



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE  
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E  
TERRITÓRIO (ILATIT)**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA CIVIL (PPG ECI)**

**INFLUÊNCIA DE DIFERENTES LINHAGENS BACTERIANAS E NUTRIENTES NA  
AUTOCICATRIZAÇÃO DE MATRIZES A BASE DE CIMENTO COM E SEM AR  
INCORPORADO**

**SHEILA KARINE LENZ**

Foz do Iguaçu

2022



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE  
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E TERRITÓRIO  
(ILATIT)**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA CIVIL (PPG ECI)**

**INFLUÊNCIA DE DIFERENTES LINHAGENS BACTERIANAS E NUTRIENTES NA  
AUTOCICATRIZAÇÃO DE MATRIZES A BASE DE CIMENTO COM E SEM AR  
INCORPORADO**

**SHEILA KARINE LENZ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Mestra em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dra. Edna Possan

Coorientador: Prof. Dr. Michel Rodrigo Zambrano Passarini

Foz do Iguaçu

2022

SHEILA KARINE LENZ

**INFLUÊNCIA DE DIFERENTES LINHAGENS BACTERIANAS E NUTRIENTES NA  
AUTOCICATRIZAÇÃO DE MATRIZES A BASE DE CIMENTO COM E SEM AR  
INCORPORADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Mestra em Engenharia Civil.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientador: Profa. Dra. Edna Possan  
UNILA

---

Coorientador: Prof. Dr. Michel Rodrigo Zambrano Passarini  
UNILA

---

Profa. Dra. Berenice Martins Toralles Carbonari  
UEL

---

Profa. Dra. Fernanda Pacheco  
UNISINOS

---

Profa. Dra. Rafaella Costa Bonugli Santos  
UNILA

Foz do Iguaçu, 03 de junho de 2022.

Catálogo elaborado pelo Setor de Tratamento da Informação  
Catálogo de Publicação na Fonte. UNILA - BIBLIOTECA LATINO-AMERICANA - PTI

L575i

Lenz, Sheila Karine.

Influência de diferentes linhagens bacterianas e nutrientes na autocatrização de matrizes a base de cimento com e sem ar incorporado / Sheila Karine Lenz. - Foz do Iguaçu, 2022.

168 fls.: il.

Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Instituto Latino-americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território (ILATIT), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGECI).

Orientador: Edna Possan.

Coorientador: Michel Rodrigo Zambrano Passarini.

1. Bacillus. 2. Concreto auto-regenerativo. 3. Extrato de levedura. I. Possan, Edna. II. Passarini, Michel Rodrigo Zambrano. III. Título.

CDU 624.012.4

Dedico este trabalho aos meus pais Hary  
Lenz e Ivone Lenz, com amor.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que contribuíram para que esta pesquisa fosse realizada. Em primeiro lugar agradeço à professora Edna Possan, pela correta e competente orientação, além do constante apoio, carinho e amizade a mim dedicados. Ao professor Michel Passarini por todos os esclarecimentos e auxílio laboratorial na coorientação do trabalho, imprescindíveis para a conclusão desta pesquisa interdisciplinar, tão desafiadora. À Polyana Ghellere, que muitas vezes foi minha guia e professora também.

Aos técnicos Wagner Ferreira e Luciano Fiamonzini e à Paula Santos do LADEMA, pelos incontáveis auxílios no laboratório, com equipamentos, materiais, conselhos e caronas, todos sempre de prontidão para o que fosse necessário. Às técnicas Giseli e Priscila pelo auxílio no Laboratório de Biotecnologia Ambiental e ao Professor Nuno e técnico Gilson, pela atenção e paciência em todos os aspectos, ao me auxiliar na utilização do estereomicroscópio. Ao técnico Sandy, por toda a disponibilidade e boa vontade em ajudar e ensinar sobre o microscópio eletrônico de varredura.

À Itaipu binacional, pelo empréstimo de formas e em especial ao engenheiro Maurício pelos ensaios mecânicos realizados para esta pesquisa. À professora Dayana, pelo empréstimo de materiais para a pesquisa. À UNILA, pela bolsa de estudo e pela oportunidade de cursar a pós-graduação.

Aos colegas de laboratório Raquel, Dalila, Cristiano, Gabriela e Eduardo, por todas as conversas, sérias e engraçadas, por todos os cafés e por todo o auxílio e apoio no período de ensaios laboratoriais, que tornaram muito mais agradável o período de análise experimental.

Aos melhores colegas mestrandos, Daiane, Karine e Cássio pelos infinitos auxílios, desabafos, conselhos, conversas e risadas que tornaram mais leve, divertido e acolhedor, mesmo de forma remota, o mestrado de isolamento em período de pandemia, sem vocês o processo teria sido muito mais difícil.

Aos meus pais Hary e Ivone, meus irmãos Sandro e Simone e meu namorado Thiago, que são meu maior orgulho e exemplo de vida, pelo amor incondicional, força e incentivo em todas as ocasiões e pela compreensão nos momentos de ausência.

A Deus, pelas bênçãos recebidas e por ser meu refúgio nos momentos difíceis. Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

*Queremos ter certezas e não dúvidas, resultados e não experiências, mas nem mesmo percebemos que as certezas só podem surgir através das dúvidas e os resultados somente através das experiências.*

**Carl Jung**

## RESUMO

A autocicatrização biológica vem ganhando destaque como uma ferramenta biotecnológica promissora na solução de fissuras, manifestação patológica inerente aos materiais cimentícios. O processo ocorre por meio do emprego de bactérias com capacidade de precipitação de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) metabolicamente. Estas quando adicionadas à matriz cimentícia durante a mistura, ou quando aspergidas na superfície do concreto endurecido, podem preencher fissuras com o  $\text{CaCO}_3$  precipitado. Porém, a matriz cimentícia é hostil, sendo necessário criar um ambiente favorável para a viabilidade prolongada das bactérias, com nutrientes e microporos para o seu desenvolvimento. Neste contexto, este estudo objetivou avaliar a eficiência de três linhagens bacterianas na autocicatrização de fissuras, a *Bacillus subtilis* AP91 (AP91), *Bacillus cf. subtilis* (BS) e *Bacillus cf. cereus* (BC) e dos nutrientes extrato de levedura (YE) e lactato de cálcio (CL), isolados e combinados em diferentes concentrações (0, 0,5 e 1%), incorporadas na água de amassamento de argamassas cimentícias com e sem aditivo incorporador de ar (AIR), gerando 16 variações de argamassa. Para análise da autocicatrização das fissuras foram produzidas amostras prismáticas (40x40x160mm) fissuradas no 1º e 7º dia de idade, mantidas em cura submersa em água e visualizadas semanalmente em estereomicroscópio óptico. A análise da microestrutura do material precipitado foi realizada em microscópio eletrônico de varredura (MEV) aos 77 dias nas amostras com o maior índice de cicatrização. Para avaliar a influência das bactérias, seus nutrientes e o AIR nas propriedades do material cimentício, foram realizados ensaios de resistência à compressão, resistência à tração na flexão, absorção de água por capilaridade, módulo de elasticidade dinâmico pela técnica de excitação por impulso e velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. Por meio da análise visual observou-se que amostras contendo bactérias apresentaram índices de cicatrização superiores às amostras de referência. Os melhores resultados foram obtidos por amostras armadas BS<sub>air</sub>, que obtiveram taxas de cicatrização de 95,72% em fissuras de espessura de 1,58mm, amostras AP91<sub>air</sub> que cicatrizaram 72,95% de espessuras com poros de até 2,09mm e a AP91 com 1% de YE + AIR alcançou taxa de 89,57% de cicatrização em fissuras com poros de até 2,28mm, além de ter apresentado precipitação de produto que excedia a espessura da fissura em até 4x. A autocicatrização autógena apresentou taxa de cicatrização de 100% em fissuras de até 0,57mm. A incorporação de AIR à mistura mostrou-se favorável a autocicatrização, proporcionando índices até 126% maiores que a mesma variação sem o aditivo. Amostras com adição de bactérias, nutrientes e ar incorporado, isolados ou combinados, apresentaram desempenho insatisfatório nas propriedades de resistência a tração, compressão e absorção de água por capilaridade das argamassas, mas supõe-se que alterando alguns fatores, os resultados podem ser diferentes. Além dos objetivos propostos, verificou-se diferença de autocicatrização entre amostras com e sem armadura, tendo sido observados resultados mais favoráveis em amostras armadas; além da comprovação, por meio de análise em MEV, de que os agentes biológicos, mesmo dispersos na matriz, tendem a metabolizar  $\text{CaCO}_3$  na região da fissura. De forma geral, conclui-se que a adição de bactérias às matrizes cimentícias é promissora na autocicatrização, mas são necessários maiores estudos para que a técnica favoreça também as propriedades do material cimentício. Com estes estudos, é possível que a tecnologia seja desenvolvida de forma eficaz laboratorialmente, de modo a torna-la escalável a grandes construções, contribuindo para o aumento da durabilidade e extensão de vida útil de estruturas de concreto.

**Palavras-chave:** *Bacillus*. Self-healing concrete. Lactato de cálcio. Extrato de levedura. Autocicatrização biológica. Aditivo incorporador de ar.

## ABSTRACT

The biological self-healing has been gaining prominence as a promising biotechnological tool for solving cracks, a pathological manifestation inherent to cementitious materials. The process occurs through the use of bacteria capable of precipitating calcium carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ) metabolically. These, when added to the cement matrix during mixing, or when sprayed on the surface of hardened concrete, can fill up cracks with the precipitated  $\text{CaCO}_3$ . However, the cement matrix is hostile, and it is necessary to create a favorable environment for the prolonged viability of bacteria, with nutrients and micropores for their development. In this context, this study aimed to evaluate the efficiency of three bacterial strains in the self-healing of fissures, *Bacillus subtilis* AP91 (AP91), *Bacillus cf. subtilis* (BS) and *Bacillus cf. cereus* (BC) and different nutrients, yeast extract (YE) and calcium lactate (CL), isolated and combined in different concentrations (0, 0.5 and 1%), incorporated in the mixing water of cementitious mortars with and without air-entraining additive (AIR), generating 16 mortar variations. For the analysis of crack self-healing, prismatic samples (40x40x160mm) cracked at 1 and 7 days were produced, kept in submerged curing in water and viewed weekly under an optical stereomicroscope. The analysis of the microstructure of the precipitated material was performed in a scanning electron microscope (SEM) at 77 days in the samples with better self-healing. To evaluate the influence of bacteria, their nutrients and AIR on the properties of the cementitious material, tests were carried out on compressive strength, flexural strength, water absorption by capillarity, dynamic modulus of elasticity by the impulse excitation technique and propagation velocity of ultrasonic waves. Through visual analysis, it was observed that samples containing bacteria showed healing rates higher than the reference samples. The best results were obtained by BSair reinforced samples, which obtained healing rates of 95.72% in 1.58mm thick fissures, AP91air samples that healed 72.95% thickness with pores up to 2.09mm and AP91 with 1% YE + AIR reached a healing rate of 89.57% in fissures with pores up to 2.28mm, in addition to having presented product precipitation that exceeded the crack thickness by up to 4x. The autogenous self-healing showed a healing rate of 100% in fissures up to 0.57 mm. The incorporation of AIR to the mixture proved to be favorable to self-healing, providing rates up to 126% higher than the same variation without the additive. Samples with the addition of bacteria, nutrients and incorporated air, alone or in combination, showed unsatisfactory performance in the properties of tensile strength, compression and water absorption by capillarity of the mortars, but it is assumed that by changing some factors, the results may be different. In addition to the proposed objectives, there was a difference in self-healing between samples with and without armor, with more favorable results being observed in armored samples; in addition to the confirmation, through SEM analysis, that biological agents, even dispersed in the matrix, tend to metabolize  $\text{CaCO}_3$  in the fissure region. In general, it is concluded that the addition of bacteria to cementitious matrices is promising in self-healing, but further studies are needed so that the technique also favors the properties of the cementitious material. With these studies, it is possible for the technology to be developed efficiently in the laboratory, in order to make it scalable to large constructions, contributing to the increase in durability and service life extension of concrete structures.

**Keywords:** *Bacillus*. Self-healing concrete. Calcium lactate. Yeast extract. Biological self-healing. Air entraining additive.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> – Desempenho e custos de manutenção ao longo do tempo para estruturas sem (a) e com material autocicatrizante (b).....	20
<b>Figura 2</b> – Etapas minimizadas e/ou extintas com a autocicatrização no processo de fissuração de estruturas de concreto armado.....	21
<b>Figura 3</b> – Diferentes mecanismos de autocura autógena de fissuras .....	22
<b>Figura 4</b> – Processo de autocura autógena por meio da precipitação de CaCO <sub>3</sub> na presença de água e CO <sub>2</sub> dissolvido .....	23
<b>Figura 5</b> - Laje da garagem com percolação de água pelas fissuras durante o teste de permeabilidade à água - (a, b e c) fissuras de referência, não tratadas, (d e e) fissuras com tratamento de superfície à base de bactérias .....	27
<b>Figura 6</b> – Primeira aplicação de agente biológico autocicatrizante em uma construção real – (a) Imagem do tanque de água (b) fissura em parede sem aditivo de autocura e (c) fissura em parede com aditivo de autocura. ....	28
<b>Figura 7</b> – Tanque de expansão com aditivo à base de bactérias (a) Imagem do tanque (b) fissuras seladas por precipitação de CaCO <sub>3</sub> (c) fissuras com entrada de umidade (d) fissuras autocicatrizadas após a entrada de umidade. ....	29
<b>Figura 8</b> – Esquema geral do processo de autocicatrização em material cimentício .....	30
<b>Figura 9</b> – Processo esquemático de recuperação de fissura por biodeposição de carbonato e cálcio em matrizes cimentícias .....	31
<b>Figura 10</b> – Esquema simplificado da precipitação de CaCO <sub>3</sub> pela hidrólise da ureia.....	32
<b>Figura 11</b> - Diferentes fases do carbonato de cálcio .....	34
<b>Figura 12</b> – Visualização em MEV de diferentes morfologias de calcita precipitadas pela <i>Bacillus subtilis</i> 168 .....	34
<b>Figura 13</b> – Visualização em MEV do biofilme formado pela bactéria <i>Bacillus subtilis</i> <i>in vitro</i> .....	35
<b>Figura 14</b> – Visualização em MEV da precipitação de CaCO <sub>3</sub> por <i>Bacillus subtilis</i> AP91 esporuladas em solução tampão fosfato (a-b) na solução de cura e (c-d) na água de amassamento .....	35
<b>Figura 15</b> - Ciclo de vida de uma bactéria formadora de esporos.....	37
<b>Figura 16</b> – Resistência à compressão de amostras cimentícias com diferentes nutrientes .....	39
<b>Figura 17</b> – Condições de cura em estágio inicial (antes do desmolde e fissuração) e de autocicatrização.....	41
<b>Figura 18</b> – Proteção de esporos de <i>B. cohnii</i> em (a) gel de agarose sem AIR, (b) AIR C201, (c) AIR B119 e (d) AIR B130 .....	44

<b>Figura 19</b> - Comportamento das bactérias inseridas em corpos de prova de argamassa	45
<b>Figura 20</b> - Esquema com as atividades desenvolvidas na pesquisa	48
<b>Figura 21</b> - Curva Granulométrica do cimento CPV-ARI utilizado na pesquisa	50
<b>Figura 22</b> – Análise termogravimétrica com curvas TG e DTG do cimento CPV-ARI	50
<b>Figura 23</b> – Curva granulométrica da areia natural	51
<b>Figura 24</b> – Análise termogravimétrica com curvas TG e DTG do aditivo incorporador de ar	52
<b>Figura 25</b> – Plaqueamento do meio de cultura NA em placas de Petri	54
<b>Figura 26</b> – Placas de Petri identificadas após técnica da semeadura e criotubos contendo as bactérias preservadas	54
<b>Figura 27</b> – Bactérias visíveis nas estrias de esgotamento em placas de Petri	54
<b>Figura 28</b> – Frascos erlenmeyer contendo meio de cultura MH e bactérias	55
<b>Figura 29</b> – Shaker em agitação dos frascos Erlenmeyers contendo as bactérias	55
<b>Figura 30</b> – Tubos Falcon contendo solução bacteriana (a) antes da lavagem do meio de cultura; (b) após a lavagem do meio de cultura e substituição por solução salina	55
<b>Figura 31</b> – Processo de moldagem de amostras armadas (a) espaçadores de pasta cimentícia; (b) espaçadores e armadura posicionados a 1cm da base sobre um lastro de argamassa; (c) preenchimento do molde prismático com argamassa	63
<b>Figura 32</b> – Cura das amostras prismáticas fissuradas, separadas por variação de bactéria e nutrientes	63
<b>Figura 33</b> – Esquema do método de abertura de fissuras nas amostras prismáticas	64
<b>Figura 34</b> – Abertura de fissuras nas amostras prismáticas por meio de carga manual em morsa com 4 pontos (a) protocolo utilizado (b) fissuras resultantes	64
<b>Figura 35</b> – Divisão da fissura em 8 espaços para visualização em microscópio óptico em (a) esquema e (b) fotos reais	66
<b>Figura 36</b> – Processo de corte das amostras analisadas em MEV – Grupo (ii)	70
<b>Figura 37</b> – Processo de corte das amostras analisadas em MEV	71
<b>Figura 38</b> – Amostras em <i>Stubs</i> e revestimento em ouro paládio para análise em MEV	71
<b>Figura 39</b> – Esquema simplificado do ensaio direto para obtenção da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas	73
<b>Figura 40</b> – Ensaio para determinação do módulo de elasticidade dinâmica na configuração longitudinal pela técnica de excitação por impulso	74
<b>Figura 41</b> – Ensaio de absorção de água por capilaridade	75
<b>Figura 42</b> – Esquema de ruptura do corpo de prova, originando outras duas amostras	76

<b>Figura 43</b> – Desprendimento de produto precipitado na borda da fissura em amostra BS <i>air</i> .....	83
<b>Figura 44</b> - Índice de cicatrização ao longo do tempo em amostras fissuradas e com armadura .....	84
<b>Figura 45</b> - Índice de cicatrização ao longo do tempo de fissuras de amostras (armadas) com bactérias AP91 e nutrientes .....	90
<b>Figura 46</b> – Índice de cicatrização aos 70 dias de amostras armadas com bactérias AP91, BC e BS com e sem ar incorporado e Bactéria AP91 + nutrientes com e sem ar incorporado.....	91
<b>Figura 47</b> - Índice de cicatrização de fissuras ao longo do tempo em amostras não armadas.....	96
<b>Figura 48</b> - Índice de cicatrização aos 56 dias de amostras não armadas com bactérias AP91, BC e BS sem nutrientes, com e sem ar incorporado .....	96
<b>Figura 49</b> – Comparativo do Índice de cicatrização final de amostras armadas (70 dias) e não armadas (56 dias) .....	97
<b>Figura 50</b> - Imagem microestrutural em MEV das amostras armadas com maior Índice de cicatrização com 2.500x e 10.000x de magnificação, na Região da fissura (FIS) e face fraturada (FRAT).....	99
<b>Figura 51</b> – Imagem microestrutural em MEV da região fissurada (FIS) das amostras de referência e AP91_0,5-0,5 <i>air</i> com 2.500x e 10.000x de magnificação .....	100
<b>Figura 52</b> – Espectro de EDS de amostras armadas M-REF e as com maior Índice de cicatrização.....	101
<b>Figura 53</b> – Imagem microestrutural em MEV da amostra sem armadura com maior Índice de cicatrização, na região da fissura (FIS) e face fraturada (FRAT) com 2.500x e 10.000x de magnificação.....	103
<b>Figura 54</b> – Espectro de EDS na face fissurada da argamassa AP91 <i>air</i> sem armadura	103
<b>Figura 55</b> – Porcentagem de recuperação do módulo de elasticidade dinâmico de amostras armadas fissuradas com bactérias AP91, BC e BS sem nutrientes aos 28 e 70 dias .....	105
<b>Figura 56</b> – Porcentagem de recuperação de Ed de amostras armadas fissuradas contendo bactéria <i>B. subtilis</i> AP91 e nutrientes aos 28 e 70 dias .....	105
<b>Figura 57</b> – Porcentagem de recuperação do módulo de elasticidade dinâmico de amostras não armadas fissuradas com bactérias AP91, BC e BS sem nutrientes aos 28 e 56 dias .....	106
<b>Figura 58</b> – Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 e 56 dias de amostras íntegras sem armadura contendo bactérias AP91, BC e BS sem nutrientes .....	108
<b>Figura 59</b> – Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 e 56 dias de amostras não armadas e íntegras com <i>B. subtilis</i> AP91 + nutrientes .....	108

<b>Figura 60</b> – Comparativo de Ed final de amostras íntegras e fissuradas .....	109
<b>Figura 61</b> - Diferença de Ed final, aos 56 dias, entre amostras fissuradas e não fissuradas .....	109
<b>Figura 62</b> - Resistência à tração na flexão aos 56 dias de amostras fissuradas sem armadura .....	110
<b>Figura 63</b> - Resistência à compressão aos 56 dias de amostras fissuradas sem armadura .....	110
<b>Figura 64</b> - Resistência à tração na flexão de amostras íntegras com bactérias AP91, BC e BS sem nutrientes aos 28 e 56 dias .....	111
<b>Figura 65</b> – Resistência à tração na flexão de amostras íntegras com bactéria <i>B. subtilis</i> AP91 e nutrientes, aos 28 e 56 dias .....	112
<b>Figura 66</b> – Resistência à compressão de amostras íntegras com bactérias AP91, BC e BS sem nutrientes aos 28 e 56 dias .....	112
<b>Figura 67</b> – Resistência à compressão de amostras íntegras com bactéria <i>B. subtilis</i> AP91 e nutrientes, aos 28 e 56 dias .....	113
<b>Figura 68</b> – Porcentagem de recuperação de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas em amostras sem armadura fissuradas com bactérias AP91, BC e BS sem nutrientes aos 28 e 56 dias .....	115
<b>Figura 69</b> – Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas entre amostras fissuradas (com dano) e íntegras (sem danos) aos 28 e 56 dias.....	116
<b>Figura 70</b> – Diferença de velocidade de propagação de ondas entre amostras íntegras e fissuradas .....	116
<b>Figura 71</b> – Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas de amostras íntegras sem nutrientes ao longo do tempo .....	117
<b>Figura 72</b> – Porcentagem de recuperação de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas em amostras íntegras com bactérias AP91, BC e BS sem nutrientes em 4 períodos de tempo.....	118
<b>Figura 73</b> - Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas de amostras íntegras com nutrientes ao longo do tempo .....	118
<b>Figura 74</b> - Porcentagem de recuperação de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas em amostras íntegras com bactérias AP91 e nutrientes iniciando aos 7 dias de cura.....	119
<b>Figura 75</b> – Absorção de água por capilaridade em 72 horas aos 28 e 56 dias de amostras com bactérias AP91, BS e BC .....	120
<b>Figura 76</b> – Absorção de água por capilaridade em 72 horas aos 28 e 56 dias de amostras com a bactéria <i>Bacillus Subtilis</i> AP91 e nutrientes .....	121

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Definição de autocicatrização e a distinção entre autógena e autônoma.....	22
<b>Tabela 2</b> – Fatores que influenciam na autocicatrização autógena em materiais a base de cimento .....	24
<b>Tabela 3</b> - Técnicas utilizadas para avaliação da eficiência da autocicatrização .....	46
<b>Tabela 4</b> - Propriedades químicas e físicas do cimento CP V – ARI.....	50
<b>Tabela 5</b> – Propriedades da areia natural utilizada .....	51
<b>Tabela 6</b> - Formulação do meio de cultura Ágar Nutriente (NA).....	52
<b>Tabela 7</b> – Formulação do meio de cultura Mueller Hinton (MH) .....	52
<b>Tabela 8</b> - Espécie, nomenclatura e bactérias selecionadas para esta pesquisa. ....	53
<b>Tabela 9</b> - Quantificação dos esporos bacterianos presentes nas primeiras soluções produzidas contendo bactérias AP91, BS e BC.....	57
<b>Tabela 10</b> – Traço adotado para produção das argamassas – em massa.....	57
<b>Tabela 11</b> - Composição e nomenclatura das 16 variações de argamassas moldadas ....	59
<b>Tabela 12</b> – Forma, dimensão e número de amostras produzidas para o estudo.....	60
<b>Tabela 13</b> – Cálculo realizado para diluição da solução bacteriana até a concentração de $10^6$ esporos / ml .....	61
<b>Tabela 14</b> – Dosagem de amostras prismáticas e cilíndricas sem nutrientes .....	61
<b>Tabela 15</b> – Dosagem de amostras prismáticas e cilíndricas com nutrientes .....	62
<b>Tabela 16</b> – Quantidade de fotografias de fissuras geradas ao longo do tempo.....	67
<b>Tabela 17</b> – Exemplo de quadro gerado para cada uma das 72 amostras com a evolução da autocicatrização ao longo do tempo .....	67
<b>Tabela 18</b> – Metodologia de cálculo de autocicatrização de amostras ao longo do tempo .....	68
<b>Tabela 19</b> – Exemplo da metodologia de cálculo utilizada para quantificar a autocicatrização das fissuras ao longo do tempo .....	69
<b>Tabela 20</b> – Resumo dos ensaios realizados no estudo .....	77
<b>Tabela 21</b> – Autocicatrização em zonas fissuradas ao longo do tempo, de amostras armadas sem nutrientes .....	78
<b>Tabela 22</b> - Análise da autocicatrização das zonas fissuradas de amostras armadas com nutrientes ao longo do tempo .....	85
<b>Tabela 23</b> – Detalhe da autocicatrização total de fissuras e poros em amostras contendo bactéria AP91 + 1% YE + AIR (AP91_0-1air) .....	89

<b>Tabela 24</b> - Análise da autocicatrização das zonas fissuradas de amostras sem armadura e sem nutrientes ao longo do tempo.....	92
--	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c	Relação água/cimento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACC	<i>Amorphous calcium carbonate</i> (Carbonato de cálcio amorfo)
AIR	Aditivo incorporador de ar
BCM	<i>Biologically controlled mineralization</i>
BIM	<i>Biologically induced mineralization</i>
Ca <sup>2+</sup>	Íons de cálcio
CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de Cálcio
CH	Hidróxido de cálcio (Forma abreviada de Ca(OH) <sub>2</sub> )
CL	<i>Calcium lactate</i>
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Íons carbonato
CP	Cimento Portland
DO	Densidade óptica
E <sub>d</sub>	Módulo de elasticidade dinâmico
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ITA	Instituto Tecnológico de Aeronáutica
LADEMA	Laboratório de Desempenho, Estruturas e Materiais
LTCI	Laboratório de Tecnologia do Concreto de Itaipu
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MH	<i>Mueller Hinton</i>
NBR	Norma Brasileira Regulamentada
RILEM	<i>International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures</i>
TEI	Técnica de Excitação por Impulso
UEL	Universidade Estadual de Londrina
UNILA	Universidade Federal da Integração Latino-Americana
UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
VU	Vida Útil
YE	<i>Yeast extract</i>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA .....	15
1.2 OBJETIVOS .....	16
1.2.1 Geral.....	16
1.2.2 Específicos .....	17
1.3 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA .....	17
1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA .....	17
<b>2 A AUTOCICATRIZAÇÃO EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS</b> .....	<b>19</b>
2.1 MECANISMOS DE AUTOCICATRIZAÇÃO .....	21
2.2 A AUTOCICATRIZAÇÃO BIOLÓGICA.....	24
2.2.1 Panorama histórico da autocicatrização biológica.....	25
2.2.2 O processo de autocicatrização biológica .....	30
2.2.3 Bactérias precipitadoras de CaCO <sub>3</sub> .....	36
2.2.4 A influência dos nutrientes no processo de biomineralização .....	38
2.2.5 Características de fissuração e cura dos materiais cimentícios .....	41
2.2.6. Aditivo incorporador de ar (AIR) como proteção de esporos bacterianos .....	43
2.3 INFLUÊNCIA DA BIOCIMENTAÇÃO NAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS CIMENTÍCIOS E FORMAS DE AVALIAÇÃO .....	45
<b>3 PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>48</b>
3.1 PRIMEIRA ETAPA .....	49
3.1.1 Caracterização do Materiais.....	49
3.1.2 Preparo dos microrganismos.....	53
3.1.3.1 <i>Reativação das bactérias</i> .....	53
3.1.3.2 <i>Crescimento e esporulação das bactérias</i> .....	54
3.1.3.3 <i>Quantificação das bactérias esporuladas</i> .....	56
3.1.3 Produção das argamassas.....	57
3.1.4 Definição do método de fissuração .....	63
3.2 SEGUNDA ETAPA.....	65
3.2.1 Análise visual da autocicatrização de fissuras .....	65
3.2.2 Avaliação das propriedades das amostras.....	72
3.2.3.1 <i>Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas</i> .....	72

3.2.3.2 Módulo de elasticidade dinâmico pela Técnica de excitação por impulso (TEI)	73
3.2.3.3 Absorção de água por capilaridade	75
3.2.3.4 Resistência à tração na flexão e compressão axial	76
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>78</b>
4.1.1 Efeito da linhagem bacteriana e do AIR na autocicatrização de fissuras	78
4.1.2 Avaliação do efeito dos nutrientes na autocicatrização	85
4.1.3 Autocicatrização em amostras sem armadura	92
4.1.4 Análise em Microscópio Eletrônico de Varredura e Espectroscopia por Energia Dispersiva	98
4.2.1. Módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ )	104
4.2.2 Resistência à tração na flexão e resistência à compressão	110
4.3 VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS	114
4.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	120
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>123</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>126</b>
<b>APÊNDICES</b>	<b>135</b>
APÊNDICE A – CÁLCULOS DO TEOR DE AIR NA ARGAMASSA	136
APÊNDICE B – CÁLCULO DA TAXA E ÍNDICE DE CICATRIZAÇÃO DE AMOSTRAS	137
APÊNDICE C – ÍNDICE DE CICATRIZAÇÃO DE FISSURAS AO LONGO DO TEMPO	161

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto feito com cimento Portland é um dos materiais de construção mais utilizados no mundo devido às suas vantajosas propriedades, seu baixo custo e a possibilidade de adaptação às mais diversificadas formas (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Porém, ao longo da vida útil (VU), as estruturas em concreto podem ser acometidas por manifestações patológicas, dentre as quais destaca-se a formação de fissuras. As fissuras podem comprometer a durabilidade das estruturas de concreto à medida que possibilitam a entrada de líquidos, gases e outros agentes agressivos na matriz, expondo as armaduras do concreto à corrosão, podendo desencadear o colapso parcial ou total das construções (EUZEBIO; ALVES; FERNANDES, 2017; JONKERS, 2011; VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013).

Com o aumento de manifestações patológicas em elementos e/ou estruturas a base de cimento, tornam-se necessárias ações de reparos e manutenções de forma regular, que geralmente demandam o consumo de materiais cimentícios, o que não é desejável do ponto de vista econômico e de sustentabilidade. Estima-se que a produção de cimento seja globalmente responsável por cerca de 6 a 7% das emissões antropogênicas de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (CO2.EARTH, 2020; ROADMAP, 2020). Medeiros, Andrade e Helene (2011), avaliaram os custos com manutenções e reparos em estruturas em países desenvolvidos, e concluíram que as despesas se equiparam e podem ser até superiores aos custos de uma nova construção. Além destes custos, existem os transtornos e prejuízos relacionados à perda de produtividade e, ainda, a dificuldade de visibilidade e acesso a determinados locais de obra (VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013).

Com o objetivo de minimizar os problemas associados às fissuras, de modo a tornar o concreto mais durável e sustentável, encontra-se em ascensão a busca por novas tecnologias, sendo uma destas a autocicatrização de materiais cimentícios (GULIN, 2019; JONKERS, 2011; SCHWANTES-CEZARIO; NOGUEIRA; TORALLES, 2017; WIKTOR; JONKERS, 2011b). A autocicatrização do concreto ocorre naturalmente principalmente de duas formas, com a hidratação das porções anidras de cimento formando C-S-H, ou, de forma mais considerável, quando os íons de cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) presentes nos poros com água do material cimentício, reagem com os íons carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) presentes na água da fissura, formando carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) (DE ROOIJ *et al.*, 2013). A autocicatrização intrínseca aos materiais cimentícios, denomina-se autógena. Sendo assim, explorar a precipitação de  $\text{CaCO}_3$  intencional em matrizes a base de cimento, pode ser altamente

vantajoso no processo de recuperação de fissuras (VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013). A autocicatrização que ocorre por meio da adição de algum material não comum à matriz cimentícia denomina-se autônoma. Neste sentido, existem bactérias capazes de precipitar  $\text{CaCO}_3$  biologicamente e, segundo estudos de Belie e Muynck (2009), Jonkers, (2011) Wiktor e Jonkers (2011), Gulin (2019) e Ghellere (2021) entre outros, seu uso em materiais cimentícios é capaz de fechar fissuras, diminuir os vazios, e, inerentemente, promover a diminuição da porosidade, o aumento da resistência à compressão e da vida útil de concretos e argamassas. De acordo com Zhang *et al.* (2020), para que a autocicatrização ocorra em fissuras de materiais cimentícios por meio de tecnologia com base no metabolismo bacteriano, são necessárias bactérias formadoras de esporos, nutrientes e fontes de cálcio, além da correta seleção desses materiais e agentes biológicos, para que sobrevivam às condições adversas do material. O reparo de fissuras por intermédio de um agente de cura encontrado facilmente na natureza, como as bactérias, integrado ao material cimentício, pode ser uma ferramenta biotecnológica promissora para manutenção de estruturas, especialmente em locais de difícil acesso, como estruturas subterrâneas, e locais que precisam de interrupção das atividades para o reparo, como barragens, túneis e pontes (JONKERS *et al.*, 2010; VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013).

A diversidade de bactérias existentes é vasta, porém nem todas são adequadas para incorporação em materiais a base de cimento. Estas bactérias precisam, primeiramente, não causar risco à saúde das pessoas ou meio ambiente. Além disso, para garantir sua sobrevivência em ambientes altamente alcalinos como o concreto, sem nutrientes e com oxigênio apenas nos poros e superfície, elas precisam ser alcali-resistentes e capazes de originar esporos, estruturas biológicas extremamente resistentes (JONKERS *et al.*, 2010; TITTELBOOM *et al.*, 2010). Além disso, se incorporadas à matriz junto a água de amassamento, devem ser resistentes à ação da mistura mecânica do material cimentício (JONKERS *et al.*, 2010). Neste contexto, as bactérias mais utilizadas são as do gênero *Bacillus*, incluindo as espécies *B. pasteurii* (ou *Sporosarcina pasteurii*), *B. sphaericus*, *B. subtilis*, *B. pseudofirmus*, *B. cohnii*, *B. megaterium*, *B. licheniformis*, *B. mucilaginous*, *B. halodurans*, *B. alkalinitrilicus*, *B. flexus* e *B. cereus* (GHELLERE, 2021).

As bactérias podem ser incorporadas em materiais cimentícios basicamente de três formas: i) na água de amassamento; ii) por imersão dos materiais cimentícios em solução bacteriana; e, iii) por aspersão desta mesma solução em amostras já fissuradas (VIJAY; MURMU; DEO, 2017). Elas podem ser ainda encapsuladas em

agregados leves, para protegê-las das condições adversas do concreto (PACHECO, 2020). A maioria das pesquisas incorpora as bactérias na água da mistura, diretamente na matriz cimentícia (SCHWANTES-CEZARIO; NOGUEIRA; TORALLES, 2017), inseridas com ou sem a formação de esporos (JONKERS *et al.*, 2010), encapsulada em materiais porosos como argila expandida (WIKTOR; JONKERS, 2011b) e perlita expandida (PACHECO, 2020; ZHANG *et al.*, 2017), ou em materiais como hidrogel (WANG *et al.*, 2018) e sílica gel (TITTELBOOM *et al.*, 2010). Além disso, tem-se a possibilidade de incorporação das bactérias em matrizes com ar incorporado (JUSTO-REINOSO *et al.*, 2022; PARASTEGARI; MOSTOFINEJAD; POURSIINA, 2019).

A diminuição contínua do diâmetro dos poros ao longo da vida útil dos concretos e argamassas, pode causar o esmagamento dos esporos bacterianos, comprometendo sua durabilidade nos materiais cimentícios. Com a incorporação de ar à mistura, microporos são criados na matriz, possibilitando a sobrevivência das bactérias (JONKERS; THIJSSSEN, 2010). Contudo, a incorporação não controlada ou excessiva de ar, pode trazer prejuízos às propriedades mecânicas e de durabilidade das estruturas de concreto.

