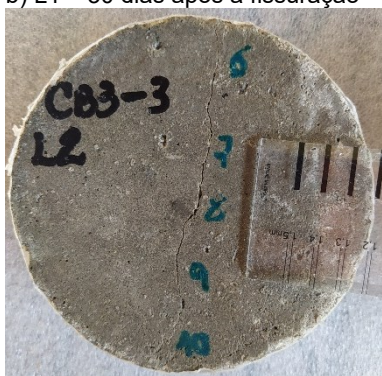
b) L1 – 30 dias após a fissuração



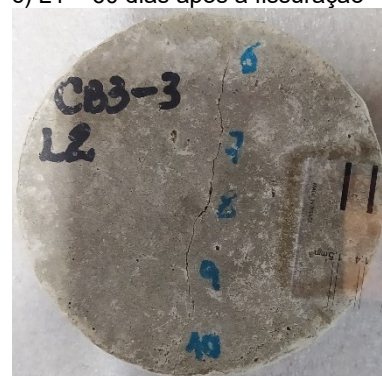
c) L1 – 60 dias após a fissuração



d) L2 – Antes do tratamento



e) L2 – 30 dias após a fissuração



f) L2 – 60 dias após a fissuração

Figura 85 – Amostra CB3-3.

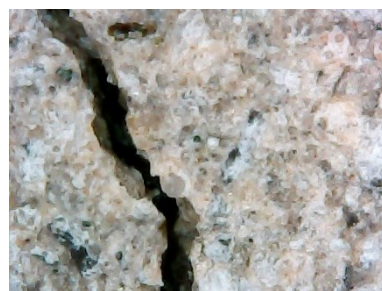
