

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Yasmin Waffá Tamimi

**AVALIAÇÃO DA AUTOCICATRIZAÇÃO OCASIONADA
POR DIFERENTES AGENTES NO CONCRETO**

Porto Alegre
Novembro de 2021

YASMIN WAFFÁ TAMIMI

**AVALIAÇÃO DA AUTOCICATRIZAÇÃO OCASIONADA
POR DIFERENTES AGENTES NO CONCRETO**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheira Civil

Orientadora: Angela Borges Masuero
Orientadora: Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Coorientador: Deividi Maurenre Gomes da Silva

Porto Alegre
Novembro de 2021

YASMIN WAFFÁ TAMIMI

**AVALIAÇÃO DA AUTOCICATRIZAÇÃO OCASIONADA
POR DIFERENTES AGENTES NO CONCRETO**

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

Porto Alegre, novembro de 2021

BANCA EXAMINADORA

Profa. Angela Borges Masuero (UFRGS)

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

Profa. Denise Carpena Coitinho Dal Molin (UFRGS)

Dra. pela Universidade de São Paulo, Brasil
Orientadora

Deividi Maurenre Gomes da Silva (UFRGS)

Me. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil
Coorientador

Vanessa Giaretton Cappelleso (UGent/Bélgica)

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

Josué Augusto Arndt

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

Dedico este trabalho a meus pais, Adel e Valdete, e aos meus irmãos, Camila e Amir, pelo carinho, pelo apoio e pelo incentivo que sempre me deram.

AGRADECIMENTOS

Agradeço às professoras Angela Masuero e Denise Dal Molin pela orientação (tanto neste trabalho quanto nos trabalhos enquanto bolsista de IC) e pelos ensinamentos passados. Vocês são exemplos pra mim de engenheiras, de pesquisadoras e de mulheres. Vocês me inspiram a querer dar o meu melhor, sempre. É muito gratificante para mim ter como orientadoras duas mulheres tão incríveis.

Aos integrantes do grupo de autocatenação LAMTAC/NORIE/UFRGS, do qual fui bolsista de IC, por serem os responsáveis por me despertar o interesse no assunto. Vanessa, Natália, Josué e Deividi: foi a dedicação e o empenho de vocês que fez com que eu me apaixonasse pelo assunto. Ao Deividi, um agradecimento especial pela coorientação neste trabalho, pela ajuda em todas as etapas e pela amizade.

Aos laboratoristas Airton e Ari, por estarem sempre dispostos a auxiliar, pelos momentos de descontração proporcionados, e pela preocupação comigo em dias de muito vento.

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

A todos do laboratório que de alguma forma auxiliaram, seja diretamente na pesquisa, ou indiretamente pelo convívio e por manter um ambiente leve. Em especial ao Henrique, pela companhia nos momentos em que precisei e por toda a ajuda prestada, sem a qual o trabalho não teria se concretizado.

Ao CBiot, pela parceria e pelo fornecimento do material e do conhecimento que não possuíamos, e sem os quais este trabalho não seria possível. Em especial ao João, por todos os auxílios prestados, pela companhia nos diversos momentos e pela amizade que se formou.

À minha família, pelo apoio e por sempre esperarem o melhor de mim. Isso foi a motivação que me impulsionou em muitos momentos dessa minha caminhada. Em especial aos meus pais, Adel e Valdete, e aos meus irmãos, Camila e Amir. Não tenho como expressar a gratidão que eu tenho por todo apoio dado em todos esses anos de curso, especialmente nesse 2021, que acredito ter sido o ano mais difícil que passamos. Mesmo com todas as dificuldades, e mesmo quando a base de vocês não estava 100%, vocês foram, sempre, a minha.

Aos amigos que trago da vida toda, pelo incentivo e pela amizade.

Aos amigos que fui fazendo ao longo dessa extensa trajetória: colegas de aula, de laboratório, de bateria. Não teria sido possível passar por tantos momentos estressantes sem vocês, assim como as comemorações dos momentos bons não teriam sido as mesmas. A UFRGS só tem a importância que ela tem pra mim e esse lugar especial no meu coração por conta de vocês.

Aos professores que tive, não só na UFRGS, mas na vida, porque vocês são os responsáveis por me conduzirem até aqui, por fazerem de mim o que sou hoje.

Por fim, agradeço ao universo por colocar tantas pessoas legais no meu caminho. Se consegui chegar até aqui, foi por ter todas essas pessoas especiais na minha volta.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características químicas e físicas do cimento	4
Tabela 2: Caracterização física do agregado graúdo	5
Tabela 3: Caracterização física da areia	6
Tabela 4: Composição química da argila expandida	6
Tabela 5: Características do aditivo superplastificante	7
Tabela 6: Traços dos concretos, em massa.....	8
Tabela 7: Características da moldagem	9
Tabela 8: Resistências médias e percentual do aumento da resistência em relação ao REF, para as idades de 3 e 28 dias	15
Tabela 9: ANOVA dos resultados de resistência à compressão.....	15
Tabela 10: Percentuais de integridade	16

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Linha do tempo dos ensaios realizados.....	8
Figura 2: Esquema de moldagem	10
Figura 3: Fatiamento das amostras	11
Figura 4: Aparato para abertura de fissuras.....	11
Figura 5: Marcações na amostra para microscopia	13
Figura 6: Resistência à compressão aos 3 e aos 28 dias.....	14
Figura 7: Velocidade de onda ultrassônica.....	16
Figura 8: Área de fissura de cada amostra, em mm ² , onde (a) BIO, (b) C, (c) SA, (d) REF, (e) média dos traços, (f) percentual médio de recuperação	17
Figura 9: Deposição de cristais na amostra BIO7 aos 7 dias (a), 21 dias (b) e 28 dias (c)	19
Figura 10: Formações de cristais fora do plano da fissura (a) amostra BIO13 aos 21 dias, (b) amostra BIO9 aos 21 dias, (c) aproximação de cristais da amostra BIO13 aos 21 dias, (d) aproximação no microscópio do topo de uma das formações de cristais tubulares da amostra BIO8 aos 14 dias.....	20
Figura 11: Porção 6 da amostra REF3 aos 21 dias, antes (a) e depois (b) da remoção dos cristais muito grandes.....	21
Figura 12: Amostra BIO5 aos 0 dias imagem original (a), aos 0 dias imagem tratada (b), aos 28 dias imagem original (c), e aos 28 dias imagem tratada (d), com 95% da área de fissura fechada.....	22
Figura 13: Amostra C3 aos 0 dias imagem original (a), aos 0 dias imagem tratada (b), aos 28 dias imagem original (c), e aos 28 dias imagem tratada (d), com 86% da área de fissura fechada	23
Figura 14: Amostra R2 aos 0 dias imagem original (a), aos 0 dias imagem tratada (b), aos 28 dias imagem original (c), e aos 28 dias imagem tratada (d), com 68% da área de fissura fechada	24
Figura 15: Amostra SA3 aos 0 dias imagem original (a), aos 0 dias imagem tratada (b), aos 28 dias imagem original (c), e aos 28 dias imagem tratada (d), com 86% da área de fissura fechada	25

SUMÁRIO

RESUMO	1
ABSTRACT	1
1 INTRODUÇÃO	2
1.1 Revisão Bibliográfica.....	2
1.2 Objetivo.....	4
2 MATERIAIS	4
2.1 Cimento	4
2.2 Agregado graúdo	5
2.3 Agregado miúdo.....	6
2.4 Argila expandida	6
2.5 Aditivo superplastificante	7
2.6 Sílica ativa.....	7
2.7 Aditivo cristalizante	7
2.8 Água	7
2.9 Solução de Bactérias	7
2.10 Fonte de carbono.....	8
3 MÉTODOS.....	8
3.1 Dosagem.....	8
3.2 Incorporação das bactérias e do lactato na argila expandida.....	9
3.3 Moldagem dos corpos de prova	10
3.4 Cura	10
3.5 Preparação das amostras para fissuração	10
3.6 Fissuração.....	11
3.7 Ciclos.....	12
3.8 Resistência à compressão axial	12
3.9 Determinação da velocidade de onda ultrassônica	12
3.10 Microscopia Ótica	13
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	14
4.1 Resistência à compressão.....	14

4.2 Velocidade de onda ultrassônica.....	16
4.3 Análise de imagem.....	17
5. CONCLUSÕES	25
REFERÊNCIAS	26

Avaliação da autocicatrização ocasionada por diferentes agentes no concreto

Título em Inglês: Evaluation of Self-healing phenomena in concrete by different agents

RESUMO

O concreto é um material amplamente utilizado devido às suas características, como a sua alta resistência à compressão. Ele apresenta, porém, baixa resistência à tração, o que o torna suscetível à fissuração. As microfissuras podem não apresentar risco estrutural, mas podem comprometer a durabilidade ao permitir a entrada de agentes agressivos. Uma maneira de mitigar este problema é melhorando a propriedade de autocicatrização, inerente ao concreto. Nesse estudo, buscou-se avaliar e comparar a autocicatrização de concretos com adição de sílica ativa, de aditivo cristalizante e de microorganismos, além de um traço referência. Todos os traços tinham uma relação água/cimento de 0,4 e a mesma condição de exposição (submersão em água), e foram fissurados aos 3 dias. Realizaram-se ensaios de velocidade de onda ultrassônica e de quantificação da área de fissura por análise de imagem de microscopia para tal avaliação. O concreto referência foi o que mostrou uma maior recuperação de integridade através do aumento na velocidade de propagação de onda ultrassônica aos 28 dias. O fechamento superficial, avaliado por análise e processamento de imagens, ocorreu nos concretos contendo microorganismos e sílica ativa.

Palavras-chave: concreto, autocicatrização, bioconcreto, sílica ativa, aditivo cristalizante.

ABSTRACT

Concrete is a widely used material due to its characteristics, such as its high compressive strength. It has, however, low tensile strength, which makes it susceptible to cracking. Microcracks do not present a structural risk, but they may compromise the durability by allowing the entry of aggressive substances. One way to mitigate this problem is to improve the intrinsic self-healing property of concrete. This study sought to evaluate and compare the self-healing of concrete with the addition of silica fume, crystalline admixture and microorganisms, and a control mix. All mixes had a water/cement ratio of 0.4 and the same exposure condition (submersion in water), and were cracked at the age of 3 days. For this evaluation, ultrasonic pulse velocity and crack area quantification by image analysis were performed. The control concrete showed a greater recovery through the increase in the velocity of ultrasonic pulse at 28 days. The surface closure recovery, evaluated by image analysis, was greater in the concrete with microorganisms and the concrete with silica fume.

Keywords: concrete, self-healing, bioconcrete, silica fume, crystalline admixture.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Revisão Bibliográfica

O concreto é um material amplamente utilizado na construção civil, visto que apresenta boa resistência à compressão, facilidade de conformação, além da facilidade de encontrar e relativo baixo custo de seus componentes (METHA e MONTEIRO, 2014).

Com a publicação em 2013 da norma de desempenho, a NBR 15575 (ABNT, 2021), que estabelece requisitos mínimos de vida útil para os diversos sistemas empregados na construção civil, somada a esta vasta utilização do concreto, a preocupação com a durabilidade das estruturas se tornou crescente. Neville (2016) define concreto durável como aquele que suportará os processos de deterioração aos quais estará exposto, desempenhando as funções para as quais foi projetado.

Apesar da sua boa resistência à compressão, o concreto não apresenta boa resistência à tração, o que faz dele bastante suscetível à fissuração (DE ROOIJ *et al.*, 2013; VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013).

A fissuração é parte integrante e inerente do concreto, e, às vezes, inevitável, mesmo quando tomadas todas as medidas preventivas (DAL MOLIN, 1988). O desenvolvimento da tecnologia permite a confecção de concretos com baixíssima porosidade e para diversas aplicações, a exemplo dos concretos de alto desempenho. Concretos desse tipo estão normalmente associados a baixíssimas relações água/cimento, ao uso de materiais cimentícios suplementares e ao elevado consumo de cimento, o que pode comprometer a durabilidade da matriz devido ao desenvolvimento de fissuras nas primeiras idades. (DE BELIE *et al.*, 2018).