Na autocicatrização por agentes biológicos o fechamento das fissuras ocorre pela precipitação de  $\text{CaCO}_3$  metabolicamente pelas bactérias. Para que este processo ocorra são adicionados nutrientes, como o extrato de levedura, que servirão como fonte de energia para as bactérias, além de fontes de cálcio, precursoras da precipitação de  $\text{CaCO}_3$ , como o lactato de cálcio (VANDINE; WEST; HANSEN, 2010; WANG *et al.*, 2018).

O processo de autocicatrização biológica é intimamente ligado à produção de  $\text{CaCO}_3$ , que depende de muitos fatores, como o pH da matriz, a presença de íons cálcio, o tipo de bactéria, sua concentração, os nutrientes e compostos precursores de cálcio utilizados, além de vários materiais e metodologias de cura aplicadas (KHALIQ; EHSAN, 2016). A fissuração dos materiais cimentícios pode ocorrer em várias idades, sendo que em idades iniciais tendem a ter recuperação pela hidratação de compostos não hidratados na matriz (VIEIRA, 2008), e além disso, as exposições ambientais das estruturas são variadas, algumas imersas em água por longos períodos, outras em locais úmidos, em locais secos, e outras, ainda, em condições de úmidas-secas (LUO; QIAN; LI, 2015).

Sendo assim, os cenários de estudo são vastos, e esta pesquisa visa contribuir para a melhor compreensão do processo de autocicatrização por meio de agentes

biológicos precipitadores de  $\text{CaCO}_3$ , simulando condições de aplicação na busca de um desenvolvimento tecnológico e científico que o viabilize, de modo a contribuir com o aumento da durabilidade dos materiais cimentícios.

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA

No Brasil, a autocicatrização de materiais cimentícios por meio de agentes biológicos é uma tecnologia recente que vem recebendo destaque especialmente em grupos de pesquisa da Universidade Estadual de Londrina (UEL) e Universidade Federal da Integração Latino-americana (UNILA), no Paraná, na Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS) e Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) no Rio Grande do Sul, no Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), em São Paulo, entre outros. Mas existem lacunas a serem preenchidas quanto à eficácia e comportamento de bactérias locais, disponíveis na região do estudo, as dimensões mínimas e máximas de fissuras que a precipitação de  $\text{CaCO}_3$  pelas bactérias consegue preencher, dificuldades quanto aos procedimentos de laboratório e a necessidade de desenvolvimento de protocolos para torná-los mais confiáveis e replicáveis, além dos custos elevados dos nutrientes, necessários ao desenvolvimento bacteriano no interior de materiais a base de cimento.

O presente estudo surgiu como continuidade de pesquisas que vem sendo desenvolvidas por um grupo de estudo interdisciplinar, de Engenharia Civil e de Microbiologia, da Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA), denominado de “Biorecuperação: Estudo da reparação de microfissuras em concreto através da biodeposição”. As primeiras investigações do grupo iniciaram em 2019, por meio do estudo de Ghellere (2021), com o estudo dos efeitos de cinco bactérias adicionadas em materiais cimentícios. O primeiro agente biológico foi uma linhagem bacteriana amplamente estudada como autocicatrizante, a *Bacillus subtilis* AP91, extraída de cascas de arroz e fornecida pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), e outras quatro linhagens, as quais foram isoladas localmente, sendo duas em pontos de lixiviação de cálcio e pontos de infiltração de água do Rio Paraná, na barragem da Usina Hidrelétrica de Itaipu, e duas na parede de uma edificação localizada em Foz do Iguaçu (PR). A utilização de linhagens locais, de acordo com Dhami, Reddy e Mukherjee (2012), é importante para que ocorra a precipitação de  $\text{CaCO}_3$ , pois estas já estarão adaptadas às condições do ambiente em que serão inseridas. As bactérias isoladas foram esporuladas e adicionadas

em misturas de argamassas para análise de suas precipitações de  $\text{CaCO}_3$ , e a consequente capacidade de fechamento de fissuras de cada uma.

O estudo de Ghellere (2021) levantou questionamento sobre a influência da adição de distintos nutrientes junto às bactérias na autocicatrização das fissuras e nas propriedades dos materiais a base de cimento. Em seu trabalho a autora utilizou os nutrientes acetato de cálcio e extrato de levedura, apenas de forma combinada e com teor de 1%. No presente estudo, também se tem expectativa de maior precipitação de  $\text{CaCO}_3$  e consequente maior potencial de fechamento de fissuras em amostras com uso de aditivo incorporador de ar, sendo neste contexto que se encaixa a presente pesquisa.

Sendo assim, este estudo deu continuidade às pesquisas do grupo com as três bactérias que obtiveram melhor desempenho com relação à precipitação de  $\text{CaCO}_3$  aos 28 dias de idade no estudo de Ghellere (2021). A primeira selecionada foi a *Bacillus subtilis* AP91, a segunda uma *Bacillus cf. subtilis*, isolada da edificação, e a terceira uma *Bacillus cf. cereus*, isolada da barragem da Usina Hidrelétrica de Itaipu. No presente trabalho, os nutrientes utilizados foram o lactato de cálcio (CL), que possui maior eficácia de acordo com a literatura (JONKERS *et al.*, 2010; WIKTOR; JONKERS, 2011a), e o extrato de levedura (YE). Eles foram utilizados de forma isolada (1%CL + 0%YE e 0%CL + 1%YE) e combinada (0,5%CL + 0,5%YE e 1%CL + 1%YE). Todas as variações foram produzidas com e sem ar incorporado, com teor de aproximadamente 10%.

Expecta-se contribuir para o desenvolvimento da tecnologia laboratorialmente para que, futuramente, sejam desenvolvidos biomateriais destinados a recuperação de fissuras em construções reais e em grande escala, proporcionando redução dos impactos ambientais, menor consumo de recursos naturais e menor impacto econômico associados aos materiais utilizados na Construção Civil, contribuindo assim, com o aumento da durabilidade e vida útil das estruturas de concreto.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Geral

Este trabalho tem por objetivo principal avaliar a influência da incorporação de diferentes linhagens bacterianas e distintos nutrientes na autocicatrização de fissuras em materiais a base de cimento, com e sem ar incorporado.

### 1.2.2 Específicos

Com o desenvolvimento deste trabalho, tem-se os seguintes objetivos específicos:

- a) Avaliar o efeito isolado e combinado de diferentes concentrações dos nutrientes lactato de cálcio e extrato de levedura, no processo de autocicatrização de fissuras em materiais a base de cimento;
- b) Analisar o efeito de diferentes agentes biológicos na autocicatrização de fissuras em materiais cimentícios;
- c) Avaliar o efeito de aditivo incorporador de ar na autocicatrização de fissuras por meio da precipitação de  $\text{CaCO}_3$  por agentes biológicos;
- d) Mensurar a influência das bactérias, dos nutrientes e aditivo incorporador de ar nas propriedades de resistência à tração na flexão, resistência à compressão e absorção de água das argamassas.

### 1.3 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA

Esta pesquisa se delimitou em avaliar a autocicatrização promovida pela adição dos esporos das bactérias *Bacillus subtilis* AP91 (AP91), *Bacillus cf. subtilis* (BS) e *Bacillus cf. cereus* (BC), incorporadas na matriz cimentícia junto à água de amassamento, na concentração de  $10^6$  esporos  $\text{mL}^{-1}$ . Os agentes biológicos foram empregados em uma argamassa básica com traço 1:3:0,48 com e sem aditivo incorporador de ar (teor de aproximadamente 10%), produzida com cimento Portland CPV-ARI, com variação de dois nutrientes (lactato de cálcio e extrato de levedura) submetidos a cura submersa em água.

### 1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA

Esta pesquisa está estruturada em 5 capítulos. No primeiro são apresentadas a introdução, os objetivos, geral e específicos, além da contextualização e delimitação da pesquisa.

O segundo capítulo contempla uma revisão bibliográfica sobre a autocicatrização biológica em materiais cimentícios, os mecanismos, as linhagens

bacterianas e nutrientes necessários para que ocorra o processo, um breve panorama histórico, além da influência que a autocicatrização biológica pode ter sobre as propriedades dos materiais cimentícios.

O terceiro capítulo aborda o projeto experimental desenvolvido, com a descrição dos materiais, ensaios realizados e metodologia empregada. No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos, bem como a discussão acerca deles, baseando-se na literatura.

O capítulo 5 contempla as conclusões obtidas por meio da presente pesquisa, além de sugestões para trabalhos futuros. Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas.

## 2 A AUTOCICATRIZAÇÃO EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS

Vantagens como o custo relativamente baixo, disponibilidade de matéria-prima e a elevada resistência à compressão, fazem com que o concreto seja um dos materiais mais importantes utilizados no mundo. Porém, sua resistência à tração é baixa, o que pode levar ao aparecimento de fissuras (PARASTEGARI; MOSTOFINEJAD; POURSINA, 2019).

A baixa resistência à tração do concreto e o desencadeamento de múltiplas fissuras já é de amplo conhecimento de profissionais e pesquisadores, pois a fissuração é considerada uma característica inerente ao material. Porém, a ocorrência de microfissuras pode levar a uma rede contínua de fissuras, podendo comprometer seriamente a segurança das estruturas, à medida que possibilita a entrada de gases, líquidos e outros agentes agressivos até as armaduras, fragilizando a integridade e capacidade de resistência do concreto armado. Em situações onde as estruturas devam cumprir a função de retenção, as microfissuras ou a rede de fissuras por elas formadas, podem comprometer a estanqueidade do sistema (DE ROOIJ *et al.*, 2013). Com o aumento da demanda atual por grandes construções de infraestrutura, em grande escala e em ambientes excessivamente agressivos, essa fragilidade tem preocupado o meio técnico. Existem soluções para o reparo e manutenção dessas fissuras, porém, seus custos são consideravelmente altos. Além disso, essas manutenções podem ser dificultadas, levando em consideração a localização e tamanho das fissuras, e a necessidade de paralisação dos serviços em determinadas situações, como rodovias, pontes e túneis (VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013; ZHANG *et al.*, 2020).

Existem materiais cimentícios, concretos e argamassas, capazes de preencher as próprias microfissuras que surgem ao longo de sua vida útil, de maneira autônoma, sem qualquer diagnóstico humano ou intervenção externa. Esses materiais cimentícios são chamados de autocicatrizantes (ZHANG *et al.*, 2020), e podem atuar de maneira autógena e/ou autônoma.<sup>1</sup>

Ao mesmo tempo em que evita reparos e manutenções sucessivas, a autocicatrização estende a vida útil dos materiais cimentícios. Dessa forma, o desafio dos pesquisadores é o desenvolvimento de tecnologias que prolonguem a vida útil das

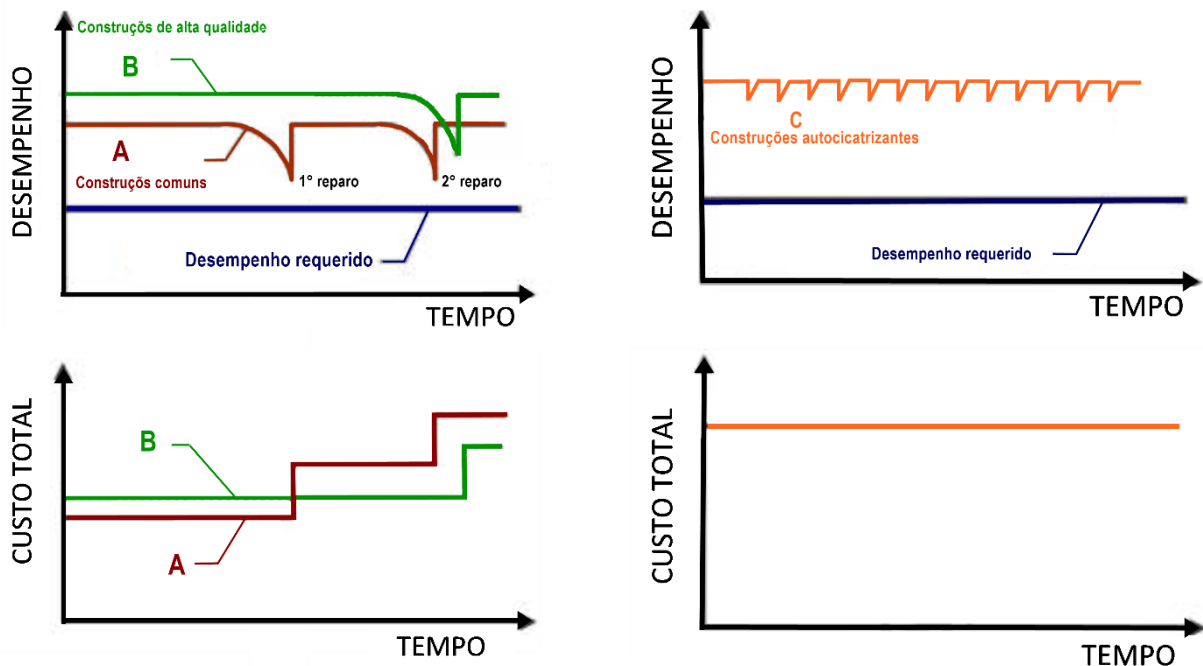
---

<sup>1</sup> Ver item 2.1.

estruturas de concreto, sem necessidade de intervenções, ou, ainda, o aperfeiçoamento de tecnologias já disponíveis, de modo que as construções atendam às exigências de desempenho com maior eficiência e com menor necessidade de reparos (CAPPELLESSO, 2018). São nessas situações que a utilização de concretos e argamassas autocicatrizantes pode ser extremamente útil, à medida que repara fissuras de forma autônoma e sem necessidade de intervenção externa para a recuperação (ZHANG *et al.*, 2020).

Cultural e historicamente, as estruturas de concreto são projetadas para atender a especificações iniciais, e a sua durabilidade é então definida por meio de programas de manutenção da edificação. Todavia, recentemente vem ocorrendo uma mudança de filosofia, que passa a considerar explicitamente a autocura dos materiais ao longo do tempo, dado o seu desempenho, como explicado na Figura 1 (DE ROOIJ *et al.*, 2013).

**Figura 1** – Desempenho e custos de manutenção ao longo do tempo para estruturas sem (a) e com material autocicatrizante (b)



a) sem material autocicatrizante

b) com material autocicatrizante

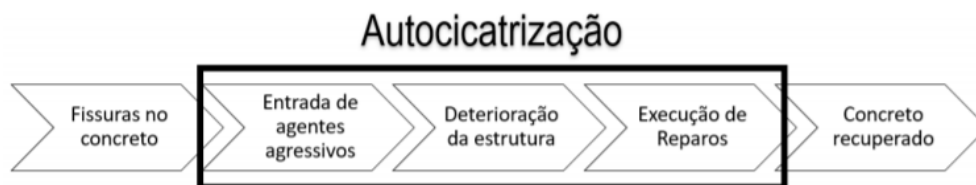
Fonte: traduzido e adaptado de De Rooij *et al.* (2013)

Na Figura 1(a), a linha A representa a degradação de construções comuns ao longo do tempo, até o estágio em que o primeiro reparo é necessário. Na linha B, que retrata construções de alta qualidade, o primeiro grande reparo demora mais para acontecer, direcionando à uma maior durabilidade. É importante ressaltar que a

durabilidade dos reparos também é preocupante pois, frequentemente, um segundo ou terceiro reparo são necessários pouco tempo depois, o que demonstra a importância de investir em qualidade inicialmente. Neste contexto, entende-se que a maior qualidade inicial se converte em redução de reparos, manutenções, custos e incômodos, o que direciona à uma ideologia de caso extremo, onde nenhum dos inconvenientes citados é necessário, pois o material se repara sozinho (Figura 1 (b)). Nesta situação, quando ocorre algum princípio de microfissuração ou degradação, o material se autocicatrizava (ou seja, tem a capacidade de fechar pequenas fissuras sem interferência humana), de modo a recuperar seu desempenho, de forma igual ou próxima à inicial (DE ROOIJ *et al.*, 2013).

O esquema apresentado na Figura 2 ilustra as etapas que podem ser minimizadas e/ou eliminadas com a autocicatrização (autógena ou autônoma) em materiais cimentícios, onde nota-se que a entrada de agentes agressivos, a deterioração da estrutura e a consequente necessidade de reparos, são substituídos por um único processo para obter um concreto recuperado: o de autocicatrização.

**Figura 2** – Etapas minimizadas e/ou extintas com a autocicatrização no processo de fissuração de estruturas de concreto armado



Fonte: Cappellessso (2018)

O termo utilizado pelo meio técnico e científico internacional para materiais cimentícios com potencial de se autorreparar ao sofrer algum dano que desencadeia fissuração, é *Self-healing concrete* (CAPPELLESSO, 2018). Estes materiais podem possuir a habilidade autógena de restaurar suas falhas, ou podem contar com auxílio de algum componente externo adicionado a ele, que o induza à recuperação de forma autônoma (DE ROOIJ *et al.*, 2013). Esses dois mecanismos serão descritos de maneira mais detalhada a seguir.

## 2.1 MECANISMOS DE AUTOCICATRIZAÇÃO

No lançamento do volume 11 do comitê técnico SHC-221, da *International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures*

(RILEM), De Rooij *et al.* (2013) apresentaram a definição de autocicatrização e a distinguiram em autógena e autônoma, conforme exposto na Tabela 1.

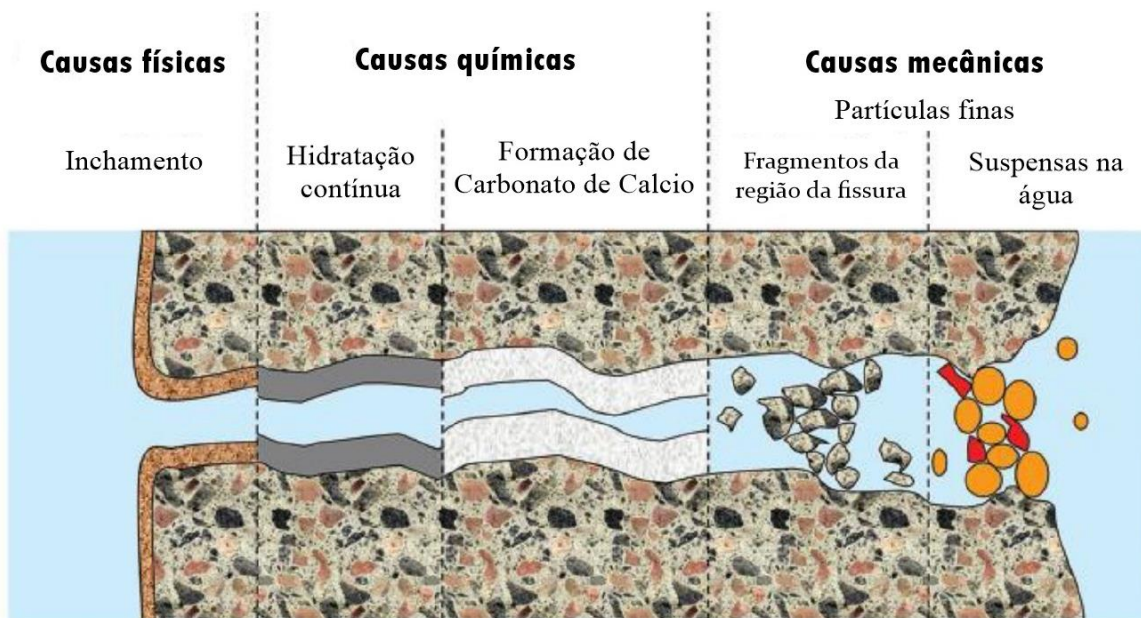
**Tabela 1** – Definição de autocicatrização e a distinção entre autógena e autônoma

<b>AUTOCICATRIZAÇÃO</b>	
Processo que ocorre no interior da matriz a base de cimento e que envolve a recuperação ou melhoria de alguma propriedade ou característica, que após algum dano (fissura), tenha reduzido o desempenho inicial.	
<b>AUTÓGENA</b>	<b>AUTÔNOMA</b>
Ocorre por meio de componentes comuns aos materiais cimentícios empregados no proporcionamento, sem necessariamente terem sido inseridos para a autocicatrização.	Ocorre na matriz cimentícia devido à inclusão intencional de compostos autocicatrizantes no proporcionamento ou não.

Fonte: adaptado de De Rooij *et al.* (2013)

Os mecanismos de autocura existentes em materiais a base de cimento podem ser ocasionados por processos físicos, químicos ou mecânicos (ZHANG *et al.*, 2020). Ainda no comitê técnico SHC-221 da RILEM, foram apresentaram os principais mecanismos para a autocicatrização autógena dos materiais (Figura 3).

**Figura 3** – Diferentes mecanismos de autocura autógena de fissuras



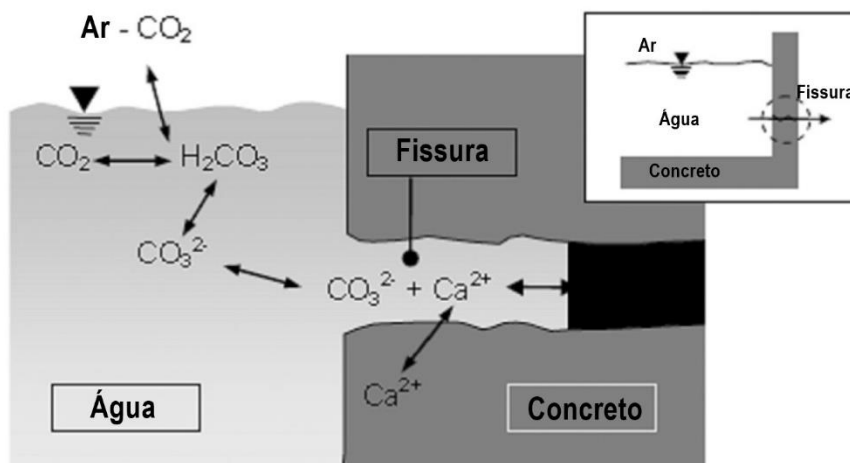
Fonte: Traduzido de De Rooij *et al.* (2013)

De acordo com a Figura 3, o mecanismo físico de autocicatrização autógena ocorre devido a um aumento de volume da pasta de cimento hidratada que ocorre

quando alguma água é absorvida, ocasionando uma redução na entrada de fluidos de até 10%. Quimicamente, são dois os mecanismos que causam a autocura autógena. O primeiro ocorre por meio da contínua hidratação do cimento anidro ao longo do tempo, mas que não é capaz isoladamente de selar uma fissura. O segundo processo químico, e mais importante em termos de contribuição para a autocicatrização de fissuras, é a formação de  $\text{CaCO}_3$ . Neste processo, os íons de cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) oriundos da água presente nos poros do material cimentício, reagem com os íons carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) presentes na água das fissuras, originando o carbonato de cálcio, que precipita os cristais na fissura. Este mecanismo é influenciado por condições de pH, concentração de reagentes e temperatura (DE ROOIJ *et al.*, 2013) e também pode estar relacionada com o fenômeno de eflorescência, pois nos locais onde ocorre a fissura, a água consegue percolar, lixiviando o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), que em contato com o gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), transforma-se em carbonato de cálcio e preenche as fissuras (CAPPELLESSO, 2018). Os mecanismos mecânicos que contribuem com a autocicatrização são de menor relevância, sendo decorrentes do acúmulo de pequenas partículas finas da água na região da fissura ou de fragmentos oriundos das faces do concreto ou argamassa (DE ROOIJ *et al.*, 2013).

Na Figura 4 é possível visualizar como ocorre a precipitação de  $\text{CaCO}_3$ , mencionada pela literatura (DE ROOIJ *et al.*, 2013) como mecanismo de maior contribuição autógena nos materiais cimentícios.

**Figura 4** – Processo de autocura autógena por meio da precipitação de  $\text{CaCO}_3$  na presença de água e  $\text{CO}_2$  dissolvido



Fonte: traduzido de Huang *et al.* (2016)

No processo ilustrado pela Figura 4, o  $\text{CO}_2$  presente no ar se dissolve na água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) formando ácido carbônico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) que se dissocia formando íons hidrogênio e

íons carbonato. Os íons  $\text{CO}_3^{2-}$  se difundem nas fissuras, encontrando o  $\text{Ca}^{2+}$  do concreto e originando a precipitação de  $\text{CaCO}_3$  (HUANG *et al.*, 2016). Nesta situação, a concentração de  $\text{CO}_3^{2-}$  é maior na superfície, quando comparada ao interior fissura, tendendo a precipitar mais na borda da fissura (SISOMPHON; COPUROGLU; KOENDERS, 2012).

A capacidade interna de autocicatrização também é conhecida como colmatação autógena, mas é limitada a pequenas fissuras e a presença de água (VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013). Ela ocorre apenas nas idades iniciais ou quando a mistura conta com a presença de cimento anidro para hidratação e é influenciada, principalmente, por características do material cimentício, da água, e da geometria das fissuras, conforme a Tabela 2.

**Tabela 2** – Fatores que influenciam na autocicatrização autógena em materiais a base de cimento

Concreto	Água	Fissura
Tipo de cimento	Pressão	Espessura
Tipo de adições	Gradiente de pressão	Profundidade
Tipo de agregados	Dureza	Geometria
Idade	pH	Ramificação da fissura
	Temperatura	Aglomerado de fissuras

Fonte: traduzido e adaptado de De Rooij *et al.* (2013)

Zhang *et al.* (2020) destacam que a eficiência da autocicatrização autógena pode ser melhorada por meio da associação com aditivos ou agentes de cura, transformando-a em autocicatrização autônoma. A autocicatrização autônoma demanda a incorporação de algum componente ou material externo e não convencional à matriz cimentícia (VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013; ZHANG *et al.*, 2020). Ela tem sido mais explorada devido à possibilidade de melhor aperfeiçoamento na criação de materiais cimentícios com capacidade de autocicatrização. Pesquisas nesse sentido destacam o uso de microcápsulas, fibras de polipropileno, fibras de carbono ou, ainda, a utilização de bactérias com capacidade de precipitação de  $\text{CaCO}_3$  nas fissuras (JONKERS *et al.*, 2010; SCHWANTES, 2017; WIKTOR; JONKERS, 2011b).

## 2.2 A AUTOCICATRIZAÇÃO BIOLÓGICA

A autocicatrização biológica por meio da remediação de fissuras nos materiais cimentícios traz um conceito heterodoxo para o meio científico, apresentando uma

nova abordagem para uma situação antiga, visto que a precipitação de minerais por bactérias ocorre continuamente na natureza (ACHAL *et al.*, 2009; RAMACHANDRAN; RAMAKRISHNAN; BANG, 2001). As bactérias são microrganismos que existem há bilhões de anos no planeta, vivendo em comunidades microbiológicas com distintos metabolismos que retiram nutrientes do meio e os transformam em substâncias necessárias para seu desenvolvimento (TORTORA, FUNKE, CASE, 2017). Entretanto, algumas de suas funcionalidades não são totalmente conhecidas.

Recentes progressos na biotecnologia indicam o potencial de uso de bactérias produtoras de carbonato de cálcio em materiais cimentícios, de modo a aumentar sua durabilidade (ACHAL *et al.*, 2015; SCHWANTES, 2017). Essas bactérias são inseridas nos materiais a base de cimento com objetivo principal de autocicatrização das fissuras por meio da precipitação de  $\text{CaCO}_3$ , e inerentemente reduzir a porosidade, aumentar a resistência, a durabilidade e a vida útil de concretos e argamassas, e vem sendo estudada como uma técnica de reparo sustentável e promissora (JONKERS *et al.*, 2010).

### 2.2.1 Panorama histórico da autocicatrização biológica

Na década de 1990 surgiram as primeiras investigações com o uso de bactérias produtoras de carbonato de cálcio para restauração de fissuras. Uma das primeiras aplicações *in loco* da biomineralização foi para tratamento em uma igreja construída com rocha calcária na cidade francesa de Thouars, por Le Métayer-Levrel *et al.* (1999). Os autores obtiveram uma proteção superficial da rocha por meio do  $\text{CaCO}_3$  produzido pelas bactérias, que reduziu a absorção de água sem alterar a aparência da fachada. No estudo foi destacada a viabilidade do processo para restauração de monumentos históricos em rochas calcárias.

Após isso, Ramachandran; Ramakrishnan e Bang (2001), foram os primeiros a utilizar soluções bacterianas em matrizes cimentícias. Como resultados, obtiveram a autocicatrização de fissuras, principalmente nas áreas superficiais, além de um aumento da resistência à compressão nas amostras contendo a solução bacteriana.

Nessa época, mais alguns escassos estudos foram realizados. A consolidação do tema de autocicatrização ocorreu a partir de 2005, com a criação do comitê técnico SHC 221 pela *International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures* (RILEM), escrito a partir de 2005 e publicado em 2013,

tendo sido a partir de 2010 a grande expansão no número de pesquisas na área de autocicatrização cimentícia por adição de bactérias (SCHWANTES-CEZARIO, 2020; CAPPELLESSO, 2018).

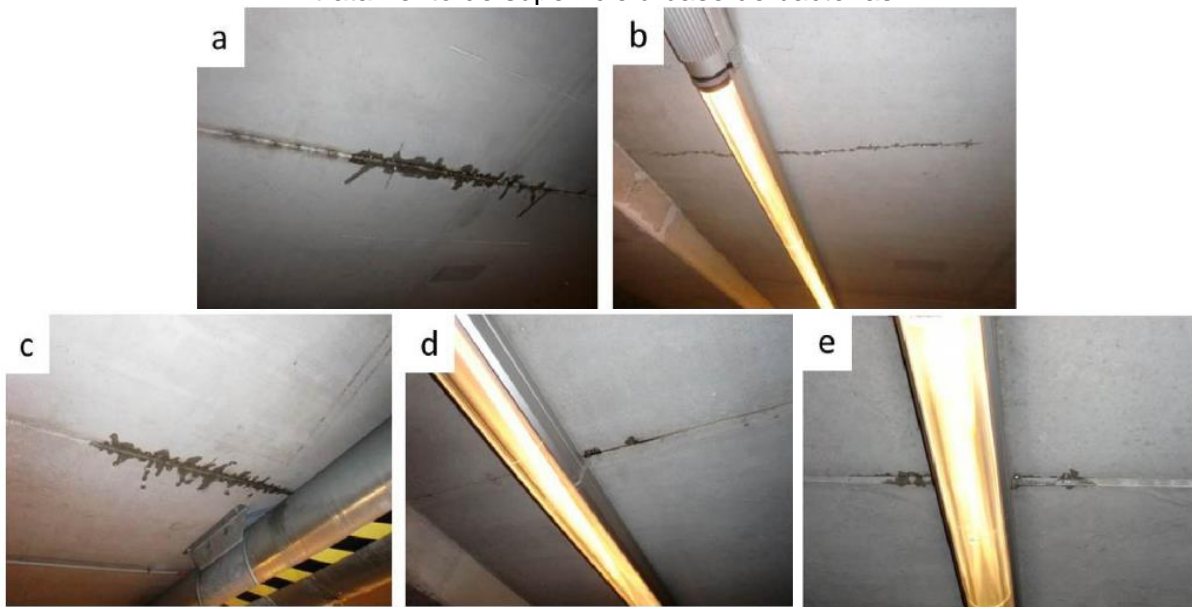
Em 2007, Jonkers e Jonkers e Schlangen (2007) aplicaram bactérias alcalíficas (*Bacillus pseudofirmus* e *B. cohnii*) em amostras de argamassa, e observaram a produção de minerais precipitados nas superfícies das fissuras nas primeiras idades. Após isso, Jonkers *et al.* (2010) adicionaram junto à mistura compostos precursores de minerais (lactato e acetato de cálcio) para simular um mecanismo de autocura com todos os componentes necessários para a reação, incluídos na matriz cimentícia. A precipitação de minerais novamente foi observada, porém, ficava limitada a concretos jovens (7 a 10 dias). Esse problema foi atribuído à desproteção de bactérias quando adicionadas diretamente à mistura, dado o alto pH da matriz do concreto e à diminuição do tamanho dos poros com a contínua hidratação do cimento, de modo a ‘esmagar’ as bactérias. Dessa forma, na maioria dos estudos subsequentes, os microrganismos foram avaliados sendo imobilizados ou encapsulados antes da adição à matriz (DE ROOIJ *et al.*, 2013; XU; WANG, 2018).

Grande variedade de agentes imobilizantes foram testados. Wiktor e Jonkers (2011) propuseram a imobilização dos esporos bacterianos e lactato de cálcio em argila expandida, e obtiveram autocicatrização de fissuras com até 0,46 mm após 100 dias de cura, comparada à apenas 0,18 mm das amostras de controle. Wang *et al.* (2012) utilizaram sílica-gel e poliuretano para encapsular as bactérias em amostras de argamassa, obtendo uma resistência a compressão 60 % maior para as amostras com cápsulas de poliuretano e 5 % em sílica-gel, comparadas às amostras de referência. Xu e Yao (2014) incorporaram vazios de ar em matrizes cimentícias para acomodar as bactérias em poros maiores, e obtiveram uma recuperação da resistência e do módulo de elasticidade quase duas vezes maior que a amostra controle. Parastegari, Mostofinejad e Poursina (2019) também adicionaram aditivo incorporador de ar em concretos, obtendo uma resistividade elétrica de 25% maior que a referência, com um teor de 5% de vazios de ar.

A maior parte dos estudos referentes à autocicatrização biológica é laboratorial, mas a partir de 2015, começaram-se a aplicar a ideia da autocicatrização ou tratamento de superfície em materiais cimentícios por meio de bactérias em construções reais. Wiktor e Jonkers (2015) aplicaram um tratamento de superfície líquido contendo esporos de uma bactéria alcalífica produtora de  $\text{CaCO}_3$  do gênero *Bacillus*, em fissuras da laje de uma garagem de estacionamento na Holanda. Foram selecionados 6 locais

fissurados na estrutura, sendo que em 3 áreas se aspergiu solução com bactérias e 3 foram utilizados como referência. Ao final de 2 meses, foi avaliada a permeabilidade de água do pavimento superior ao inferior, sendo verificado que as três lajes sem tratamento tinham elevada percolação ao longo de todo o comprimento. Das regiões tratadas com solução a base de bactérias, duas exibiram apenas alguns gotejamentos e a terceira foi totalmente recuperada, não tendo sido constatada percolação de água. O teste pode ser visualizado na Figura 5.

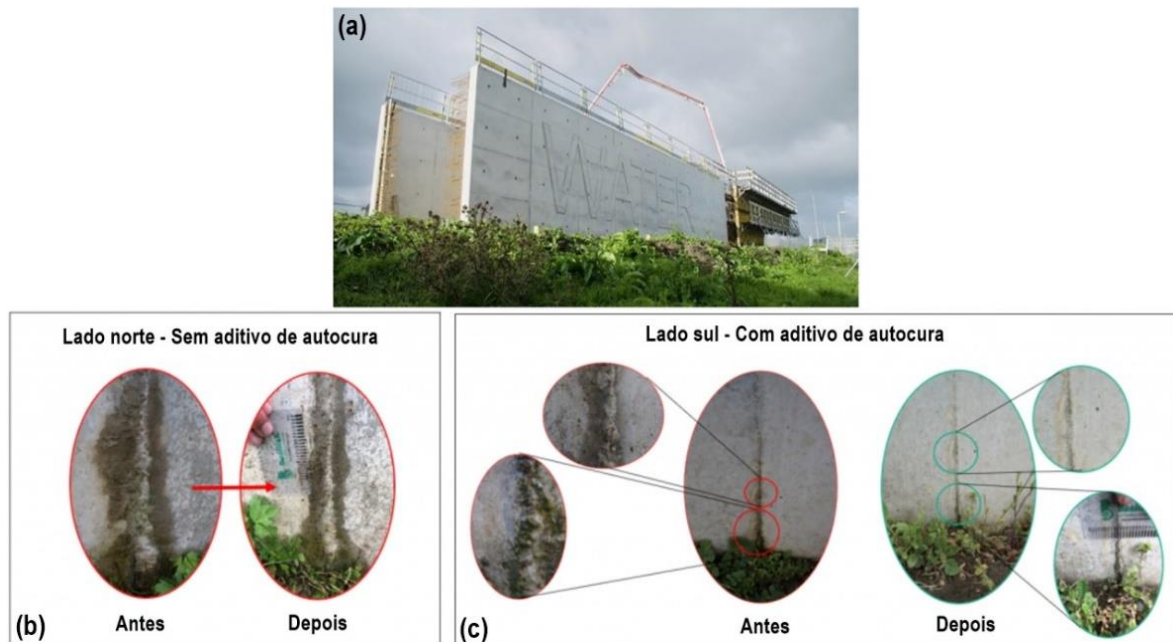
**Figura 5** - Laje da garagem com percolação de água pelas fissuras durante o teste de permeabilidade à água - (a, b e c) fissuras de referência, não tratadas, (d e e) fissuras com tratamento de superfície à base de bactérias



Fonte: Wiktor e Jonkers (2015)

Em 2017 ocorreu a primeira aplicação de agente bacteriano autocicatrizante em uma construção real. Trata-se de um tanque de água em Rotterdam, construído com quatro paredes de concreto. Duas paredes foram construídas em concreto comum, enquanto as outras duas foram construídas com adição do *Basilisk Healing agent*, um aditivo a base de bactérias. Os resultados são mostrados na Figura 6, onde em (b) e (c) é possível ver a cura das fissuras de percolação, que ocorreram na parte inferior da estrutura.