Fonte: Autor



a) L1-F1



b) L1-F2



c) L1-F3



d) L1-F4



e) L1-F5



f) L1-F6

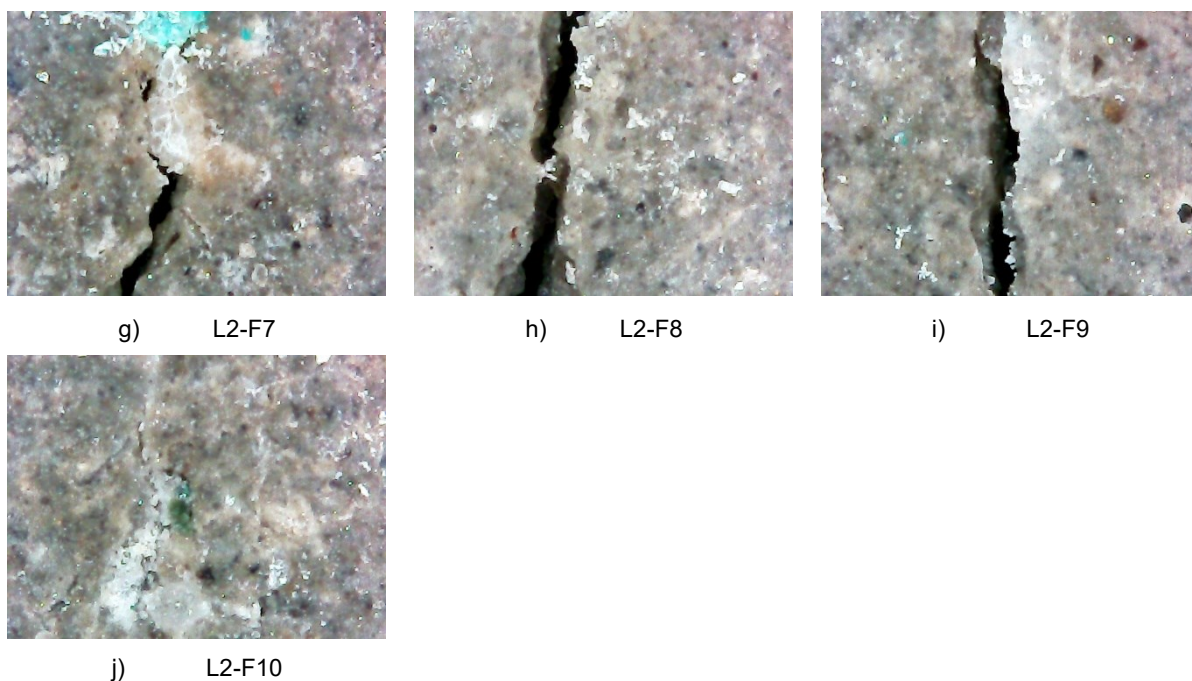


Figura 86 – Detalhamento das fissuras da amostra CB3-3 aos 31 dias após a fissuração.

Fonte: Autor

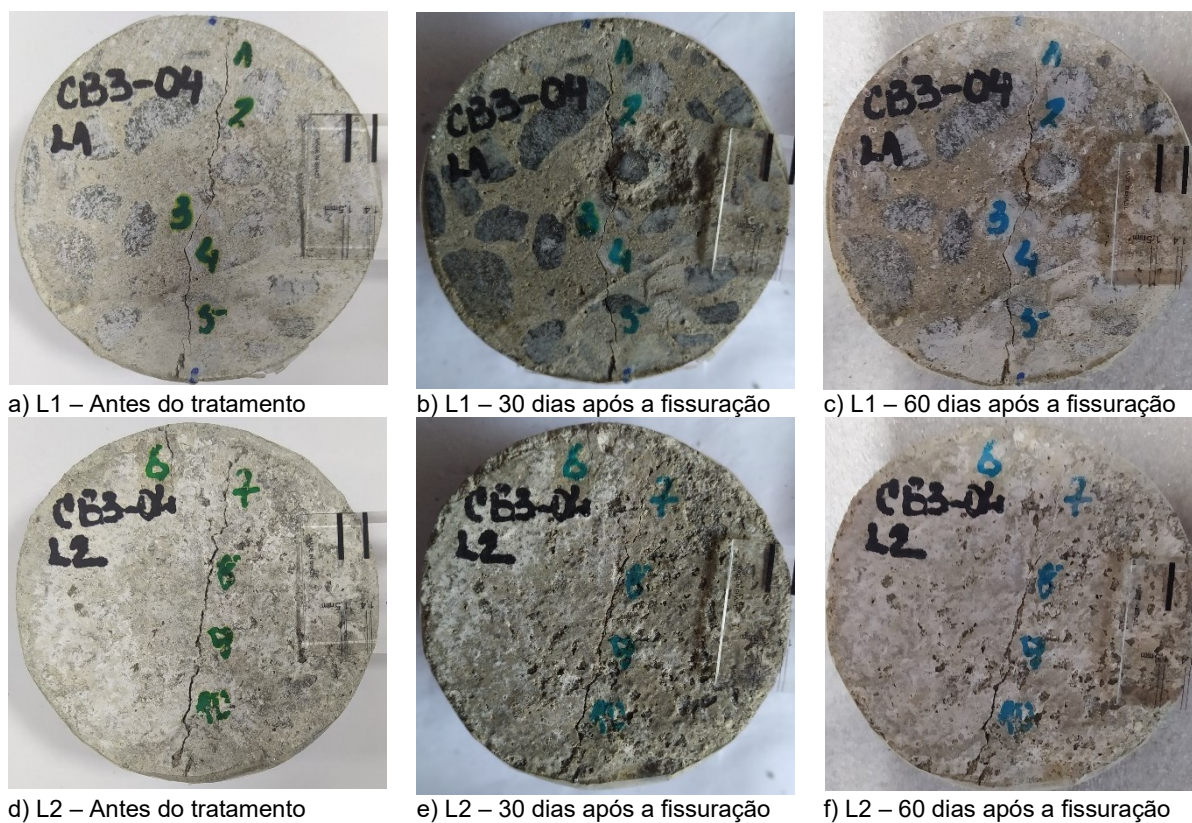


Figura 87 – Amostra CB3-4.