Em concreto armado, a fissuração não necessariamente está associada a uma falha ou a um problema de segurança, consoante à faixa de abertura das fissuras (DE ROOIJ *et al.*, 2013; SCHLANGEN e JOSEPH, 2009), a qual pode variar pelos requisitos descritos na NBR 6118 (ABNT, 2014) entre 0,2 e 0,4mm. Ainda, cabe salientar que a máxima abertura de fissuras permitida pelos critérios de dimensionamento desta norma está diretamente relacionada à classe de agressividade do meio. Neville (2016) ressalta que a durabilidade de um concreto depende muito da facilidade de penetração de líquidos e gases na matriz, uma vez que uma parte considerável das influências negativas sobre a durabilidade está relacionada ao transporte de fluidos através do concreto. Portanto, a fissuração pode afetar diretamente na durabilidade ao aumentar a permeabilidade do concreto, facilitando o ingresso de agentes agressivos na matriz (SCHLANGEN e JOSEPH, 2009; DE ROOIJ *et al.*, 2013; VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013; HUANG *et al.*, 2016; NEVILLE, 2016; TZIVILOGLOU *et al.*, 2016). Como resultado do trânsito destes agentes patogênicos, há exposição da armadura ao ambiente externo, podendo causar corrosão e posterior necessidade de reparos e manutenção dispendiosos (TZIVILOGLOU *et al.*, 2016). Além disso, a corrosão da armadura é a principal causa do colapso prematuro de estruturas de concreto (DE ROOIJ *et al.*, 2013).

Diante do exposto, tem-se a busca e o desenvolvimento de tecnologias de reparo de fissuras, que podem se dividir entre métodos passivos - manuais, capazes de tratar fissuras superficiais, e com algumas limitações, fissuras internas - e métodos denominados ativos - também conhecidos como autocicatrização, que são soluções tecnológicas empregadas no momento da confecção do concreto, atuando tanto em fissuras internas quanto em superficiais (SEIFAN *et al.*, 2016; DE BELIE *et al.*, 2018), eliminando a necessidade de intervenção humana para seu reparo.

A autocicatrização é a capacidade de um material de se autorreparar de maneira automática, sem a intervenção externa (GHOSH, 2009, DE ROOIJ, 2013). Em materiais cimentícios, é uma propriedade intrínseca (SCHLANGEN e JOSEPH, 2009), e pode ser dividida, conforme proposto pela União Internacional de Laboratórios e Peritos em Construção Civil (RILEM) na publicação de seu livro (DE ROOIJ *et al.*, 2013), entre autocicatrização autônoma e

autocicatrização autógena. A autocicatrização autônoma é aquela em que os materiais responsáveis pela cicatrização são adicionados à matriz para esta finalidade, enquanto na autocicatrização autógena, os materiais responsáveis pela cicatrização não são adicionados à matriz cimentícia especificamente para este fim. Para a maioria dos mecanismos, é fundamental a presença de água (NEVILLE, 2016; VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013), tanto para as reações quanto para transporte de partículas (DE BELIE *et al.*, 2018), à exceção apenas da utilização de agentes adesivos que podem não endurecer na presença de água (HUANG *et al.*, 2016).

Os principais meios de autocicatrização autógena são a hidratação de grãos anidros de cimento, em contato com a água que entra pela fissura, e a precipitação de carbonato de cálcio resultante da carbonatação do hidróxido de cálcio (presente na matriz) na presença de CO₂ (gás carbônico) do ar ou de CO₃ (carbonato) da água, formando carbonato de cálcio (HUANG *et al.*, 2016; NEVILLE, 2016; DE BELIE *et al.*, 2018). Como maneiras de estimular a autocicatrização autógena, De Belie *et al.* (2018), citam o uso de adições minerais, de aditivos cristalizantes e de polímeros superabsorventes, que já foram objetos de estudo pelo Grupo de autocicatrização LAMTAC (Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído) / NORIE (Núcleo Orientado à Inovação da Edificação) / UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul) por Arndt (2019), Ziegler (2020), Hollman (2020) e San Martin (2021), e Silva (2018), respectivamente, além do trabalho de Cappellesso (2018) comparando diferentes tipos de cimento e de Petry (2021) que avaliou a influência de diferentes meios de exposição na capacidade de autocicatrização de matrizes cimentícias .

Aditivos cristalizantes são produtos que têm como objetivo reduzir a permeabilidade da matriz e potencializar a cicatrização. Embora raramente os fabricantes divulguem a composição química de seus produtos, aditivos redutores de permeabilidade podem incluir químicos hidrofóbicos, fillers, materiais cristalinos hidrofílicos que aumentam a densidade do C-S-H. Ao entrar em contato com a água, os cristalizantes reagem, e seus produtos ficam dispersos por toda a matriz. Na eventualidade de ocorrer a fissuração, eles continuarão a reagir na presença de água (ACI, 2010).

A sílica ativa é composta por nano partículas de sílica amorfa (SiO), formada da oxidação e condensação do SiO₂ gasoso liberado na produção de silício metálico ou ligas de ferrosilício. É um subproduto extremamente reativo, que reage por reação pozolânica com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) resultante da hidratação do cimento. Ela melhora o empacotamento e é utilizada principalmente com o objetivo de reduzir a penetrabilidade e de garantir uma maior resistência inicial (NEVILLE, 2016).

Embora as reações pozolânicas consumam o Ca⁺ da matriz, reduzindo, nestes casos, a autocicatrização decorrente da carbonatação (DE BELIE *et al.*, 2018), para matrizes que contenham uma quantidade significativa da adição, a reação pozolânica pode propiciar uma autocicatrização análoga à decorrente da hidratação do cimento, pela formação de C-S-H. Por ser uma reação vinculada ao pH, a reação pozolânica é muito mais lenta que a hidratação de cimento anidro, e, portanto, a autocicatrização ligada a ela pode se estender para além do período em que ocorre hidratação do cimento anidro (LI *et al.*, 2013).

Dentre as formas de autocicatrização autônoma elencadas por De Belie *et al.* (2018), tem-se o concreto com bactérias. O princípio da utilização de bactérias na autocicatrização é a produção de carbonato de cálcio por mineralização biologicamente induzida (biomineralização), processo pelo qual biominaerais são produzidos por reações metabólicas de microorganismos quando na presença de fontes de carbono e cálcio no ambiente (SEIFAN *et al.*, 2016). Dentre os diversos minerais que podem ser produzidos desta forma, o carbonato de cálcio é o que mais desperta interesse para utilização no concreto devido à sua compatibilidade com a matriz (SEIFAN *et al.*, 2016; TZIVILOGLOU *et al.*, 2016).

Uma das formas de produção do bioconcreto ocorre pela incorporação de esporos de bactérias produtoras de carbonato de cálcio na mistura, juntamente a nutrientes e fonte de íons de cálcio. As bactérias permanecem dormentes (como esporos) até entrarem em contato com água, íons e nutrientes - oriundos da percolação por uma eventual fissura (TZIVILOGLOU *et al.*, 2016). A adição de bactérias pode conferir ao concreto a capacidade de uma autocicatrização em idades mais avançadas, além de ser um método potencialmente sustentável (DE BELIE *et al.*, 2018). Bactérias produzem carbonato de cálcio por diferentes vias metabólicas, mas todas compartilham de algumas características nesse processo: a produção de ácido carbônico e sua reação com íons de cálcio em solução. Seifan *et al.*, (2016) dividem estes caminhos metabólicos em dois grupos: autotrófico e heterotrófico. No primeiro, microorganismos geram sua fonte de carbono principalmente pela conversão de dióxido de carbono (CO₂) em compostos orgânicos a partir de energia proveniente do ambiente (fotossíntese, por exemplo). Já, no segundo, ocorre a degradação de fontes de carbono hexógenas (não geradas pelo microorganismo) como fonte de energia.

São diversas as bactérias que podem ser utilizadas com a finalidade de produção de biominerais. Bactérias alcalifílicas e produtoras de esporos, como do gênero *Bacillus*, são as mais atrativas para a incorporação no concreto por se adaptarem melhor às condições extremas da matriz (TZIVILOGLOU *et al.*, 2016).

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é avaliar o fenômeno de autocicatrização em diferentes concretos produzidos com três agentes distintos (sílica ativa, aditivo cristalizante e microorganismos) e um referência, isento de agentes cicatrizantes, expostos a uma mesma condição ambiental, por meio de ensaio de velocidade de onda ultrassônica e de análise de imagem.

2 MATERIAIS

2.1 Cimento

O cimento utilizado foi o cimento Portland de alta resistência inicial CPV-ARI. Ele foi escolhido para este trabalho por ser o cimento que apresenta menor quantidade de substituições em sua composição, permitindo avaliar melhor a influência isolada das adições utilizadas e do comportamento dos microorganismos. Segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018), este aglomerante pode conter até 10% de material carbonático. A composição, fornecida pelo fabricante, assim como demais caracterizações, está representada na Tabela 1, juntamente com os limites normativos impostos pela ABNT NBR 16697 (2018).

Tabela 1: Características químicas e físicas do cimento

Composição química		Dado fornecido pelo fabricante	Limites normativos ABNT NBR 16697
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	%	4,52	-
Dióxido de silício (SiO ₂)	%	18,68	-
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	%	2,84	-
Óxido de cálcio (CaO)	%	62,37	-
Óxido de magnésio (MgO)	%	3,54	≤6,5
Trióxido de enxofre (SO ₃)	%	2,84	≤4,5
Perda ao Fogo	%	3,63	≤6,5
Óxido de cálcio (CaO) Livre	%	1,37	-

Resíduo Insolúvel	%	0,61	$\leq 3,5$
Equivalente Alcalino	%	0,6	-
Características Físicas			
Expansibilidade a Quente	mm	0	≤ 5
Tempos de Pega	Início	160	≥ 60
	Fim	225	≤ 600
Consistência Normal	%	29,7	-
Blaine	cm ² /g	4,46	-
Massa retida na peneira #200	%	0,1	≤ 6
Massa retida na peneira #375	%	0,5	-
Resistência à Compressão [MPa]	1 dia	22,5	≥ 14
	3 dias	37,6	≥ 24
	7 dias	43,9	≥ 34

Fonte: adaptado do fabricante

2.2 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado é de origem basáltica. Na Tabela 2, estão apresentadas a granulometria, conforme NBR NM 248 (ABNT, 2003), a dimensão máxima característica de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009), atualizada em 2019, e as massas específicas e a absorção de água, segundo a NBR NM 53 (ABNT, 2009), que foi substituída pela NBR 16917 (ABNT, 2021). Em ambos os casos, a caracterização foi feita antes da substituição.

Tabela 2: Caracterização física do agregado graúdo

Abertura da peneira (mm)	% retido	% retido acumulado
25	0	0
19	0	0
12,5	0	0
9,5	17	17
6,3	56	73
4,75	20	93
2,36	7	100
1,18	0	100
0,6	0	100
0,3	0	100
0,15	0	100
Fundo	0	100
Módulo de Finura		6,1
Dimensão máxima (mm)		12,5
Massa específica saturado superfície seca (g/cm³)		2,94
Massa específica seca (g/cm³)		3,01
Massa Unitária (g/cm³)		1,51
Absorção (%)		1,2

Fonte: Grupo autocicatrização LAMTAC/NORIE

2.3 Agregado miúdo

A areia utilizada é a areia quartzosa, que foi peneirada com a finalidade de compor uma areia de mesma distribuição granulométrica dos demais trabalhos do grupo de autocicatrização do LAMTAC/NORIE/UFRGS. Foram determinadas: a massa específica, segundo a NBR 16916 (ABNT, 2021), e o módulo de finura e a dimensão máxima, segundo a NBR 7211 (ABNT, 2019). As características estão descritas na Tabela 3.

Tabela 3: Caracterização física da areia

Abertura da peneira (mm)	% retido	% retido acumulado
4,75	0	0
2,36	1	1
1,18	7	8
0,6	15	23
0,3	42	65
0,15	27	92
Fundo	8	100
Módulo de finura		1,89
Dimensão máxima (mm)		2,36
Massa específica seca (g/cm³)		2,49
Massa Unitária (g/cm³)		1,544
Absorção (%)		2,56

Fonte: própria da autora

2.4 Argila expandida

A argila expandida foi utilizada nos bioconcretos como agregado miúdo leve, em substituição parcial da areia, com a finalidade de encapsular as bactérias e o nutriente. Possui granulometria entre 0 e 5mm de diâmetro e massa específica de 1,56kg/m³, segundo dados fornecidos pelo fabricante.

A composição química, também conforme material fornecido pelo fabricante, consta na Tabela 4.

Tabela 4: Composição química da argila expandida

Composição química da argila	% em massa
Dióxido de silício (SiO ₂)	63,19
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	18,02
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	7,63
Dióxido de titânio (TiO ₂)	0,92
Óxido de cálcio (CaO)	0,64
Óxido de magnésio (MgO)	3,26
Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,61
Óxido de potássio (K ₂ O)	4,91
Pentóxido de fósforo (P ₂ O ₅)	0,2
Óxido de manganês (MnO)BaO	0,08
Óxido de Bário (BaO)	0,09

Perda ao Fogo	0,2
---------------	-----

Fonte: adaptado do fabricante

A argila foi peneirada e separada por granulometria, e dela foram utilizadas as frações retidas nas peneiras 1,18mm, 600 μ m e 300 μ m, e substituídos em volume nas frações correspondentes da areia, conforme traço contido em 3.1. Posteriormente, foi utilizada para encapsulamento das bactérias e de nutrientes, conforme explicação contida em 3.2.