**Figura 6** – Primeira aplicação de agente biológico autocicatrizante em uma construção real – (a) Imagem do tanque de água (b) fissura em parede sem aditivo de autocura e (c) fissura em parede com aditivo de autocura.



Fonte: Basilisk (2017)

Outra aplicação realizada pela empresa Basilisk, com o mesmo aditivo bacteriano incorporado ao concreto, foi em um tanque de expansão em uma empresa de estação de tratamento de águas residuais (Figura 7a), em 2020. Alguns dias após o enchimento do tanque com água, apareceram fissuras na parte inferior do tanque, resultando em vazamentos. Porém, quando as fissuras tiveram contato com umidade (7c), as bactérias foram ativadas e precipitaram  $\text{CaCO}_3$ , selando as fissuras (7b e d), garantindo estanqueidade, automanutenção e uma maior vida útil à construção.

Na Bélgica, a primeira aplicação de bactérias em construção real foi realizada por Mullem *et al.* (2020) na laje de um telhado de um poço de inspeção em um sistema de drenagem, ao mesmo tempo em que corpos de prova de mesma composição foram avaliados em laboratório. As bactérias foram incorporadas aos materiais por meio de um aditivo comercial não axênico<sup>2</sup> com capacidade de esporulação, MUC+ (Cultura Ureolítica Mista + bactérias anaeróbicas<sup>3</sup>), junto de uma fonte de ureia e cálcio. A laje ainda não apresentou fissuração e por isso, resultados reais ainda não foram avaliados, porém,

<sup>2</sup> Cultura axênica ou pura é uma cultura celular que contém apenas uma linhagem (MADIGAN *et al.*, 2016).

<sup>3</sup> Bactérias anaeróbicas são microrganismos não capazes de respirar oxigênio (MADIGAN *et al.*, 2016)

os experimentos de laboratório demonstraram resultados favoráveis para a autocicatrização e redução da permeabilidade.

**Figura 7** – Tanque de expansão com aditivo à base de bactérias (a) Imagem do tanque (b) fissuras seladas por precipitação de  $\text{CaCO}_3$  (c) fissuras com entrada de umidade (d) fissuras autocicatrizadas após a entrada de umidade.



Fonte: Basilisk (2020)

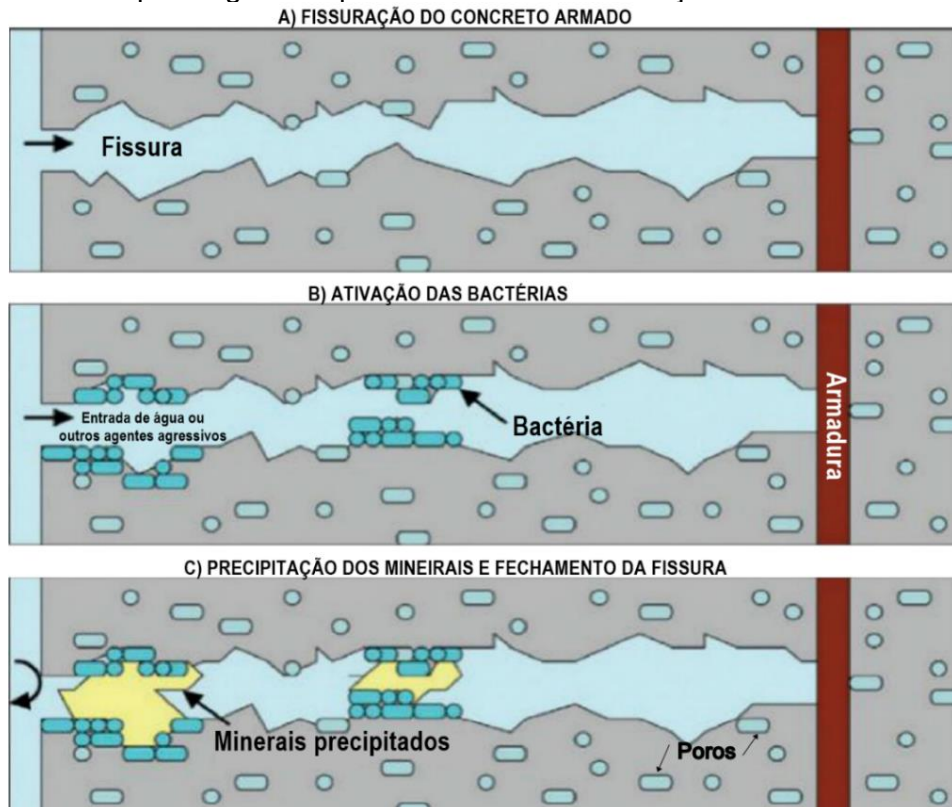
No Brasil, criada em 2019, a *startup* pioneira na tecnologia de autocicatrização biológica é a CIMEBIO, que vem trabalhando no desenvolvimento de um aditivo em pó concentrado a base de bactérias, chamado CICACON. A empresa trabalha com a validação do produto para comercialização como aditivo de massa, para ser inserido na mistura de novas edificações, e para tratamento de superfície, para atuar no fechamento de fissuras em construções existentes (SCHWANTES-CEZÁRIO, 2021).

Com base no panorama apresentado, é perceptível que as maiores descobertas, além de aplicações em situações reais dos materiais cimentícios com incorporação de bactérias, acontecem nos últimos anos, sendo que no Brasil, a utilização da tecnologia concentra-se ainda em testes laboratoriais, evidenciando a atualidade e necessidade de mais estudos sobre o assunto.

## 2.2.2 O processo de autocicatrização biológica

No processo de autocicatrização biológica, primeiramente as bactérias, na forma de esporos<sup>4</sup> ou em sua forma vegetativa, são adicionados à matriz do concreto. Os nutrientes e fontes de cálcio necessários podem ser adicionados juntamente à mistura, ou disponibilizados na cura, por meio de solução nutritiva (ZHANG *et al.*, 2020). As bactérias esporuladas podem permanecer “adormecidas” por até 200 anos, entretanto quando uma estrutura é danificada e ocorre a entrada de água, a bactéria é ativada e por meio de suas vias metabólicas precipita  $\text{CaCO}_3$  que se solidifica na superfície fissurada, selando-a (VANDINE; WEST; HANSEN, 2010; ZHANG *et al.*, 2020). O esquema apresentado na Figura 8 demonstra simplificada como ocorre a autocicatrização biológica das fissuras e a consequente proteção das armaduras.

**Figura 8** – Esquema geral do processo de autocicatrização em material cimentício

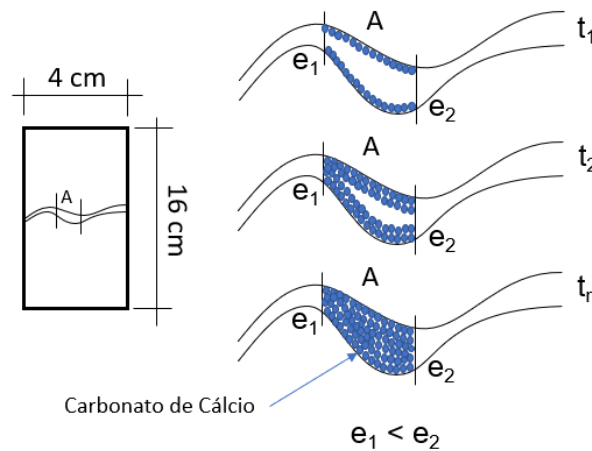


Fonte: Jonkers (2007)

<sup>4</sup> Os esporos bacterianos são microrganismos em estado dormente, muito mais resistentes e capazes de resistir ao calor e às condições adversas da matriz cimentícia, possuindo um período maior de vida (XU; WANG, 2018), os quais serão detalhados na seção 2.2.3.

De acordo com a Figura 8, a formação do produto precipitado pelas bactérias aparenta não ser de forma homogênea e contínua, corroborando com o apontado por Ghellere (2021), que observou a formação de cristais nas paredes das fissuras que vão se acumulando em direção à parede oposta (Figura 9). Ainda de acordo com a autora, é o encontro dos produtos precipitados que leva ao fechamento da fissura, estando a autocicatrização total relacionada à espessura da abertura.

**Figura 9** – Processo esquemático de recuperação de fissura por biodeposição de carbonato e cálcio em matrizes cimentícias



Fonte: Ghellere (2021).

O processo pelo qual as bactérias precipitam minerais, dentre eles o  $\text{CaCO}_3$  pode também ser denominado de biomineralização (ACHAL *et al.*, 2015). Devido à compatibilidade com a matriz cimentícia, e por não ocasionar impactos ambientais, a utilização da biomineralização das bactérias para preencher fissuras tem se tornado cada vez mais popular no meio científico (WANG *et al.*, 2012). Porém, o processo de biomineralização envolve vários microrganismos, mecanismos, ambientes e fatores intervenientes (DE MUYNCK *et al.*, 2008), como o pH da matriz, a presença de íons cálcio, o tipo e a concentração da bactéria, os nutrientes e compostos precursores de cálcio, além dos materiais e condições de cura aplicadas, que necessitam de maiores estudos.

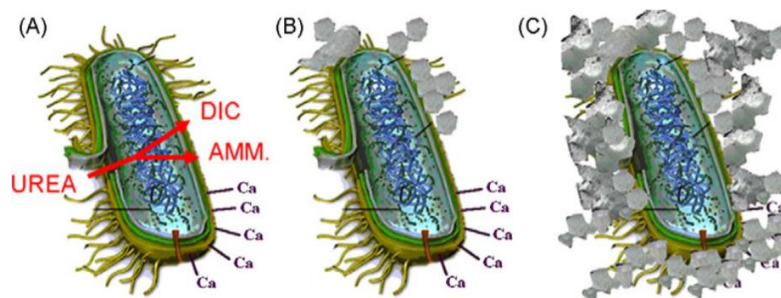
A biomineralização é um processo biológico no qual microrganismos sintetizam minerais inorgânicos, sendo um deles, o  $\text{CaCO}_3$ , precipitado pelas bactérias por meio de suas atividades metabólicas (DHAMI; REDDY; MUKHERJEE, 2012). A síntese desses minerais é dividida em duas classes: a Mineralização controlada biologicamente (BCM, do inglês *Biologically controlled mineralization*), no qual os organismos controlam o processo e os minerais são sintetizados independente das condições, no interior ou

transportados para o exterior das células, e a Mineralização induzida biologicamente (BIM, do inglês *Biologically induced mineralization*), na qual os agentes biológicos secretam os produtos metabólicos, que reagem com íons cálcio presentes no ambiente, resultando na precipitação dos minerais, sendo dependentes das condições ambientais do meio (DE MUYNCK; DE BELIE; VERSTRAETE, 2010; DHAMI; REDDY; MUKHEERJEE, 2013).

A precipitação de carbonato de cálcio pelas bactérias é classificada como induzida (BIM), pois o modelo de mineral a ser precipitado é dependente das condições ambientais do meio (DE MUYNCK; DE BELIE; VERSTRAETE, 2010). Na presença de uma fonte de cálcio, esse processo pode ocorrer de quatro maneiras: i) pela hidrólise da ureia, realizada por bactérias ureolíticas<sup>5</sup>; ii) por fotossíntese, quando as bactérias são autotróficas<sup>6</sup>; iii) por meio da redução de sulfatos; ou iv) ocasionada pela mudança de pH no meio, durante a produção de biofilme<sup>7</sup> (SCHWANTES, 2017).

De acordo com Hammes e Verstraete (2002), a precipitação de  $\text{CaCO}_3$  é um processo químico regido principalmente por quatro fatores: (i) concentração de cálcio; (ii) concentração de carbono inorgânico dissolvido (DIC, do inglês *Dissolved inorganic carbon*); (iii) pH; e, (iv) locais de nucleação. Os três primeiros fatores resultam do metabolismo bacteriano, ao passo que o sítio de nucleação é a própria parede celular da bactéria, onde o mineral será precipitado envolta da célula. A Figura 10 ilustra o processo de precipitação de  $\text{CaCO}_3$  por meio da hidrólise da ureia, que, de acordo com o mesmo autor, é o mecanismo que acomete a maioria das situações.

**Figura 10** – Esquema simplificado da precipitação de  $\text{CaCO}_3$  pela hidrólise da ureia



Fonte: De Muynck, De Belie e Verstraete (2010)

<sup>5</sup> Bactérias ureolíticas são produtoras da enzima uréase, responsáveis pela hidrólise da ureia (SCHWANTES, 2017).

<sup>6</sup> Bactérias autotróficas são capazes de crescer utilizando  $\text{CO}_2$  como única fonte de carbono (MADIGAN *et al.*, 2016).

<sup>7</sup> Biofilme são colônias microbianas organizadas envoltas por material adesivo, que formam comunidades estruturadas e funcionais, aderidas a uma superfície (MADIGAN *et al.*, 2016).

De acordo com a Figura 10, em (A) os íons cálcio (Ca) são atraídos pela carga negativa da parede celular bacteriana que, na presença de ureia, libera metabolicamente amônio (AMM, do inglês *ammonium*) e carbono inorgânico dissolvido. Em (B), a presença de íons cálcio ocasiona a supersaturação local, ocasionando a precipitação de  $\text{CaCO}_3$  e levando a um envolvimento total da célula pelo mineral (C) (DE MUYNCK; DE BELIE; VERSTRAETE, 2010).

A maioria dos estudos envolvendo a biomineralização utiliza-se do mecanismo “hidrólise da ureia” (DE MUYNCK et al., 2008; WANG et al., 2012, 2018). Entretanto, de acordo com Jonkers *et al.* (2010), este processo pode antecipar a deterioração dos materiais cimentícios, pois para cada íon de carbonato liberado são produzidos dois íons de amônio.

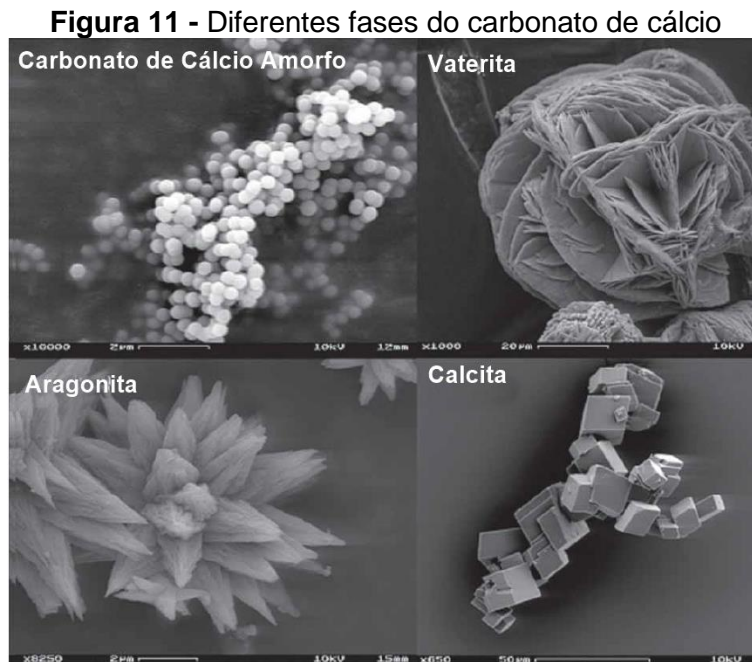
Como alternativa à hidrólise da ureia, a biomineralização bacteriana pode ocorrer também pela mudança de pH ocasionada pela produção de biofilme, sem que ocorra o desenvolvimento de um subproduto prejudicial aos materiais cimentícios. Neste mecanismo, a precipitação de  $\text{CaCO}_3$  acontece quando o agente biológico entra em contato com alguma fonte de cálcio. Nesta situação, o íon de cálcio  $\text{Ca}^{2+}$  é atraído pela parede celular que possui negatividade, de modo a formar o biofilme, e ocasionando uma mudança no pH do meio. O íon carbonato  $\text{CO}_3^{2-}$ , derivado principalmente do  $\text{CO}_2$  produzido na respiração celular, reage com o  $\text{Ca}^{2+}$ , ocasionando a precipitação de  $\text{CaCO}_3$  (GULIN, 2019; SCHWANTES-CEZARIO *et al.*, 2017).

A biomineralização induzida por bactérias pode resultar em diferentes fases de  $\text{CaCO}_3$ , principalmente três polimorfos anidros, a calcita, aragonita e vaterita, duas fases cristalinas hidratadas, mono-hidrocalcita e ikaite, e o carbonato de cálcio amorfo (ACC, do inglês *amorphous calcium carbonate*), como apresentado na Figura 11 (DHAMI; REDDY; MUKHERJEE, 2013).

Marvasi *et al.* (2010) analisaram os cristais precipitados por meio da mudança de pH durante o desenvolvimento de biofilme de culturas de *Bacillus subtilis* 168, cultivadas em diferentes condições, e obtiveram as diferentes morfologias apresentadas na Figura 12, sendo representados em (a) os cristais presentes no biofilme de *B. subtilis* após 1 semana de incubação (um deles indicado pela seta branca), em (b) e (c) os cristais formados em culturas de *B. subtilis* em meios líquidos de B4<sup>8</sup>, após 1 mês de incubação.

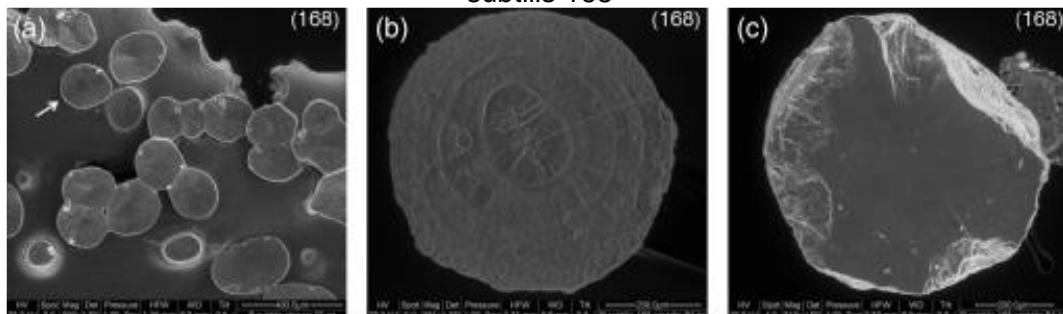
---

<sup>8</sup> Meio líquido B4 – Meio líquido utilizado para verificar a precipitação de  $\text{CaCO}_3$  nos estudos de Marvasi *et al.* (2010) e Ghellere (2021).



Fonte: Dhami, Reddy e Mukherjee (2013)

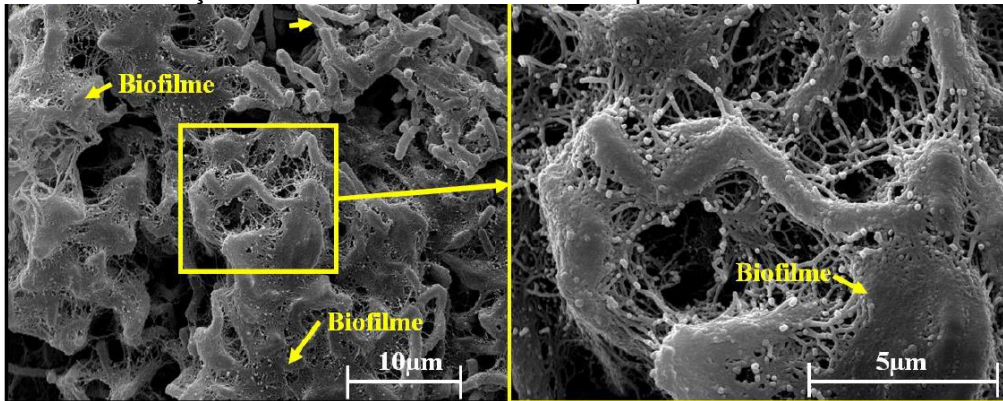
**Figura 12 – Visualização em MEV de diferentes morfologias de calcita precipitadas pela *Bacillus subtilis* 168**



Fonte: Marvasi *et al.* (2010)

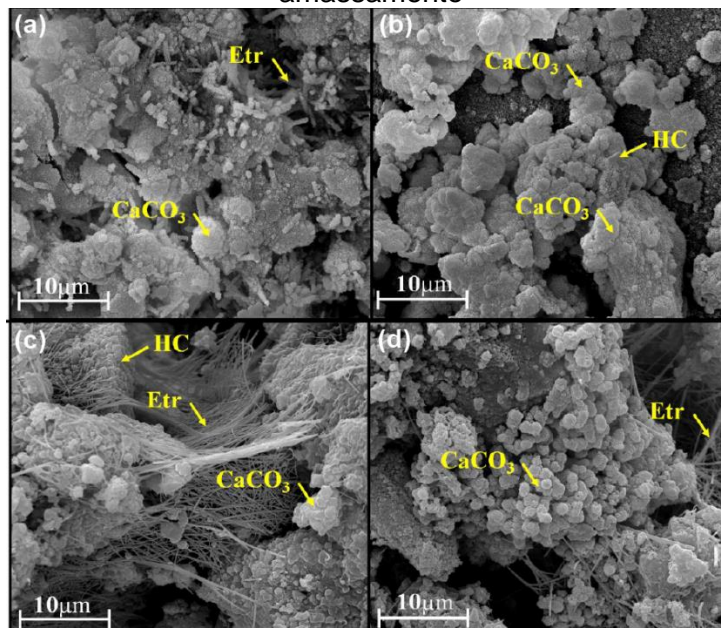
Schwantes (2017) também estudou a precipitação de  $\text{CaCO}_3$  pela mudança de pH ocasionada pelo crescimento da linhagem *Bacillus subtilis* AP91, em meio de cultivo B4, onde verificou a produção de biofilme *in vitro* (Figura 13), e depois a precipitação de carbonato de cálcio em argamassas imersas em solução com esporos suspensos em tampão fosfato (Figura 14 a-b) e em argamassas com esporos e tampão fosfato adicionados no lugar da água da mistura (Figura 14 c-d).

**Figura 13** – Visualização em MEV do biofilme formado pela bactéria *Bacillus subtilis* *in vitro*



Fonte: Schwantes (2017)

**Figura 14** – Visualização em MEV da precipitação de  $\text{CaCO}_3$  por *Bacillus subtilis* AP91 esporuladas em solução tampão fosfato (a-b) na solução de cura e (c-d) na água de amassamento



Fonte: Schwantes (2017)

Nos materiais cimentícios, o processo de biomineralização é utilizado principalmente de duas formas: i) como um material de cimentação, inserido na matriz cimentícia no momento da sua produção; ou ii) como um material para tratamento de superfície, formando uma camada protetora superficial, onde o composto é aplicado sobre o material já hidratado. O primeiro é conhecido como biocimentação, e o segundo como biodeposição (ACHAL; MUKHERJEE, 2015; DE MUYNCK; DE BELIE; VERSTRAETE, 2010)

A maior parte dos estudos que envolvem biocimentação encontram  $\text{CaCO}_3$  na forma de calcita (CHAHAL; SIDDIQUE, 2013; DE MUYNCK *et al.*, 2008; RAMACHANDRAN; RAMAKRISHNAN; BANG, 2001; WIKTOR; JONKERS, 2011b) e em menor parte vaterita (DE MUYNCK *et al.*, 2008) e aragonita (WIKTOR; JONKERS, 2011).

A biocimentação dá origem ao termo “Biocimento”, que tem interessado ao meio científico e técnico por ser um “material verde”, sendo uma técnica altamente promissora como ferramenta de remediação de fissuras, melhoria de resistência à compressão, diminuição da porosidade e aumento da durabilidade dos materiais a base de cimento (ACHAL *et al.*, 2015). Trata-se de um biomaterial com potencial de aplicação em novas construções, uma vez que o agente biológico deve ser incorporado no momento da dosagem.

Porém, a autocicatrização biológica por meio da biomineralização de  $\text{CaCO}_3$  é dependente de muitos fatores, como o tipo e a quantidade da bactéria utilizada, os nutrientes e compostos precursores de cálcio, o ambiente adverso da matriz, além das variações em torno de fissuras, como a possibilidade de ocorrência em diferentes idades, larguras variadas e em diversos locais de exposição (KHALIQ; EHSAN, 2016; LUO; QIAN; LI, 2015).

### 2.2.3 Bactérias precipitadoras de $\text{CaCO}_3$

Apesar da grande diversidade de bactérias existentes no planeta, não são todas apropriadas para incorporação nos materiais cimentícios. A matriz dos materiais a base de cimento é altamente alcalina, com pH que varia entre 11 e 13. As bactérias utilizadas para a biocimentação, portanto, devem ser capazes de suportar a alta alcalinidade por longos períodos, além da capacidade de resistir a tensões mecânicas oriundas da mistura dos materiais. Além disso, as bactérias também precisam ser tolerantes ao oxigênio, oriundo da difusão através dos capilares da matriz. Dessa forma, a maior parte dos microrganismos biológicos promissores para incorporação nos materiais cimentícios, são as bactérias formadoras de esporos, alcalínicas<sup>9</sup> e aeróbias<sup>10</sup> (JONKERS *et al.*, 2010).

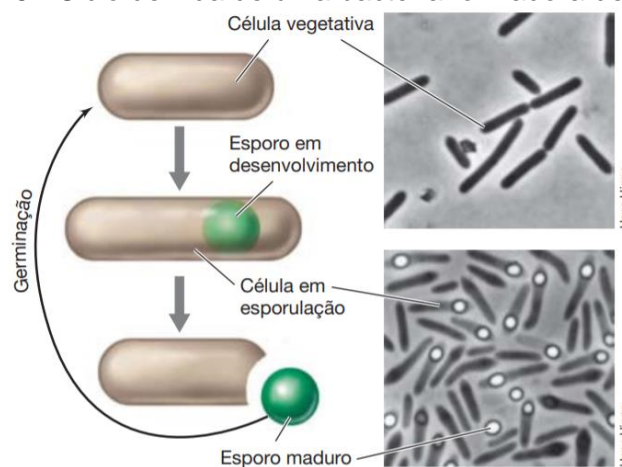
---

<sup>9</sup> Bactérias alcalínicas são aquelas resistentes à elevados valores de pH (JONKERS *et al.*, 2010).

<sup>10</sup> Bactérias aeróbias são aquelas que crescem na presença de oxigênio (MADIGAN *et al.*, 2016).

Os esporos bacterianos são estruturas extremamente resistentes em estado “dormente”, não apresentando crescimento (Figura 15), imprescindíveis para a autocicatrização biológica. A esporulação das bactérias acontece quando as células vegetativas<sup>11</sup> encontram-se em ambientes agressivos ou em condições de carência nutricional. Os esporos podem permanecer dormentes por anos, porém, ao entrarem em contato com água ou um meio nutricional, a transformação para célula vegetativa é relativamente rápida (MADIGAN *et al.*, 2016; WANG *et al.*, 2014).

**Figura 15 -** Ciclo de vida de uma bactéria formadora de esporos



Fonte: Madigan *et al.* (2016)

Em síntese, a seleção da bactéria a ser utilizada na mistura deve levar em consideração três fatores: (i) o microrganismo precisa resistir a ambientes alcalinos como o concreto; (ii) deve ser capaz de originar esporos, a fim de sobreviver à ação da mistura mecânica do concreto e às condições ambientais adversas; e (iii) não deve causar riscos à saúde das pessoas ou meio ambiente (JONKERS *et al.*, 2010). Nestas condições, o agente biológico que vem sendo mais utilizado, são espécies bacterianas do gênero *Bacillus* (SCHWANTES-CEZARIO; NOGUEIRA; TORALLES, 2017).

Espécies do gênero *Bacillus* podem ser encontradas facilmente no solo, possuindo facilidade de adaptação em diferentes condições ambientais e uma vasta diversidade, se apresentando como ótimas precipitadoras de  $\text{CaCO}_3$  (KHALIQ; EHSAN, 2016; VALENCIA GONZÁLEZ; SANTANA; CARVALHO, 2014). As bactérias do gênero *Bacillus* mais estudadas na biocimentação, de acordo com o levantamento conduzido por

<sup>11</sup> Células vegetativas são as células vivas, bactérias em estado ativo (WANG *et al.*, 2014b)

Ghellere (2021) são a *Bacillus pasteurii*, *Bacillus sphaericus*, *Bacillus pseudofirmus*, *Bacillus cohnii*, *Bacillus alkalinitrilicus* e a *Bacillus subtilis*.

A incorporação dos agentes biológicos no material cimentício pode ocorrer basicamente de três maneiras: i) adicionado à água de amassamento; ii) imersão das amostras em solução bacteriana; ou, iii) por aspersão desta mesma solução nas amostras já fissuradas (VIJAY; MURMU; DEO, 2017). Na primeira forma de adição, quando as bactérias são adicionadas à mistura no momento da dosagem e recuperam as fissuras, denomina-se autocicatrização, ao passo que nas outras duas formas, quando as fissuras são recuperadas por aspersão de solução bacteriana e/ou imersão na mesma, denomina-se tratamento de superfície (SCHWANTES-CEZARIO, 2020).

Outra consideração sobre as bactérias para uso em estruturas reais é que, de acordo com Dharni, Reddy e Mukherjee (2012), para que ocorra a precipitação de  $\text{CaCO}_3$ , é importante a utilização de bactérias locais, pois estas já estão adaptadas às condições do ambiente em que estão inseridas. Além disso, a precipitação de  $\text{CaCO}_3$  pelas bactérias depende da concentração utilizada, de compostos precursores de cálcio, além de nutrientes para cultivar as bactérias (ACHAL *et al.*, 2015).

#### 2.2.4 A influência dos nutrientes no processo de biomineralização

A precipitação de carbonato de cálcio pelas bactérias ocorre metabolicamente, através da biomineralização. Para que este processo ocorra no material cimentício é necessário um ambiente favorável para as bactérias, onde sejam fornecidos nutrientes como meios de cultura, para auxiliar na germinação dos esporos e no crescimento das células bacterianas, e fontes de cálcio como precursores da precipitação de  $\text{CaCO}_3$  (ACHAL *et al.*, 2015; ALAZHARI *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2018).

Para alcançar melhores resultados de autocicatrização, em relação à profundidade da autocura das fissuras, e para que as bactérias estejam imediatamente disponíveis após o dano, é importante que os agentes biológicos e todos os componentes necessários para a reação, sejam incorporados durante a mistura na matriz cimentícia de modo a diminuir os gatilhos externos necessários (JONKERS; SCHLANGEN, 2007; KHALIQ; EHSAN, 2016).

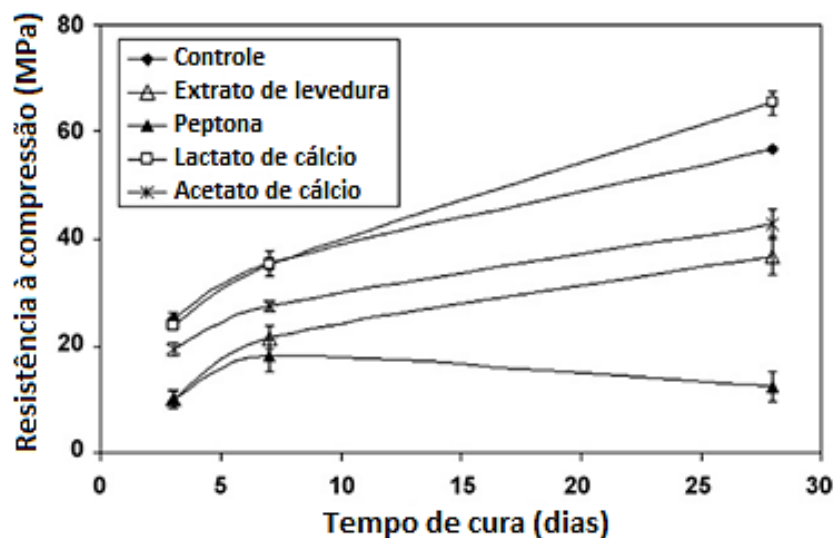
Diferentes fontes de cálcio e distintas composições do meio de cultura podem afetar a morfologia e influenciar na forma dos minerais produzidos, pois espécies

díspares de bactérias podem precipitar formas, tamanhos e quantidades diferentes de  $\text{CaCO}_3$  (ACHAL; PAN, 2014; GOROSPE *et al.*, 2013).

Existem vários nutrientes que podem ser utilizados neste processo, sendo o extrato de levedura o mais comumente utilizado (ALAZHARI *et al.*, 2018; JONKERS *et al.*, 2010; WIKTOR; JONKERS, 2011; ACHAL *et al.*, 2009), enquanto como precursores de cálcio são muito utilizados o cloreto de cálcio (ACHAL *et al.*, 2009; ACHAL; MUKERJEE; SUDHAKARA REDDY, 2013; TITTELBOOM *et al.*, 2010), nitrato de cálcio (DE MUYNCK *et al.*, 2008; WANG *et al.*, 2010, 2014a), acetato de cálcio (ALAZHARI *et al.*, 2018; JONKERS *et al.*, 2010), lactato de cálcio (JONKERS *et al.*, 2010; KHALIQ; EHSAN, 2016; WIKTOR; JONKERS, 2011; ZHANG *et al.*, 2017) e ureia (ACHAL *et al.*, 2009; WANG *et al.*, 2018, 2010, 2014b; XU; WANG, 2018).

De acordo com Ghellere (2021), o precursor mais utilizado é a ureia, visto que a maior parte dos estudos induzem o processo de precipitação de  $\text{CaCO}_3$  a partir da hidrólise da ureia. Outro agente comumente utilizado é o cloreto de cálcio, porém, sabe-se que cloretos são prejudiciais aos materiais cimentícios, podendo causar a corrosão do aço em concretos armados. Jonkers *et al.* (2010) avaliaram o efeito de adições de quatro nutrientes adicionados em materiais cimentícios (1% em relação a massa de cimento) na propriedade de resistência à compressão, e obtiveram o resultado apresentado na Figura 16.

**Figura 16** – Resistência à compressão de amostras cimentícias com diferentes nutrientes



Fonte: Traduzido de Jonkers *et al.* (2010)

Os resultados demonstram que as adições de acetato de cálcio e extrato de levedura ocasionaram uma diminuição nos valores de resistência à compressão de cerca de 50% em relação a amostra controle, enquanto a adição de peptona foi completamente prejudicial. No entanto, a incorporação de lactato de cálcio resultou em um significativo acréscimo de resistência à compressão aos 28 dias. Posteriormente, Wiktor e Jonkers (2011) utilizaram *Bacillus alkalinitrilicus* juntamente com lactato de cálcio e extrato de levedura (6% e  $\cong$  0,1% em massa de agregado, respectivamente) encapsulados em argila expandida. Resultados demonstraram que a taxa de autocicatrização máxima de fissuras foi o dobro em relação a referência.

Xu e Yao (2014) também avaliaram a influência de solução bacteriana com nutrientes em argamassas (na água da mistura e por aspersão). Os nutrientes foram o lactato e glutamato de cálcio como precursores de  $\text{CaCO}_3$  (1% em relação a massa de cimento) combinados com extrato de levedura (0,55% em relação a massa de cimento) como fonte nutricional de carbono e nitrogênio para as bactérias. Sílica ativa e um aditivo incorporador de ar também foram inseridos na mistura, de modo a criar microporos para sobrevivência bacteriana. Fissuras de 0,1 a 0,4 mm foram induzidas e com o tratamento superficial com ambas as soluções contendo bactérias e nutrientes, foram preenchidas completamente. Nas amostras que continham a solução inserida na matriz, as fissuras foram seladas apenas parcialmente, sendo que as amostras contendo glutamato de cálcio apresentaram resultados mais satisfatórios. Com relação a propriedade de flexão em 4 pontos, o mesmo comportamento foi observado.

Luo e Qian (2016) avaliaram três nutrientes (lactato de cálcio, formiato de cálcio e nitrato de cálcio) juntamente com esporos de bactérias alcalínicas em pó. A variação contendo bactérias e lactato de cálcio retardou a pega do material cimentício, enquanto os compostos com formiato e nitrato de cálcio aceleraram a hidratação. Entretanto, as amostras contendo os nutrientes lactato de cálcio e formiato de cálcio aumentaram a resistência à compressão aos 28 dias em relação à controle, enquanto as que continham nitrato de cálcio tiveram essa propriedade reduzida.