Fonte: Autor

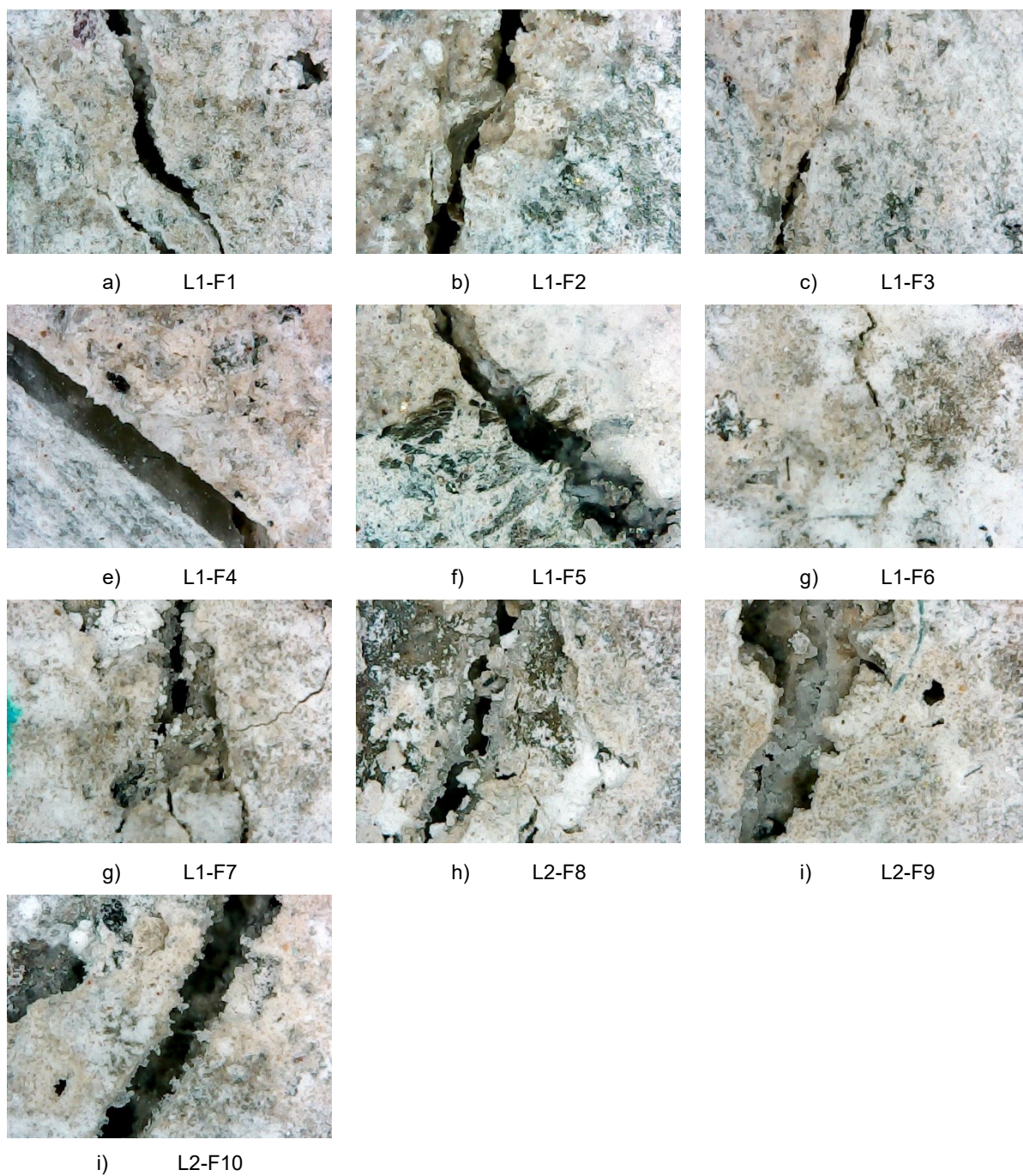


Figura 88 – Detalhamento das fissuras da amostra CB3-4 aos 31 dias após a fissuração.

Fonte: Autor