2.5 Aditivo superplastificante

As características apresentadas pelo fabricante do aditivo superplastificante utilizado estão contidas na Tabela 5.

Tabela 5: Características do aditivo superplastificante

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

Fonte: Grupo autocicatrização LAMTAC/NORIE, adaptado do fabricante

2.6 Sílica ativa

Foi utilizada uma sílica ativa em pó, cuja superfície específica é de aproximadamente 20 m²/g. Para sua caracterização, foi realizado o ensaio de massa específica conforme a NBR 16605 (ABNT, 2017), obtendo-se um valor de 2,18 g/cm³.

2.7 Aditivo cristalizante

O aditivo impermeabilizante por cristalização utilizado é constituído, segundo o fabricante, por cimento Portland, rastreador químico e compostos químicos ativos, que reagem com a umidade do concreto fresco e com os produtos da hidratação do cimento, com a finalidade de formar uma estrutura cristalina e insolúvel nos poros e capilares do concreto.

2.8 Água

A água utilizada, tanto para a produção dos concretos quanto para a cura em submersão, foi a água fornecida pela rede pública de distribuição de água da cidade de Porto Alegre, de responsabilidade do Departamento Municipal de Água e Esgoto de Porto Alegre (DMAE). O pH médio para as datas de moldagem e abastecimento dos recipientes para submersão foi de 6,0, segundo dados fornecidos pelo DMAE.

2.9 Solução de bactérias

Neste estudo, foi utilizada a bactéria *Bacillus Subtilis* (ATCC 6633), por se enquadrar nos requisitos expostos em 1.1, de ser uma bactéria alcalifílica e produtora de esporos, por apresentar capacidade de autocicatrização em pesquisas já realizadas (KHALIQ e EHSAN, 2016; NAIN *et al.*, 2019; PACHECO, 2020, dentre outros) e por já ser cultivada e mantida pelo laboratório Cbiot (Centro de Biotecnologia), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Esta foi fornecida já em forma de solução de esporos, pronta para uso na incorporação em argila expandida.

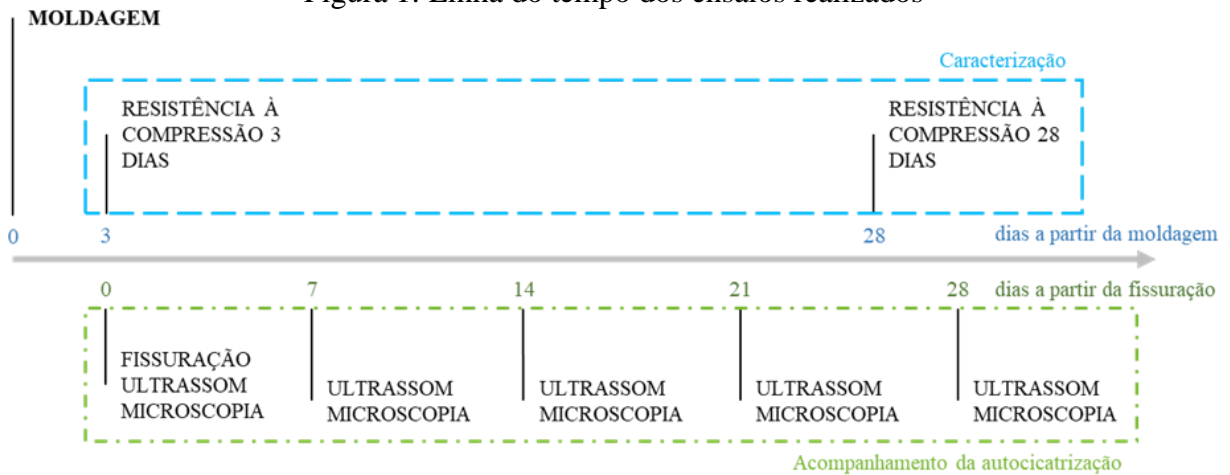
2.10 Fonte de carbono

Neste estudo, adotou-se como fonte de carbono o lactato de cálcio, visto que sua metabolização não gera agentes nocivos à matriz cimentícia (como amônia, na hidrólise de ureia), consome oxigênio, colaborando com a proteção contra corrosão da armadura (SEIFAN *et al.*, 2016), e já apresenta na mesma molécula as fontes de carbono e cálcio juntas, sendo necessário apenas esse reagente para o processo.

3 MÉTODOS

A metodologia utilizada neste estudo tem a finalidade de avaliar a autocicatrização de fissuras resultante de diferentes agentes, assim como compará-las. Foram feitos também ensaios para a caracterização do concreto. Para um melhor entendimento, foi elaborado um esquema em forma de linha do tempo dos ensaios realizados para cada traço, apresentado na Figura 1.

Figura 1: Linha do tempo dos ensaios realizados



Fonte: própria da autora.

3.1 Dosagem

A dosagem dos concretos do presente trabalho está compreendida nos traços utilizados pelo Grupo de Autocicatrização NORIE/LAMTAC/UFRGS, que avalia a interferência na autocicatrização de diferentes cimentos, adições, aditivos cristalizantes, soluções de bactérias e meios de exposição. A dosagem foi baseada no método do IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992), com teor de argamassa, definido experimentalmente, de 52%.

Foram confeccionados 4 traços: um traço de referência (REF), um traço com adição de 10% sobre a massa de cimento de sílica ativa (SA), um traço com adição de 1% de cristalizante sobre a massa de cimento (C) e um traço com substituição de 30% em volume da areia por argila expandida com inoculação (item 3.2) de bactérias e de lactato de cálcio, (BIO), apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Traços dos concretos, em massa

Traço	Traço unitário	Cimento	Areia	Argila Expandida	Brita	Água	Cristalizante	Sílica Ativa
REF	1:1,37:2,19:0,41	9,15	12,51	-	20	3,76	-	
C	1:1,37:2,19:0,41	9,15	12,51	-	20	3,76	0,0915	
SA	1:1,37:2,19:0,41	9,15	12,51	-	20	3,76	-	0,915
BIO	1:1,18:2,19:0,41	9,15	8,45	2,35	20	3,76	-	

Fonte: própria da autora

Os concretos foram confeccionados em local climatizado, de temperatura e umidade controladas. O teor de aditivo foi variável, de forma a obter um abatimento pré-estabelecido de 220 ± 20 mm, analisado pelo método de ensaio de abatimento de tronco de cone (slump), segundo a NBR 16889 (ABNT, 2020). Estes dados estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Características da moldagem

Traço	Temperatura (°C)	Umidade (%)	Teor de aditivo (% sobre a massa de cimento)	Abatimento (mm)
REF	20,82	60,8	0,14	190
C	20,86	61,8	0,25	200
SA	20,96	63,4	0,48	230
BIO	21,01	64,9	0,27	240

Fonte: própria da autora

3.2 Incorporação das bactérias e do lactato de cálcio na argila expandida

O encapsulamento dos esporos é crucial para a proteção das bactérias, uma vez que eles podem ser danificados pela força mecânica da mistura (TZIVILOGLOU *et al.*, 2016), pelo elevado pH ou por condições de umidade impróprias (DE BELIE *et al.*, 2018), e pode ser feito com utilização de agregados leves ou microcápsulas produzidas, por exemplo, com polímeros, cerâmicas ou materiais cimentícios.

Os agregados leves são bastante utilizados para a produção de concretos leves, que são concretos com uma menor massa específica. Eles apresentam a vantagem de reduzir o peso próprio da estrutura, além de apresentar um desempenho térmico superior ao do concreto convencional (NEVILLE, 2016). Porém, a incorporação de bactérias via agregados leves é limitada, visto que a utilização de agregados leves em substituição do agregado convencional reduz a resistência mecânica do concreto (TZIVILOGLOU *et al.*, 2016), o que pode ser amenizado com o uso de agregado de menor dimensão (NEVILLE, 2016).

Nesta pesquisa, para a inoculação das bactérias e dos nutrientes nos agregados, adotou-se a metodologia descrita a seguir, baseada na utilizada por Pacheco (2020), testada inicialmente em uma pequena amostra de 22g de argila expandida.

Primeiramente, a quantidade total de argila expandida a ser incorporada ao concreto foi lavada na peneira 300 μ m (menor fração de argila utilizada), colocada para secar na estufa a 100°C, e, depois de seca, dividida em duas porções iguais.

A primeira foi submersa em solução de concentração $7,97 \times 10^7$ CFU/gxml de bactérias, em mesmo volume de argila e de solução, em um recipiente acondicionado em um dessecador de vidro, e submetido a uma pressão relativa de -500mmHg (em relação à pressão atmosférica) pelo período de 30min.

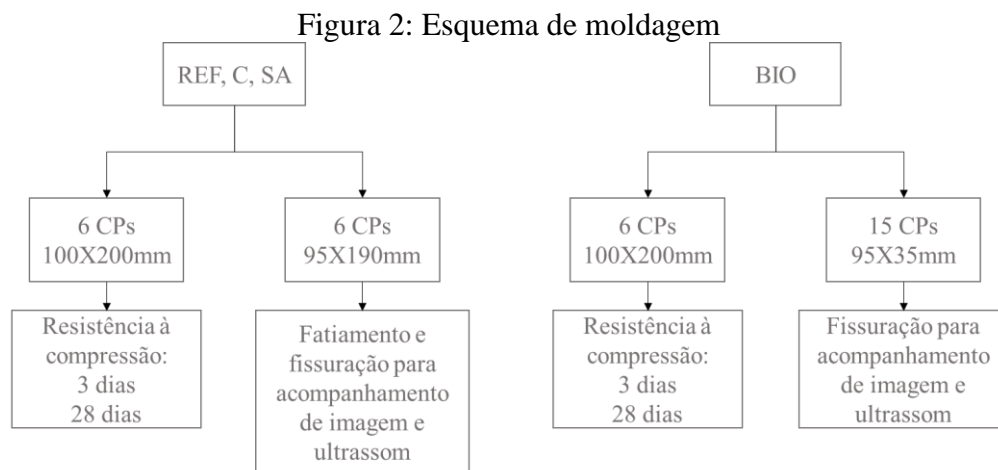
Posteriormente, a argila foi colocada para secar em estufa a 40°C. Após 12h, ainda com a argila úmida, o cimento foi pulverizado de forma a aderir na superfície e criar uma camada de proteção, ou seja, evitar a migração da água presente na mistura para o interior das cápsulas, além de evitar a migração das substâncias inoculadas para a matriz. Este processo resultou em uma concentração de $1,47 \times 10^6$ CFU/gxml esporos em argila expandida com cobertura.

A outra porção de argila expandida a ser incorporada no concreto foi submetida ao mesmo procedimento, porém com uma solução de lactato de cálcio a uma concentração de 0,5g por litro de concreto.

3.3 Moldagem dos corpos de prova

Foram moldados corpos de prova cilíndricos de 100x200mm para determinação da resistência à compressão aos 3 e aos 28 dias, e corpos de prova cilíndricos de 95x190mm que foram fatiados para posterior fissuração e acompanhamento da autocicatrização. As amostras do concreto com bactérias foram moldadas diretamente em moldes de 35mm de altura, porque, ao serrar o concreto, ele é aquecido e as altas temperaturas podem inviabilizar os esporos contidos na argila expandida que se encontraria na superfície das fatias. A Figura 2 apresenta um esquema das quantidades de corpos de prova de cada dimensão que foram moldados para cada traço.

Das fatias obtidas (item 3.5), após fissuração (item 3.6), sete amostras fissuradas foram selecionadas para acompanhamento de velocidade de onda ultrassônica, das quais, para os concretos REF, C e SA, seis foram selecionadas para acompanhamento de análise de imagem. Apenas para o concreto BIO, todas as sete amostras acompanhadas para velocidade de onda ultrassônica foram também utilizadas para análise de imagem. E, de cada traço, duas fatias foram mantidas íntegras.



CP: corpo de prova; REF: concreto referência; C: concreto com cristalizante; SA: concreto com sílica ativa; BIO: concreto com bactérias

Fonte: própria da autora

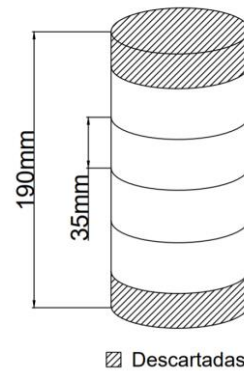
3.4 Cura

Após a moldagem, os corpos de prova foram mantidos cobertos com lona por 24h (para evitar a perda de água para o meio), posteriormente foram desmoldados e depois armazenados em câmara úmida, mantida em temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa do ar superior a 95%, de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015). O armazenamento se deu por 3 dias (amostras destinadas ao ensaio de compressão e à fissuração) ou 28 dias (amostras destinadas ao ensaio de compressão para determinação da resistência aos 28 dias).