Vários são os nutrientes utilizados nos estudos da literatura de forma combinada e isolada, apresentando resultados distintos. Isso pode ser explicado porque as bactérias, pH, cimento, cura, mecanismo de indução da biomineralização variam entre os estudos, demonstrando a importância de mais avaliações a respeito, até que se chegue a um valor nutricional ótimo.

### 2.2.5 Características de fissuração e cura dos materiais cimentícios

Em casos práticos, as fissurações que ocorrem em estruturas reais são mais complexas do que as induzidas em laboratório. Em situações reais, esta manifestação patológica tende a ocorrer em distintas idades, com variação de abertura e profundidade. As condições ambientais de exposição das construções com essa manifestação também são diversas, algumas imersas em água, outras em condições úmidas, secas, ou em ciclos seca-úmida (LUO; QIAN; LI, 2015).

Em laboratório, o processo de moldagem de amostras de materiais cimentícios é comum; geralmente o material fresco é derramado em moldes em camadas, sendo cada uma delas sujeitas a vibração ou golpe para compactação.

Já a cura, que ocorre em dois estágios, o inicial (antes do desmolde e da fissuração) e o estágio de autocicatrização, após a abertura de fissuras, pode ser feito de várias formas, de modo a simular distintas condições de exposição ambiental e suas respectivas influências no processo (Figura 17).

**Figura 17** – Condições de cura em estágio inicial (antes do desmolde e fissuração) e de autocicatrização.



Fonte: traduzido de Zhang *et al.* (2020)

Dentre todas, existe um elemento que é crucial para melhorar o desempenho no estágio de cura de autocicatrização, a água (ZHANG *et al.*, 2020). Wiktor

e Jonkers (2011) perceberam que a cicatrização bacteriana de fissuras iniciou após 20 dias e continuou até os 100 dias de imersão em água.

Luo, Qian e Li (2015) estudaram a influência do tipo de cura, da largura da fissura e da idade de abertura de fissuras em argamassas contendo bactérias. No que tange ao tamanho de fissura, os autores encontraram taxa de autocicatrização diferentes para aberturas distintas. Em fissuras com largura de 0,1 a 0,3 mm a taxa de reparo atingiu 85 % e em larguras médias (de 0,3 a 0,5 mm) a taxa atingiu de 50 a 70 %. No entanto, em larguras de até 0,8 mm, esta taxa foi inferior a 30 %. Em relação ao efeito da cura, a submersa em água teve o melhor resultado, apresentando uma taxa de recuperação de 80 % aos 14 dias, enquanto a cura úmida atingiu taxa de 43%. Os autores verificaram que a eficiência da autocicatrização diminuiu com a idade de abertura da fissura na amostra. Quando a idade da amostra era superior a 60 dias, a taxa de cura foi muito pequena.

Qian *et al.* (2015) encontraram resultados semelhantes. Eles avaliaram fissuras em amostras de materiais cimentícios, fissuradas nas idades de 7, 14, 28 e 60 dias, com a largura variando entre 0,1 a 1,0 mm e observaram que as fissuras com larguras de até 0,4 mm, induzidas aos 7 dias, foram completamente preenchidas, porém, a taxa de autocicatrização caiu significativamente com o aumento da idade da fissura. Aos 28 dias houve redução significativa na taxa, e aos 60 dias não houve qualquer efeito nas amostras

A diminuição na taxa de cicatrização em idades avançadas, relatada por Qian *et al.* (2015) e Luo, Qian e Li (2015) pode ser associada à morte das bactérias ou à completa autocicatrização autógena, visto que comumente aos 60 dias a matriz já encontra-se totalmente hidratada. Quando a fissura da amostra é aberta nas idades iniciais de hidratação da matriz, parte da recuperação delas advém do processo contínuo de hidratação do cimento, conhecida como autocicatrização autógena, que aos 60 dias talvez não esteja mais presente.

Para evitar o percalço de perda de viabilidade dos agentes biológicos, dada a contínua hidratação do cimento e conseqüente redução dos poros, citada por Luo, Qian e Li (2015), Qian *et al.* (2015), Wiktor e Jonkers (2011), entre outros, alguns autores (CHEN *et al.*, 2021; ERŞAN *et al.*, 2015; JUSTO-REINOSO *et al.*, 2022; STUCKRATH *et al.*, 2014) sugerem a incorporação de um aditivo incorporador de ar à mistura, a fim de garantir poros maiores para que as bactérias se desenvolvam.

## 2.2.6. Aditivo incorporador de ar (AIR) como proteção de esporos bacterianos

A principal dificuldade na utilização de bactérias nos materiais cimentícios é o ambiente hostil da matriz, com pH muito alto e tamanhos de poros relativamente pequenos, impossibilitando que algumas culturas bacterianas permaneçam viáveis a longo prazo (ERŞAN *et al.*, 2015). Uma alternativa promissora para proteção das bactérias do ambiente desfavorável da matriz cimentícia, é a utilização de aditivos incorporadores de ar (AIR) (CHEN *et al.*, 2021; ERŞAN *et al.*, 2015; JUSTO-REINOSO *et al.*, 2022; STUCKRATH *et al.*, 2014). Os AIRs incorporam microbolhas uniformemente distribuídas na matriz durante o processo de mistura, com diâmetros que variam de 0,02 a 1,0 mm. Esses vazios de ar propiciam um aumento do espaço disponível, favorecendo a sobrevivência dos esporos bacterianos às condições iniciais de mistura e da matriz (JUSTO-REINOSO *et al.*, 2022).

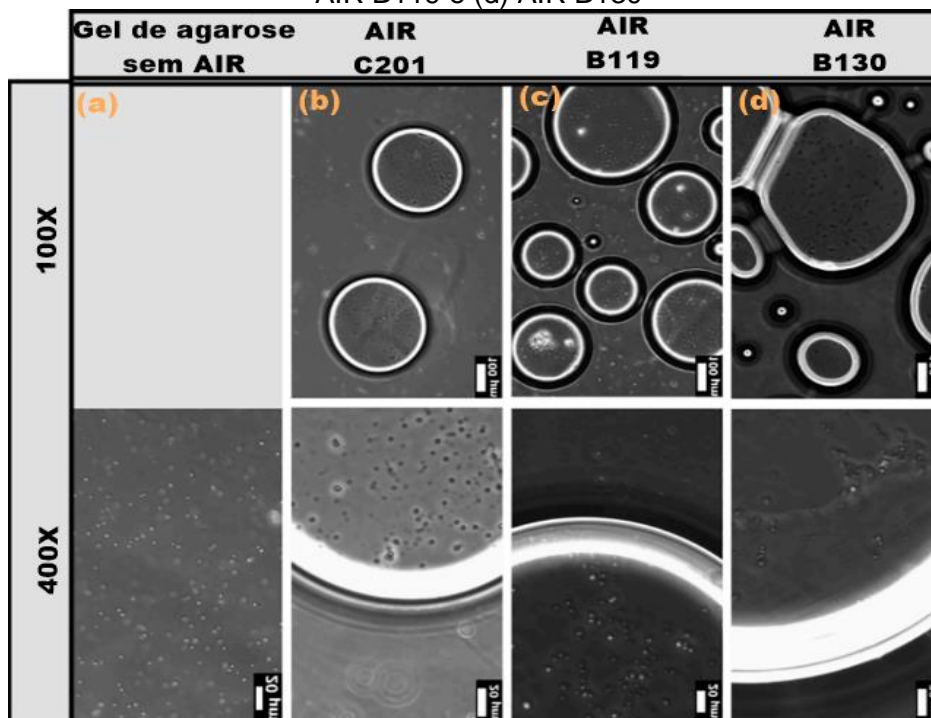
Porém, são poucos os estudos que investigaram o efeito da utilização do ar incorporado na autocicatrização biológica. Erşan *et al.* (2015) avaliaram a eficácia de um AIR (1% em massa de cimento) utilizado para proteção de bactérias *Bacillus sphaericus* em amostras de argamassa, mas estudaram apenas o efeito do aditivo em algumas propriedades no estado fresco e endurecido, mas não o seu desempenho na autocicatrização de fissuras. Bundur *et al.* (2017) fizeram uso de um AIR à base de sal de amônio (0,2% em massa de cimento) para proteção de células vegetativas de *Sporosarcina pasteurii* incorporadas em argamassas a base de cimento. Os autores obtiveram uma diminuição na concentração de células viáveis devido à atuação do AIR, mas concluíram que os resultados seriam promissores fossem utilizados esporos bacterianos, no lugar de células vegetativas.

Parastegari e Mostofinejad (2018) propuseram a utilização de aditivo incorporador de ar em misturas de concreto com bactérias vegetativas, analisando sua eficácia por meio da profundidade de carbonatação. Os autores obtiveram resultados promissores ao utilizar teor de 5% de ar incorporado à mistura. Posteriormente, Parastegari, Mostofinejad e Poursina (2019), avaliaram a mesma situação, mas para propriedades de resistividade elétrica e resistência a penetração de cloretos, obtendo também maior eficácia ao utilizar teor de 5% de ar incorporado.

Chen *et al.* (2021) avaliaram 4 diferentes teores de AIR para aumentar a viabilidade de células vegetativas de *S. pasteurii* utilizadas na água da mistura para cicatrizar fissuras com espessuras de até 0,4 mm. Os autores obtiveram uma melhoria na

recuperação de resistência à flexão das argamassas e fechamento da fissura com sucesso, ao utilizar  $2 \times 10^6$  esporos/mL e um teor de AIR de 0,01% (em massa de aglutinante). Mais recentemente, Justo-Reinoso *et al.* (2022) adicionaram diferentes suspensões contendo AIR e esporos bacterianos de *B. cohnii* ( $1,2 \times 10^{10}$  esporos) a um gel de agarose, submetido à agitação em vórtice. Na Figura 18, com ampliação de 100 e 400x é possível visualizar o resultado obtido, com uma alta concentração de esporos de bactérias dentro das microbolhas, em oposição ao visualizado no gel de agarose com esporos sem AIR, onde as células permanecem soltas.

**Figura 18** – Proteção de esporos de *B. cohnii* em (a) gel de agarose sem AIR, (b) AIR C201, (c) AIR B119 e (d) AIR B130



Fonte: Traduzido de JUSTO-REINOSO *et al.* (2022)

O resultado encontrado por Justo-Reinoso *et al.* (2022) sugere que os poros formados na matriz por meio da incorporação de AIR são capazes de aprisionar e proteger as bactérias dentro dos vazios formados, de acordo com o esperado para a presente pesquisa. Sendo assim, para inibir a perda de viabilidade das bactérias, neste estudo foi adicionado um aditivo incorporador de ar à matriz, garantindo poros maiores para que elas possam atuar na autocicatrização ao longo do tempo.

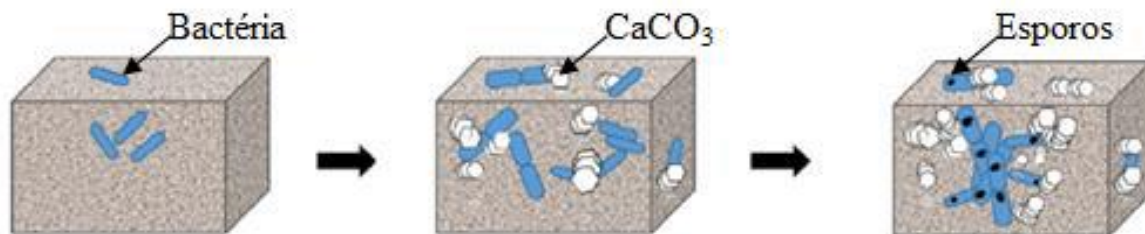
## 2.3 INFLUÊNCIA DA BIOCIMENTAÇÃO NAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS CIMENTÍCIOS E FORMAS DE AVALIAÇÃO

Existem inúmeras características que podem influenciar nas propriedades físicas e mecânicas dos materiais cimentícios, e o estudo destas propriedades é primordial para que as estruturas atinjam o desempenho e durabilidade necessários (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Com a adição de um novo e ainda pouco conhecido material de reparo, como as bactérias, torna-se necessário um estudo de como esse novo agente poderá influenciar em propriedades importantes dos materiais cimentícios, como resistência à compressão, resistência à tração e porosidade (SCHWANTES-CEZARIO; NOGUEIRA; TORALLES, 2017).

A predisposição geral de obter um aumento na resistência à compressão com a incorporação dos agentes biológicos, pode ser atribuída ao comportamento das células dentro da matriz cimentícia de corpos de prova, conforme ilustrado na Figura 19 (ACHAL *et al.*, 2015).

**Figura 19** - Comportamento das bactérias inseridas em corpos de prova de argamassa



Fonte: Schwantes (2017) adaptado de ACHAL *et al.* (2015)

Quando as células bacterianas iniciam a precipitação de  $\text{CaCO}_3$ , que preenche os poros e fissuras na matriz cimentícia, o acesso de oxigênio, nutrientes ou umidade é impedido, fazendo com que as bactérias transformem-se em esporos, que eventualmente, passam a atuar como fibras orgânicas (ACHAL *et al.*, 2015; RAMACHANDRAN; RAMAKRISHNAN; BANG, 2001). Já a diminuição na porosidade ocorre por motivo similar, pois à medida que as precipitações preenchem os poros, água e umidade ficam dificultadas de entrar.

Dessa forma, com a recuperação, mesmo que parcial, da microestrutura (por meio da autocicatrização de fissuras), a durabilidade e algumas propriedades

mecânicas são geralmente recuperadas (ZHANG *et al.*, 2020). Resistência à compressão e porosidade estão inversamente relacionadas, e são propriedades muito importantes, visto que influem diretamente na durabilidade dos materiais cimentícios. Portanto, tornam-se necessárias avaliações de como os agentes biológicos e seus nutrientes influem nessas propriedades.

Para análise da eficiência da autocicatrização e da influência dela nas demais propriedades dos materiais cimentícios, diversas técnicas laboratoriais têm sido amplamente utilizadas, sendo estas separadas em testes de visualização e determinação, teste de recuperação de estanqueidade e testes de recuperação de propriedades mecânicas (VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013), conforme a Tabela 3.

**Tabela 3 - Técnicas utilizadas para avaliação da eficiência da autocicatrização**

	<b>TÉCNICA DE AVALIAÇÃO DA AUTOCICATRIZAÇÃO</b>	<b>POSSIBILIDADES</b>
<b>VISUALIZAÇÃO E DETERMINAÇÃO</b>	Microscopia ótica + análise de imagens	Visualização da deposição de cristais e determinação da taxa de cicatrização
	Microscópio eletrônico de varredura - MEV	Visualização da deposição de cristais e sua morfologia
	Microscópio eletrônico de varredura ambiental	Visualização do rompimento das cápsulas parcialmente embutidas
	Análise de Seção fina	Visualização da deposição de cristais no interior das fissuras
	Radiografia de raios-X	Visualização da liberação do agente encapsulado na cápsula embutida
	Tomografia de raios-X	Visualização da liberação do agente encapsulado na cápsula embutida em 3D
	Correlação de imagem digital	Visualização do fechamento da fissura mediante tratamento térmico de SMA
	Análise por difração de raios-X	Determinação dos materiais cristalinos
	Espectroscópio Raman	Determinação da composição química
	Análise no infravermelho	Determinação de produtos precipitados
<b>RECUPERAÇÃO DA ESTANQUEIDADE</b>	Permeabilidade à água / baixa pressão	Vazão da água através da fissura (cicatrizada)
	Permeabilidade à água / alta pressão	Vazão da água através da fissura (cicatrizada)
	Permeabilidade do ar	Vazão do ar através da fissura (cicatrizada)
	Absorção de água por capilaridade	Absorção de água por capilaridade da fissura (cicatrizada)
	Radiografia por nêutrons	Visualizar a absorção de água por capilaridade
	Teste de corrosão	Resistência contra corrosão
	Delaminação por sais de degelo	Resistência contra delaminação por sais de degelo
	Difusão de cloreto	Resistência contra o ingresso de cloretos
	Pressão osmótica	Resistência contra o ingresso de íons
	Medições de transmissão de ultrassom	Continuidade do material

TÉCNICA DE AVALIAÇÃO DA AUTOCICATRIZAÇÃO		POSSIBILIDADES
RECUPERAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS	Ensaio de compressão	Recuperação em resistência, rigidez e/ou energia obtida quando recarregar o corpo de prova cicatrizado
	Ensaio de tração na flexão	
	Ensaio de tração na flexão em três pontos	
	Ensaio de tração na flexão em quatro pontos	Formação de novas fissuras contra a reabertura de fissuras antigas
	Deformação horizontal coluna/quadro	
	Laje de carga de impacto	
	Análise de emissão acústica	Recuperação de energia / observar o rompimento de eventuais cápsulas
	Análise da frequência de ressonância	Recuperação da consistência

Fonte: adaptado de Van Tittelboom e De Belie (2013)

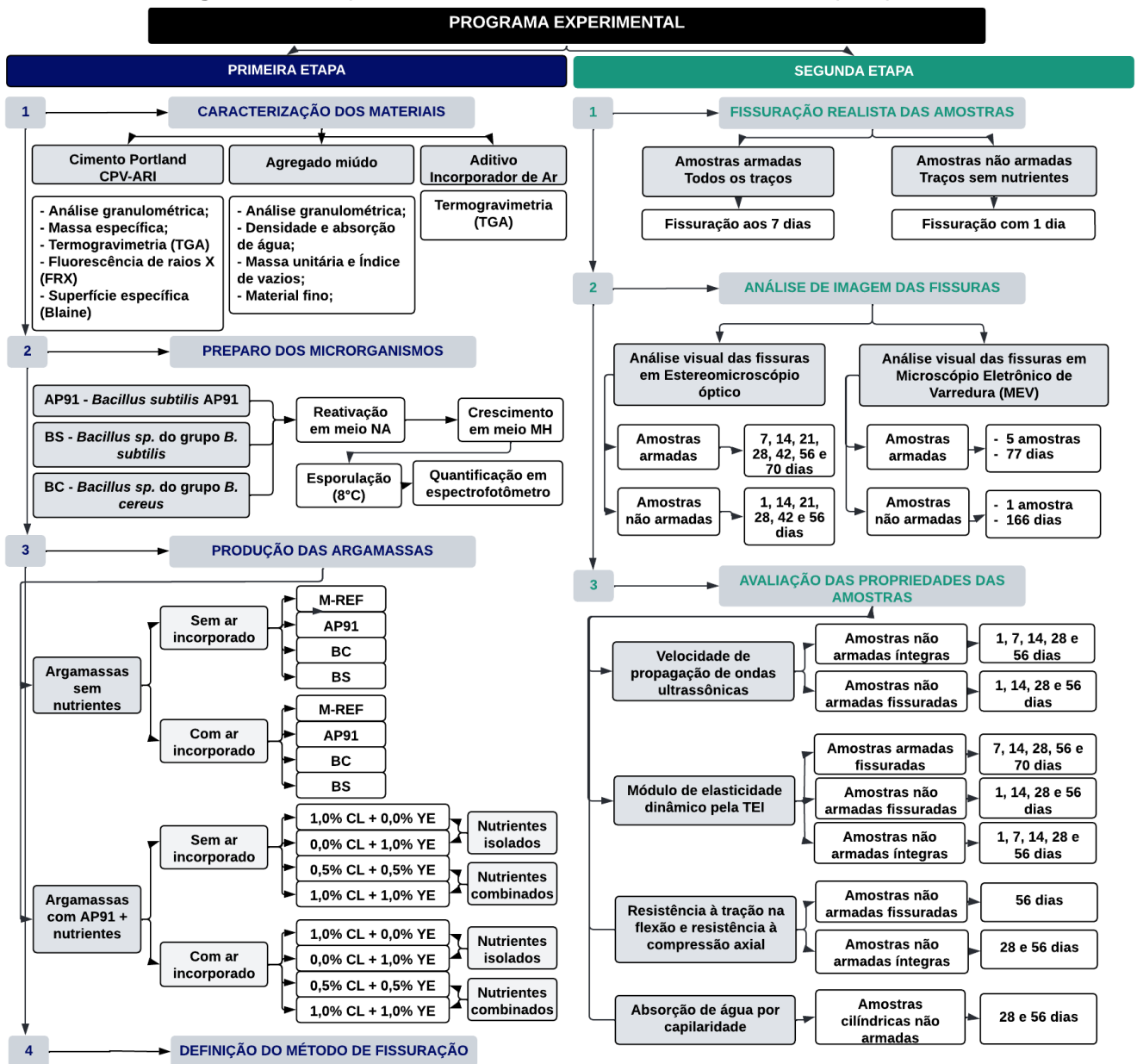
Dentre as técnicas apresentadas na Tabela 3, as destacadas em vermelho foram selecionadas para realização neste trabalho, sendo dois testes de visualização (análise da autocicatrização em microscópio óptico e microscópio eletrônico de varredura - MEV), dois de recuperação de estanqueidade (Absorção de água por capilaridade e velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, por Ultrassom) e dois de recuperação de propriedades mecânicas (Ensaio de compressão e tração na flexão em três pontos). Além destes, também foi selecionada a avaliação do módulo de elasticidade dinâmico pela técnica não destrutiva de excitação por impulso, a fim de verificar sua aplicabilidade na avaliação da autocicatrização de materiais a base de cimento.

Foram selecionadas bactérias locais do gênero *Bacillus* pois estudos, já citados, demonstraram resultados satisfatórios ao utilizá-las. Para proteger a bactéria da alta alcalinidade da matriz cimentícia, da mistura mecânica e da hidratação do cimento, sua utilização foi na forma de esporos, na água de amassamento, e com adição, em algumas variações de argamassa, de um aditivo incorporador de ar. Como meio de cultura foi utilizado o extrato de levedura e como precursor de cálcio, o lactato de cálcio.

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Visando avaliar a aplicação de agentes biológicos na autocicatrização de matrizes cimentícias com e sem aditivo incorporador de ar, assim como a influência da adição de nutrientes, foi desenvolvido o programa experimental, dividido em duas etapas, conforme esquema apresentado na Figura 20.

Figura 20 - Esquema com as atividades desenvolvidas na pesquisa



Fonte: Autora (2022)

Na primeira etapa do estudo foram realizadas a caracterização dos materiais, a definição do método de fissuração, o preparo das bactérias e a produção das argamassas. Na segunda etapa, realizou-se a fissuração das amostras, a análise visual das fissuras e a avaliação das propriedades das argamassas, conforme detalha-se nos itens a seguir.

### 3.1 PRIMEIRA ETAPA

#### 3.1.1 Caracterização do Materiais

No presente estudo foi empregado o Cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI), composto segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018), por teores de 90 a 100% de clínquer + sulfato de cálcio, e 0% de material pozolânico, motivo pelo qual foi determinado para a presente pesquisa, de modo a não promover autocicatrização por pozolanas, e não interferir no entendimento dos resultados.

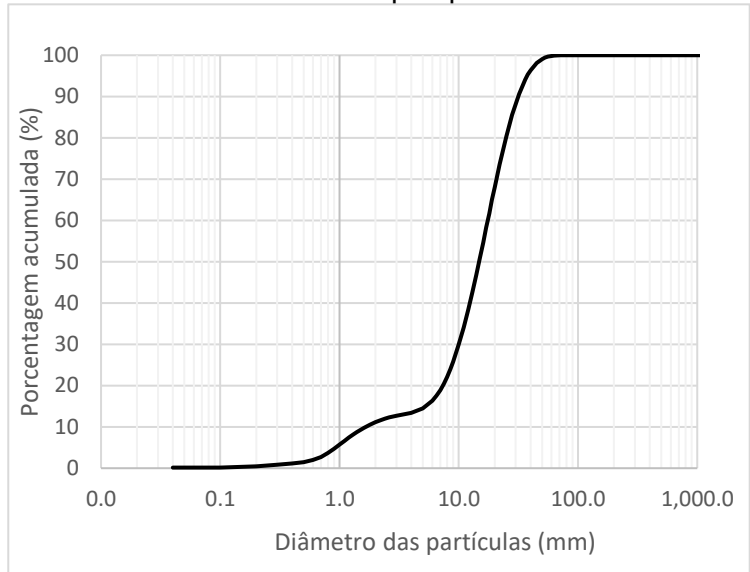
Para caracterização do cimento foram realizados, no Laboratório de Desempenho, Estruturas e Materiais (LADEMA) da UNILA/PTI, os ensaios de massa específica, seguindo as diretrizes da NBR 16605 (ABNT, 2017), a análise granulométrica, por ensaio de granulometria por difração à laser com auxílio do equipamento CILAS 1190, (faixa de leitura de 0,04 à 2500  $\mu m$ ), e a avaliação do teor de sólidos do material por meio da análise termogravimétrica em equipamento da marca PerkinElmer, modelo STA 8000. A análise de caracterização química por ensaio de Fluorescência de Raios X (FRX) em espectrômetro ZSX Rigaku modelo Pirmus IV, equipado com tubo de Rh, foi realizada por laboratório especializado, e a superfície específica por meio de Blaine foi realizada no Laboratório de Tecnologia do Concreto da Itaipu Binacional (LTCI).

As propriedades físicas e químicas do Cimento CPV-ARI utilizado são apresentadas na Tabela 4, a Figura 21 apresenta a sua curva granulométrica e a Figura 22 ilustra a análise termogravimétrica do material.

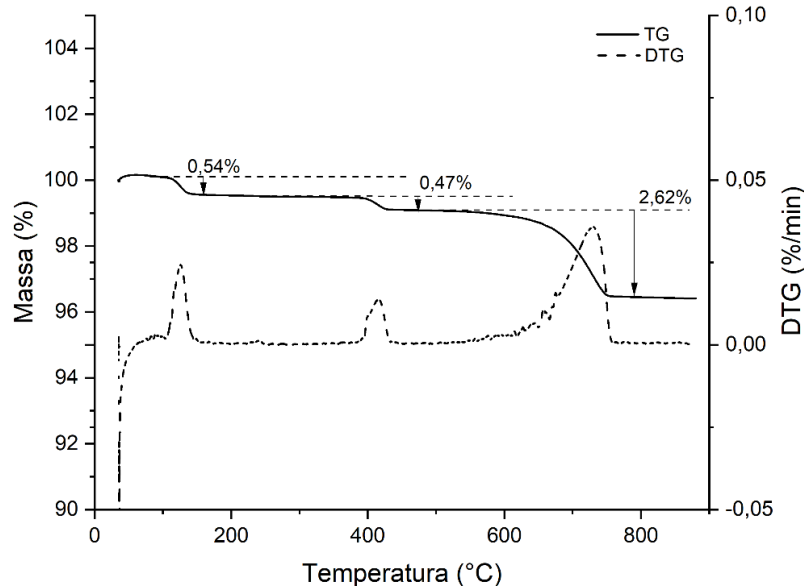
**Tabela 4** - Propriedades químicas e físicas do cimento CP V – ARI

Propriedade	Teor (%)	
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,11	
Composição química	SiO <sub>2</sub>	20,26
	TiO <sub>2</sub>	0,21
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,04
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,53
	MgO	2,35
	CaO	62,58
	Na <sub>2</sub> O	0,12
	K <sub>2</sub> O	0,75
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,24
	SO <sub>3</sub>	2,94
	LOI	3,32
Perda ao fogo	3,32	
Distribuição de Partículas (µm)	D10	1,65
	D50	14,80
	D90	31,46
Superfície específica	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	5320

Fonte: Autora (2022)

**Figura 21** - Curva Granulométrica do cimento CPV-ARI utilizado na pesquisa

Fonte: Autora (2022)

**Figura 22** – Análise termogravimétrica com curvas TG e DTG do cimento CPV-ARI

Fonte: Autora (2022)

O cimento utilizado apresenta 3 picos de perda de massa (Figura 22), sendo a primeira ocorrida até 150°C, que, de acordo com Neves Junior (2014) é referente à desidratação do gesso, a segunda, ocorrida entre 350 a 450°C é referente à

decomposição do hidróxido de cálcio e a terceira, mais expressiva, que ocorre de 450 a 700°C é oriunda da decomposição do  $\text{CaCO}_3$ .

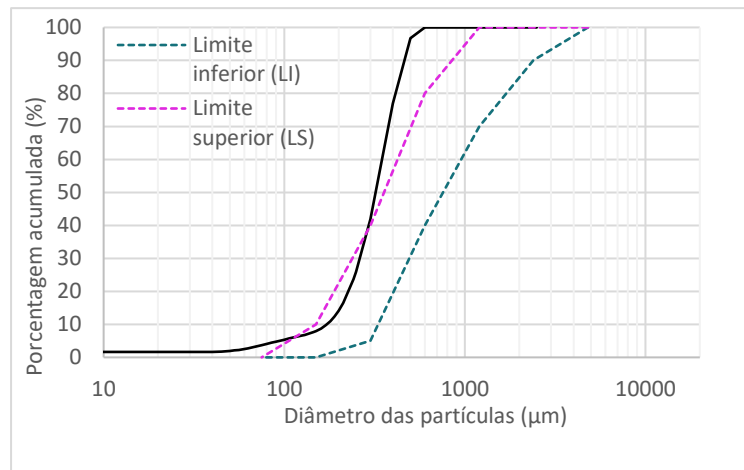
Como agregado miúdo foi empregada a areia natural de origem quartzosa do Rio Paraná, caracterizada quanto à sua granulometria pelo ensaio de granulometria por difração à laser. Foi conduzida a determinação da densidade e a absorção de água conforme NBR 16916 (ABNT, 2021), massa unitária e índice de vazios de acordo com a NBR 16972 (ABNT, 2021) e determinação do material fino de acordo com a NBR 16973 (ABNT, 2021), realizados no Laboratório de Desempenho, Estruturas e Materiais (LADEMA) da UNILA/PTI. O resultado da caracterização do agregado miúdo utilizado, a areia natural, é apresentado na Tabela 5, com a respectiva curva granulométrica mostrada na Figura 23, onde é possível observar que areia utilizada se enquadra parcialmente nos limites estabelecidos pela norma britânica BS 1199 (BRITISH STANDARD, 1976).

**Tabela 5** – Propriedades da areia natural utilizada

Propriedade	Resultado
Densidade ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2,51
Distribuição de partículas ( $\mu\text{m}$ )	D10 172,02
	D50 320,61
	D90 463,44
Absorção de água (%)	0,09
Massa unitária ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1,64
Índice de vazios (%)	99,93
Material fino (%)	0,60

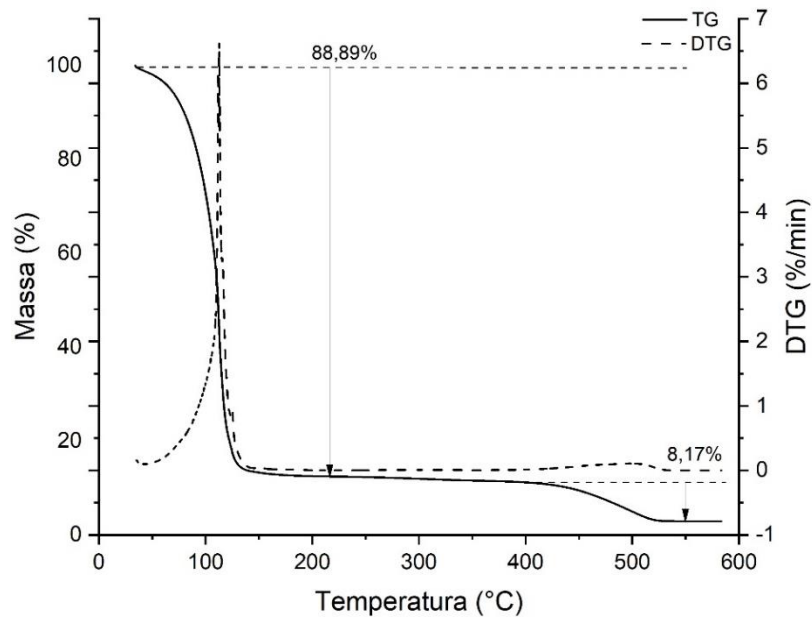
Fonte: Autora (2022)

**Figura 23** – Curva granulométrica da areia natural



Fonte: Autora (2022)

Em algumas misturas foi utilizado um aditivo Incorporador de ar (AIR), composto basicamente, de acordo com o fabricante, por sabão de breu em meio aquoso, com densidade de  $1,01 \pm 0,02$  kg/ litro e pH de  $12,0 \pm 1,0$ . A caracterização do teor de sólidos do material foi realizada em analisador termogravimétrico da marca PerkinElmer, modelo STA 8000, com taxa de aquecimento de 35°C até 600°C a 20°C/min, no LADEMA, onde verifica-se, de acordo com a Figura 24, que a primeira inclinação brusca de perda de massa acontece a partir dos 100°C, sendo correspondente à fração líquida do aditivo.

**Figura 24** – Análise termogravimétrica com curvas TG e DTG do aditivo incorporador de ar

Fonte: Autora (2022)

De acordo com Rampanelli (2021) a estabilização da curva e o pico da DTG indicam o fim da volatilização do líquido, que neste estudo ocorreu após uma perda de massa de aproximadamente 89%, apontando que o AIR possui um teor de sólidos de aproximadamente 11% em relação à sua massa total.

Além dos materiais supracitados, também foram utilizados no estudo uma fonte precursora de cálcio e um nutriente, o lactato de cálcio (CL, do inglês *calcium lactate*), e extrato de levedura (YE, do inglês *yeast extract*), respectivamente, além dos meios de cultura Ágar Nutriente (NA), formulação apresentada na Tabela 6, e *Mueller Hinton* (MH), formulação apresentada na Tabela 7.

**Tabela 6** - Formulação do meio de cultura Ágar Nutriente (NA)

Constituintes	Quantidade (g/l)
Extrato de carne	1,0
Extrato de levedura	2,0
Peptona	5,0
Cloreto de Sódio	5,0
Ágar	15,0
pH	7,4 ± 0,2 a 25°C

Fonte: Fabricante (2022)

**Tabela 7** – Formulação do meio de cultura *Mueller Hinton* (MH)

Constituintes	Quantidade (g/l)
Extrato de carne	2,0
Casaminoácidos	17,5
Amido	1,5
pH	7,3 ± 0,1 a 25°C

Fonte: Fabricante (2022)

### 3.1.2 Preparo dos microrganismos

As bactérias utilizadas neste estudo, a nomenclatura adotada, sua identificação e origem são apresentadas na Tabela 8.

**Tabela 8** - Espécie, nomenclatura e bactérias selecionadas para esta pesquisa.

NOMENCLATURA	IDENTIFICAÇÃO	ORIGEM
AP91	<i>Bacillus subtilis</i> AP91	Casca de arroz (Embrapa)
BS	<i>Bacillus</i> cf. <i>subtilis</i>	Parede de edificação
BC	<i>Bacillus</i> cf. <i>cereus</i>	Barragem de Itaipu

Fonte: Autora (2022)

Por meio do estudo de Ghellere (2021), as bactérias foram isoladas e a precipitação de cristais verificada com auxílio de um estereomicroscópio, que constatou a presença de produto no meio B4 básico.

Tendo sido a precipitação de cristais confirmada, para sequência de utilização nesta pesquisa, as bactérias AP91, BS e BC foram primeiramente reativadas, depois cultivadas, esporuladas e quantificadas, conforme procedimentos descritos abaixo.

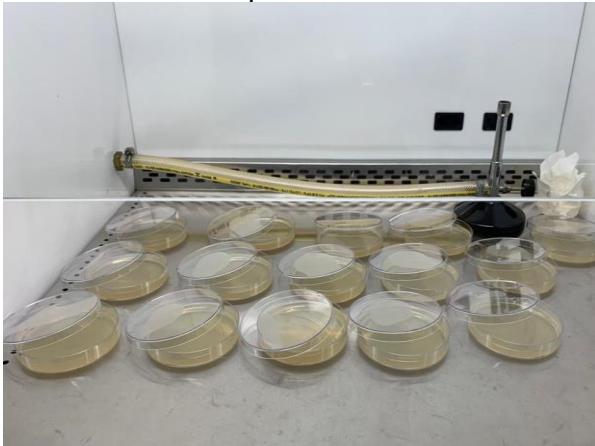
#### 3.1.3.1 Reativação das bactérias

As bactérias utilizadas encontravam-se preservadas em glicerol em criotubos, a uma temperatura de -20°C no Laboratório de Biotecnologia Ambiental da UNILA. Para tornar possível sua utilização elas foram reativadas.

A reativação consistiu primeiramente no descongelamento das bactérias dos criotubos, com a posterior técnica de semeadura por meio de estrias de esgotamento em placas de Petri contendo meio de cultivo NA (Figuras 25 e 26).