3.5 Preparação das amostras para fissuração

As amostras para fissuração foram obtidas a partir do corte dos corpos de prova de 95x190mm, com uso de serra diamantada refrigerada à água, específica para concreto. Foram descartadas as extremidades, de 95x25mm, e a parte central foi dividida em quatro amostras de 95x35mm, conforme Figura 3.

Figura 3: Fatiamento das amostras

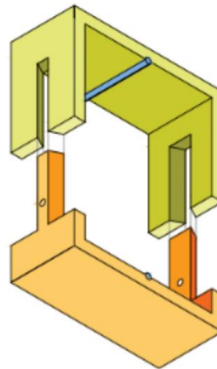


Fonte: própria da autora

3.6 Fissuração

As fissuras foram geradas por meio do uso do aparato patenteado pelo Grupo autocicatrização do LAMTAC/NORIE/UFRGS, ilustrado na Figura 4.

Figura 4: Aparato para abertura de fissuras



Fonte: Grupo autocicatrização LAMTAC/NORIE

Foi patenteado, com número do registro: BR10201900794, depositado no Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), com o título de “dispositivo de acoplamento de amostra para ensaio de fissuração e processo de fissuração em amostra”.

Ele conta com duas barras de metal de 5mm de diâmetro que têm a finalidade de criar esforços de tração e direcionar a abertura de fissuras, ao mesmo tempo em que conta com limitadores laterais, que restringem a movimentação no sentido ortogonal ao da aplicação da carga, de forma a evitar que ocorra a ruptura por completo. O aparato é utilizado em prensa hidráulica, onde é aplicada uma carga de velocidade constante de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s, que para ao constatar queda no carregamento, decorrente da ruptura.

Após, foram selecionadas as sete amostras com fissuras mais retilíneas, ficando uma média de abertura de 0,166mm para o concreto BIO, 0,152mm para o SA, 0,141mm para o REF e 0,146mm para o concreto C, obtida conforme explicado em 3.10. Duas amostras de cada traço foram mantidas íntegras conforme explicado adiante.

Cabe ressaltar que, embora as fissuras tenham sido selecionadas pela abertura, as análises foram feitas em relação à área.

3.7 Condição de exposição

Imersão em água, em geral, é considerada a melhor exposição para que ocorra a autocicatrização (DE BELIE *et al.*, 2018, SILVA *et al.*, 2020, PETRY, 2021).

As amostras fissuradas foram mantidas submersas, em caixas plásticas separadas por traço, sempre com o mesmo lado da fissura para baixo (o lado de maior abertura da fissura ou, quando de mesmo tamanho, o lado escolhido para acompanhamento de imagem). Elas eram retiradas para secagem 24h antes dos ensaios. A água dos banhos não foi renovada, e foi mantida em um nível constante para todos os traços.

3.8 Resistência à compressão axial

Aos 3 e aos 28 dias, três amostras de cada traço foram ensaiadas para a determinação da resistência à compressão axial, conforme a ABNT NBR 5739.

3.9 Determinação da velocidade de onda ultrassônica

Segundo Ferrara *et al.*, (2018), ensaios não destrutivos, como é o caso da determinação da velocidade de onda ultrassônica, contribuem de forma importante para a compreensão dos mecanismos de autocicatrização, permitindo um acompanhamento do material no decorrer do tempo. Uma vez que ondas ultrassônicas viajam muito mais rápido em meio sólido que em água ou ar, elas contornam a fissura, aumentando o percurso e conseqüentemente o tempo de transmissão. Quando a fissura cicatriza, o tempo de propagação da onda é reduzido. (ÇOPUROĞLU *et al.*, 2013)

A leitura da velocidade de onda ultrassônica foi feita de acordo com as recomendações da NBR 8802 (ABNT, 2019). O acompanhamento foi realizado em todas as amostras, após a fissuração, a cada 7 dias. A condição saturada aumenta a velocidade de onda no concreto (METHA e MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2016), então, para manter uma condição de saturação semelhante em todas as idades de leitura, elas eram retiradas dos banhos 24h antes do ensaio. O aparelho utilizado foi o Pundit PL-200, da marca Proceq, com transdutores exponenciais de 50mm de diâmetro e frequência de 54kHz, que dispensam a necessidade de pasta de acoplamento. As leituras foram realizadas sempre nos mesmos pontos (marcados com caneta permanente), em três alturas de cada amostra, sendo três leituras por ponto em cada idade. A leitura média para cada amostra para cada idade é obtida, então pela média destas leituras.

Todas as amostras tiveram seu diâmetro medido (na direção de propagação do pulso) para a obtenção da velocidade, calculada conforme a Equação 1:

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

Onde:

V = velocidade do pulso ultrassônico através da amostra;

L = diâmetro da amostra;

t = tempo lido pelo equipamento.

De maneira a dissociar o incremento na velocidade decorrente da hidratação continuada da matriz cimentícia do ganho relativo à cicatrização da fissura, foram analisadas duas amostras íntegras de cada traço, análogo ao que foi feito por Arndt (2018) e San Martin (2021). Assim, o percentual de integridade para cada amostra, em cada idade, foi calculada conforme a Equação 2:

$$T_I(\%) = \frac{V_n}{V_{I,n}} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$T_I(\%)$ = percentual de integridade (%);

V_n = velocidade de propagação de onda ultrassônica do corpo de prova fissurado, aos n dias;

$V_{I,n}$ = velocidade de propagação de onda ultrassônica média dos dois corpos de prova íntegros.

A partir destes dados, é possível calcular o percentual de recuperação para cada amostra, a partir da Equação 3.

$$R_{I,n}(\%) = T_{I,0} - T_{I,n} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

$R_{I,n}$ – percentual recuperado para a idade analisada (%);

$T_{I,n}$ – percentual de integridade do corpo de prova na idade analisada;

$T_{I,0}$ – percentual de integridade do corpo de prova na idade inicial.

3.10 Microscopia Ótica

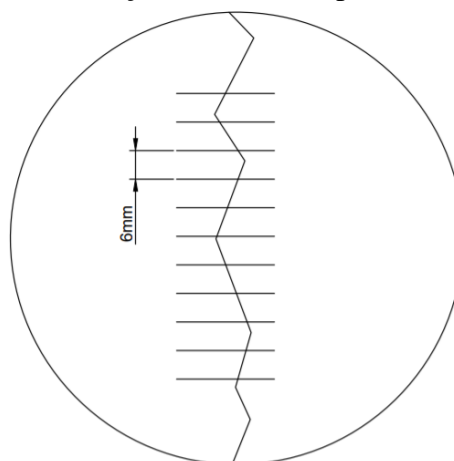
O uso do microscópio traz a possibilidade de avaliar o grau de autocatrização ao combinar a fotografia com uma análise quantitativa de imagem, por comparação no tempo, podendo ser pela espessura da fissura ou por análise de área (ÇOPUROĞLU *et al.*, 2013). Além disso, Roig-Flores *et al.*, (2016) em seu trabalho perceberam uma relação entre resultados obtidos de análise de imagem e de teste de permeabilidade.

As imagens foram obtidas através do microscópio ótico Zeiss Stemi 508, que conta com lentes que permitem uma amplificação entre 2x e 250x. Neste trabalho, as imagens que foram utilizadas para as análises, foram feitas com ampliação de 2x na resolução de 0,65x.

Alguns pontos foram padronizados, para proporcionar a melhor comparação possível entre as idades. Primeiramente, foram marcados, transversalmente à fissura, 10 trechos de 6mm a serem fotografados para a montagem da fissura em cada uma das idades, conforme

Figura 5. As imagens foram feitas sempre com as amostras superficialmente secas, de forma a manter um padrão e permitir a comparação de imagens, uma vez que pontos úmidos poderiam causar manchas e interferir nas análises, além de ser a condição que proporciona um maior contraste entre matriz, fissura e cristais formados, o que facilita a análise pelo software. E sempre na mesma condição de iluminação, fazendo uso de uma câmara de iluminação especificamente desenvolvida para ser usada em conjunto com o microscópio.

Figura 5: Marcações na amostra para microscopia



Fonte: própria da autora

Conforme metodologia descrita por Garay *et al.* (2021), o software ImageJ foi utilizado para quantificar a área da fissura em todas as imagens geradas para acompanhamento, de modo a poder acompanhar o fechamento das fissuras ao longo do tempo, através da Equação 4:

$$R(\%) = \frac{A_0 - A_n}{A_0} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

$R(\%)$ = percentual recuperado da fissura;

A_0 = área de fissura no dia 0, em mm^2 ;

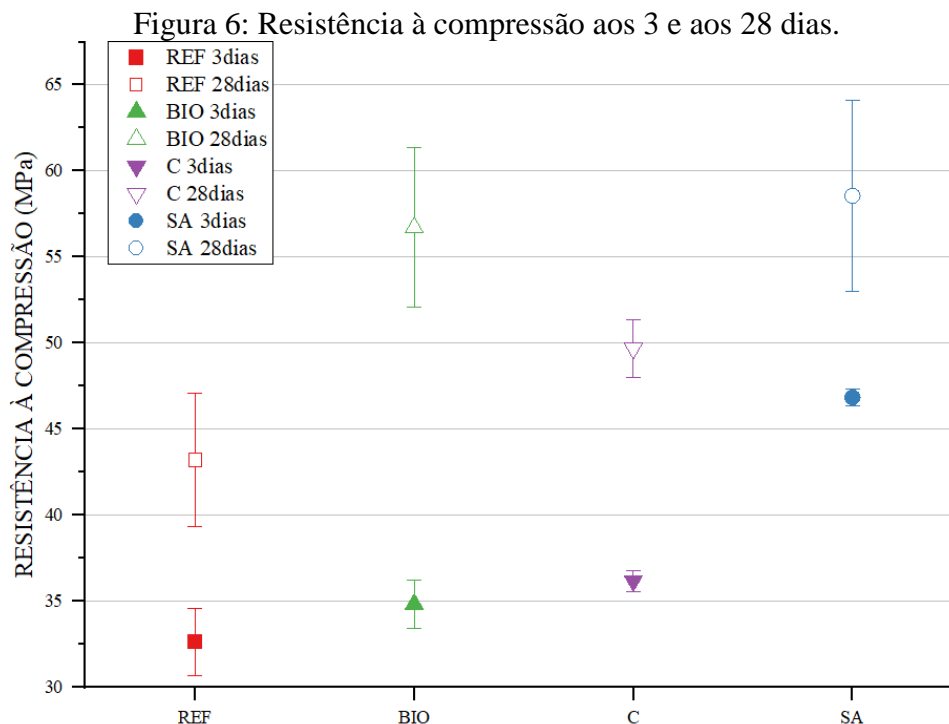
A_n = área de fissura no dia n, em mm^2 .

As imagens geradas pelo microscópio foram também utilizadas para se obter a abertura média de fissura para cada traço. As medidas foram tiradas apenas no lado selecionado para o acompanhamento por análise de imagem, conforme realizado por Cappellesso (2018) e Arndt (2020). Foram medidos 21 pontos de cada fissura, sendo 11 medidas alinhadas com as marcações dos trechos da fissura para acompanhamento (ilustrados na Figura 5) e em um ponto intermediário de cada trecho. As medidas foram obtidas por meio do software Zen 2.6, próprio para o aparelho utilizado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resistência à compressão

Os resultados obtidos para resistência à compressão axial (f_c) estão apresentados na Figura 6. Os resultados de desvio padrão, assim como o percentual de aumento de resistência em relação à resistência à compressão do REF, para 3 e 28 dias, estão na Tabela 8.



Fonte: própria da autora.

Tabela 8: Resistências médias e percentual do aumento da resistência em relação ao REF, para as idades de 3 e 28 dias

Traço	3 dias			28 dias		
	f_c (MPa)	Desvio padrão (MPa)	% em relação ao REF	f_c (MPa)	Desvio padrão (MPa)	% em relação ao REF
REF	32,64	1,94	-	43,23	3,88	-
BIO	34,84	1,41	6,8	56,72	4,64	31,2
C	36,19	0,59	10,9	49,69	1,67	15,0
SA	46,85	0,46	43,5	58,56	5,55	35,5

Fonte: própria da autora.

A partir dos dados obtidos de resistência à compressão, se fez uma análise estatística ANOVA, cujos resultados estão representados na Tabela 9.

Tabela 9: ANOVA dos resultados de resistência à compressão

Fatores	Soma	NGL	MQ	F	Valor P	Significância
A (Idade)	1247,976	1	1247,976	87,075	0,000	Sim
B (Traço)	683,936	3	227,979	15,907	0,000	Sim
AB	117,490	3	39,163	2,733	0,078	Não
Erro	229,315	16	14,332			
Total	2278,7174	23				

Fonte: própria da autora.

A idade e o traço se mostraram significativos sozinhos, enquanto a interação não se mostrou significativa. Fez-se então uma comparação múltipla de médias pelo método de Duncan, do qual se obteve que, para os 3 dias, os resultados de f_c dos concretos REF, C e BIO são estatisticamente iguais entre si e diferentes do SA. Já para os 28 dias, o resultado do concreto BIO se mostrou estatisticamente igual ao SA.

A partir dos dados apresentados, pode-se perceber que, como esperado, a adição de sílica ativa foi a que conferiu ao concreto a maior resistência à compressão para ambas as idades. Estes aumentos se devem não só à reação pozolânica, mas também à melhora no empacotamento, como pode-se perceber na grande diferença de 43,5% na resistência aos 3 dias. Aos 28 dias, houve um aumento de 35,5%, justificado ainda pela redução da relação água/aglomerante, que passou de 0,41 para 0,37. Cappellesso (2016) havia encontrado um aumento de 27% na resistência à compressão com 10% de adição de sílica ativa para um concreto referência de 41,32MPa, enquanto Ziegler (2020) encontrou 28,4% de aumento na resistência aos 28 dias com 5% de adição de sílica ativa para um concreto referência de 34,9MPa.

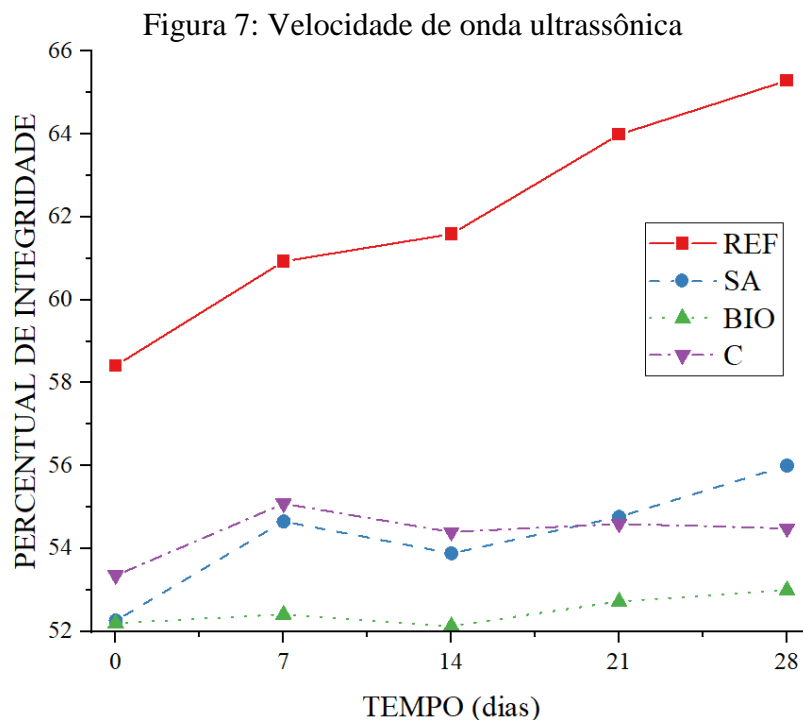
Em relação ao aditivo cristalizante, diferente do encontrado por Arndt (2019) e Takagi (2013), houve um aumento na resistência aos 3 dias de 10,9%. Já aos 28 dias, houve um aumento de 15,0% de resistência aos 28 dias, próximo aos 13% encontrados por Cappellesso (2016) e aos 15,4% encontrados por Ziegler (2020) para um dos cristalizantes utilizados.

Já para o concreto BIO, diferente do observado por Pacheco (2020), obteve-se um incremento na resistência à compressão do concreto com incorporação de bactérias, quando comparado ao concreto de referência, de 6,8% aos 3 dias e de 31,2% aos 28 dias, se tornando estatisticamente igual ao resultado obtido pelo concreto SA. Este resultado vai contra o esperado dada a utilização do agregado leve. Porém, é importante ressaltar que há uma variação muito grande de resultados de resistência à compressão e concretos com a utilização de bactérias por serem

muitas as variáveis (método de encapsulamento, espécies de bactérias, fonte de carbono, concentrações). Khaliq e Ehsan (2016) encontraram um aumento de 12% na resistência à compressão aos 28 dias de concretos confeccionados com *Bacillus subtilis* incorporados em agregado leve utilizado como agregado graúdo. Os autores atribuíram a melhora, porém, a uma menor granulometria deste agregado quando em comparação à granulometria do agregado graúdo tradicional, proporcionando um melhor empacotamento, o que difere do presente trabalho, onde a substituição se deu do agregado miúdo, e por mesma faixa de granulometria. Já Nain *et al.* (2019) encontraram um aumento de 22,6% da resistência à compressão do concreto com utilização de *Bacillus subtilis* incorporada diretamente na matriz. Ainda, cabe ressaltar que embora tenha sido feita a camada de proteção no agregado leve com cimento visando evitar a passagem do material inoculado na argila para a matriz, a eficiência desta camada não foi objeto de análise neste trabalho, podendo ter havido migração do lactato de cálcio para a matriz, o que pode ter interferido na resistência à compressão.

4.2 Velocidade de onda ultrassônica

Os resultados do percentual de integridade, calculado a partir da velocidade de onda ultrassônica, estão apresentados na Figura 7 e na Tabela 10.



Fonte: própria da autora.

Tabela 10: Percentuais de integridade

Idade	BIO	SA	REF	C
0d	52,20%	52,26%	58,42%	53,35%
7d	52,41%	54,66%	60,93%	55,09%
14d	52,14%	53,89%	61,59%	54,40%
21d	52,72%	54,77%	63,99%	54,60%
28d	53,00%	56,00%	65,29%	54,49%
$R_{I,28}$	0,80%	3,74%	6,87%	1,13%

Fonte: própria da autora.

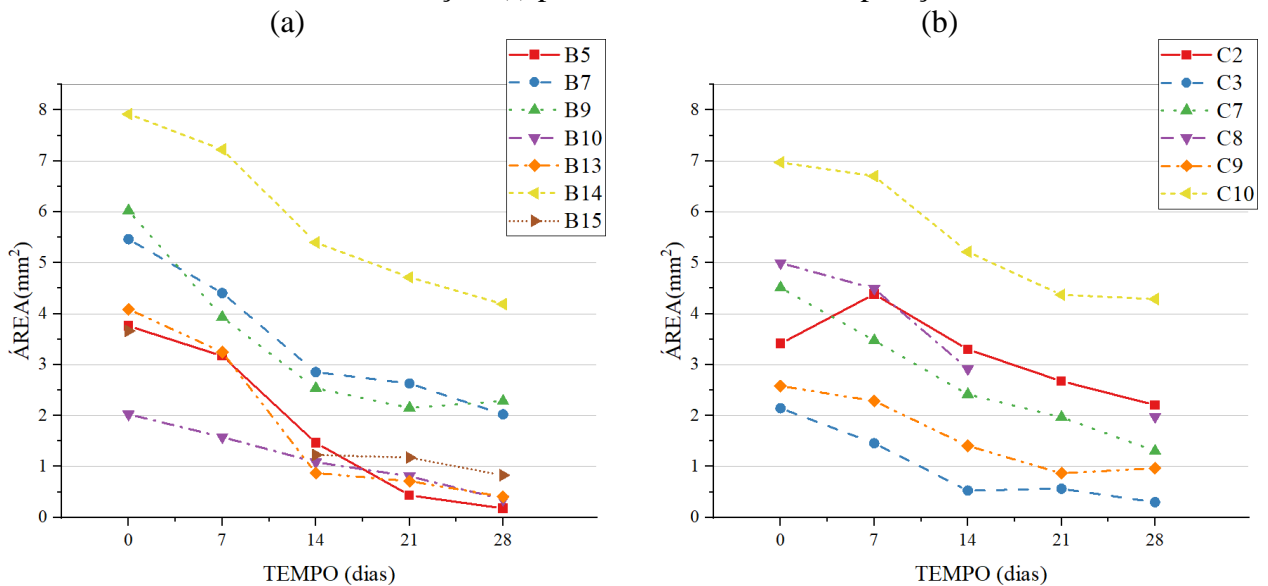
Pode-se perceber pela figura 7 que o concreto REF mostrou uma melhora superior aos demais concretos, com uma percentual recuperado de 6,87%. SA e C tiveram um comportamento semelhante inicialmente, tendo a partir dos 21 dias o concreto SA demonstrado um comportamento superior, chegando a um percentual recuperado de 3,74% aos 28 dias, enquanto o C recuperou 1,13%. Já o BIO apresentou pouca melhora na velocidade para as quatro idades analisadas, chegando a menos de 1% aos 28 dias. Isso pode estar relacionado ao fato de que parte dos produtos formados saíram do plano das fissuras, conforme apresentado em mais detalhes em 4.3.

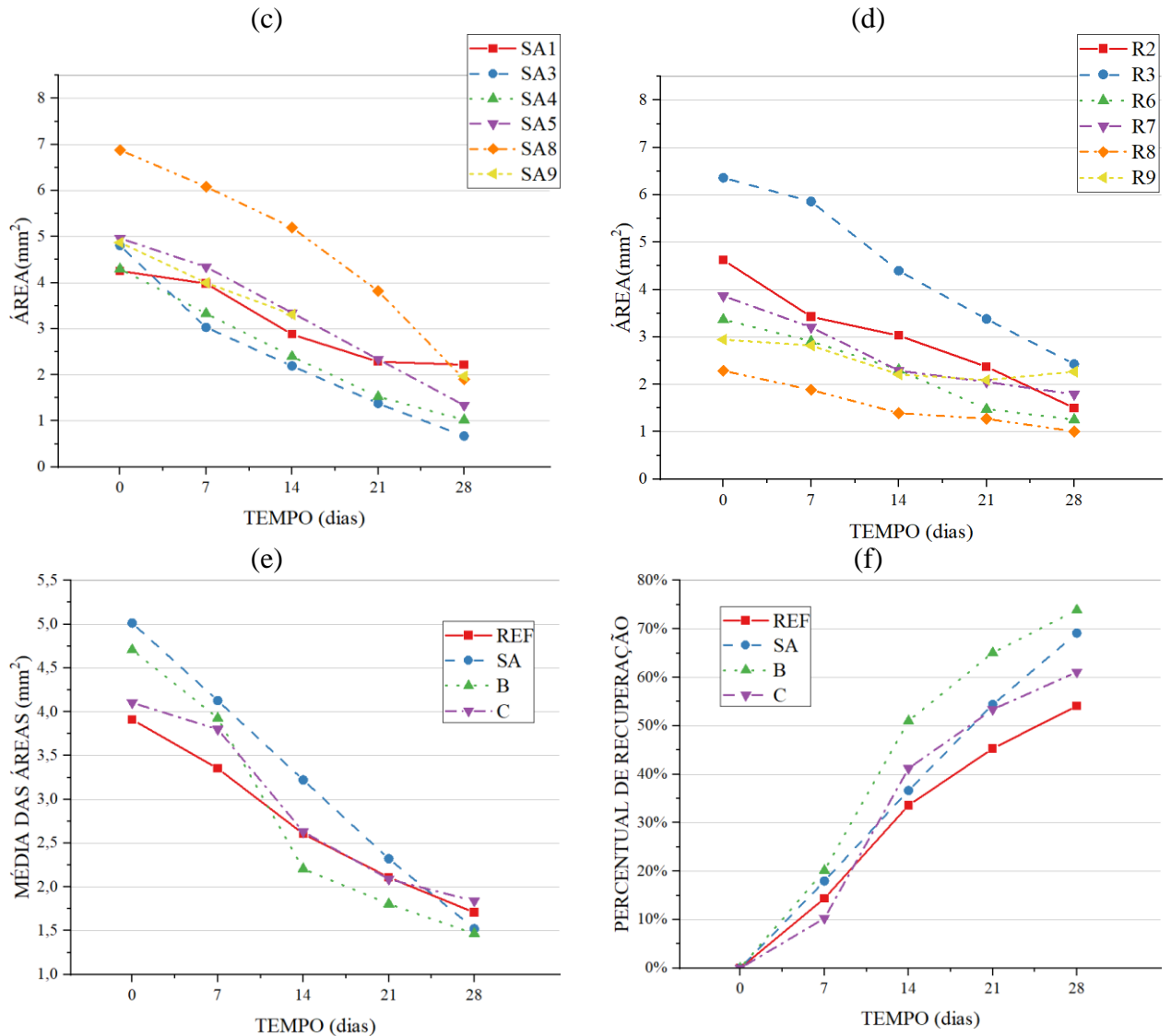
O comportamento do REF pode estar relacionado a uma menor abertura de fissuras média inicial, não apenas superficialmente, que se comprova pelas médias de áreas de fissura apresentadas em 4.3 ($3,91\text{mm}^2$ para o REF comparativamente a $4,71\text{mm}^2$ para o BIO, $5,01\text{mm}^2$ para SA e $4,10\text{mm}^2$ para o C), mas também internamente pelo fato de a velocidade inicial ter o maior percentual de integridade (uma perda menor de velocidade) de todos os concretos.