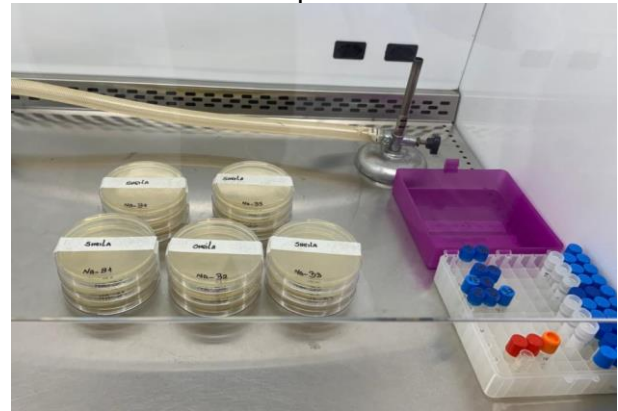
Posteriormente as placas foram armazenadas em estufas a uma temperatura de 37 °C por 24 a 48 horas. Após esse período, as bactérias ficaram visíveis a olho nu nas estrias desenhadas nas placas (Figura 27).

**Figura 25** – Plaqueamento do meio de cultura NA em placas de Petri



Fonte: Autora (2022)

**Figura 26** – Placas de Petri identificadas após técnica da sementeira e criotubos contendo as bactérias preservadas



Fonte: Autora (2022)

**Figura 27** – Bactérias visíveis nas estrias de esgotamento em placas de Petri



Fonte: Autora (2022)

### 3.1.3.2 Crescimento e esporulação das bactérias

Após reativadas, o cultivo bacteriano das três linhagens foi realizado em meio de cultura líquido Mueller Hinton (MH). Este meio de cultura foi determinado por ser o que apresentou maior concentração de esporos por mL, no estudo de Schwantes-Cezario *et al.* (2018). O meio de cultura foi diluído em água destilada conforme orientação do fabricante, inserido em frascos Erlenmeyer vedados, os quais foram esterilizados em autoclave. Após a esterilização, as bactérias foram inseridas nos frascos contendo o meio com auxílio de uma alça de platina (Figura 28). Então, os frascos contendo o meio e as bactérias foram agitados em Shaker por 66 horas, com rotação de 130 rpm e temperatura média de 37 °C (Figura 29), para favorecer seu crescimento, de acordo com metodologia

adotada por Ghellere (2021). Posteriormente ao período de agitação, foi possível visualizar uma solução mais turva, comprovando o crescimento das bactérias no meio.

**Figura 28** – Frascos erlenmeyer contendo meio de cultura MH e bactérias



Fonte: Autora (2022)

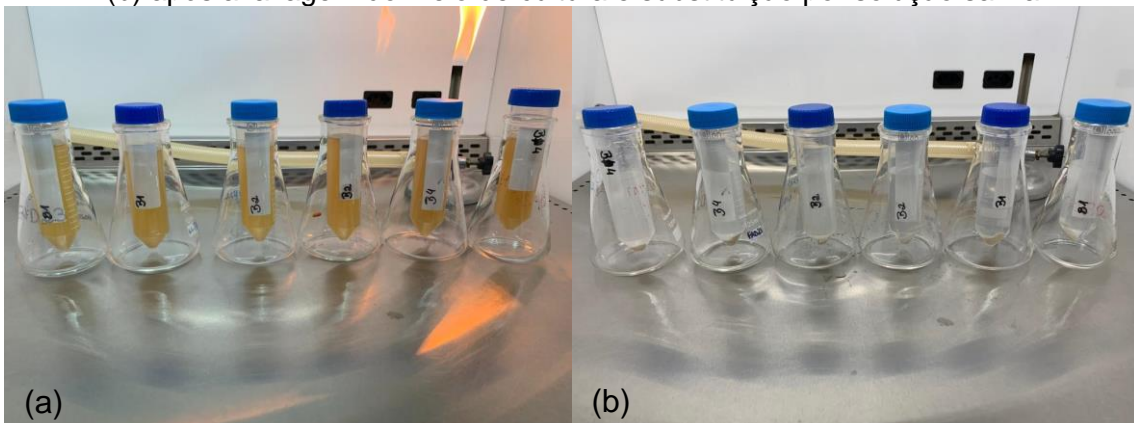
**Figura 29** – Shaker em agitação dos frascos Erlenmeyers contendo as bactérias



Fonte: Autora (2022)

A fim de alcançar uma solução de bactérias com maior concentração, a solução foi lavada para retirada do meio de cultura. Para tal, a solução contendo meio de cultura MH e bactérias foi inserida em tubos Falcon de 50 mL, que foram centrifugados por 20 minutos a uma rotação de 3600 rpm. Neste processo as bactérias ficam concentradas no fundo do frasco, sendo possível, após a centrifugação, o meio sobrenadante ser extraído e substituído por solução salina de NaCl a 0,85%. O processo de lavagem descrito foi realizado duas vezes, conforme realizado anteriormente por Schwantes-Cezario *et al.*, (2018), sendo possível visualizar, na Figura 30, a diferença dos tubos (a) antes da lavagem e (b) após a lavagem, além da concentração de bactérias no fundo do recipiente.

**Figura 30** – Tubos Falcon contendo solução bacteriana (a) antes da lavagem do meio de cultura; (b) após a lavagem do meio de cultura e substituição por solução salina



Fonte: Autora (2022)

Para que as bactérias sobrevivam nos materiais a base de cimento é imprescindível que elas sejam capazes de formar esporos. Para tal, após a lavagem, as bactérias foram induzidas à formação de esporos, mantendo a solução contendo os microrganismos em repouso por dois dias em geladeira à temperatura de 8 °C (SCHWANTES-CEZARIO *et al.*, 2018).

### 3.1.3.3 Quantificação das bactérias esporuladas

Foram produzidos vários tubos Falcon com solução bacteriana, até que fosse obtida a quantidade necessária para produção das amostras. Para quantificar a concentração de bactérias cultivadas em cada tubo Falcon, foi realizado o teste de densidade óptica (DO) em espectrofotômetro. Para tal, utilizou-se 2 mL de solução salina de NaCl a 0,85% sem bactérias para servir como referência, e 2 mL de cada solução bacteriana que desejava-se quantificar. Com um comprimento de onda de 600 nm, a leitura da densidade de óptica de cada solução foi realizada em duplicata, e com essa informação, por meio da Equação 1, proposta por Ramachandran; Ramakrishnan e Bang (2001), foi calculada a concentração de bactérias existente em cada solução.

$$Y = 8,59 * 10^7 * X^{1,3627} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

Y = Concentração bacteriana em esporos por ml

X = Leitura da densidade óptica ou absorbância.

Com base na concentração bacteriana encontrada, foram realizados os cálculos de diluição até obter a concentração desejada e em quantidade suficiente. A concentração de bactérias a ser adicionada nos corpos de prova foi definida em  $10^6$  esporos /mL, tendo em vista que a concentração utilizada por Ghellere (2022) foi de  $10^5$  esporos/mL e desejava-se uma maior precipitação, e, também por ser a que apresentou melhores resultados em termos de fechamento de fissuras no estudo de Pacheco (2020). O resultado da quantificação das primeiras soluções, que foram produzidas em duplicata para cada bactéria, é apresentado na Tabela 9.

**Tabela 9** - Quantificação dos esporos bacterianos presentes nas primeiras soluções produzidas contendo bactérias AP91, BS e BC

Amostra	Absorbância	Bactérias		
		AP91	BS	BC
Solução 1	X <sub>1</sub>	1,715	1,698	2,198
	X <sub>2</sub>	1,676	1,688	2,194
	X <sub>3</sub>	1,656	1,688	2,194
	X <sub>média</sub>	1,682	1,691	2,195
	Esporos / 2 mL	1,75x10 <sup>8</sup>	1,76x10 <sup>8</sup>	2,51x10 <sup>8</sup>
Solução 2	X <sub>1</sub>	1,53	1,565	2,068
	X <sub>2</sub>	1,421	1,459	2,06
	X <sub>3</sub>	1,426	1,561	2,065
	X <sub>média</sub>	1,459	1,528	2,064
	Esporos / 2 mL	1,44x10 <sup>8</sup>	1,53x10 <sup>8</sup>	2,31x10 <sup>8</sup>

Fonte: Autora (2022)

Após a quantificação, os esporos em suspensão foram armazenados em geladeira até o momento de aplicação nos materiais cimentícios (JONKERS *et al.*, 2010).

### 3.1.3 Produção das argamassas

O seguimento da primeira etapa se deu com a preparação das amostras. Foram preparadas argamassas a base de cimento, com areia, água e com as três bactérias, variando-se os nutrientes, lactato de cálcio e extrato de levedura, isolados e combinados, em diferentes teores, com e sem aditivo incorporador de ar.

A relação água-cimento (a/c) e a proporção cimento-areia foram determinados com base nos estudos de Ghellere (2021), de modo a dar sequência aos estudos do grupo de Biorecuperação da Unila<sup>12</sup>, sendo apresentados na Tabela 10.

**Tabela 10** – Traço adotado para produção das argamassas – em massa.

Cimento	Areia	Relação a/c	Traço	Aditivo incorporador de ar*
1	3	0,48	1:3:0,48	0,05%*

\* Apenas na metade das amostras, visto que foram produzidas 16 variações de mistura, 8 com AIR e 8 sem AIR.

Fonte: Autora (2022)

<sup>12</sup> Grupo apresentado no item 1.1

O teor de aditivo incorporador de ar havia sido definido com base em estudos de Parastegari e Mostofinejad (2018) e Parastegari, Mostofinejad e Poursina (2019), que obtiveram maior eficácia em seus estudos ao utilizar teor de 5%<sup>13</sup> de ar incorporado. A quantidade de AIR a ser utilizada na mistura para alcançar o teor de 5% na argamassa foi calculada por meio da NBR 13278 (ABNT, 2005). Porém, ao realizar os ensaios constatou-se que a argamassa de referência, sem aditivo, já possuía teor de ar maior que 5% naturalmente, possuindo um total de 6,86% de ar aprisionado. Sendo assim, com base no consumo recomendado pelo fabricante, foi calculado o teor de ar para 0,05% e 0,1% de aditivo, obtendo como resultados teores de 10,64% e 11,57%, respectivamente (cálculos apresentados no Apêndice A). Como o dobro de aditivo culminou em um acréscimo de menos de 1% de ar, optou-se por adotar um teor de 0,05% de aditivo, de modo a garantir as bolhas de ar sem prejudicar tanto a resistência à compressão das amostras.

Os nutrientes e precursores da  $\text{CaCO}_3$ , foram definidos com base nos estudos de Jonkers *et al.* (2010), que obtiveram resultados satisfatórios ao utilizar o lactato de cálcio em teor de 0,5% da massa de cimento para avaliar a autocicatrização e 1% do mesmo composto para avaliar a influência na propriedade mecânica de resistência à compressão. O extrato de levedura também foi avaliado neste trabalho, com os mesmos teores do lactato de cálcio, 0,5 e 1%. A influência dos teores de nutrientes foi avaliada apenas nas argamassas moldadas com a bactéria *Bacillus subtilis* AP91, que já possui autocicatrização verificada pela literatura (KHALIQ; EHSAN, 2016; MARVASI; VAZQUEZ; MARTINEZ, 2013; SCHWANTES-CEZARIO *et al.*, 2018; SCHWANTES-CEZARIO; NOGUEIRA; TORALLES, 2017).

Dessa forma, para avaliação da autocicatrização nos materiais cimentícios e suas propriedades, foram definidas 16 variações de argamassa (sendo 8 misturas sem nutrientes e 8 com nutrientes), em amostras prismáticas com dimensões 4x4x16 cm, em conformidade com a NBR 13279 (ABNT, 2005). A composição e nomenclatura adotada para cada variação são apresentados na Tabela 11.

---

<sup>13</sup> Para maiores detalhes, ver item 2.2.6.

**Tabela 11 - Composição e nomenclatura das 16 variações de argamassas moldadas**

Grupo	Nomenclatura adotada	Composição			
		Bactéria	AIR (%)	Nutrientes (%)	
				CL*	YE*
Amostras sem nutrientes	M-REF	-	X	X	
	AP91	<i>Bacillus subtilis</i> AP91			
	BS	<i>Bacillus cf. subtilis</i>			
	BC	<i>Bacillus cf. cereus</i>			
	M-REF <sub>air</sub>	-	0,05%		
	AP91 <sub>air</sub>	AP91	0,05%		
	BS <sub>air</sub>	BS	0,05%		
	BC <sub>air</sub>	BC	0,05%		
Amostras com nutrientes	AP91_1-1	<i>Bacillus subtilis</i> AP91	X	1	1
	AP91_0,5-0,5			0,5	0,5
	AP91_1-0			1	0
	AP91_0-1			0	1
	AP91_1-1 <sub>air</sub>		0,05%	1	1
	AP91_0,5-0,5 <sub>air</sub>		0,05%	0,5	0,5
	AP91_1-0 <sub>air</sub>		0,05%	1	0
	AP91_0-1 <sub>air</sub>		0,05%	0	1

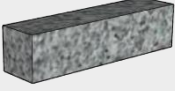
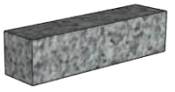
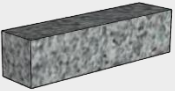


\*Nomenclaturas do inglês: CL= Calcium lactate, YL = Yeast extract

Fonte: Autora (2022)

Para todas as variações, foram moldadas argamassas destinadas à análise da autocicatrização e propriedades de resistência à tração na flexão, compressão e absorção de água por capilaridade, todos seguindo as diretrizes da NBR 13279 (ABNT, 2005). Na Tabela 12 são apresentadas as informações relativas à quantidade, formato e dimensões das amostras moldadas para cada um dos ensaios realizados, totalizando 288 amostras produzidas para o estudo.

Como amostras de referência para o grupo de corpos de prova com nutrientes foram utilizadas as amostras M-REF e M-REF<sub>air</sub> (referências sem bactéria), e AP91 e AP91<sub>air</sub> (referência com a mesma bactéria, *B. subtilis* AP91, mas sem nutrientes).

**Tabela 12 – Forma, dimensão e número de amostras produzidas para o estudo**

Ensaio		Esquema e dimensões	Amostras sem nutrientes		Amostras com nutrientes		Número de amostras	
			M	Mair	M	Mair		
Não Destrutivos	Análise de imagem – amostras armadas	 40x40x160mm	12	12	12	12	48	
	Análise de imagem – amostras não armadas <sup>1)</sup>		24 <sup>1)</sup>	24 <sup>1)</sup>	0	0	48	
	Ultrassom	 40x40x160mm	12	12	12	12	48	
	Módulo de elasticidade pela TEI							
Destrutivos	Resistência à tração na flexão NBR 13279 (ABNT, 2005)	 40x40x160mm	28 dias	12	12	12	12	48
			56 dias	12 <sup>2)</sup>	12 <sup>2)</sup>	12 <sup>2)</sup>	12 <sup>2)</sup>	00 <sup>2)</sup>
	Resistência à compressão axial NBR 13279 (ABNT, 2005)	 40x40x160mm	28 dias	24 <sup>3)</sup>	24 <sup>3)</sup>	24 <sup>3)</sup>	24 <sup>3)</sup>	00 <sup>3)</sup>
			56 dias	24 <sup>3)</sup>	24 <sup>3)</sup>	24 <sup>3)</sup>	24 <sup>3)</sup>	00 <sup>3)</sup>
	Absorção de água por capilaridade NBR 9779 (ABNT, 2012)	 50x100mm	28 dias	12	12	12	12	48
			56 dias	12	12	12	12	48
<b>TOTAL DE AMOSTRAS</b>							<b>288</b>	

<sup>1)</sup> Lote de amostras não armadas sem nutrientes moldado em duplicata para que fosse possível obter um lote inteiro de amostras não armadas após fissuração, considerando as perdas.

<sup>2)</sup> Ao término da coleta de dados aos 56 dias, as 48 amostras utilizadas nos ensaios não destrutivos de Ultrassom e TEI foram utilizadas para o ensaio de resistência à tração na flexão e compressão aos 56 dias.

<sup>3)</sup> As amostras destinadas ao ensaio de resistência à compressão foram oriundas do dano completo das amostras submetidas à tração na flexão.

Fonte: Autora (2022)

Para a moldagem das argamassas, as bactérias foram diluídas em água, realizando a diluição da solução bacteriana de acordo com a concentração desejada ( $10^6$  esporos/mL). Conforme exemplo apresentado na Tabela 13, é possível visualizar que cada solução presente nos tubos Falcon apresentou uma quantidade diferente de bactérias, ou seja, se fez necessário a colocação de quantidades diferentes de solução em cada traço, para alcançar a concentração de  $10^6$  esporos/mL. Dentro da concentração de  $10^6$  foram selecionados os números mais próximos entre si, variando de 1,6 a  $1,90 \times 10^6$ . Ainda na Tabela 13, é apresentado o cálculo de diluição das primeiras soluções produzidas, calculado em função da quantidade de água necessária para cada mistura de argamassa, 204 mL para 3 amostras prismáticas de 40x40x160mm e 156 mL para 3 amostras cilíndricas de 50x100mm.

**Tabela 13 – Cálculo realizado para diluição da solução bacteriana até a concentração de  $10^6$  esporos / mL**

Bactéria	Amostra	Concentração de esporos						
		1mL	2mL	2,5mL	3mL	3,5mL	4mL	5mL
AP91	(1)	$8,73 \times 10^7$	$1,75 \times 10^8$	$2,18 \times 10^8$	$2,62 \times 10^8$	$3,05 \times 10^8$	$3,49 \times 10^8$	$4,36 \times 10^8$
	(2)	$7,19 \times 10^7$	$1,44 \times 10^8$	$1,80 \times 10^8$	$2,16 \times 10^8$	$2,52 \times 10^8$	$2,87 \times 10^8$	$3,59 \times 10^8$
BS	(1)	$8,79 \times 10^7$	$1,76 \times 10^8$	$2,20 \times 10^8$	$2,64 \times 10^8$	$3,08 \times 10^8$	$3,52 \times 10^8$	$4,39 \times 10^8$
	(2)	$7,66 \times 10^7$	$1,53 \times 10^8$	$1,91 \times 10^8$	$2,30 \times 10^8$	$2,68 \times 10^8$	$3,06 \times 10^8$	$3,83 \times 10^8$
BC	(1)	$1,25 \times 10^8$	$2,51 \times 10^8$	$3,14 \times 10^8$	$3,78 \times 10^8$	$4,39 \times 10^8$	$5,02 \times 10^8$	$6,27 \times 10^8$
	(2)	$1,15 \times 10^8$	$2,31 \times 10^8$	$2,88 \times 10^8$	$3,46 \times 10^8$	$4,04 \times 10^8$	$4,61 \times 10^8$	$5,77 \times 10^8$

Bactéria	Amostra	Diluição em 204mL de água			Diluição em 156mL de água			
		3mL	4mL	5mL	2mL	2,5mL	3mL	3,5mL
AP91	(1)	$1,28 \times 10^6$	$1,71 \times 10^6$	$2,14 \times 10^6$	$1,12 \times 10^6$	$1,40 \times 10^6$	$1,68 \times 10^6$	$1,96 \times 10^6$
	(2)	$1,06 \times 10^6$	$1,41 \times 10^6$	$1,756 \times 10^6$	$9,21 \times 10^5$	$1,15 \times 10^6$	$1,38 \times 10^6$	$1,61 \times 10^6$
BS	(1)	$1,29 \times 10^6$	$1,72 \times 10^6$	$2,15 \times 10^6$	$1,13 \times 10^6$	$1,41 \times 10^6$	$1,69 \times 10^6$	$1,97 \times 10^6$
	(2)	$1,13 \times 10^6$	$1,50 \times 10^6$	$1,88 \times 10^6$	$9,82 \times 10^5$	$1,23 \times 10^6$	$1,47 \times 10^6$	$1,72 \times 10^6$
BC	(1)	$1,84 \times 10^6$	$2,46 \times 10^6$	$3,07 \times 10^6$	$1,61 \times 10^6$	$2,01 \times 10^6$	$2,41 \times 10^6$	$2,81 \times 10^6$
	(2)	$1,70 \times 10^6$	$2,26 \times 10^6$	$2,83 \times 10^6$	$1,48 \times 10^6$	$1,85 \times 10^6$	$2,22 \times 10^6$	$2,59 \times 10^6$

Fonte: Autora (2022)

Na dosagem, a massa do aditivo incorporador de ar e da solução bacteriana foram descontados da água de amassamento, a fim de preservar a relação a/c adotada. A Tabela 14 apresenta a dosagem das amostras sem nutrientes e a Tabela 15 apresenta a dosagem das amostras com nutrientes.

**Tabela 14 – Dosagem de amostras prismáticas e cilíndricas sem nutrientes, massa em gramas e líquidos em ml**

Amostra	3 amostras 40x40x160mm					3 amostras cilíndricas 50x100mm				
	Cimento	Areia	Água	Bactéria	AIR	Cimento	Areia	Água	Bactéria	AIR
M-REF	425	1275	204	-	0	325	975	156	-	0
AP91	425	1275	200	4ml (1)	0	325	975	153	3ml (1)	0
BS	425	1275	200	4ml (1)	0	325	975	153	3ml (1)	0
BC	425	1275	200	3ml (1)	0	325	975	154	2ml (1)	0
M-REF <sub>air</sub>	425	1275	203,78	-	0,22	325	975	155,84	-	0,16
AP91 <sub>air</sub>	425	1275	199,78	4ml (1)	0,22	325	975	152,84	3ml (1)	0,16
BS <sub>air</sub>	425	1275	199,78	4ml (1)	0,22	325	975	152,84	3ml (1)	0,16
BC <sub>air</sub>	425	1275	200,78	3ml (1)	0,22	325	975	153,84	2ml (1)	0,16

Fonte: Autora (2022)

**Tabela 15 –** Dosagem de amostras prismáticas e cilíndricas com nutrientes, massa em gramas e líquidos em ml

	Amostra	Cimento	Areia	Água	Bactéria	AIR	CL	YE
3 amostras prismáticas 40x40x160mm	AP91_1-1	425	1275	200	4ml (1) *	-	4,25	4,25
	AP910,5-0,5	425	1275	200	4ml (1) *		2,13	2,13
	AP91_1-0	425	1275	200	4ml (1) *		4,25	0
	AP91_0-1	425	1275	200	4ml (1) *		0	4,25
	AP91_1-1air	425	1275	198,78	5ml (2) *	0,22	4,25	4,25
	AP910,5-0,5air	425	1275	198,78	5ml (2) *	0,22	2,13	2,13
	AP91_1-0air	425	1275	198,78	5ml (2) *	0,22	4,25	0
	AP91_0-1air	425	1275	198,78	5ml (2) *	0,22	0	4,25
3 amostras cilíndricas 50x100mm	AP91_1-1	325	975	153	3ml (1) *	-	3,25	3,25
	AP910,5-0,5	325	975	153	3ml (1) *		1,63	1,63
	AP91_1-0	325	975	153	3ml (1) *		3,25	0
	AP91_0-1	325	975	153	3ml (1) *		0	3,25
	AP91_1-1air	325	975	152,34	3,5ml (2) *	0,16	3,25	3,25
	AP910,5-0,5air	325	975	152,34	3,5ml (2) *	0,16	1,63	1,63
	AP91_1-0air	325	975	152,34	3,5ml (2) *	0,16	3,25	0
	AP91_0-1air	325	975	152,34	3,5ml (2) *	0,16	0	3,25

\* A quantidade de solução utilizada nesta tabela trata-se de um exemplo com base na quantificação realizada das primeiras amostras de solução bacteriana produzidas (Tabelas 9 e 13), visto que a solução presente em apenas 2 tubos Falcon não foi suficiente para produção de todas as amostras apresentadas na dosagem.

**Fonte:** Autora (2022)

Como já mencionado na Tabela 10, para análise da autocicatrização foram moldadas amostras armadas e não armadas. Inicialmente tinha-se a intenção de produzir amostras sem armadura para esta análise, porém, conforme será detalhado no item 3.1.4, esta situação não foi possível.

Para armar as amostras prismáticas foram moldados inicialmente espaçadores cilíndricos com pasta cimentícia de traço igual ao do estudo, 1:0,48, com frisos para o encaixe das armaduras que possuíam dimensões de 4,8 x 150mm. Ambos foram inseridos no molde de argamassa a aproximadamente 1,0 cm da base, conforme ilustra a Figura 31. As demais amostras, sem armadura, foram moldas de forma convencional, seguindo as diretrizes das normas pertinentes.

A influência da cura não foi escopo da presente pesquisa, sendo assim, todas as amostras foram curadas de forma submersa em água, por ser a que favorece maior precipitação de cristais (LUO; QIAN; LI, 2015; PACHECO, 2020). Para tal, as amostras foram acondicionadas em recipientes com água abertos à atmosfera para permitir a entrada de oxigênio e dióxido de carbono (WIKTOR; JONKERS, 2011), separadas por

bactéria e por nutrientes, tomando-se o cuidado de manter as amostras sempre na mesma posição, com as faces fissuradas orientadas para cima (Figura 32).

**Figura 31** – Processo de moldagem de amostras armadas (a) espaçadores de pasta cimentícia; (b) espaçadores e armadura posicionados a 1cm da base sobre um lastro de argamassa; (c) preenchimento do molde prismático com argamassa



Fonte: Autora (2022)

**Figura 32** – Cura das amostras prismáticas fissuradas, separadas por variação de bactéria e nutrientes



Fonte: Autora (2022)

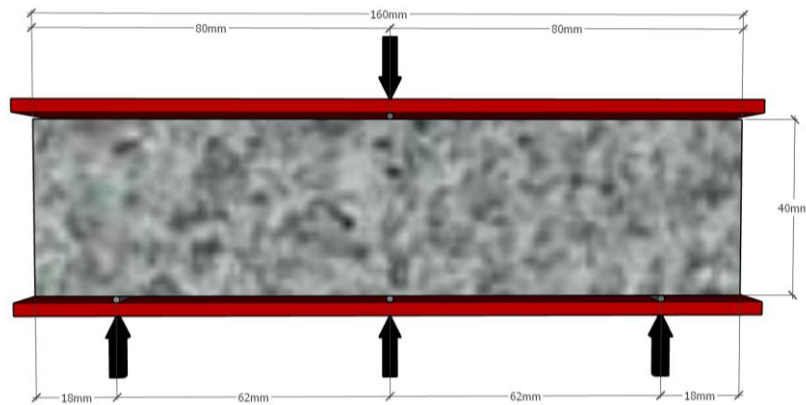
As amostras foram removidas da cura submersa nas datas estipuladas para inspeção visual e outros ensaios, e quando retornadas ao recipiente, a água foi trocada, de modo a simular as condições de renovação natural de água, que ocorrem em situações reais.

#### 3.1.4 Definição do método de fissuração

Para abertura de fissuras nas amostras, definiu-se um protocolo de fissuração manual, visto que as argamassas apresentam baixa resistência à tração,

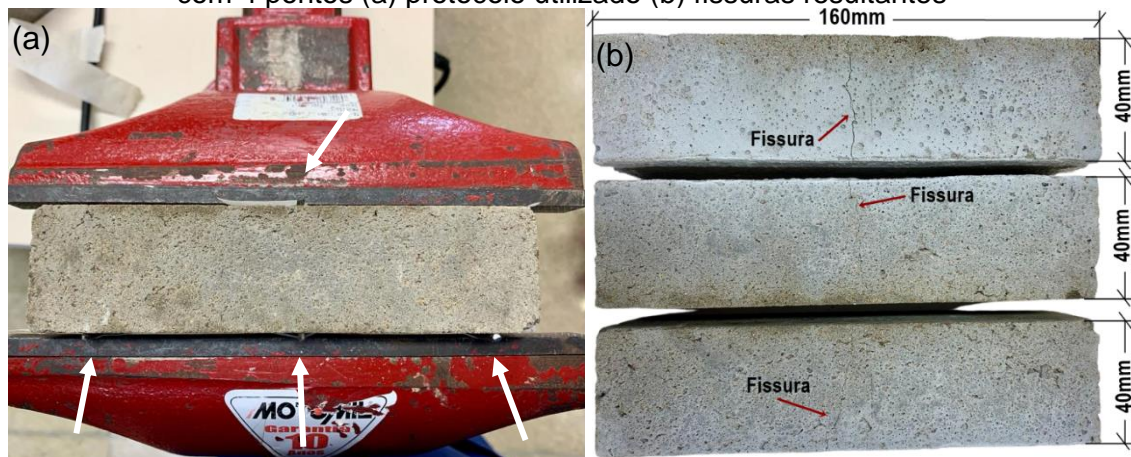
apresentando ruptura frágil<sup>14</sup>, e devido ao interesse em realizar fissuras em amostras sem armadura. As Figuras 33 e 34a ilustram o protocolo adotado.

**Figura 33** – Esquema do método de abertura de fissuras nas amostras prismáticas.



Fonte: Autora (2022)

**Figura 34** – Abertura de fissuras nas amostras prismáticas por meio de carga manual em morsa com 4 pontos (a) protocolo utilizado (b) fissuras resultantes



Fonte: Autora (2022)

Neste processo não foi possível estabelecer a carga de fissuração, tampouco controlar a dimensão de abertura das fissuras, que conforme apresentado na Figura 34b, apresentam espessuras variadas.

O método de fissuração foi possível em amostras sem armaduras na abertura de fissuras às 24 horas, sendo que o sucesso era de aproximadamente 50%, ou seja, em metade das amostras era possível a fissuração, e na outra, as amostras rompiam-

<sup>14</sup> Realizou-se um estudo piloto submetendo diferentes formatos de amostras (prismáticas, cilíndricas e cúbicas) à carregamentos de compressão e tração por compressão diametral. Porém, em todas as situações, a amostra apresentava ruptura frágil, impossibilitando a visualização do surgimento da primeira fissura. Por este motivo, adotou-se o protocolo manual, desenvolvido pelo grupo de pesquisa da Unila.

se. Decidiu-se, dessa forma, moldar 2 lotes para que fosse possível obter 1 lote inteiro de amostras fissuradas.

Porém, nas amostras contendo nutrientes, a abertura de fissuras às 24 horas não foi possível, pois nessas argamassas o extrato de levedura ocasionou o retardamento da pega, tornando o desmolde possível apenas após, no mínimo, 48 horas.

Sendo assim, optou-se em moldar dois grupos de amostras para análise de autocicatrização de fissuras: o primeiro, com 8 misturas sem nutrientes, para abertura de fissuras em 24 horas, e o segundo com amostras armadas, para tornar possível a abertura de fissuras aos 7 dias, grupo este composto pelas mesmas 8 misturas do primeiro grupo, e outros 8 com nutrientes, totalizando 16 misturas de argamassas armadas. A composição de cada mistura foi detalhada no item 3.1.3.

### 3.2 SEGUNDA ETAPA

Tendo sido preparados os esporos bacterianos e moldadas as amostras de argamassa, a segunda etapa consistiu na execução dos ensaios para os quais os corpos de prova foram moldados.

As formas de avaliação da eficiência da autocicatrização nos materiais cimentícios, de acordo com Van Tittelboom e de Belie (2013), são divididas em três grupos principais, (i) Visualização e determinação, (ii) recuperação da estanqueidade e (iii) recuperação de propriedades mecânicas. Para cada um dos grupos, foram selecionados dois ensaios, sendo para o grupo (i) a microscopia óptica + análise visual e a Microscopia eletrônica de varredura (MEV); para o grupo (ii) a absorção de água por capilaridade e velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e (iii) a resistência à tração na flexão e resistência à compressão, além de uma avaliação de módulo de elasticidade dinâmico pela técnica da excitação por impulso (TEI), os quais serão detalhados a seguir.

#### 3.2.1 Análise visual da autocicatrização de fissuras

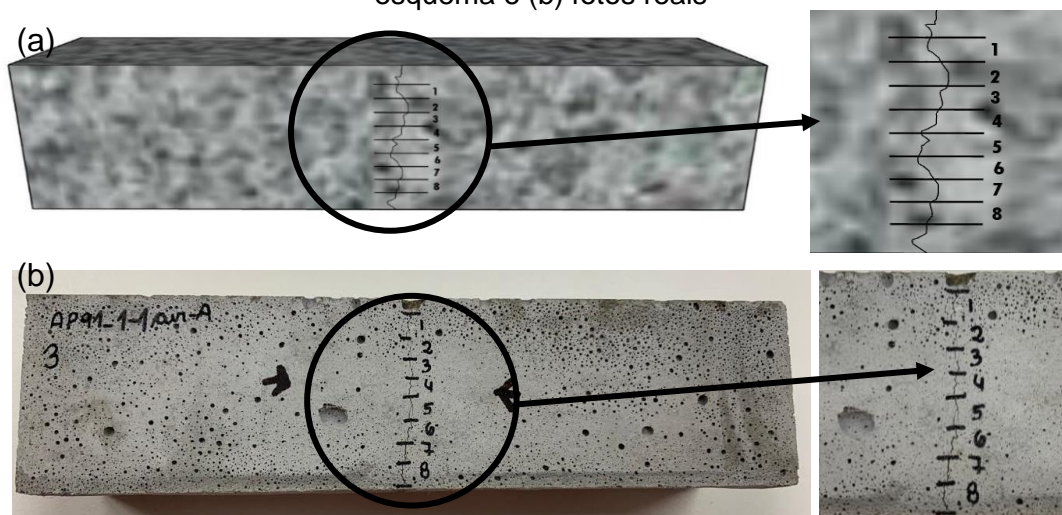
Para avaliação da autocicatrização das amostras de argamassa por meio do fechamento das fissuras ao longo do tempo, as amostras fissuradas foram divididas em três grupos:

- (i) Amostras armadas sem nutrientes: 8 traços com 3 amostras cada, totalizando 24 amostras com bactérias AP91, BC e BS, com e sem AIR
- (ii) Amostras armadas com nutrientes: 8 traços com 3 amostras cada, totalizando 24 amostras com bactérias AP91, combinadas com YE e CL, com e sem AIR;
- (iii) Amostras não armadas: 8 traços com 3 amostras cada, totalizando 24 amostras com bactérias AP91, BC e BS sem nutrientes, com e sem AIR;

Ao total 72 amostras foram analisadas visualmente em Estereomicroscópio óptico utilizado da marca Zeiss Discovery.V12, com lentes Zeiss PlanApo S 1.0x FWD de 60 mm, ligado a uma câmera Zeiss AxioCam 105 com ampliação de até 100x, e com software AxioVision SE64. As amostras do grupo (i) e (ii) foram fotografadas nas idades de 7 (leitura 0), 14, 21, 28, 42, 56 e 70 dias e as do grupo (iii) nas idades 1 (leitura 0), 14, 21, 28, 42 e 56.

Para visualização e leitura no Estereomicroscópio, todas as fissuras das amostras foram demarcadas e divididas em 8 zonas aproximadamente equidistantes (Figura 35), adaptando-se o procedimento de leitura realizado por Cappellesso (2018).

**Figura 35** – Divisão da fissura em 8 espaços para visualização em microscópio óptico em (a) esquema e (b) fotos reais



Fonte: Autora (2022)

Cada uma das 8 zonas de cada uma das 72 amostras foi fotografada nas idades pré-definidas, gerando o total de imagens apresentado na Tabela 16, e um quadro igual à Tabela 17 para cada uma das 72 amostras.