4.3 Análise de imagem

As amostras foram analisadas por quantificação de pixels pretos, conforme descrito em 3.9, e na Figura 8 estão apresentadas as áreas de fissura no decorrer de tempo, para as amostras de cada traço. Também é apresentada a média da área para os quatro concretos, assim como o percentual médio de recuperação.

Figura 8: Área de fissura de cada amostra, em mm^2 , onde (a) BIO, (b) C, (c) SA, (d) REF, (e) média dos traços, (f) percentual médio de recuperação





Fonte: própria da autora.

Pode-se perceber que o concreto BIO foi o que apresentou um melhor percentual de recuperação médio em todas as idades (média dos percentuais das amostras, na Figura 8 (f)), sendo de 74% aos 28 dias enquanto o concreto SA apresentou 69% de recuperação para a mesma idade. Já quando se analisa a média das áreas final e inicial (Figura 8 (e)), o concreto SA apresentou uma maior diferença, partindo de uma média de 5,01mm² e chegando a 1,52mm² (70% de recuperação) enquanto o concreto BIO passou de 4,71mm² para 1,47mm² (69% de recuperação).

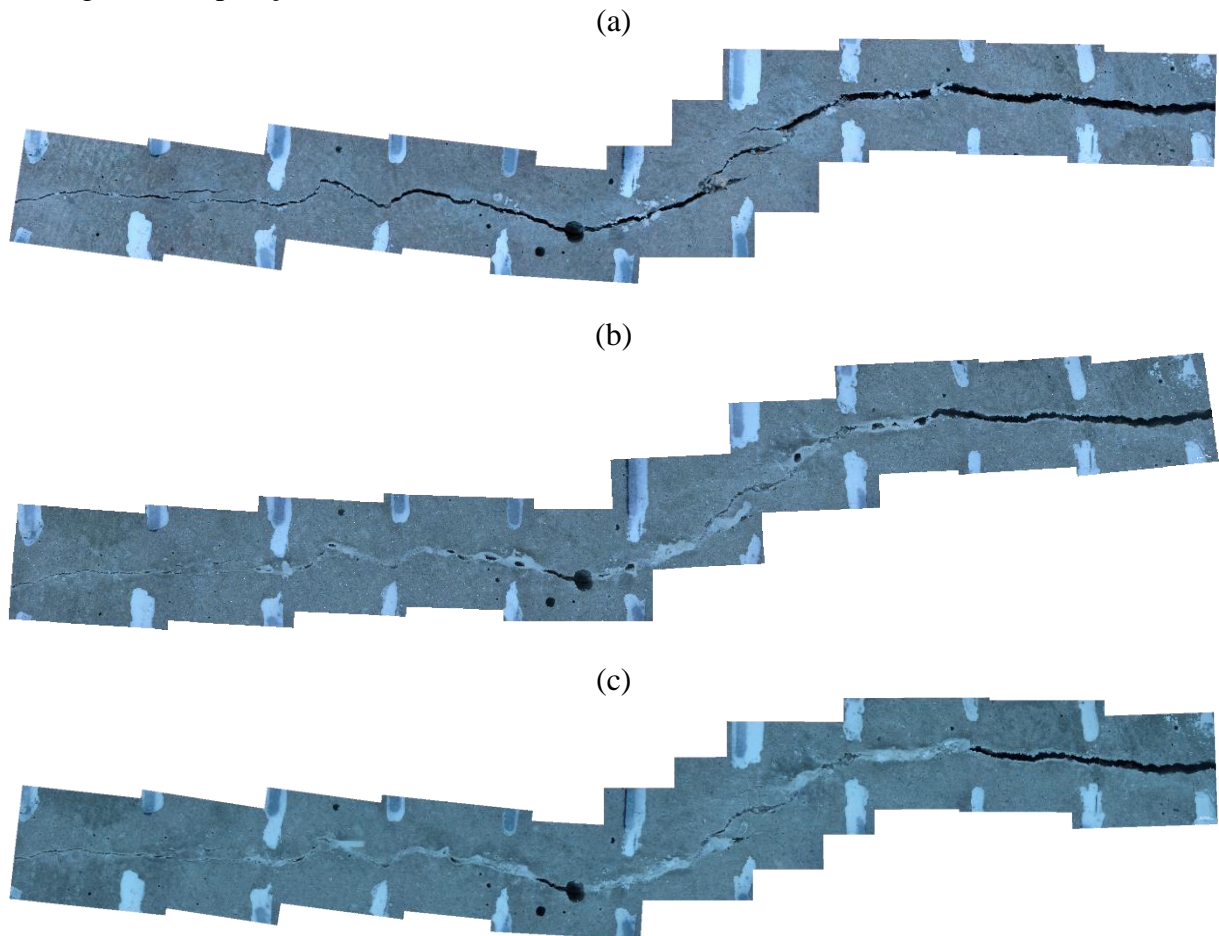
As diferenças entre o resultado de média dos percentuais de recuperação para o resultado de diferença da média das áreas inicial e final se deve ao fato de que as amostras apresentaram áreas de fissura diferentes e percentuais diferentes de recuperação. Três amostras do BIO, por exemplo, apresentaram percentual superior a 80% de recuperação aos 28 dias (elevando a média de percentuais) mas correspondiam a fissuras de menor área (apresentando um menor efeito sobre as médias das áreas).

Os concretos REF e C apresentaram média de percentual de recuperação de 54% e 61%, respectivamente.

Nas imagens antes do tratamento, pode-se perceber já aos 7 dias o início da deposição de cristais em todas as amostras de BIO, de maneira heterogênea ao longo da fissura. Isso se deve

provavelmente à distribuição dos agregados leves na matriz, e é um comportamento comumente percebido em trabalhos com bactérias encapsuladas, onde a deposição de carbonato se dá preferencialmente nas proximidades das cápsulas com bactéria ou com a fonte de cálcio (Pacheco, 2020). Nas idades posteriores, porém, essa tendência foi sendo revertida, conforme ilustrado pela Figura 9, e a deposição de cristais ocorreu para toda a extensão da fissura na maior parte das amostras, inclusive em pontos de maior espessura. Adicionalmente, a concentração irregular de íons cálcio na matriz pode conferir a regiões específicas uma aglomeração de produtos químicos percebidos no fenômeno de autocatrização (SILVA *et al.*, 2020).

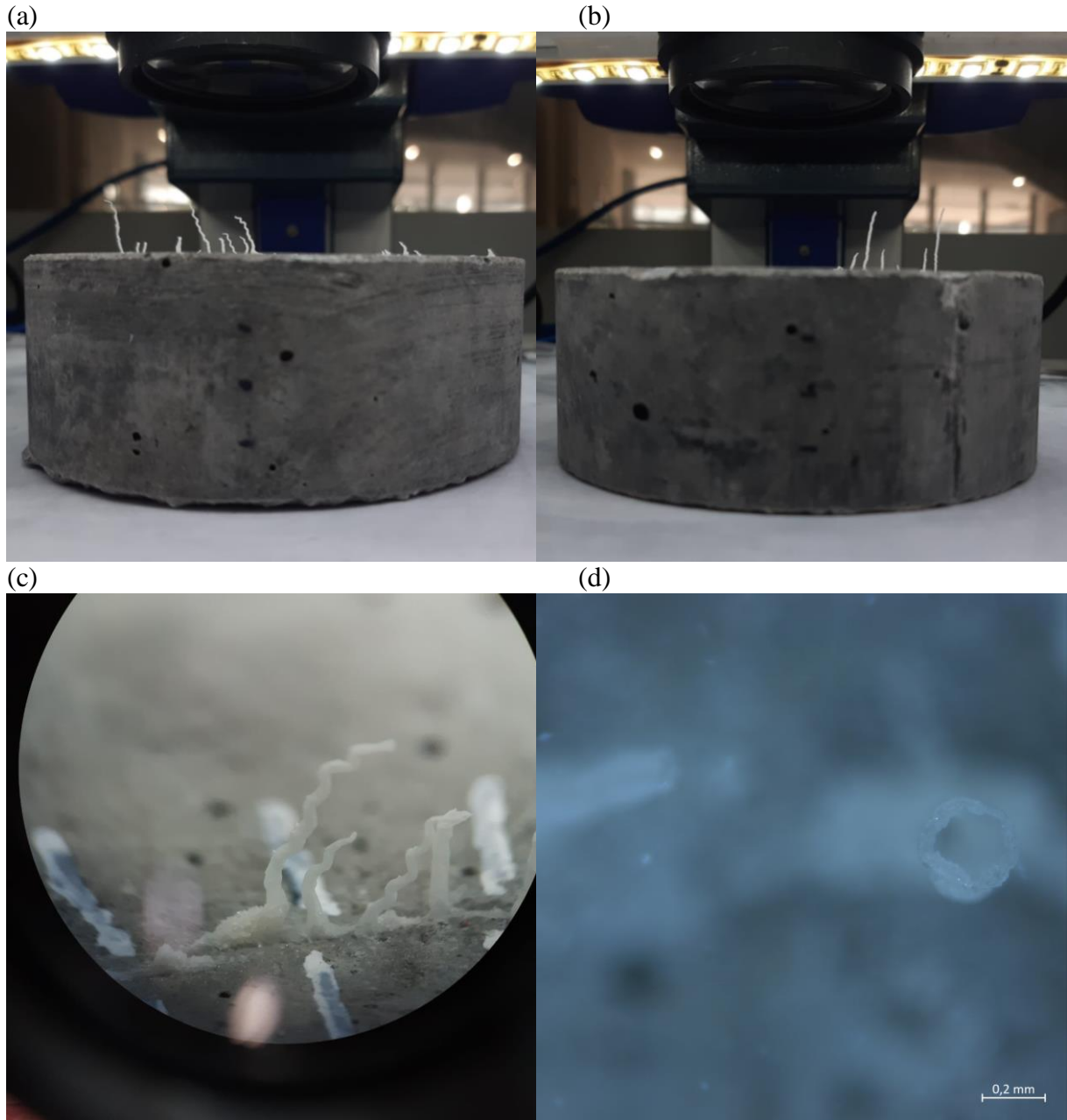
Figura 9: Deposição de cristais na amostra BIO7 aos 7 dias (a), 21 dias (b) e 28 dias (c)



Fonte: própria da autora

Aos 14 dias, havia nas amostras do BIO uma formação de cristais para fora do plano das fissuras, e com uma formação tubular, conforme ilustrado na Figura 10 (d).

Figura 10: Formações de cristais fora do plano da fissura (a) amostra BIO13 aos 21 dias, (b) amostra BIO9 aos 21 dias, (c) aproximação de cristais da amostra BIO13 aos 21 dias, (d) aproximação no microscópio do topo de uma das formações de cristais tubulares da amostra BIO8 aos 14 dias.

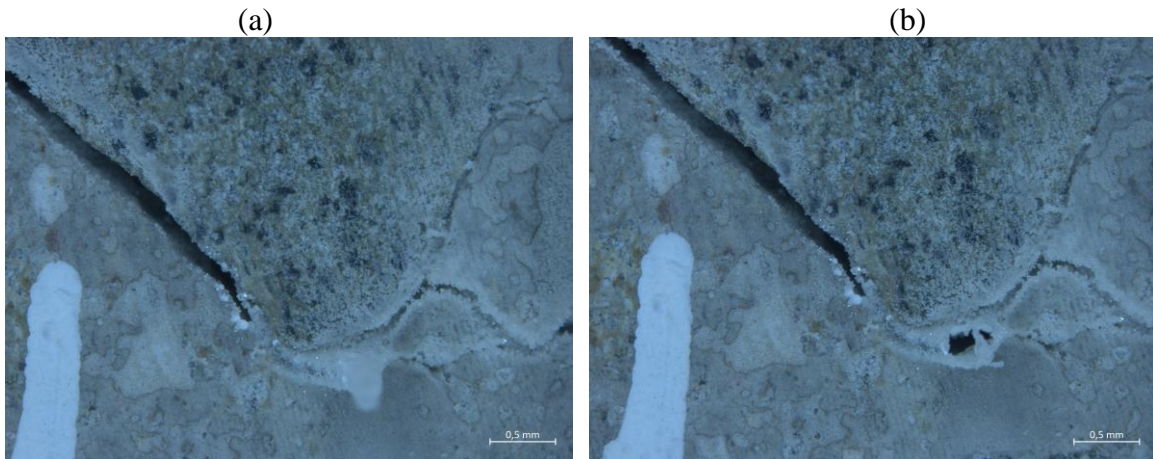


Fonte: própria da autora.