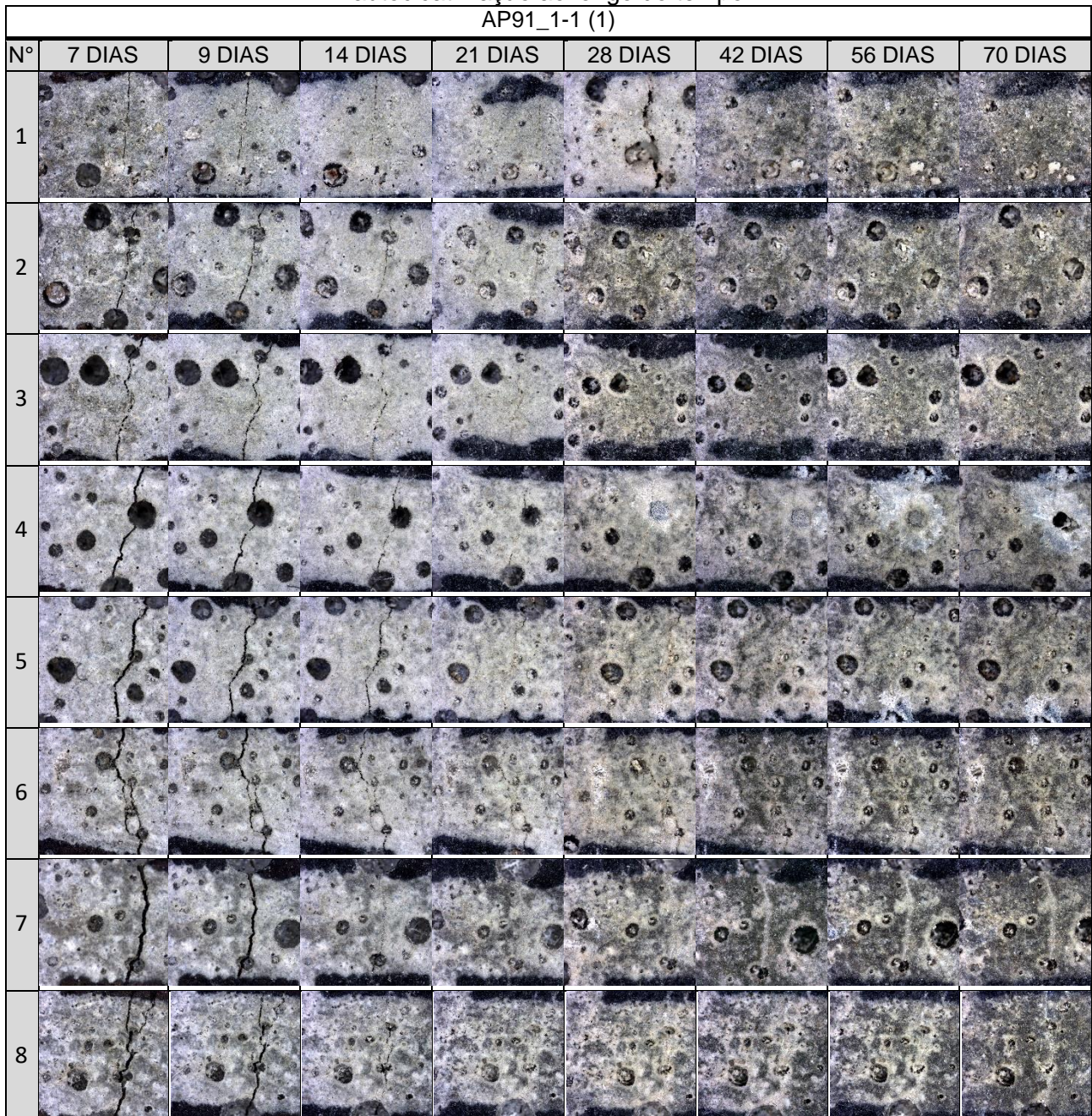
**Tabela 16 – Quantidade de fotografias de fissuras geradas ao longo do tempo**

Amostras armadas	Amostras não armadas
- 16 traços (com e sem nutrientes)	- 8 traços (sem nutrientes)
- 3 amostras por traço = 48 amostras	- 3 amostras por traço = 24 amostras
- Idades: 7 – 9 – 14 – 21 – 28 – 42 – 56 – 70	- Idades: 1 – 14 – 21 – 28 – 42 – 56
- 8 zonas por amostra	- 8 zonas por amostra
- 48 x 8 x 8 = 3072 imagens	- 24 x 6 x 8 = 1152 imagens

**3072 + 1152 = 4224 imagens**

Fonte: Autora (2022)

**Tabela 17 – Exemplo de quadro gerado para cada uma das 72 amostras com a evolução da autocicatrização ao longo do tempo**



Fonte: Autora (2022)

Dado o objetivo de quantificar a evolução da autocicatrização de cada uma das variações de argamassa ao longo de tempo, e à impossibilidade de avaliação de todas elas devido ao grande número de fotografias existentes, desenvolveu-se um método de seleção e cálculo de área, apresentado na Tabela 18.

**Tabela 18 – Metodologia de cálculo de autocicatrização de amostras ao longo do tempo**

ETAPA	PROCEDIMENTO
1	Seleção da melhor amostra de autocicatrização, entre três de cada traço, de acordo com o resultado de recuperação do módulo de elasticidade dinâmico conduzido por TEI;
2	Descarte dos trechos das extremidades das fissuras;
3	Escolha visual dos 3 maiores trechos da fissura da amostra selecionada;
4	Delimitação das imagens das idades 7, 14, 28 e 70 dias, nas amostras armadas, e 1, 14, 28 e 56 dias nas amostras não armadas;
5	Cálculo da área da fissura em cada idade (em situações em que se percebe que o fechamento é apenas superficial ou apenas no fundo, a área foi dividida por 2);
6	Cálculo da taxa de autocicatrização da fissura por idade;
7	Cálculo do índice de autocicatrização da amostra, por meio de multiplicação da taxa de autocicatrização x espessura média da fissura.

Fonte: Autora (2022)

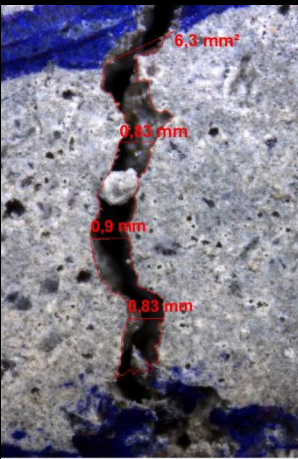
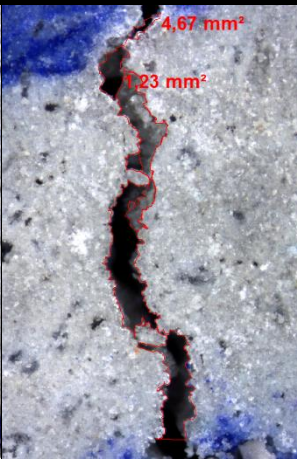

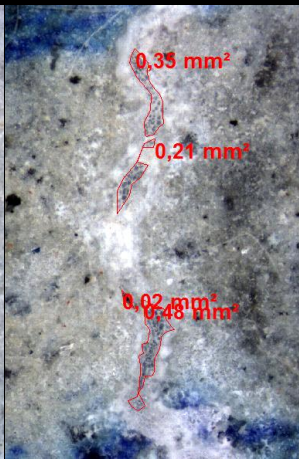
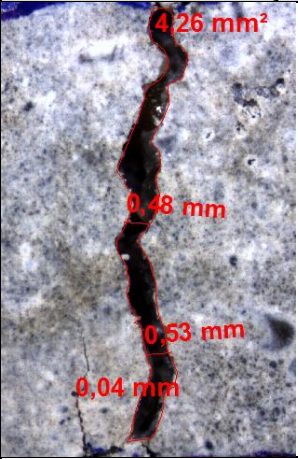

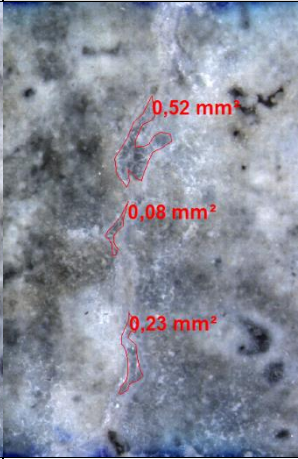
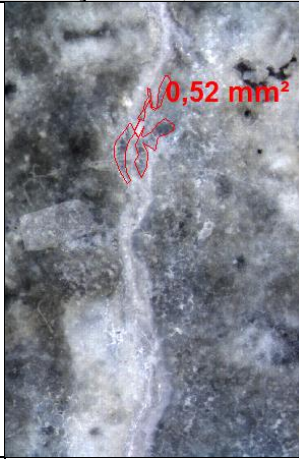
As etapas 1, 3 e 4 da metodologia de cálculo apresentada tiveram fins de redução do número de imagens, ao passo que a etapa 2 foi adotada pois em algumas situações as zonas 1 e 8 das fissuras apresentavam muitas irregularidades. Com a utilização das etapas 1, 2, 3 e 4 dessa metodologia, foi possível reduzir o número de imagens de 4224 para 288, tornando possível o cálculo da área das fissuras.

A etapa 5 foi empregada pois em algumas situações, por meio da análise com aproximação em estereomicroscópio óptico, percebeu-se o fechamento apenas superficial ou apenas do fundo da fissura, mas como houve precipitação, não era possível desconsiderá-la. Portanto, optou-se por determinar a área e dividi-la por 2.

Na etapa 7, percebeu-se que em algumas situações a taxa de cicatrização ( $t_c$ ) de fissuras entre amostras distintas, era similar, porém a espessura das fissuras era diferente. Como fissuras menores são propensas, de acordo com Ghellere (2021), a fecharem mais facilmente e em menor tempo, percebeu-se a necessidade de diferenciar as cicatrizações, associando-as com a espessura média ( $e_m$ ) de cada fissura, criando um Índice de autocicatrização ( $I_c$ ). As etapas 5 e 7 podem ser visualizadas nos exemplos apresentados na Tabela 19, onde percebe-se que, tanto na amostra BSair quanto na

amostra M-REF, há espaços cicatrizados que aparentam superficialidade, os quais tiveram a área calculada e dividida por 2, para demonstrar que houve cicatrização, porém não foi totalmente contínua.

**Tabela 19** – Exemplo da metodologia de cálculo utilizada para quantificar a aut cicatrização das fissuras ao longo do tempo

A M	Idade da leitura			
	7 dias (L0)	14 dias	28 dias	70 dias
BSair				
	$A_0 = 6,3\text{mm}^2$ - $E_m = 0,85\text{mm}$	$A = 4,67 - 1,23/2 =$ $4,06\text{ mm}^2$	$A = 6,5 - 2,12/2 =$ $5,44\text{mm}^2$	$A = 0,35/2 + 0,21/2$ $+ 0,48/2 + 0,02 = 0,54\text{mm}^2$
	Taxa de cicatrização:	35,56 %	13,65% **	91,43%
	Índice de aut cicatrização = $t * e_m = 91,43 * 0,85 =$		<b>Índice de aut cicatrização = 77,72</b>	
M-REF				
	$A_0 = 4,26\text{mm}^2$ $E_m = 0,50\text{mm}$	$A = 2,14 / 2 = 1,07\text{ mm}^2$	$A = 0,88 / 2 = 0,44\text{mm}^2$	$A = 0,52 / 2 = 0,26\text{mm}^2$
	Taxa de cicatrização:	74,90 %	79,34 %	93,90%
	Índice de aut cicatrização = $t * e_m = 93,9 * 0,50 =$		<b>Índice de aut cicatrização = 46,95</b>	

Fonte: Autora (2022)

Os cálculos realizados para obter o Índice de cicatrização são sintetizados na Equação 2.

$$I_c = \left( \frac{A_0 - A_{idade}}{A_0} \right) * E_m * 100$$

Equação 2

Onde:

$I_c$  = Índice de autocicatrização das fissuras (%)

$A_0$  = Medida inicial da área da fissura ( $\text{mm}^2$ )

$A_{idade}$  = Medida da área da fissura na idade de leitura ( $\text{mm}^2$ )

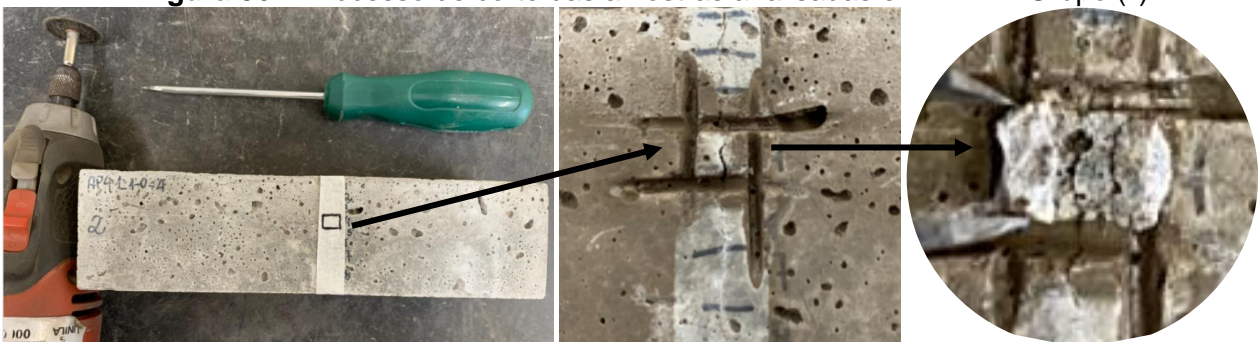
$E_m$  = Espessura média inicial da fissura (mm)

Em posse dessas informações, foi possível avaliar o máximo potencial de autocicatrização de fissuras das argamassas, além da possibilidade de quantificação do fechamento superficial das fissuras ao longo do tempo.

Além da visualização em estereomicroscópio óptico, foi realizada uma análise microestrutural por meio da microscopia eletrônica de varredura, onde foi possível observar a morfologia dos cristais precipitados. A análise em MEV foi realizada aos 77 dias e prioritariamente no grupo de amostras armadas, pois as amostras não armadas foram rompidas à tração e compressão aos 56 dias. Sendo assim, apenas no melhor resultado das amostras não armadas foi realizado o MEV, selecionando-se a área da fissura de forma distinta da preparação do grupo armado.

A preparação das amostras armadas para o MEV consistiu na seleção visual da zona mais cicatrizada, demarcação da região e corte da amostra com auxílio de uma micro-retífica. Após delimitadas as laterais da amostra, a região foi fraturada com a chave de fenda, sendo possível analisar a face da região da fissura. O processo é apresentado na Figura 36.

**Figura 36** – Processo de corte das amostras analisadas em MEV – Grupo (ii)

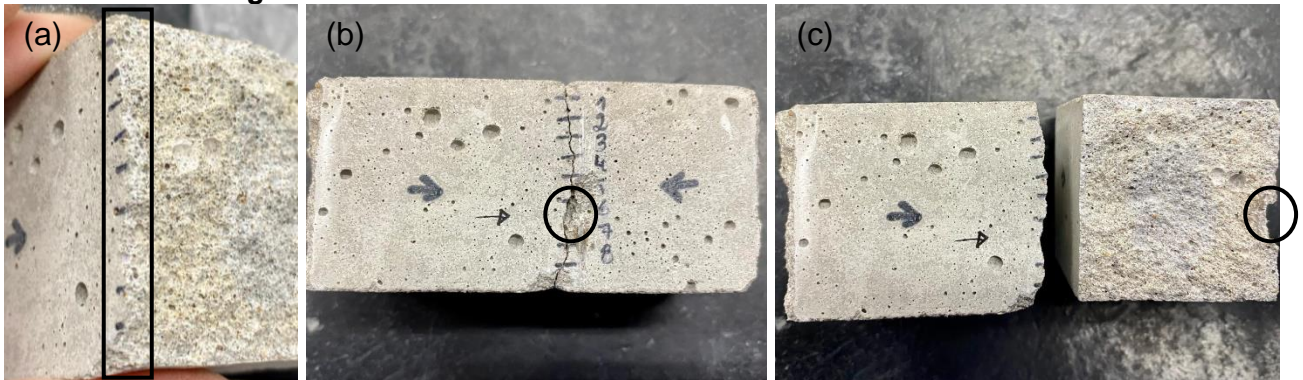


Fonte: Autora (2022)

As amostras não armadas já se encontravam fraturadas pelo ensaio de resistência à tração na flexão, sendo assim, selecionou-se (apenas para a variação com melhor resultado de índice de cicatrização) a região superior da zona de cicatrização com

melhor fechamento, pois visualmente apresentava uma região esbranquiçada, aparentando ser  $\text{CaCO}_3$ , conforme ilustra a Figura 37a. Com auxílio da micro-retífica e chave de fenda, fraturou-se a região desejada (Figuras 37b e c).

**Figura 37** – Processo de corte das amostras analisadas em MEV

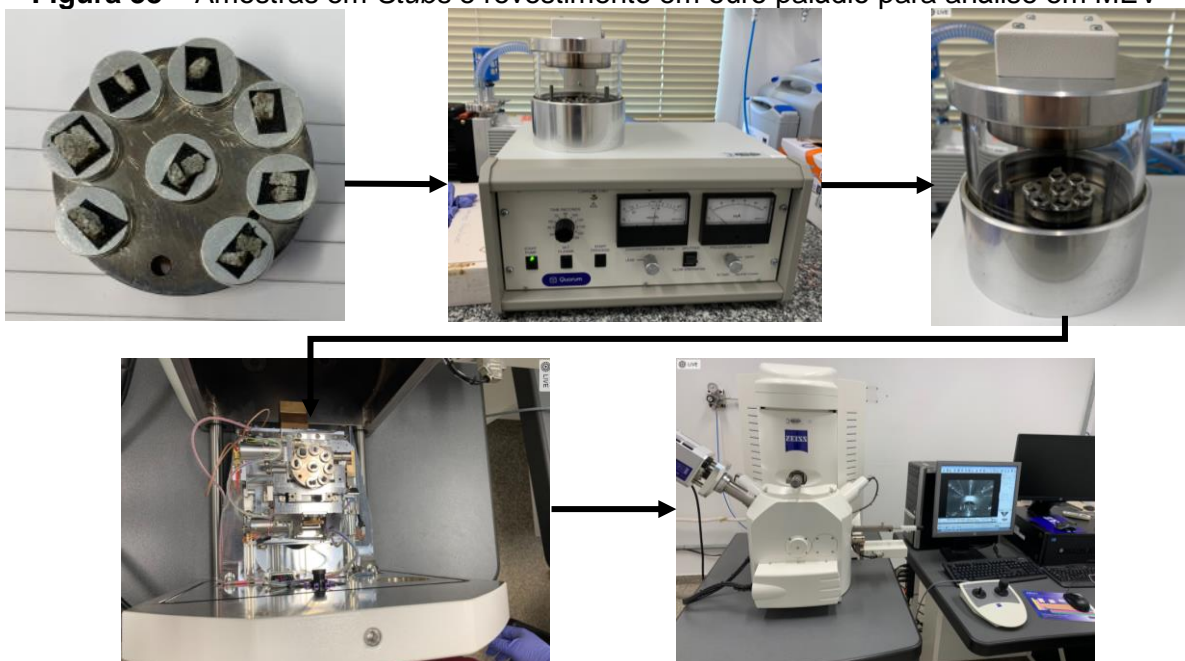


Fonte: Autora (2022)

Após o corte as amostras foram nomeadas, posicionadas em *stubs*, e revestidas por uma película de ouro Paládio para conferir melhor nitidez às imagens, para então serem inseridas e analisadas no Microscópio Eletrônico de Varredura ZEISS EVO MA10, operando em voltagem 20kV e rodando o software SmartSEM (Figura 38).

Além das imagens geradas no MEV, para complementar as análises, realizou-se o ensaio de Espectroscopia por energia dispersiva (EDS), que concebe gráficos com os picos dos elementos presentes na imagem analisada.

**Figura 38** – Amostras em *Stubs* e revestimento em ouro paládio para análise em MEV



Fonte: Autora (2022)

A preparação das amostras foi realizada no Laboratório de Desempenho, Estruturas e Materiais (LADEMA) e a microscopia de varredura foi realizada no Laboratório de Microscopia Eletrônica, ambos da UNILA.

### 3.2.2 Avaliação das propriedades das amostras

Para avaliação da influência que a adição de bactérias e nutrientes, isolados e combinados em diferentes teores, podem exercer no material cimentício, foram realizados ensaios para verificar algumas propriedades das amostras.

Foram realizados ensaios não destrutivos para obtenção do módulo de elasticidade dinâmico e velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, ensaios destrutivos para verificação da permeabilidade por capilaridade, e dois ensaios destrutivos para avaliação da recuperação das propriedades mecânicas, resistência à tração na flexão e resistência à compressão axial.

#### 3.2.3.1 *Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas*

O ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas foi realizado em dois grupos: (i) amostras fissuradas não armadas, contendo 8 traços e 24 amostras com bactérias e sem nutrientes, e (ii) amostras não armadas íntegras, com 16 traços e 48 amostras, produzido para avaliação da resistência aos 56 dias.

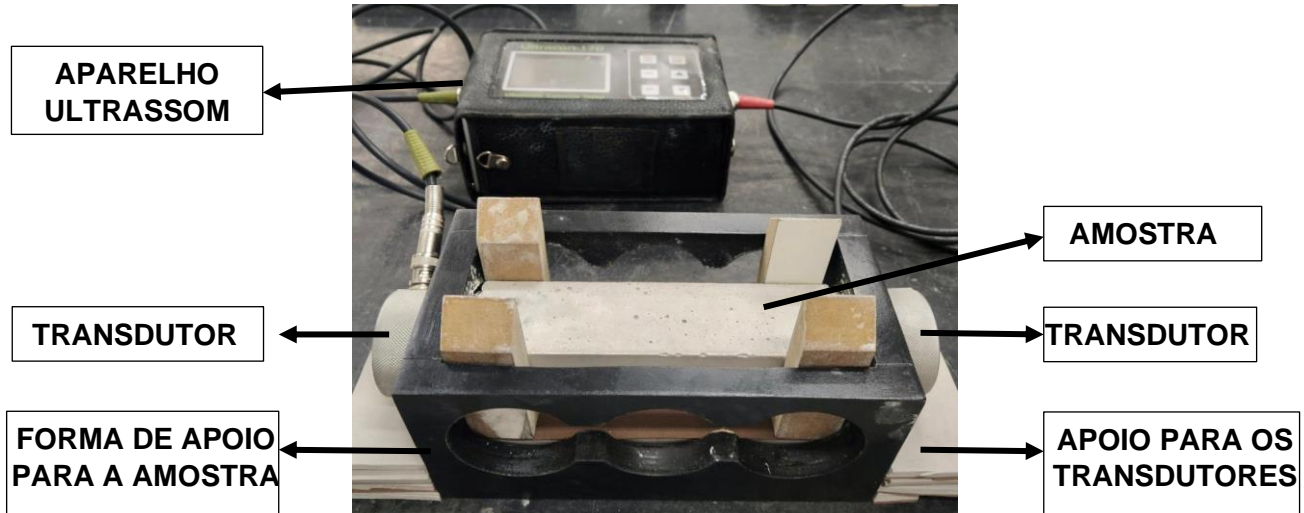
No grupo (i) o ensaio de ultrassom foi realizado nas idades de 1 dia (após a fissuração), 14, 28 e 56 dias, e no grupo de amostras íntegras (dividido entre amostras sem nutrientes e com nutrientes) foi realizado aos 1, 7, 14, 28 e 56 dias no primeiro grupo e aos 7, 14, 28 e 56 no segundo, porque no grupo de amostras com nutrientes não foi possível fazer com 1 dia de idade, dado o retardamento da pega causado pelos nutrientes.

O ensaio de ultrassom foi realizado por meio de transmissão direta, com os transdutores em faces opostas, possibilitando a transmissão das ondas com maior intensidade, de acordo com a NBR 8802 (ABNT, 2019), no Laboratório de Desempenho, Estruturas e Materiais (LADEMA).

Para tal, a amostra foi colocada em um aparelho ultrassom de marca Ultracon-170, que gera pulso de vibrações em uma frequência ultrassônica transmitida por

um transdutor emissor, aplicado em uma face da amostra, até o transdutor receptor, aplicado na face oposta da amostra (Figura 39).

**Figura 39** – Esquema simplificado do ensaio direto para obtenção da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas



Fonte: Autora (2022)

Foram realizadas 3 leituras por idade em cada amostra. Para facilitar a propagação das ondas, um gel acoplador foi utilizado nas superfícies entre corpo de prova e transdutor. Após alguns segundos, o equipamento fornecia a velocidade de propagação do pulso ultrassônico da amostra.

O acréscimo de velocidade de ondas ultrassônicas nas amostras pode ser associado à melhoria da matriz cimentícia devido à contínua hidratação do cimento, e também à precipitação de  $\text{CaCO}_3$  nas fissuras, pois se estas são seladas as ondas passam pelo produto precipitado, e o tempo da transmissão é reduzido.

### 3.2.3.2 Módulo de elasticidade dinâmico pela Técnica de excitação por impulso (TEI)

Para acompanhar a evolução da autocicatrização ao longo do tempo foi realizado o ensaio para verificação do módulo de elasticidade dinâmico, pela Técnica de excitação por impulso (TEI), o qual é baseado na resposta acústica das frequências de vibração natural.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Desempenho, Estruturas e Materiais (LADEMA), por meio de equipamento Sonelastic® da marca ATP Engenharia Física, composto por um pulsador eletromagnético automático, um captador acústico

(microfone) e por um software de coleta dos dados (Figura 40). Neste ensaio, quando ocorre um impacto na amostra, suas frequências de vibração são capturadas pelo microfone, as quais são processadas pelo software, que averigua o módulo de elasticidade dinâmico do material em análise.

**Figura 40** – Ensaio para determinação do módulo de elasticidade dinâmica na configuração longitudinal pela técnica de excitação por impulso.



(a) Posicionamento da amostra no suporte

(b) Software para coleta dos dados

Fonte: Autora (2022)

Neste ensaio foram avaliados dois grupos de amostra:

- (i) Amostras fissuradas, armadas e não armadas (16 misturas, com e sem nutrientes, 8 misturas sem nutrientes, respectivamente);
- (ii) Amostras íntegras sem armadura (16 misturas, com e sem nutrientes).

No grupo (i) a avaliação final foi realizada em função da melhoria da propriedade ao longo do tempo, chamada de recuperação de módulo de elasticidade dinâmico ( $R_{ED}$ ), e calculado por meio da Equação 3:

$$R_{ED} = \frac{Ed_0 - Ed_{idade}}{Ed_{final}} * 100 \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

$R_{ED}$  = Recuperação do módulo de elasticidade dinâmico (%)

$Ed_0$  = Módulo de elasticidade dinâmico na idade inicial

$Ed_{idade}$  = Módulo de elasticidade dinâmico na idade desejada

$E_{d\text{final}}$  = Módulo de elasticidade dinâmico final, no último dia de ensaio

Já no grupo (ii) a análise foi realizada em função do módulo de elasticidade final, aos 56 dias.

### 3.2.3.3 Absorção de água por capilaridade

No ensaio de absorção de água por capilaridade obteve-se o valor de absorção de água das amostras por meio da ascensão capilar.

As amostras foram produzidas em triplicata com dimensões de 50x100mm seguindo as diretrizes da NBR 9779 (ABNT, 2012). Moldou-se um grupo de amostra para análise aos 28 dias e outro para avaliação aos 56 dias, totalizando 96 corpos de prova.

Para execução do ensaio, as amostras foram pesadas ( $m_s$ ) e imersas parcialmente em água em um recipiente de modo que o nível de água permanecesse  $5\text{mm} \pm 1$  acima do nível inferior da amostra, conforme ilustra a Figura 41.

**Figura 41** – Ensaio de absorção de água por capilaridade



Fonte: Autora (2022)

Durante o ensaio foi determinada a massa saturada das amostras aos 15min, 30min, 1h, 2h, 3h, 6h, 24h, 48h e 72h após a imersão em água. Os primeiros períodos foram escolhidos (além dos estabelecidos por norma) devido à absorção por capilaridade acontecer de forma mais considerável nos períodos iniciais. Após a coleta de dados, a absorção de água por capilaridade foi calculada de acordo com as equações da NBR 9779 (ABNT, 2012).

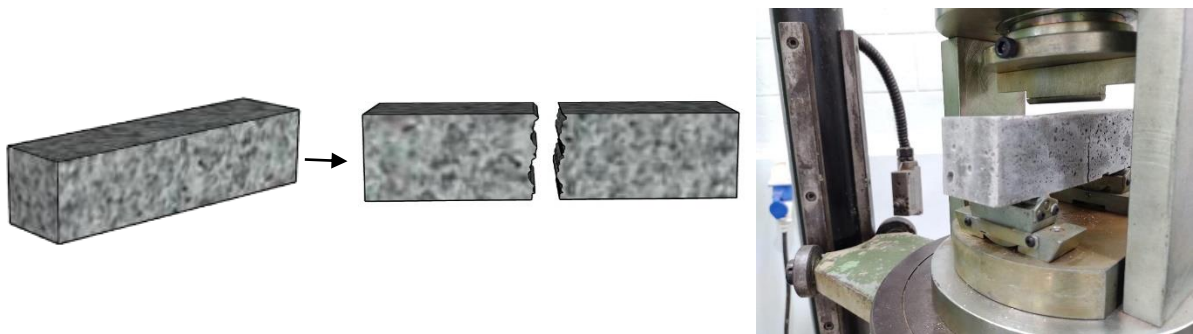
### 3.2.3.4 Resistência à tração na flexão e compressão axial

O ensaio de resistência à tração na flexão em três pontos e compressão axial foi realizado em todas as variações de argamassa, aos 28 e 56 dias de cura, em amostras íntegras. Para cada traço, foram produzidas amostras em triplicata, com dimensões de 40x40x160mm.

As amostras destinadas à análise de autocicatrização, sendo elas as 8 misturas de amostras sem armadura contendo bactérias AP91, BS e BC, com e sem ar incorporado, sem nutrientes, também foram submetidas ao ensaio ao final da coleta de dados de autocicatrização, aos 56 dias.

Para verificação da resistência à tração na flexão, as argamassas foram submetidas à aplicação de carga em prensa hidráulica até a ruptura do corpo de prova, dividindo-o em 2 metades, utilizadas no ensaio de resistência à compressão (Figura 42), conforme diretrizes da NBR 13279 (ABNT, 2005). Os valores de resistência à tração na flexão e compressão axial foram calculados com base nas equações da mesma norma.

**Figura 42** – Esquema de ruptura do corpo de prova, originando outras duas amostras.



Fonte: Autora (2021)

Um resumo de todos os procedimentos, dimensões dos corpos de prova, idades de ensaio e normas a serem utilizadas para o desenvolvimento desta pesquisa, são apresentados na Tabela 20.

**Tabela 20 – Resumo dos ensaios realizados no estudo**

Ensaio	Condição das amostras	Nº de amostras	Dimensão (mm)	Idades de ensaio (dias)	NORMA
Fissuração realista dos corpos-de-prova	Armada	48	40x40x160	7	--
	Não armada	24	40x40x160	1	
Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas	Não armada / íntegra	48	40x40x160	1 <sup>1)</sup> , 7, 14, 28 e 56	NBR 8802 (ABNT, 2019)
	Não armada / fissurada	24	40x40x160	1, 14, 28 e 56	
Módulo de elasticidade dinâmico - TEI	Armada / fissurada	48	40x40x160	7, 14, 28, 56 e 70	ASTM E1876 (2015)
	Não armada / fissurada	24	40x40x160	1, 14, 28 e 56	
	Não armada / íntegra	48	40x40x160	1 <sup>1)</sup> , 7, 14, 28 e 56	
Absorção de água por capilaridade	Não armada	96	50x100	28 e 56	NBR 9779 (ABNT, 2012)
Resistência à tração na flexão	Não armada / fissurada	24	40x40x160	56	NBR 13279 (ABNT, 2005)
	Não armada / íntegra	96	40x40x160	28 e 56	
Resistência à compressão axial	Não armada / fissurada	48 <sup>2)</sup>	≅ 40x40x80	56	NBR 13279 (ABNT, 2005)
	Não armada / íntegra	192 <sup>2)</sup>	≅ 40x40x80	28 e 56	
Inspeção visual das fissuras em Estereomicroscópio óptico	Armada	48	40x40x160	7, 14, 21, 28, 42, 56 e 70	-
	Não armada	24	40x40x160	1, 14, 21, 28, 42 e 56	-
Inspeção visual das fissuras em MEV	Armada	14	≅ 5x5x2	77	-
	Não armada	1	≅ 5x5x2	166	-

<sup>1)</sup> A leitura da velocidade de propagação de ondas e módulo de elasticidade dinâmico com 1 dia das amostras não armadas e íntegras ocorreu apenas nas amostras sem nutrientes. Nas amostras com nutrientes a leitura iniciou aos 7 dias, nos dois ensaios, pois a desmoldagem ocorreu com 2 dias de idade.

<sup>2)</sup> Amostras de resistência à compressão oriundas do dano completo no ensaio de resistência à tração na flexão.

Fonte: Autora (2022)

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados dos experimentos realizados para atingir aos objetivos propostos para este estudo, bem como a discussão acerca deles, com base na literatura.





### 4.1 AVALIAÇÃO VISUAL DA AUTOCICATRIZAÇÃO DE FISSURAS

A análise de imagem das fissuras foi realizada em Estereomicroscópio óptico, com objetivo de visualizar, fotografar e quantificar, ao longo do tempo, o potencial de aut cicatrização de cada bactéria, dos nutrientes (isolados e combinados) e do aditivo incorporador de ar. Visualizou-se também, ao final da coleta de dados, algumas amostras em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), a fim de verificar a morfologia dos cristais precipitados.


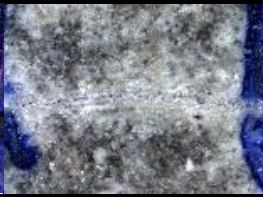





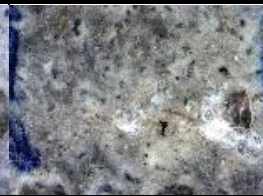





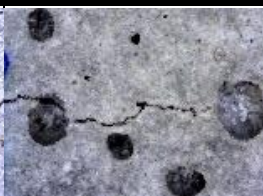












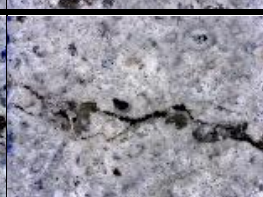



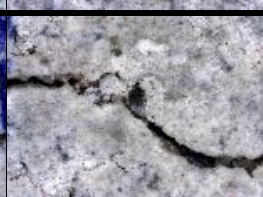
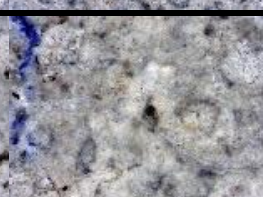

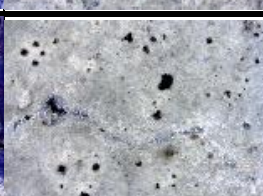
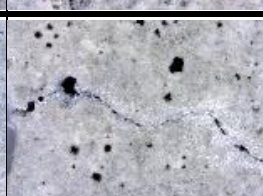

#### 4.1.1 Efeito da linhagem bacteriana e do AIR na aut cicatrização de fissuras




























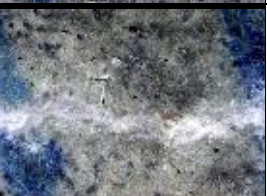
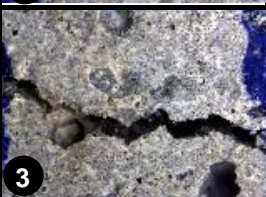
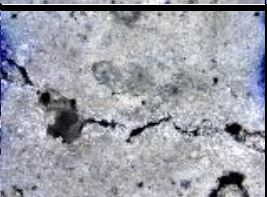







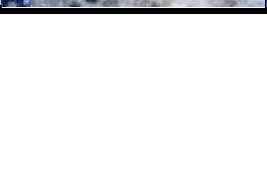
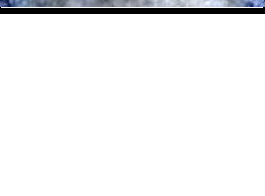
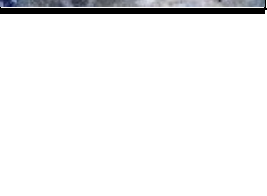
Na Tabela 21 são apresentados os resultados de aut cicatrização em amostras com e sem ar incorporado com armadura e sem nutrientes, variando-se os agentes biológicos em estudo. São apresentados também, a área inicial da fissura ( $A_0$ ), espessura média ( $e_m$ ) e espessura máxima ( $e_{m\acute{a}x}$ ), além da Taxa de cicatrização<sup>15</sup> ( $T_c$ ) (desconsiderando espessura de fissura) ao longo do tempo.





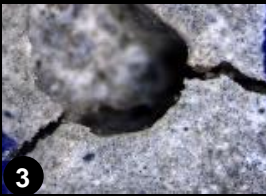










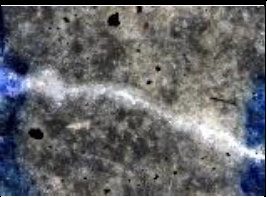


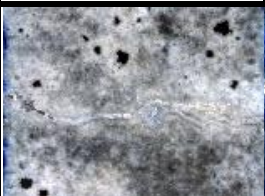
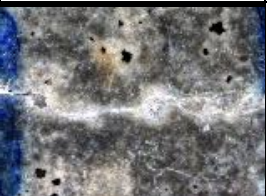
**Tabela 21** – Aut cicatrização em zonas fissuradas ao longo do tempo, de amostras armadas sem nutrientes

	7 DIAS ( $L_0$ )	14 DIAS	28 DIAS	70 DIAS	RESUMO
AP91 1					$A_0 = 2,50 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,43\text{mm}$ $e_{m\acute{a}x} = 0,50\text{mm}$ $T_{c14} = 72,80\%$ $T_{c28} = 80,80\%$ $T_{c70} = 87,60\%$

<sup>15</sup> Calculou-se a taxa de cicatrização com base nas áreas da fissura e produto precipitado, e o Índice de cicatrização com base na taxa de cicatrização e espessura da fissura, conforme detalhado no item 3.2.1.