Como eles não apresentavam sombreamentos em área de fissura que pudessem comprometer a análise, eles foram mantidos. Porém, aos 21 dias, por não serem completamente perpendiculares ao plano, conforme demonstrado na Figura 10 (a), (b) e (c), esta formação causava sombreamentos em pontos onde a fissura ainda estava aberta, e os cristais foram rompidos a uma distância de aproximadamente 2mm do plano da fissura. Este procedimento foi adotado também para todos os outros cristais superiores a 5mm e que não causavam sombreamento, para que se mantivesse um padrão. Uma vez que estes cristais apresentavam uma formação tubular, em alguns pontos este procedimento fez com que a fissura ficasse novamente exposta, como mostrado na Figura 11, aumentando a área total de fissura na quantificação naquela data

em pontos antes considerados como fechados (não tendo ficado superior, porém, em nenhum caso, à área na idade de avaliação anterior). Este processo foi necessário em todas as amostras do BIO, aos 21 e aos 28 dias, em uma amostra do C aos 21 dias e, aos 28 dias, 4 amostras C, 3 amostras REF e uma SA.

Figura 11: Porção 6 da amostra REF3 aos 21 dias, antes (a) e depois (b) da remoção dos cristais muito grandes.



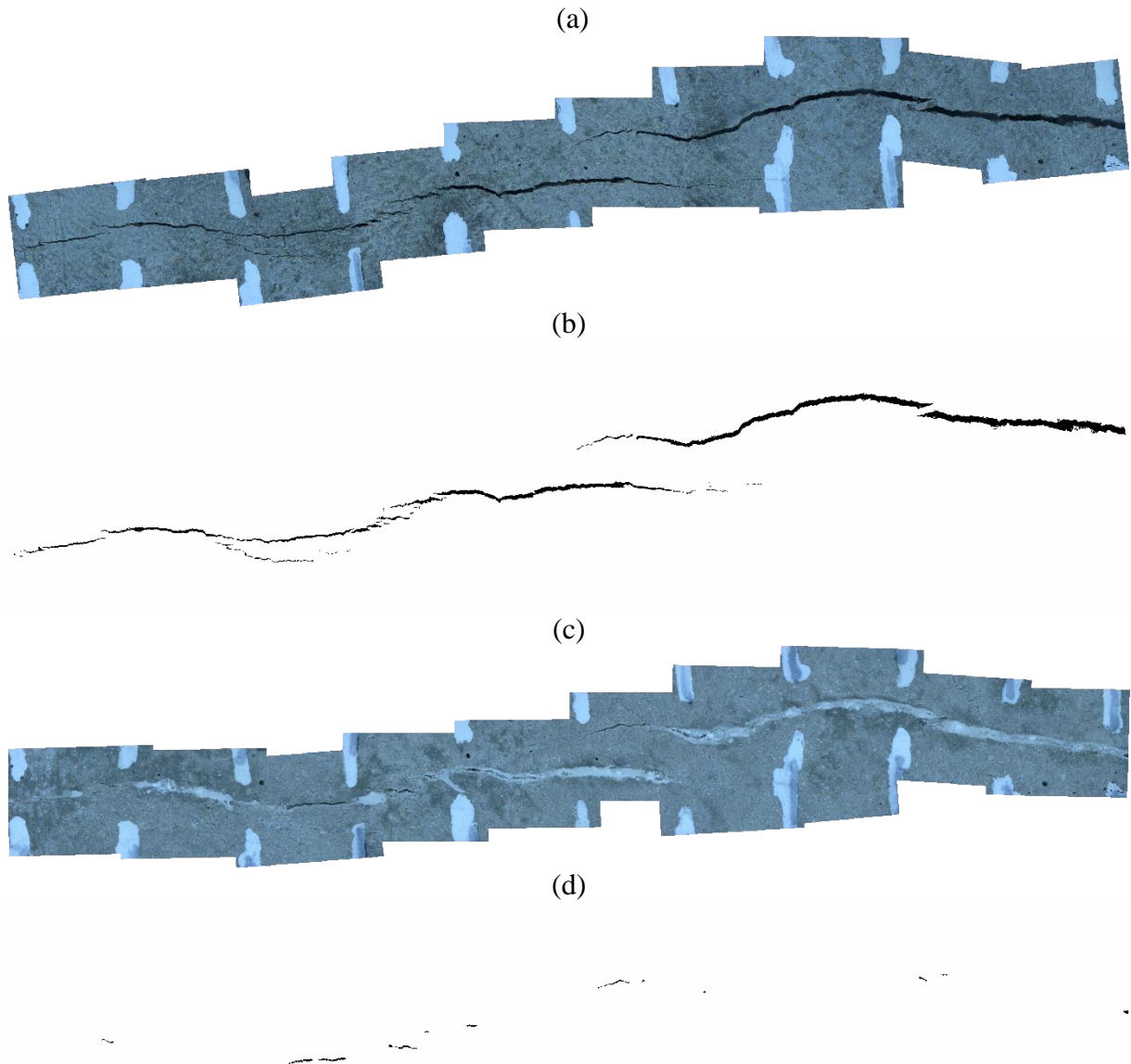
Fonte: própria da autora.

O concreto referência apresenta um fechamento aos 7 dias que se deu principalmente nos pontos onde as fissuras eram menos espessas, coerente com o esperado de autocatrização autógena pela hidratação do cimento anidro, e evidenciado em outros trabalhos como Cappellessio (2018) e Arndt (2019), tendo depois atingido uma estabilidade e demonstrando pouca evolução após os 14 dias.

O concreto com utilização de sílica ativa (SA) e o concreto com cristalizante (C) apresentaram um comportamento semelhante ao referência aos 7 e aos 14 dias, tendo mais tarde um desempenho superior. Este comportamento é coerente com as reações do aditivo cristalizante e com a reação pozolânica da sílica ativa, pois elas vão ocorrer somente após a hidratação do cimento, visto que são reações que utilizam produtos desta hidratação. Isso acontece justamente quando o concreto REF diminui a taxa de recuperação, ou seja, quando há uma diminuição nestas reações devido ao fato de que boa parte do cimento já reagiu.

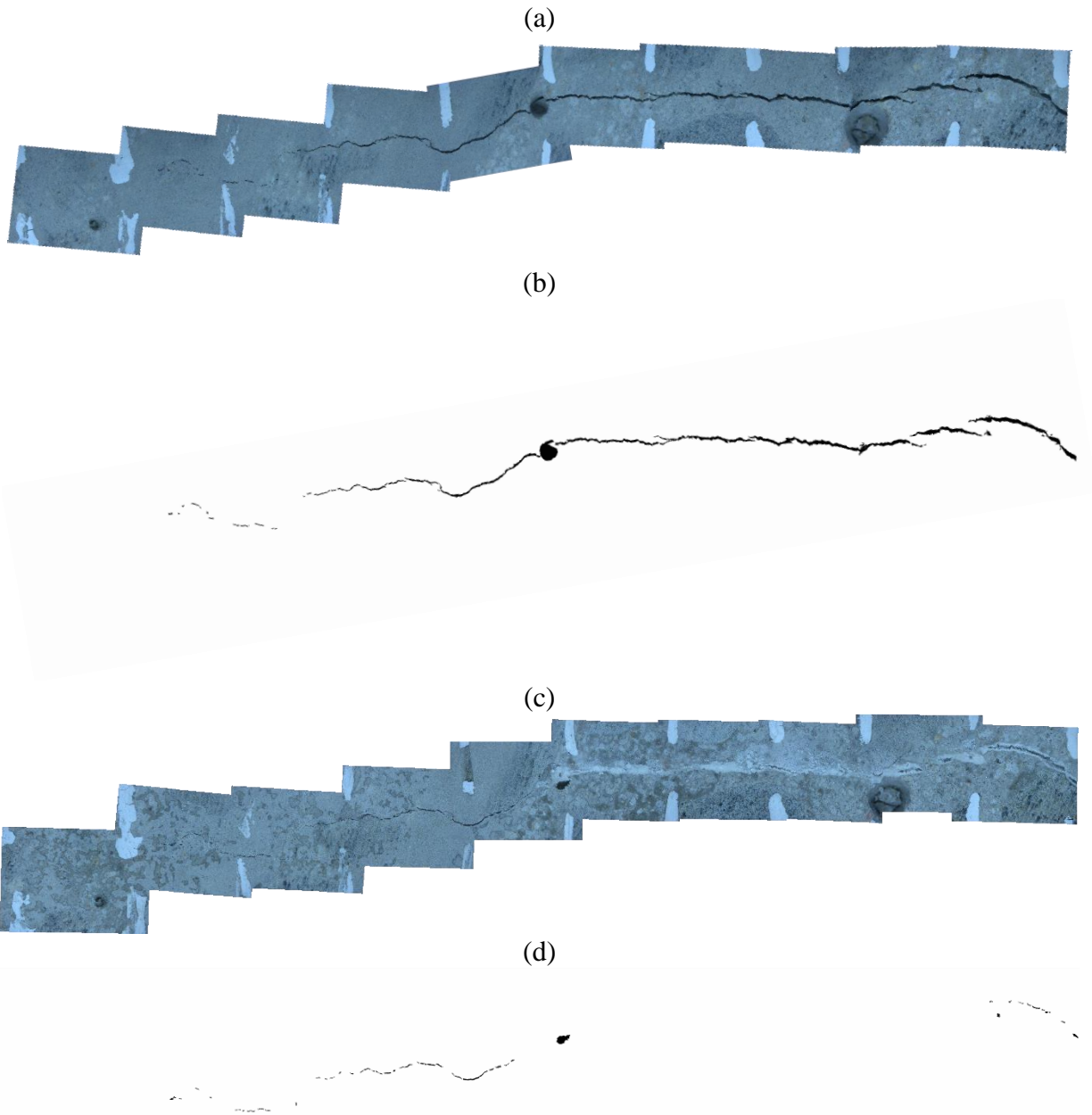
As amostras de cada traço que apresentaram maior percentual de fechamento da fissura na análise por imagem estão representadas da Figura 12 à Figura 15. Nelas é possível perceber que a análise pelo software apresenta algumas limitações, e pontos de fissuras com abertura muito pequena acabam sendo considerados como fechados.

Figura 12: Amostra BIO5 aos 0 dias imagem original (a), aos 0 dias imagem tratada (b), aos 28 dias imagem original (c), e aos 28 dias imagem tratada (d), com 95% da área de fissura fechada



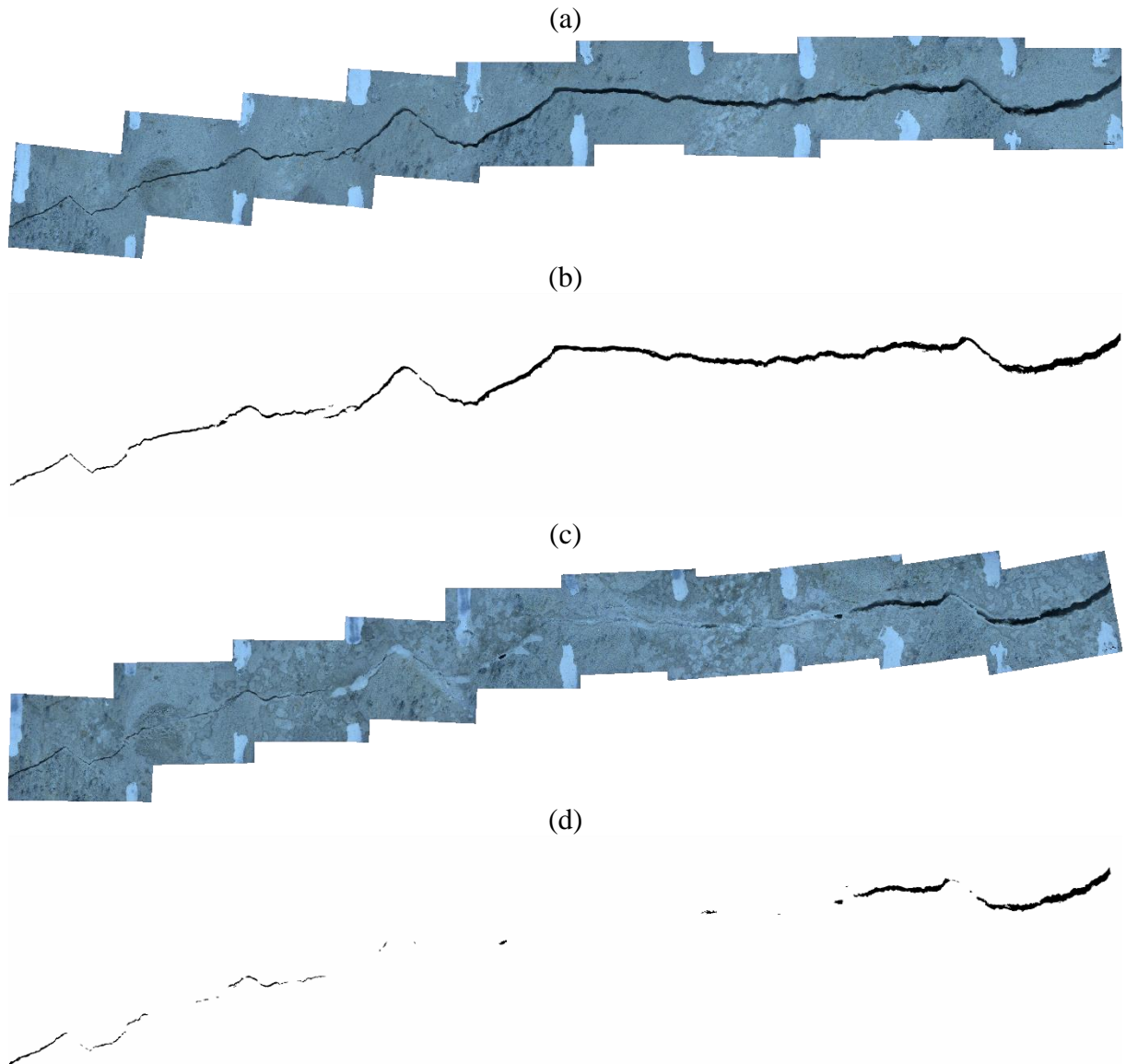
Fonte: própria da autora

Figura 13: Amostra C3 aos 0 dias imagem original (a), aos 0 dias imagem tratada (b), aos 28 dias imagem original (c), e aos 28 dias imagem tratada (d), com 86% da área de fissura fechada