					$A_0 = 4,28\text{mm}^2$ $e_m = 0,55\text{mm}$ $e_{m\acute{a}x} = 0,55\text{mm}$ $TC_{14} = 87,15\%$ $TC_{28} = 95,80\%$ $TC_{70} = 99,65\%$
					$A_0 = 5,66\text{mm}^2$ $e_m = 0,72\text{mm}$ $e_{m\acute{a}x} = 2,15\text{mm}$ $TC_{14} = 55,83\%$ $TC_{28} = 56,89\%$ $TC_{70} = 88,16\%$
AP91 air					$A_0 = 9,55\text{mm}^2$ $e_m = 1,2\text{mm}$ $e_{m\acute{a}x} = 2,84\text{mm}$ $TC_{14} = 20,74\%$ $TC_{28} = 23,98\%$ $TC_{70} = 72,04\%$
					$A_0 = 1,61\text{mm}^2$ $e_m = 0,37\text{mm}$ $e_{m\acute{a}x} = 0,50\text{mm}$ $TC_{14} = 65,22\%$ $TC_{28} = 72,05\%$ $TC_{70} = 86,96\%$
					$A_0 = 4,03\text{mm}^2$ $e_m = 0,74\text{mm}$ $e_{m\acute{a}x} = 2,09\text{mm}$ $TC_{14} = 20,84\%$ $TC_{28} = 36,23\%$ $TC_{70} = 72,95\%$
BC					$A_0 = 2,36\text{mm}^2$ $e_m = 0,57\text{mm}$ $e_{m\acute{a}x} = 0,6\text{mm}$ $TC_{14} = 28,81\%$ $TC_{28} = 41,53\%$ $TC_{70} = 94,92\%$
					$A_0 = 3,48\text{mm}^2$ $e_m = 0,55\text{mm}$ $e_{m\acute{a}x} = 0,92$ $TC_{14} = 10,63\%$ $TC_{28} = 19,83\%$ $TC_{70} = 65,52\%$
					$A_0 = 3,82\text{mm}^2$ $e_m = 0,41\text{mm}$ $e_{m\acute{a}x} = 0,44\text{mm}$ $TC_{14} = 11,52\%$ $TC_{28} = -1,83\%$ $TC_{70} = 76,57\%$
BCair					$A_0 = 3,25\text{mm}^2$ $e_m = 0,36\text{mm}$ $e_{m\acute{a}x} = 0,39\text{mm}$ $TC_{14} = 55,38\%$ $TC_{28} = 72,31\%$ $TC_{70} = 86,46\%$

					$A_0 = 4,51 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,65 \text{ mm}$ $e_{m\text{áx}} = 1,03$ $TC_{14} = 75,61\%$ $TC_{28} = 65,41\%$ $TC_{70} = 77,61\%$
					$A_0 = 4,02 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,54 \text{ mm}$ $e_{m\text{áx}} = 0,84 \text{ mm}$ $TC_{14} = 85,32\%$ $TC_{28} = 79,35\%$ $TC_{70} = 91,04\%$
					$A_0 = 4,81 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,53 \text{ mm}$ $e_{m\text{áx}} = 0,58 \text{ mm}$ $TC_{14} = 79,21\%$ $TC_{28} = 90,65\%$ $TC_{70} = 100\%$
BS					$A_0 = 4,98 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,5 \text{ mm}$ $e_{m\text{áx}} = 0,55 \text{ mm}$ $TC_{14} = 57,23\%$ $TC_{28} = 88,96\%$ $TC_{70} = 95,38\%$
					$A_0 = 4,00 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,65 \text{ mm}$ $e_{m\text{áx}} = 1,03 \text{ mm}$ $TC_{14} = 48,00\%$ $TC_{28} = 83,25\%$ $TC_{70} = 96,25\%$
					$A_0 = 6,3 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,85 \text{ mm}$ $e_{m\text{áx}} = 0,9 \text{ mm}$ $TC_{14} = 35,56\%$ $TC_{28} = 13,65\%$ $TC_{70} = 91,43\%$
BSair					$A_0 = 5,39 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,78 \text{ mm}$ $e_{m\text{áx}} = 0,82 \text{ mm}$ $TC_{14} = 63,45\%$ $TC_{28} = 21,15\%$ $TC_{70} = 98,79\%$
					$A_0 = 6,77 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,91 \text{ mm}$ $e_{m\text{áx}} = 1,58 \text{ mm}$ $TC_{14} = 59,08\%$ $TC_{28} = 56,13\%$ $TC_{70} = 95,72\%$
					$A_0 = 4,26 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,50 \text{ mm}$ $e_{m\text{áx}} = 0,53 \text{ mm}$ $TC_{14} = 74,90\%$ $TC_{28} = 79,34\%$ $TC_{70} = 93,90\%$
M-REF					$A_0 = 4,26 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,50 \text{ mm}$ $e_{m\text{áx}} = 0,53 \text{ mm}$ $TC_{14} = 74,90\%$ $TC_{28} = 79,34\%$ $TC_{70} = 93,90\%$

					$A_0 = 12,23 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,83 \text{ mm}$ $e_{m\acute{a}x} = 1,54 \text{ mm}$ $T_{C14} = 79,56\%$ $T_{C28} = 63,04\%$ $T_{C70} = 58,71\%$
					$A_0 = 2,31 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,46 \text{ mm}$ $e_{m\acute{a}x} = 0,57 \text{ mm}$ $T_{C14} = 90,91\%$ $T_{C28} = 80,52\%$ $T_{C70} = 100\%$
M-REFair					$A_0 = 2,72 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,35 \text{ mm}$ $e_{m\acute{a}x} = 0,38 \text{ mm}$ $T_{C14} = -20,0\%$ $T_{C28} = 44,12\%$ $T_{C70} = 88,24\%$
					$A_0 = 3,45 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,37 \text{ mm}$ $e_{m\acute{a}x} = 0,40 \text{ mm}$ $T_{C14} = 13,62\%$ $T_{C28} = 86,96\%$ $T_{C70} = 100\%$
					$A_0 = 2,55 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,29 \text{ mm}$ $e_{m\acute{a}x} = 0,33 \text{ mm}$ $T_{C14} = 65,10\%$ $T_{C28} = 92,55\%$ $T_{C70} = 94,51\%$

Análise de 3 zonas fissuradas de cada grupo, onde:  $A_0$ : Área inicial da fissura no dia de fissuração;  $e_m$ : espessura média da fissura;  $e_{m\acute{a}x}$ : Espessura máxima de cada fissura,  $T_{c_x}$ = Taxa de cicatrização por idade.  
 Fonte: Autora (2022)

É possível observar que todas as amostras, incluindo àquelas sem adição de bactéria (referência), apresentaram precipitação de cristais de carbonato, com fechamento das fissuras de forma pontual ou contínua. Os produtos precipitados apresentam coloração esbranquiçada e forma ramificada, corroborando com o citado por Rooij *et al.* (2013). De acordo com Alyousif (2016), a precipitação nessas condições e coloração é atribuída à forma de calcita.

A autocicatrização de amostras de referência chegou a taxas de 100% nas amostras sem AIR para espessura média de 0,46 mm e máxima de 0,57 mm. Para as amostras com AIR foram 100% cicatrizadas fissuras com espessura média de 0,37 mm e abertura máxima de 0,40 mm. Tal fechamento é denominado de autocicatrização autógena, e foi verificado também por Cappellesso (2018), Gagné e Argouges (2012) Pacheco (2020), entre outros, sendo que a última autora, em mesmas condições de cura obteve cicatrização contínua em fissuras com espessura de 0,55mm e cicatrização pontual de até 0,60 mm. A

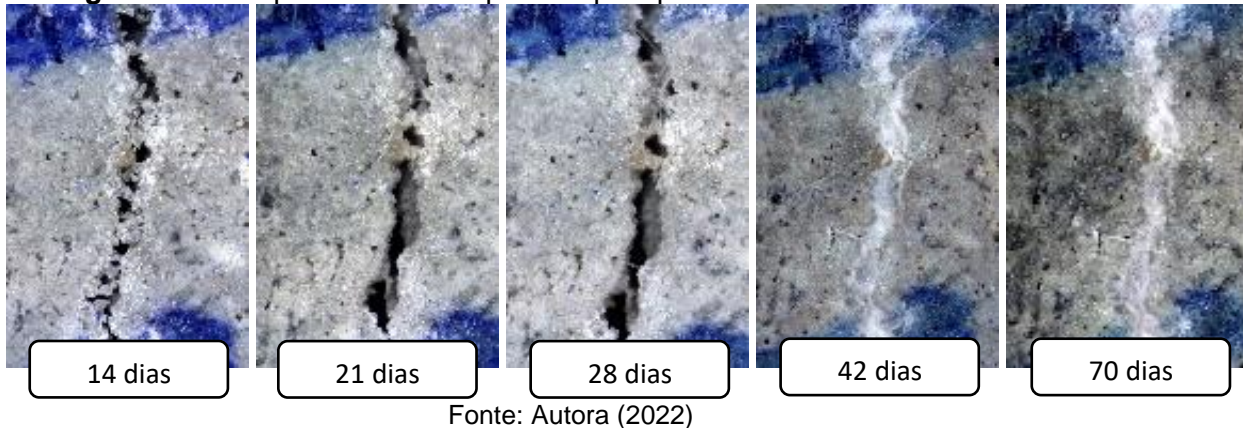
amostra com o agente BS também apresentou taxa de cicatrização de 100% em fissura com  $e_{m\acute{a}x}$  de 0,58 mm. As amostras com as bactérias AP91 e BS<sub>air</sub> apresentaram taxa de cicatrização de 99,65% e 98,79% para fissuras com espessura máxima de 0,55 e 0,82mm, respectivamente.

Em algumas situações, como nas amostras contendo AP91, o fechamento contínuo da fissura ocorre já nos primeiros 7 dias de abertura em algumas zonas. Para Xu *et al.* (2019), a estimativa é de que a reação de formação de  $CaCO_3$  pela atividade metabólica das bactérias acontece de forma rápida, como de fato aconteceu neste estudo. Porém, a situação não foi verificada em todas as zonas de mesma variação, demonstrando que não há linearidade de tempo de cicatrização, nem mesmo em amostras de mesma composição.

Como observado, amostras com e sem agentes biológicos apresentaram autocicatrização, indicando processos autógenos e autônomos, uma vez que amostras com bactérias apresentaram desempenho superior à de referência, com fechamento de fissuras de aberturas mais elevadas. A formação de produto cicatrizante pode ser decorrente da hidratação secundária do cimento visto que a fissuração foi realizada aos 7 dias, existindo ainda material anidro na matriz (SIDIQ; GRAVINA; GIUSTOZZI, 2019). Composições com baixas relações a/c podem ser favoráveis à autocicatrização autógena, visto que mesmo após passado algum tempo de cura, podem restar quantidades significativas de aglutinante não hidratadas, sendo estas potencialmente disponíveis para reação de hidratação retardada, juntamente com a carbonatação (FERRARA *et al.*, 2018). Também pode haver formação de  $CaCO_3$  por meio de reação entre o cálcio presente na matriz e os íons carbonato fornecidos pela água da cura (HILLOULIN *et al.*, 2016).

Outra situação analisada deu-se nas amostras BC<sub>air</sub>, onde constatou-se que aos 21 e 28 dias há menos produtos de cicatrização na região da fissura que aos 14 dias. O mesmo ocorreu em zonas de fissuras da amostra BS<sub>air</sub>, conforme apresenta a Figura 43, onde aos 14 dias apresentam-se cristais de produto precipitados na borda da fissura, que não são visíveis nas idades de leitura seguintes (21 e 28 dias). Em idades avançadas de análise (42 e 70 dias) observa-se que a fissura foi totalmente fechada.

**Figura 43** – Desprendimento de produto precipitado na borda da fissura em amostra BSair



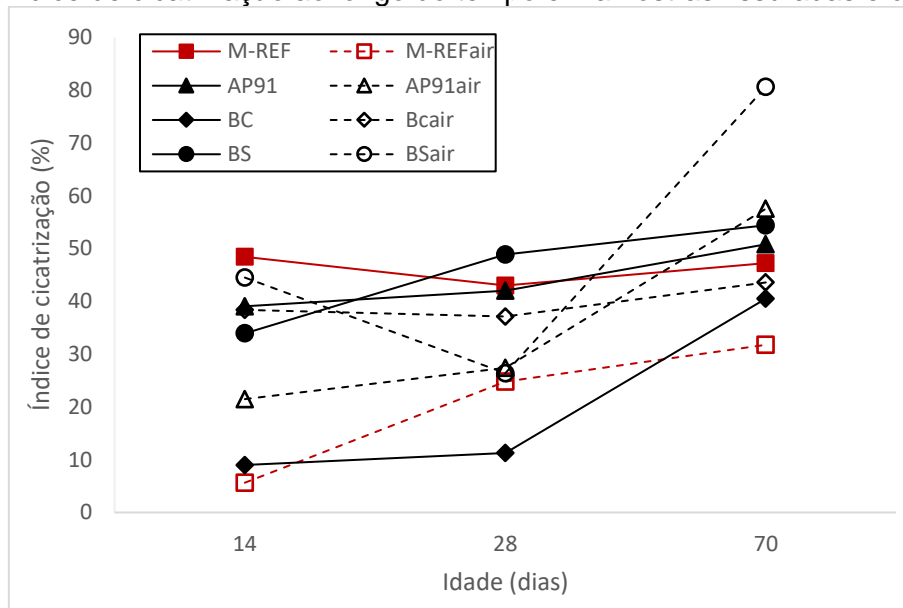
De acordo com Pacheco (2020), nestas situações ocorre um desprendimento, devido à queda ou ruptura, do produto gerado na parede da fissura, advindo do manuseio da amostra ou do processo de lixiviação. O reposicionamento das amostras à submersão, após a realização dos ensaios de controle não destrutivos, pode ocasionar pressão de água sob os produtos de cicatrização, gerando seu desprendimento e conseqüente queda na região.

Roig-Flores *et al.* (2016) sugerem que para evitar a remoção acidental de precipitados recém-formados, não sejam realizadas medições intermediárias (7, 14, 21 dias), pois podem afetar o desempenho da autocicatrização. Acrescenta-se que, caso sejam realizadas leituras intermediárias, é importante acompanhar o processo de lixiviação das amostras, por meio de medição de pH e condutividade, para verificar sua influência no processo.

A respeito da relação entre espessura média de fissura e taxa de cicatrização, percebe-se que não há proporcionalidade entre os dois fatores, visto que a área de fechamento não é maior em espessuras de fissuras menores. Ghellere (2021), observou maior sucesso de autocicatrização de fissuras com aberturas menores que 0,43 mm (para amostras não submersas). Resultado similar ao do presente estudo foi percebido por Gagné e Argouges (2012), que obtiveram taxas de cicatrização autógena maiores e mais rapidamente em trincas de maior dimensão em amostras de argamassa acondicionadas ao ar. Os autores explicam que a cinética de precipitação de produtos de autocicatrização é maior em fissuras de maior espessura, visto que não há limitação de espaço para formação de produtos, e existe abertura suficiente para fornecimento de CO<sub>2</sub> externo e água, para a formação de CaCO<sub>3</sub>.

Pela análise do índice de cicatrização (taxa de cicatrização multiplicada pela espessura média da fissura), observa-se (Figura 44) que todas as combinações apresentaram melhoria ao longo do tempo, com resultados mais favoráveis para matrizes com a incorporação de AIR, exceto naquelas sem bactérias (referência).

**Figura 44** - Índice de cicatrização ao longo do tempo em amostras fissuradas e com armadura



Fonte: Autora (2022)

Observou-se que a amostra de referência apresentou maior índice de cicatrização aos 14 dias de idade (7 após abertura de fissura), indicando que a autocicatrização autógena ocorre prioritariamente nas idades iniciais devido a formação de produtos de hidratação na matriz, bastante observado nas amostras. Nas idades seguintes (28 e 70 dias) observa-se superioridade nos índices de amostras com adição de bactérias, indicando que nas idades finais os microrganismos podem estar atuando e favorecendo a autocicatrização autônoma das fissuras. Verificou-se também, que não há linearidade entre as melhores taxas e índices em cada idade, pois o melhor resultado aos 14 dias não é o melhor também aos 28 e 70.




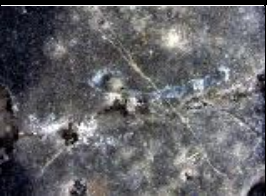








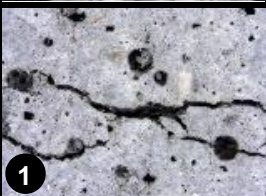
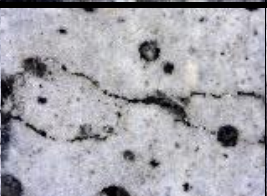
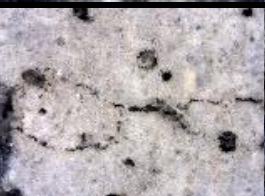

O menor índice de cicatrização aos 28 dias para algumas amostras está associado ao desprendimento do produto precipitado. Nas primeiras idades de cicatrização os compostos formados não apresentam boa aderência às paredes da fissura, podendo ser removidos com facilidade pelo processo de lixiviação ou ação decorrentes do manuseio das amostras submersas.













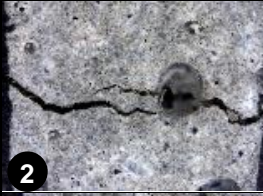




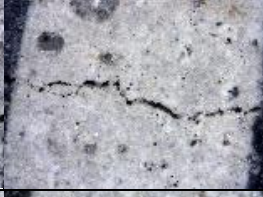

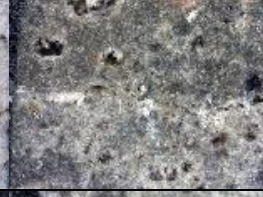
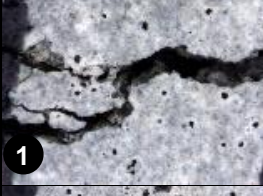



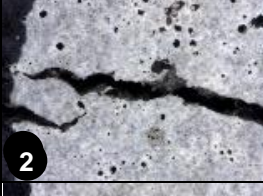
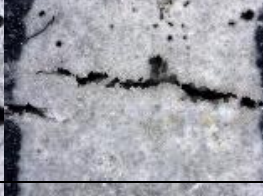



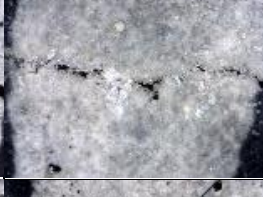






Os melhores resultados para matrizes sem nutrientes foram obtidos pelas amostras BS<sub>air</sub>, AP91<sub>air</sub> e BS, que apresentaram, respectivamente, Índice de cicatrização de 80,63%, 57,54% e 54,42%. Informação importante a ser destacada é que estas argamassas possuem bactérias da espécie *Bacillus subtilis*. Esta espécie já foi utilizada em outros estudos (PACHECO, 2020; SCHWANTES-CEZARIO et al., 2018; SCHWANTES, 2017; GHELLERE, 2021) apresentando resultados satisfatórios de autocicatrização.




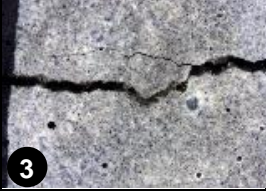



























#### 4.1.2 Avaliação do efeito dos nutrientes na autocicatrização

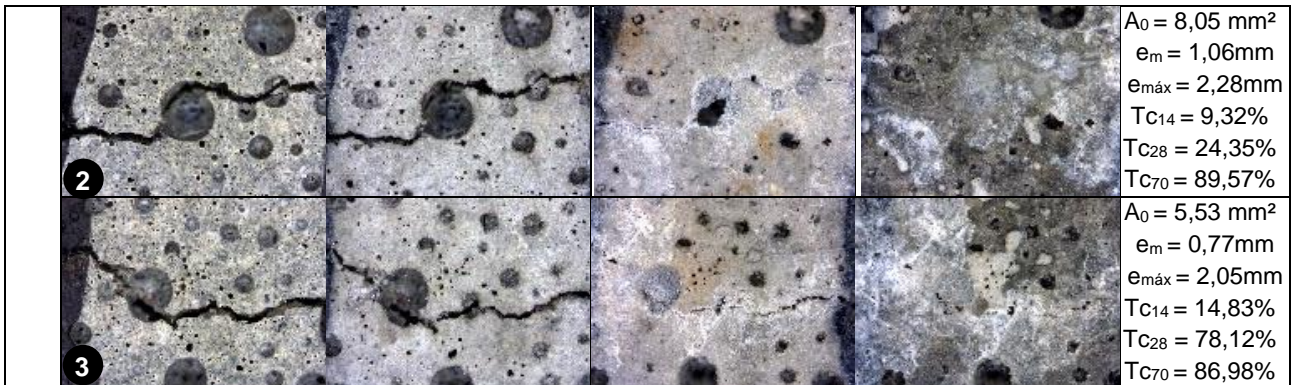
Na avaliação do efeito dos nutrientes (CL- Lactato de Cálcio e YE - Extrato de Levedura) combinados com a bactéria AP91 na autocicatrização de fissuras (Tabela 22), constatou-se que todas as amostras apresentaram precipitação de cristais, de forma pontual ou contínua, sendo que a incorporação de ar se mostrou favorável à autocicatrização.

**Tabela 22** - Análise da autocicatrização das zonas fissuradas de amostras armadas com nutrientes ao longo do tempo

	7 DIAS (L <sub>0</sub> )	14 DIAS	28 DIAS	70 DIAS	RESUMO
AP91_1-1					A <sub>0</sub> = 3,17 mm <sup>2</sup> e <sub>m</sub> = 0,39mm e <sub>máx</sub> = 0,45mm TC <sub>14</sub> = 62,78% TC <sub>28</sub> = 91,48% TC <sub>70</sub> = 79,18%
					A <sub>0</sub> = 1,66 mm <sup>2</sup> e <sub>m</sub> = 0,26mm e <sub>máx</sub> = 0,42mm TC <sub>14</sub> = 77,11% TC <sub>28</sub> = 93,98% TC <sub>70</sub> = 65,06%
					A <sub>0</sub> = 2,15 mm <sup>2</sup> e <sub>m</sub> = 0,3mm e <sub>máx</sub> = 0,34mm TC <sub>14</sub> = 83,26% TC <sub>28</sub> = 94,88% TC <sub>70</sub> = 60,47%
AP91_1-1 <sub>air</sub>					A <sub>0</sub> = 4,33 mm <sup>2</sup> e <sub>m</sub> = 0,35mm e <sub>máx</sub> = 0,68mm TC <sub>14</sub> = 41,64% TC <sub>28</sub> = 75,08% TC <sub>70</sub> = 77,81%

					$A_0 = 4,33 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,50\text{mm}$ $e_{\text{m}\acute{a}\text{x}} = 0,78\text{mm}$ $TC_{14} = 49,19\%$ $TC_{28} = 50,35\%$ $TC_{70} = 72,52\%$
					$A_0 = 4,08 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,29\text{mm}$ $e_{\text{m}\acute{a}\text{x}} = 0,44\text{mm}$ $TC_{14} = 64,22\%$ $TC_{28} = 90,20\%$ $TC_{70} = 92,89\%$
AP91_0,5-0,5					$A_0 = 1,71\text{mm}^2$ $e_m = 0,20\text{mm}$ $e_{\text{m}\acute{a}\text{x}} = 0,21\text{mm}$ $TC_{14} = 49,12\%$ $TC_{28} = 71,35\%$ $TC_{70} = 88,30\%$
					$A_0 = 1,89\text{mm}^2$ $e_m = 0,29\text{mm}$ $e_{\text{m}\acute{a}\text{x}} = 0,32\text{mm}$ $TC_{14} = 70,37\%$ $TC_{28} = 86,77\%$ $TC_{70} = 90,48\%$
					$A_0 = 2,96 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,35\text{mm}$ $e_{\text{m}\acute{a}\text{x}} = 0,36\text{mm}$ $TC_{14} = 71,62\%$ $TC_{28} = 90,20\%$ $TC_{70} = 93,24\%$
AP91_0,5-0,5air					$A_0 = 10,11\text{mm}^2$ $e_m = 0,91\text{mm}$ $e_{\text{m}\acute{a}\text{x}} = 1,19\text{mm}$ $TC_{14} = 69,54\%$ $TC_{28} = 79,33\%$ $TC_{70} = 78,64\%$
					$A_0 = 7,04 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,61\text{mm}$ $e_{\text{m}\acute{a}\text{x}} = 0,74\text{mm}$ $TC_{14} = 58,38\%$ $TC_{28} = 72,02\%$ $TC_{70} = 73,30\%$
					$A_0 = 5,05 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,49\text{mm}$ $e_{\text{m}\acute{a}\text{x}} = 0,51\text{mm}$ $TC_{14} = 89,91\%$ $TC_{28} = 98,61\%$ $TC_{70} = 99,41\%$
AP91_1-0					$A_0 = 5,16\text{mm}^2$ $e_m = 0,56\text{mm}$ $e_{\text{m}\acute{a}\text{x}} = 0,59\text{mm}$ $TC_{14} = 46,90\%$ $TC_{28} = 79,84\%$ $TC_{70} = 92,05\%$

					$A_0 = 5,25 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,66\text{mm}$ $e_{\text{m}\acute{a}\text{x}} = 0,89\text{mm}$ $TC_{14} = 28,95\%$ $TC_{28} = 79,04\%$ $TC_{70} = 85,71\%$
					$A_0 = 3,76\text{mm}^2$ $e_m = 0,41\text{mm}$ $e_{\text{m}\acute{a}\text{x}} = 0,48\text{mm}$ $TC_{14} = 90,91\%$ $TC_{28} = 80,52\%$ $TC_{70} = 100\%$
AP91_1-0air					$A_0 = 5,44 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,68\text{mm}$ $e_{\text{m}\acute{a}\text{x}} = 0,87\text{mm}$ $TC_{14} = 77,39\%$ $TC_{28} = 99,08\%$ $TC_{70} = 100,00\%$
					$A_0 = 4,52 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,45\text{mm}$ $e_{\text{m}\acute{a}\text{x}} = 0,69\text{mm}$ $TC_{14} = 84,07\%$ $TC_{28} = 90,71\%$ $TC_{70} = 90,04\%$
					$A_0 = 3,55 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,42\text{mm}$ $e_{\text{m}\acute{a}\text{x}} = 0,53\text{mm}$ $TC_{14} = 83,94\%$ $TC_{28} = 84,79\%$ $TC_{70} = 87,89\%$
AP91_0-1					$A_0 = 2,81\text{mm}^2$ $e_m = 0,37\text{mm}$ $e_{\text{m}\acute{a}\text{x}} = 0,46\text{mm}$ $TC_{14} = 58,36\%$ $TC_{28} = 82,92\%$ $TC_{70} = 83,63\%$
					$A_0 = 3,30 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,35\text{mm}$ $e_{\text{m}\acute{a}\text{x}} = 0,38\text{mm}$ $TC_{14} = 35,45\%$ $TC_{28} = 86,06\%$ $TC_{70} = 90,90\%$
					$A_0 = 2,43\text{mm}^2$ $e_m = 0,29\text{mm}$ $e_{\text{m}\acute{a}\text{x}} = 0,37\text{mm}$ $TC_{14} = 36,21\%$ $TC_{28} = 75,72\%$ $TC_{70} = 89,30\%$
AP91_0-1air					$A_0 = 2,83 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,39\text{mm}$ $e_{\text{m}\acute{a}\text{x}} = 0,40\text{mm}$ $TC_{14} = 26,15\%$ $TC_{28} = 94,70\%$ $TC_{70} = 100\%$



Análise de 3 zonas fissuradas de cada grupo, onde:  $A_0$ : Área inicial da fissura no dia de fissuração;  $e_m$ : espessura média da fissura;  $e_{\text{máx}}$ : Espessura máxima de cada fissura,  $T_{c_x}$ = Taxa de cicatrização por idade.  
Fonte: Autora (2022)

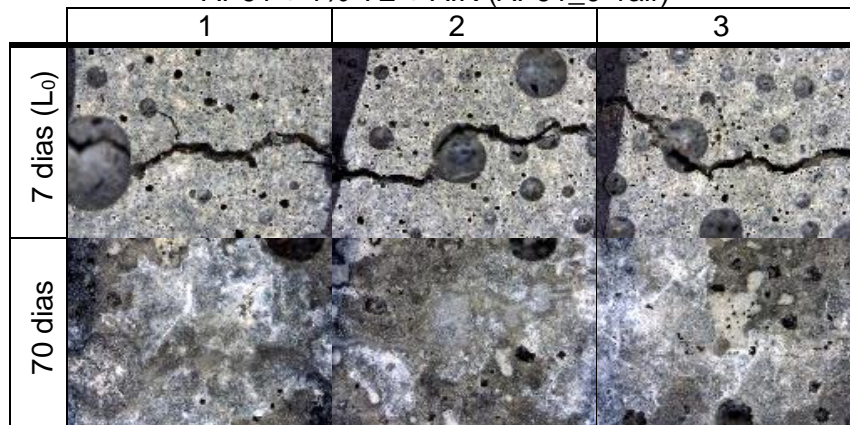
Das oito variações de argamassa analisadas, três (AP91\_1-0air, AP91\_1-0, AP91\_0-1air) apresentaram 100% de autocicatrização na zona fissurada para diferentes aberturas de fissuras (0,87, 0,48 e 0,40 mm, respectivamente). Além disso, outra taxa de cicatrização bastante significativa foi da amostra AP91\_0,5-0,5air que cicatrizou 99,41% de uma zona de fissura com  $e_{\text{máx}}$  de 0,51mm. As melhores taxas de cicatrização foram observadas em amostras com a presença isolada (1%) ou combinada (0,5%) dos nutrientes.

As variações AP91\_1-0 e AP91\_0-1air além de selarem 100% algumas zonas das fissuras, tiveram precipitação de produto que excedia consideravelmente a espessura da fissura, chegando a valores até 3 a 4x superiores à abertura inicial. É importante também frisar, que nas três zonas fissuradas de cada amostra analisadas, mesmo as que não tiveram  $T_c$  de 100%, se obteve a mesma situação, como pode ser visualizado na Tabela 22. Tal ocorrência levanta a hipótese de que, nestas condições experimentais seria possível corrigir fissuras de maior espessura. O acúmulo de produtos excedendo a espessura das fissuras também foi relatado na literatura (PACHECO, 2020; SCHWANTES-CEZARIO *et al.*, 2018; XU *et al.*, 2019). Em algumas situações, ao fazer aproximação da imagem na zona cicatrizada, constatou-se diferença de densidade do produto precipitado (translúcido em alguns locais), indicando que a fissura estava não estava totalmente cicatrizada no momento da tomada da imagem<sup>16</sup>.

<sup>16</sup> Em algumas situações, nas imagens apresentadas nas Tabelas 21 e 22, as fissuras aparentam ter 100% de sua área cicatrizada, porém, ao aproximar a imagem, percebe-se a diferença de densidade do produto precipitado, translúcido em alguns locais, os quais tiveram sua área de cicatrização dividida por 2 para o cálculo da taxa (Apêndice B).

Na variação de argamassa contendo AP91, extrato de levedura e AIR (AP91\_0-1air) a autocicatrização abrangeu também os poros contidos na fissura, com espessura máxima de 2,28mm, como pode ser visualizado na Tabela 23.

**Tabela 23** – Detalhe da autocicatrização total de fissuras e poros em amostras contendo bactéria AP91 + 1% YE + AIR (AP91\_0-1air)



Fonte: Autora (2022)

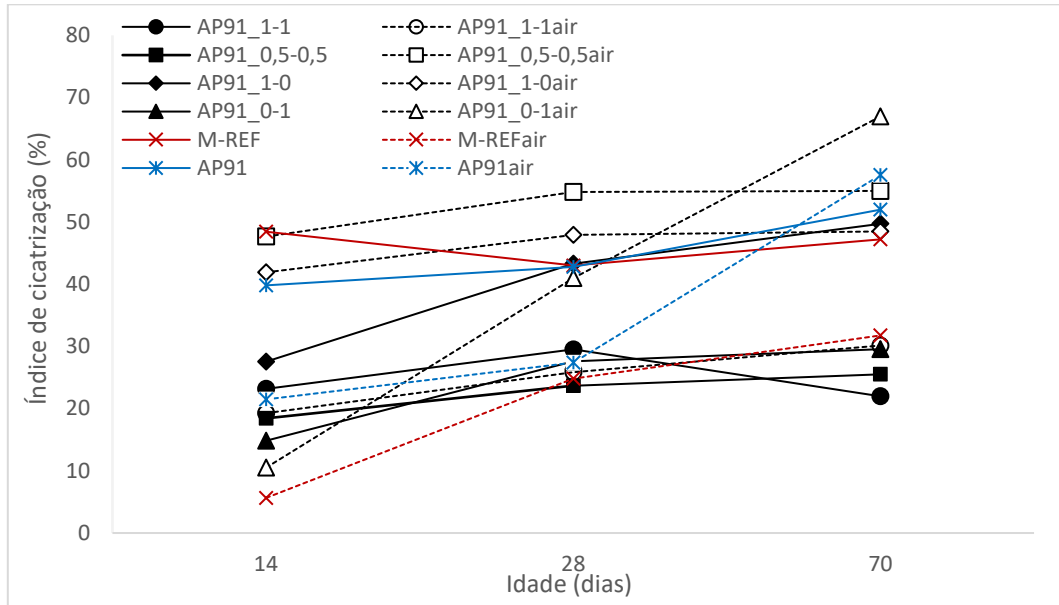
Supõe-se o resultado promissor nesta variação pela associação da provável viabilidade prolongada dos esporos bacterianos, proporcionada pelos espaços dos microporos gerados pelo AIR, com a disponibilidade de nutriente (YE) necessário para a sobrevivência bacteriana, sendo possível extrair da própria matriz cimentícia o cálcio necessário para precipitar  $\text{CaCO}_3$  e cicatrizar as fissuras.

Outra situação visualizada na Tabela 22<sup>17</sup> é o fato de algumas zonas fissuradas apresentarem autocicatrização quase na espessura total já aos 28 dias de cura. Tal ocorrência também foi verificada por Pacheco (2020) em algumas amostras contendo solução bacteriana encapsuladas em Perlita expandida. De acordo com Davies *et al.*, (2018) isso ocorre pois se há condição favorável (presença de água), como no caso deste estudo, logo após a ocorrência da fissuração os esporos bacterianos germinam e as células vegetativas metabolizam os nutrientes, precipitando  $\text{CaCO}_3$ .

O índice de cicatrização ao longo do tempo das misturas com bactérias AP91 e nutrientes, com e sem AIR, é apresentado na Figura 45 e ilustra que todas as amostras tiveram melhoria ao longo do tempo. Observa-se que as amostras com ar incorporado apresentaram desempenho superior.

<sup>17</sup> Nas amostras sem adição de nutrientes (Tabela 21) a situação também foi observada.

**Figura 45** - Índice de cicatrização ao longo do tempo de fissuras de amostras (armadas) com bactérias AP91 e nutrientes



Fonte: Autora (2022)

Observou-se que houve aumento no índice de cicatrização ao longo do tempo para quase todas as amostras, sendo que as misturas com adição de AIR apresentaram melhor desempenho do que aquelas sem o aditivo.

Percebeu-se também que algumas amostras apresentaram uma diminuição no índice de cicatrização, aos 28 e 70 dias, que pode ser associada ao desprendimento do produto precipitado, já mencionado no grupo de amostras sem nutrientes. Neste sentido, acredita-se que a variação AP91\_1-1 teria obtido resultado mais satisfatório aos 70 dias, caso não tivessem sido desprendidos os cristais precipitados aos 28 dias, situação que pode ser visualizada na Tabela 22 e Figura 45.