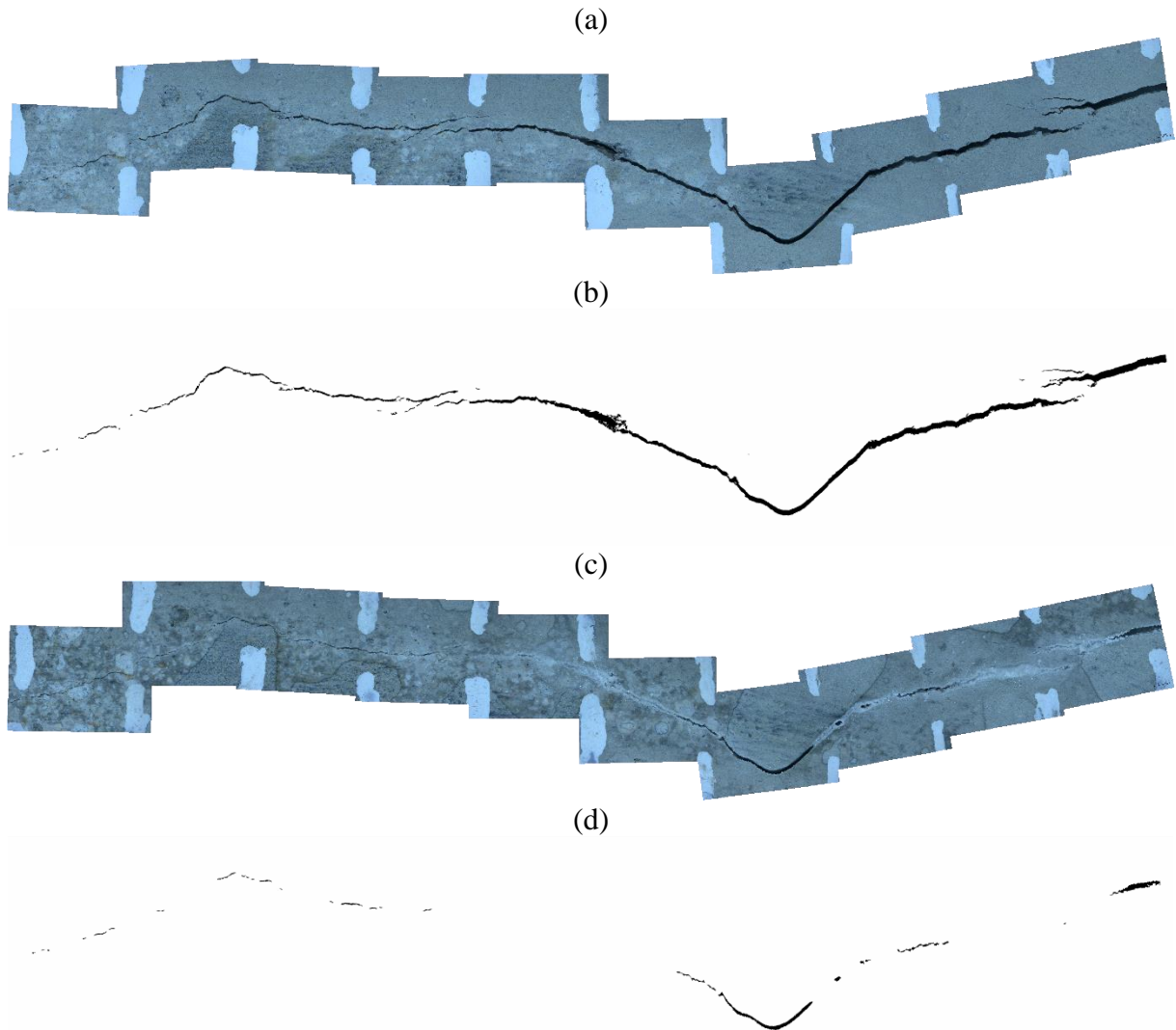
Fonte: própria da autora

Figura 14: Amostra R2 aos 0 dias imagem original (a), aos 0 dias imagem tratada (b), aos 28 dias imagem original (c), e aos 28 dias imagem tratada (d), com 68% da área de fissura fechada



Fonte: própria da autora

Figura 15: Amostra SA3 aos 0 dias imagem original (a), aos 0 dias imagem tratada (b), aos 28 dias imagem original (c), e aos 28 dias imagem tratada (d), com 86% da área de fissura fechada



Fonte: própria da autora

5. CONCLUSÕES

Neste estudo, foi possível avaliar e comparar, por meio de análise de imagem e velocidade de onda ultrassônica, a autocicatrização desencadeada por diferentes agentes de cicatrização, em concretos fissurados aos 3 dias.

Os mecanismos estudados foram a autocicatrização autógena por utilização de sílica ativa (SA), por utilização de aditivo cristalizante (C), e a autocicatrização autônoma por utilização de microorganismos (BIO) encapsulados em agregado leve, além de um concreto referência (REF), sem adições.

Pode-se perceber que, em relação à velocidade de onda ultrassônica, o concreto REF teve um melhor desempenho (aumento de 6,9% da velocidade aos 28 dias de idade), seguido pelo concreto SA (aumento de 3,7%), depois pelo C (aumento de 1,1%), tendo o BIO demonstrado o pior desempenho aos 28 dias (aumento de 0,8%).

Já em relação à análise de imagem, pode-se perceber uma superioridade na utilização das bactérias quando analisado o percentual de recuperação médio em comparação com os demais

agentes (74% de recuperação média da área da fissura aos 28 dias), seguido pelo concreto SA (com 69% de recuperação média aos 28 dias) e do concreto C (com 61% de recuperação média aos 28 dias), tendo o concreto REF os piores resultados (recuperação média de 54% da área da fissura).

Por estes resultados, o concreto BIO apresenta melhor desempenho quanto ao fechamento superficial da fissura, enquanto o concreto REF se mostrou superior no quesito de densificação interna da matriz. O concreto SA atuou tanto externa como internamente de forma satisfatória. No entanto, não se pode relacionar diretamente os dados obtidos de velocidade de onda ultrassônica aos resultados obtidos de análise de imagem, já que as medidas se referem a diferentes formas de atuação dos agentes cicatrizantes (fechamento interno ou externo) e estas, a diferentes requisitos de desempenho desejado dos concretos.

Este trabalho contribui com o estudo para entendimento do fenômeno da autocicatrização, que pode ser uma ferramenta importante para se aumentar a durabilidade de estruturas. Além disso, é um dos primeiros trabalhos no contexto nacional a utilizar as bactérias como um agente de autocicatrização incorporado na mistura do concreto, o que demanda a cooperação entre diferentes áreas do conhecimento, tornando a pesquisa um trabalho multidisciplinar.

REFERÊNCIAS

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

ARNDT, J. A. **Avaliação de aditivos cristalizantes na autocicatrização de concretos de cimento Portland**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: concreto - procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: concreto - ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: agregados para concreto - especificação. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802**: concreto endurecido - determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: edificações habitacionais: desempenho. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: cimento Portland e outros materiais em pó - determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: cimento Portland – requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889**: concreto - determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916**: agregado miúdo - determinação da densidade e absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16917**: Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água, Rio de Janeiro, 2021

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: agregados - determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: agregado graúdo - determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009

CAPPELLESSO, V. G. **Uso de impermeabilizante por cristalização para redução da permeabilidade do concreto**. Monografia (Trabalho de conclusão do curso de engenharia civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2016.

CAPPELLESSO, V. G. **Avaliação da autocicatrização de fissuras em concretos com diferentes cimentos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2018.

ÇOPUROĞLU, O. *et al.* Experimental Techniques Used to Verify Healing. In: DE ROOIJ, M. *et al.* **Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials**. State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 221-SHC, 11. Springer Science & Business Media, 2013. p 19-64

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

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

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

FERRARA, L. *et al.* **Experimental characterization of the self-healing capacity of cement based materials and its effects on the material performance: A state of the art report by COST Action SARCOS WG2**. *Construction and Building Materials*. v. 167, p. 115–142, 2018.

GARAY, T. M.; BOROWSKI, J. V. B.; SILVA, D. M. G; PETRY, N. S.; MASUERO, A. B.; DAL MOLIN, D. C. C. **Self-healing evaluation by optical microscope: An Approach to image acquisition, processing and analysis**. In: XVII Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação das Construções, Fortaleza, junho de 2021

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

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

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

HOLLMAN, C. F. **Avaliação da influência de aditivos cristalizantes na resistência à penetração de íons cloreto em concretos fissurados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2020.

HUANG, H.; YE, G.; QIAN, C.; SCHLANGEN, E. **Self-healing in cementitious materials: Materials, methods and service conditions**. *Materials and Design*. v.92, pp. 499-511. 2016.

- LI, V. C. *et al.* Recovery against Mechanical Actions. In: DE ROOIJ, M. *et al.* **Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials**. State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 221-SHC, 11. Springer Science & Business Media, 2013. p 119-216.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.
- NAIN, N., SURABHI, R., V, Y, N., KRISHNAMURHTY, V., DEEPA, T., TAHRANNUM, S. **Enhancement in Strength Parameters of Concrete by Application of Bacillus Bacteria**. Construction and Building Materials, v. 202, p. 904-908, 2019.
- PACHECO, F. **Análise da eficácia dos mecanismos de autocicatrização do concreto**. Tese (Doutorado em engenharia civil). Universidade Do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, 2020.
- PETRY, N. S. **Influência dos ambientes de exposição no fenômeno da autocicatrização de fissuras com idades variadas em concretos convencionais de cimento Portland com diferentes resistências**. Tese (Doutorado em engenharia civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2021.
- ROIG-FLORES, M.; PIRRITANO, M.; SERNA, P.; FERRARA, L. **Effect of crystalline admixtures on the self-healing capability of early-age concrete studied by means of permeability and crack closing tests**. Construction Build Master. v. 114 p. 447–457. 2016.
- SAN MARTIN, J. F. F. **Avaliação da autocicatrização de concretos com adição de cristalizantes: análise em obra e em laboratório**. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2021.
- SILVA, D. M. G. **Avaliação do comportamento de polímeros superabsorventes com distintos níveis de pré-saturação em matrizes cimentícias**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2018
- SILVA, D. M. G; CAPPELLESSO, V. G.; GARCIA, M. G. L; MASUERO, A. B., DAL MOLIN, D. C. C. **Calcium hydroxide influence in autogenous self-healing of cement-based materials in various environmental conditions**. Ambiente Construído, vol 21, n. 2, p. 209-224, abr./jun. 2021
- SCHLANGEN, E.; JOSEPH, C. Self-Healing Processes in Concrete. In: GHOSH, S. K. (Ed.). **Self-Healing Materials: Fundamentals, Design Strategies, and Applications**. Weinheim: Wiley-VCH, p. 141–182. 2009.
- SEIFAN, M.; SAMANI, A. K.; BERENJIAN, A. **Bioconcrete: next generation of self-healing concrete**. Applied microbiology and biotechnology vol. 100, Ed.6, p. 2591-2602, 2016
- TAKAGI, E. M. **Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória de altoforno ativados por catalisador cristalino**. [s.l.] Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2013.
- TZIVILOGLOU *et al.* Bio-Based Self-Healing Concrete: From Research to Field Application. In: HAGER M.D., VAN DER ZWAAG S., SCHUBERT U.S. (Eds). **Self-healing Materials**, vol. 273, Cham: Springer International Publishing; 2015, p. 345-386
- VAN TITTELBOOM, K.; DE BELIE, N. **Self-Healing in Cementitious Materials - A Review**. Materials, v. 6, n. 6, p. 2182–2217, 2013.

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