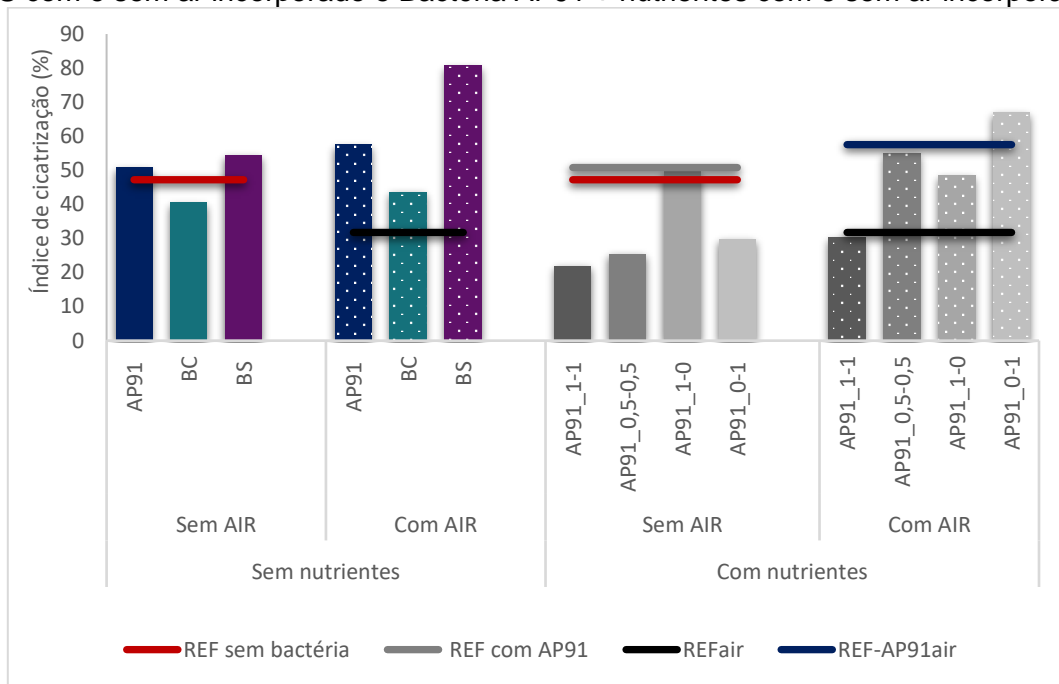
Aos 70 dias, os melhores resultados foram apresentados pelas amostras AP91\_0-1air e AP91\_0,5-0,5air. Supõe-se que tal resultado seja resultante da possibilidade de desenvolvimento dos agentes bacterianos nos poros criados pelo AIR, bem como da disponibilidade de alimento vindo do YE e do cálcio oriundo da matriz, no primeiro caso, e do YE e CL fornecidos no momento da mistura. Na variação AP91\_0-1air nota-se um aumento substancial no Ic nos últimos 42 dias, provavelmente devido à ação das bactérias, tendo em vista que a cicatrização autógena ocorre prioritariamente nas primeiras idades.

Os grupos de amostras contendo apenas CL, com e sem AIR, também apresentaram ótimos resultados de Taxa e Índice de cicatrização, alcançando aos 70 dias

índices de 47,23% e 48,48%, respectivamente, superando a amostra de referência sem bactérias.

A Figura 46 apresenta um comparativo dos Índices de cicatrização aos 70 dias de cura (63 após fissuração) das 16 variações de argamassa para as quais foram produzidas amostras armadas fissuradas.

**Figura 46** – Índice de cicatrização aos 70 dias de amostras armadas com bactérias AP91, BC e BS com e sem ar incorporado e Bactéria AP91 + nutrientes com e sem ar incorporado



Fonte: Autora (2022)

Os melhores resultados do Índice de cicatrização aos 70 dias de amostras com armadura, foram obtidos por variações com ar incorporado nominadas BS<sub>air</sub>, AP91\_0-1<sub>air</sub>, AP91<sub>air</sub> e AP91\_0,5-0,5<sub>air</sub> (Figura 46). Este resultado corrobora com os estudos de Justo-Reinoso *et al.* (2022) que utilizaram *B. cohnii* juntamente de extrato de levedura (1% da massa de cimento) e Nitrato de cálcio (5% da massa de cimento). Para amostras fissuradas aos 28 dias e 9 meses, os autores relataram um aumento de aproximadamente 60% e 45% de cicatrização em amostras contendo ar incorporado, quando comparadas à inserção de solução na mistura sem o aditivo.








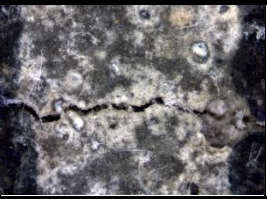




Chen *et al.* (2021) também observaram selagem total de fissuras de até 0,4 mm ao utilizar células vegetativas de *S. pasteurii* na concentração de  $2 \times 10^6$  esporos/ml e 0,01% de teor de AIR, e concluíram que o aditivo exerce influência significativa na velocidade de selagem das fissuras.

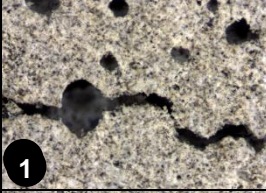
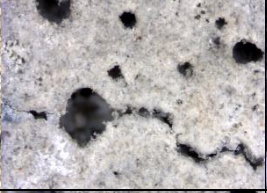
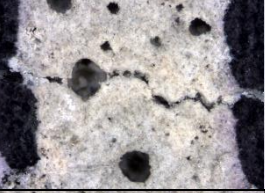
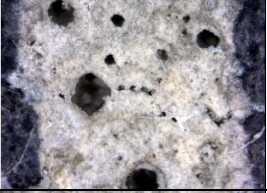
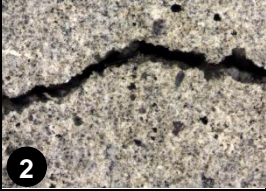
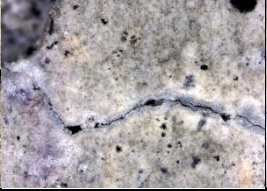

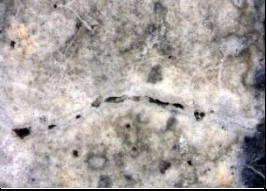
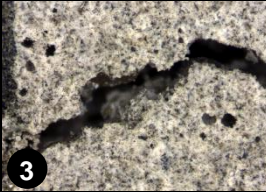














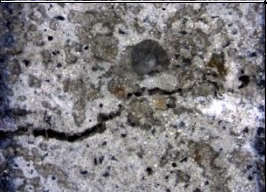



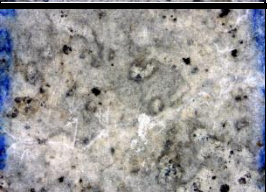
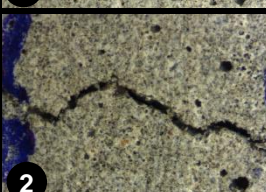


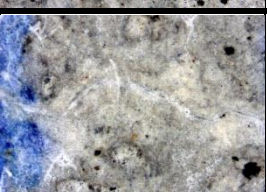
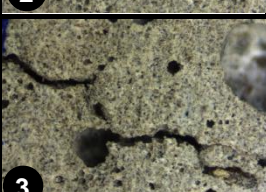
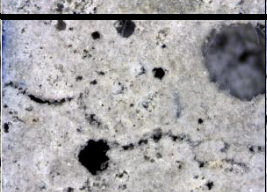
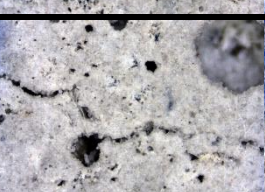
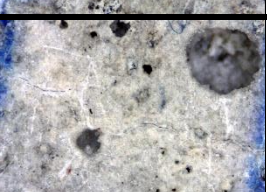
Os resultados de autocicatrização deste estudo apontam espessuras cicatrizadas por bactérias maiores do que as obtidas pela literatura, visto que a espessura máxima de poros cicatrizados chegou a 2,28 mm de espessura. Atribui-se tal resultado à associação de fatores propícios à autocicatrização de matrizes a base de cimento por meio de agentes biológicos, como a cura submersa, a formação de fissura realista, utilização de nutrientes, incorporação de ar e adição das bactérias esporuladas (não vegetativas). Além disso, tem-se a já mencionada maior cinética de precipitação em fissuras de maior espessura, pois não há limitação de espaço para formação de produtos (GAGNÉ E ARGOUGES, 2012).

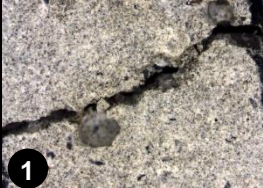

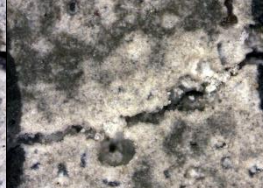



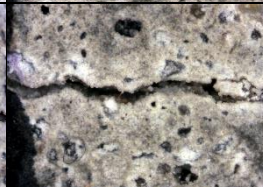
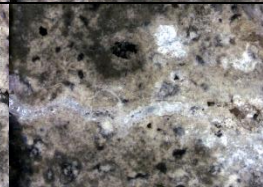

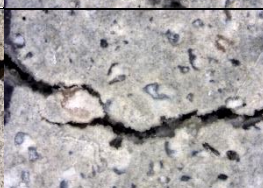

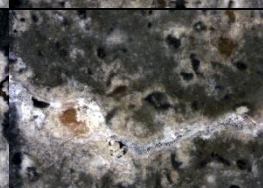

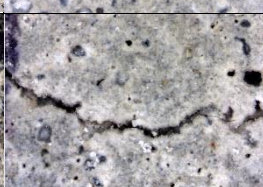
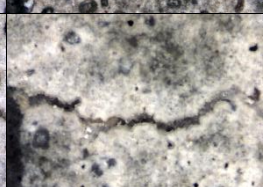
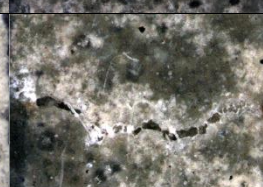
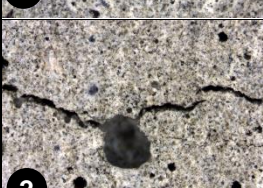
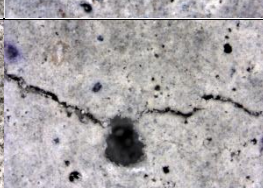
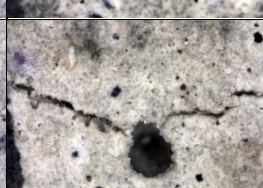
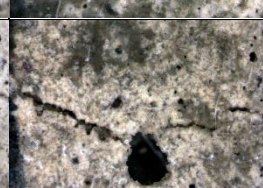
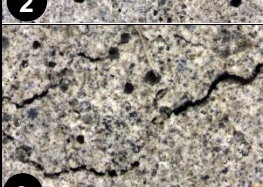

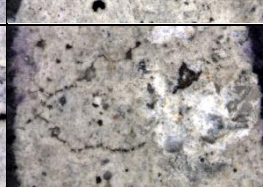
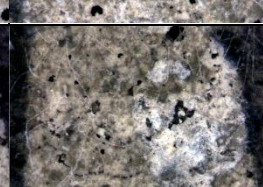
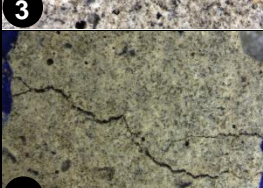
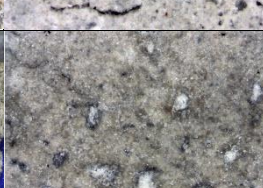
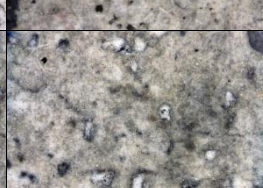
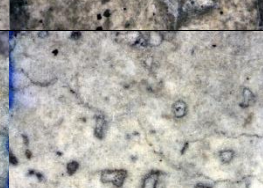
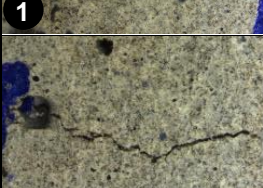

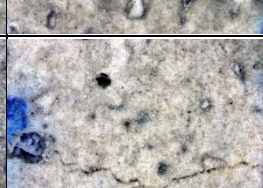

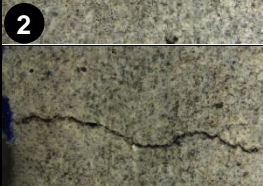

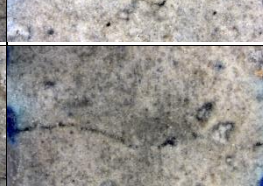
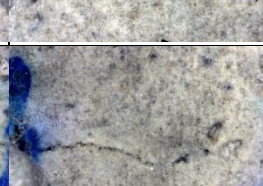
#### 4.1.3 Autocicatrização em amostras sem armadura


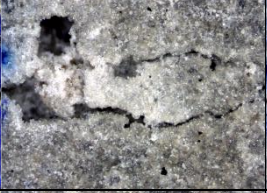


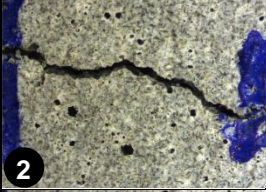
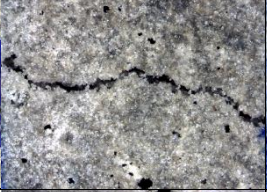


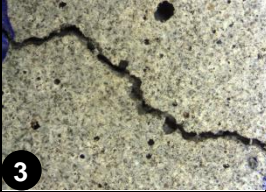

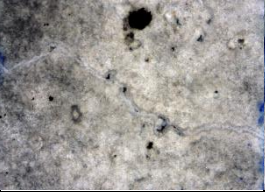
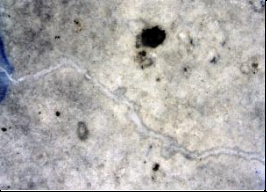
Percebeu-se diferença significativa na autocicatrização entre amostras armadas e não armadas, mesmo sendo constituídas pelo mesmo traço, bactéria e ausência ou presença de ar incorporado. A Tabela 24 apresenta as imagens das zonas fissuradas ao longo do tempo, bem como área inicial ( $A_0$ ), espessura média ( $e_m$ ) e máxima ( $e_{máx}$ ) e os resultados de Taxa de cicatrização ( $T_c$ ) obtidos para este grupo.

**Tabela 24** - Análise da autocicatrização das zonas fissuradas de amostras sem armadura e sem nutrientes ao longo do tempo

	7 DIAS ( $L_0$ )	14 DIAS	28 DIAS	56 DIAS	RESUMO
AP91					$A_0 = 4,25 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,77 \text{ mm}$ $e_{máx} = 1,80 \text{ mm}$ $T_{C14} = 14,59\%$ $T_{C28} = 10,12\%$ $T_{C56} = 48,47\%$
					$A_0 = 2,46 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,36 \text{ mm}$ $e_{máx} = 0,38 \text{ mm}$ $T_{C14} = 15,85\%$ $T_{C28} = 34,55\%$ $T_{C56} = 63,01\%$
					$A_0 = 3,15 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,38 \text{ mm}$ $e_{máx} = 0,57 \text{ mm}$ $T_{C14} = 18,73\%$ $T_{C28} = 36,19\%$ $T_{C56} = 74,92\%$

AP91air	1					$A_0 = 3,52 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,48\text{mm}$ $e_{\text{m}\acute{a}\text{x}} = 0,52\text{mm}$ $TC_{14} = 62,50\%$ $TC_{28} = 76,70\%$ $TC_{56} = 92,90\%$
	2					$A_0 = 6,61 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,75\text{mm}$ $e_{\text{m}\acute{a}\text{x}} = 1,24\text{mm}$ $TC_{14} = 76,70\%$ $TC_{28} = 85,02\%$ $TC_{56} = 91,83\%$
	3					$A_0 = 9,86\text{mm}^2$ $e_m = 0,99\text{mm}$ $e_{\text{m}\acute{a}\text{x}} = 1,62\text{mm}$ $TC_{14} = 72,01\%$ $TC_{28} = 90,67\%$ $TC_{56} = 92,29\%$
BC	1					$A_0 = 3,91 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,42\text{mm}$ $e_{\text{m}\acute{a}\text{x}} = 0,96\text{mm}$ $TC_{14} = 44,76\%$ $TC_{28} = 61,64\%$ $TC_{56} = 59,08\%$
	2					$A_0 = 2,83 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,29\text{mm}$ $e_{\text{m}\acute{a}\text{x}} = 0,31\text{mm}$ $TC_{14} = 29,68\%$ $TC_{28} = 56,54\%$ $TC_{56} = 53,71\%$
	3					$A_0 = 3,14 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,29\text{mm}$ $e_{\text{m}\acute{a}\text{x}} = 0,44\text{mm}$ $TC_{14} = 33,44\%$ $TC_{28} = 50,64\%$ $TC_{56} = 39,17\%$
BCair	1					$A_0 = 2,42 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,32\text{mm}$ $e_{\text{m}\acute{a}\text{x}} = 0,53\text{mm}$ $TC_{14} = 72,73\%$ $TC_{28} = 70,66\%$ $TC_{56} = 99,17\%$
	2					$A_0 = 2,31 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,30\text{mm}$ $e_{\text{m}\acute{a}\text{x}} = 0,33\text{mm}$ $TC_{14} = 43,29\%$ $TC_{28} = 52,38\%$ $TC_{56} = 96,97\%$
	3					$A_0 = 4,96 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,65\text{mm}$ $e_{\text{m}\acute{a}\text{x}} = 1,56\text{mm}$ $TC_{14} = 60,69\%$ $TC_{28} = 61,29\%$ $TC_{56} = 83,47\%$

BS					$A_0 = 5,86 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,64\text{mm}$ $e_{\text{m}\acute{a}\text{x}} = 0,72\text{mm}$ $TC_{14} = 39,59\%$ $TC_{28} = 45,90\%$ $TC_{56} = 61,43\%$
					$A_0 = 5,08\text{mm}^2$ $e_m = 0,59\text{mm}$ $e_{\text{m}\acute{a}\text{x}} = 0,73\text{mm}$ $TC_{14} = 29,53\%$ $TC_{28} = 53,74\%$ $TC_{56} = 94,09\%$
					$A_0 = 5,82\text{mm}^2$ $e_m = 0,51\text{mm}$ $e_{\text{m}\acute{a}\text{x}} = 0,63\text{mm}$ $TC_{14} = 28,18\%$ $TC_{28} = 36,43\%$ $TC_{56} = 82,99\%$
BSair					$A_0 = 2,91 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,42\text{mm}$ $e_{\text{m}\acute{a}\text{x}} = 0,87\text{mm}$ $TC_{14} = 48,11\%$ $TC_{28} = 71,48\%$ $TC_{56} = 67,35\%$
					$A_0 = 1,89 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,29\text{mm}$ $e_{\text{m}\acute{a}\text{x}} = 0,48\text{mm}$ $TC_{14} = 47,62\%$ $TC_{28} = 50,79\%$ $TC_{56} = 48,15\%$
					$A_0 = 2,32\text{mm}^2$ $e_m = 0,26\text{mm}$ $e_{\text{m}\acute{a}\text{x}} = 0,49\text{mm}$ $TC_{14} = 50\%$ $TC_{28} = 89,66\%$ $TC_{56} = 91,81\%$
M-REF					$A_0 = 1,44 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,19\text{mm}$ $e_{\text{m}\acute{a}\text{x}} = 0,24\text{mm}$ $TC_{14} = 86,11\%$ $TC_{28} = 81,94\%$ $TC_{56} = 61,81\%$
					$A_0 = 1,2 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,17 \text{ mm}$ $e_{\text{m}\acute{a}\text{x}} = 0,17 \text{ mm}$ $TC_{14} = 59,17\%$ $TC_{28} = 79,17\%$ $TC_{56} = 71,67\%$
					$A_0 = 0,84 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,10\text{mm}$ $e_{\text{m}\acute{a}\text{x}} = 0,14\text{mm}$ $TC_{14} = 65,48\%$ $TC_{28} = 71,43\%$ $TC_{56} = 66,67\%$

M-REFair					$A_0 = 4,33 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,51 \text{ mm}$ $e_{m\acute{a}x} = 1,17$ $T_{C14} = -14,90\%$ $T_{C28} = 37,88\%$ $T_{C56} = 48,50\%$
					$A_0 = 3,17 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,38 \text{ mm}$ $e_{m\acute{a}x} = 0,39 \text{ mm}$ $T_{C14} = 41,01\%$ $T_{C28} = 82,97\%$ $T_{C56} = 97,48\%$
					$A_0 = 4,10 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,33 \text{ mm}$ $e_{m\acute{a}x} = 0,39 \text{ mm}$ $T_{C14} = 60,73\%$ $T_{C28} = 91,46\%$ $T_{C56} = 94,88\%$

Análise de 3 zonas fissuradas de cada grupo, onde:  $A_0$ : Área inicial da fissura no dia de fissuração;  $e_m$ : espessura média da fissura;  $e_{m\acute{a}x}$ : Espessura máxima de cada fissura,  $T_{c_x}$ = Taxa de cicatrização por idade.  
 Fonte: Autora (2022)

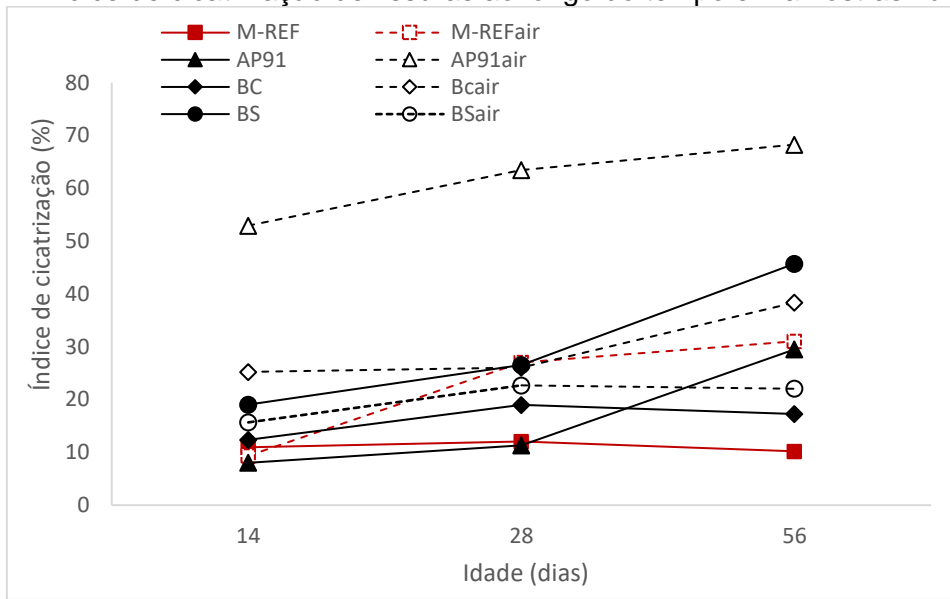
Nas amostras não armadas, mesmo com fissuras de espessuras médias menores, o fechamento ocorreu apenas de forma pontual em algumas variações, incluindo-se a amostra de referência sem ar incorporado. De acordo com Ferrara *et al.* (2018) isto pode ser dar devido à natureza coesiva intrínseca às fissuras dos materiais cimentícios, que pode ser intensificada por armaduras.

Observou-se que nenhuma zona fissurada apresentou autocicatrização de 100%. Os melhores resultados obtidos neste grupo, são das amostras AP91air, que apresentou taxa de cicatrização aos 56 dias de 92,29% em zona com fissura de  $e_{m\acute{a}x} = 1,62 \text{ mm}$ , à BCair que obteve taxa de 99,17% de em zona fissurada com  $e_{m\acute{a}x} = 0,53 \text{ mm}$  e à amostra BS com Tc de 94,09% em  $e_{m\acute{a}x} = 0,73 \text{ mm}$ , e que também apresentou fechamento de um poro presente na face fissurada.

De acordo com as imagens da Tabela 24, constou-se que ocorreu a redução na taxa de cicatrização de algumas amostras (M-REFair, M-REF, BSair, BC, BCair), da mesma forma que nas amostras armadas, devido ao provável desprendimento de produtos precipitados. Já a deposição de produto além da espessura da fissura, ocorreu apenas no grupo de amostras BS e BSair.

A Figura 47 mostra o Índice de cicatrização das amostras ao longo do tempo, obtido em função da taxa de cicatrização e da espessura média da zona fissurada.

**Figura 47 - Índice de cicatrização de fissuras ao longo do tempo em amostras não armadas**

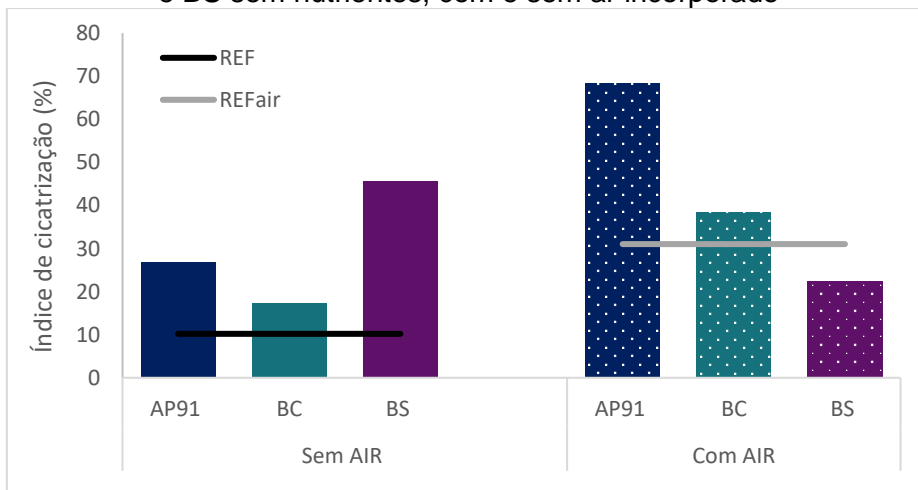


Fonte: Autora (2022)

Por meio da Figura 47 é possível visualizar considerável superioridade no Índice de cicatrização da amostra AP91air, que teve a melhor Ic dos 14 aos 56 dias.

No período de análise, todas as amostras foram superiores à referência sem bactéria e sem AIR. Além disso, todas as amostras apresentaram melhora do Ic ao ser incorporado AIR à mistura, exceto na variação BSair, variação que apresentou o melhor resultado de Ic entre as amostras armadas aos 70 dias. Tal situação pode ser verificada também na Figura 48, que mostra um comparativo do Índice de cicatrização final, aos 56 dias, das amostras sem armadura.

**Figura 48 - Índice de cicatrização aos 56 dias de amostras não armadas com bactérias AP91, BC e BS sem nutrientes, com e sem ar incorporado**

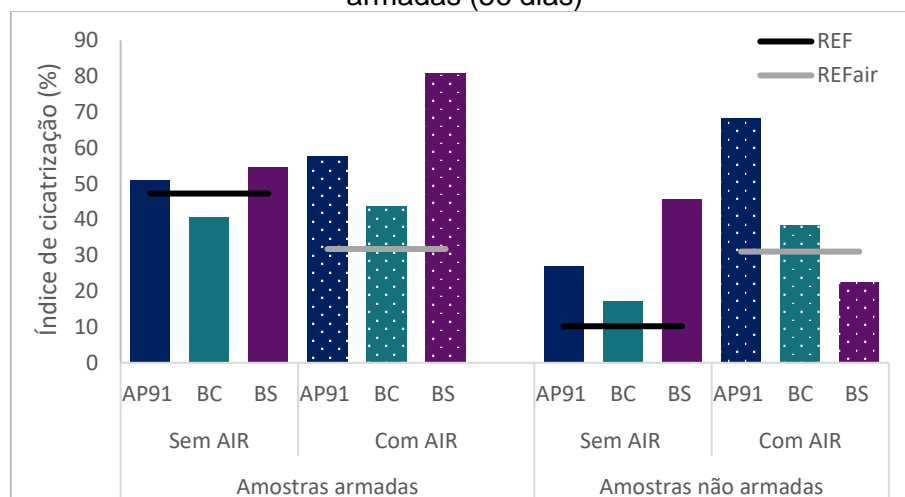


Fonte: Autora (2022)

Observa-se também (Figura 48) que todas as amostras contendo bactérias apresentaram resultado superior à amostra M-REF, demonstrando a eficácia da utilização de agentes biológicos na autocicatrização de fissuras em materiais cimentícios, corroborando com estudos de (JONKERS *et al.*, (2010); Pacheco (2020); Schwantes, (2017), Wiktor e Jonkers (2011) e Ghellere (2021). Além disso, percebe-se a superioridade do índice de cicatrização em amostras com AIR, concordando com estudos de Chen *et al.* (2021) e Justo-Reinoso *et al.* (2022).

Um comparativo do Índice de cicatrização final entre amostras armadas (70 dias) e não armadas (56 dias) é apresentado na Figura 49, demonstrando que todas as amostras, com exceção da variação AP91 *air* e M-REF *air*, apresentaram índice reduzido nos corpos de prova sem presença de armadura.

**Figura 49** – Comparativo do Índice de cicatrização final de amostras armadas (70 dias) e não armadas (56 dias)



Fonte: Autora (2022)

Ao longo de todo o tópico de análise visual aqui apresentado, pôde-se perceber a grande variação na espessura de fissuras avaliadas, dificultando a análise da taxa de cicatrização, motivo pelo qual adotou-se outro fator de análise, o índice de cicatrização. Essa dificuldade também foi encontrada por Ghellere (2021) e Pacheco (2020). Essa variação se deve, principalmente, à sensibilidade do procedimento adotado para abertura de fissuras. Para minimizar essa variação, Pacheco (2020) recomenda que sejam realizadas ações para restringir a deformação na matriz e obter fissuras de espessura padrão. Hollmann (2020) sugere que, na inexistência de um método que permita a padronização das aberturas, seja realizada a fissuração de muitas amostras, a fim de possibilitar a seleção de fissuras com espessuras similares para os grupos de estudo.

Cappellesso (2018) desenvolveu um dispositivo de acoplamento de amostra para ensaio de fissuração, desenvolvido com limitadores laterais para que o corpo de prova não rompa completamente. O equipamento não limita a abertura de fissuras, mas por permitir utilização de amostras menores (100x100x50 mm) auxilia no processo de seleção de fissuras com espessura similar sem que seja despendido tanto material.

#### 4.1.4 Análise em Microscópio Eletrônico de Varredura e Espectroscopia por Energia Dispersiva

Tendo sido realizada a análise visual em estereomicroscópio óptico, foram selecionados os melhores resultados de acordo com o Índice de cicatrização para análise microestrutural em MEV, a fim de verificar os produtos de hidratação do cimento e de autocicatrização.

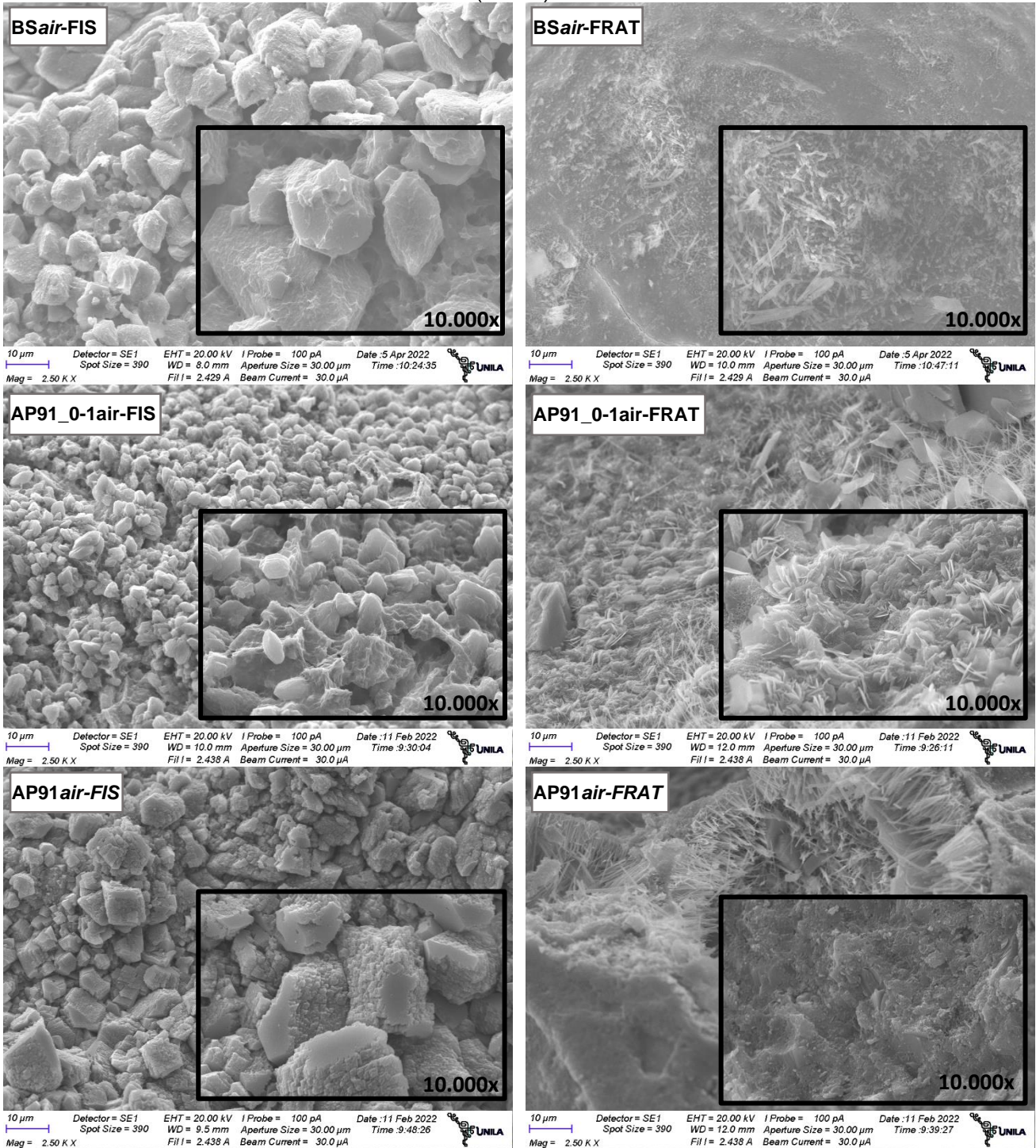
Sendo assim, do grupo de amostras armadas foi realizada a análise das variações *BSair*, *AP91\_0-1air*, *AP91air* e *AP91\_0,5-0,5air*, além da amostra de referência sem AIR. Para os três primeiros, foi realizada a análise na face fissurada (FIS) e na face fraturada (FRAT), a fim de avaliar a diferença de precipitação entre a região fissurada e a região de microestrutura convencional. Entre o grupo de amostras sem armaduras foi realizada a análise da amostra *AP91air*<sup>18</sup>, também na face fissurada e fraturada.

Os resultados obtidos por meio da análise realizada aos 77 dias no grupo de amostras armadas, são apresentados nas Figuras 50 (amostras com face FIS e FRAT) e 51 (amostras com face FIS).

---

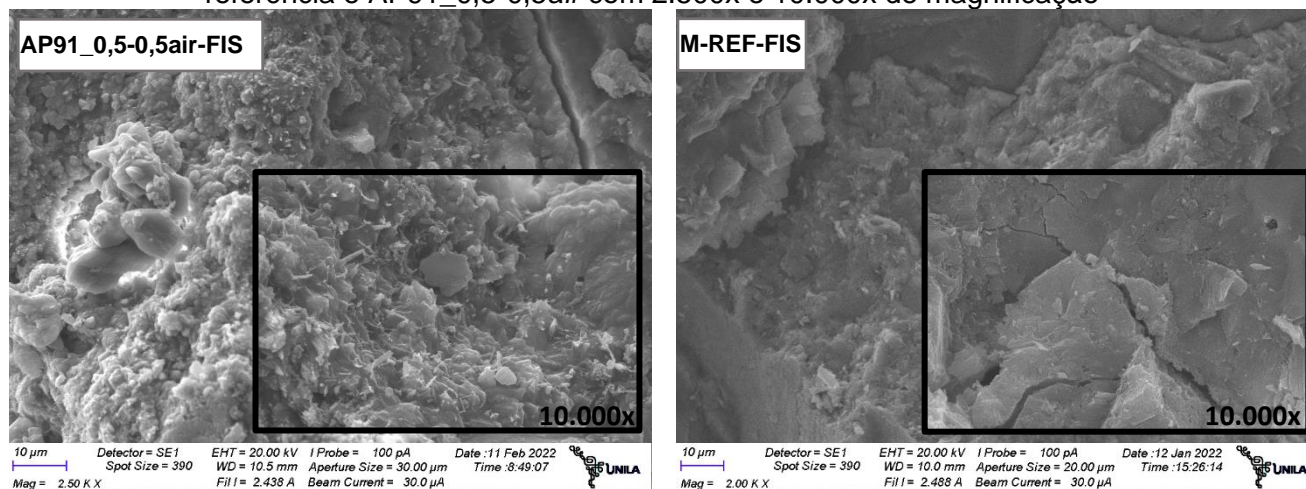
<sup>18</sup> Nas amostras sem armadura realizou-se ensaio de tração na flexão e compressão, motivo pelo qual não foi possível analisar todos os grupos.

**Figura 50** - Imagem microestrutural em MEV das amostras armadas com maior Índice de cicatrização com 2.500x e 10.000x de magnificação, na Região da fissura (FIS) e face fraturada (FRAT)



Fonte: Autora (2022)

**Figura 51** – Imagem microestrutural em MEV da região fissurada (FIS) das amostras de referência e AP91\_0,5-0,5air com 2.500x e 10.000x de magnificação



Fonte: Autora (2022)

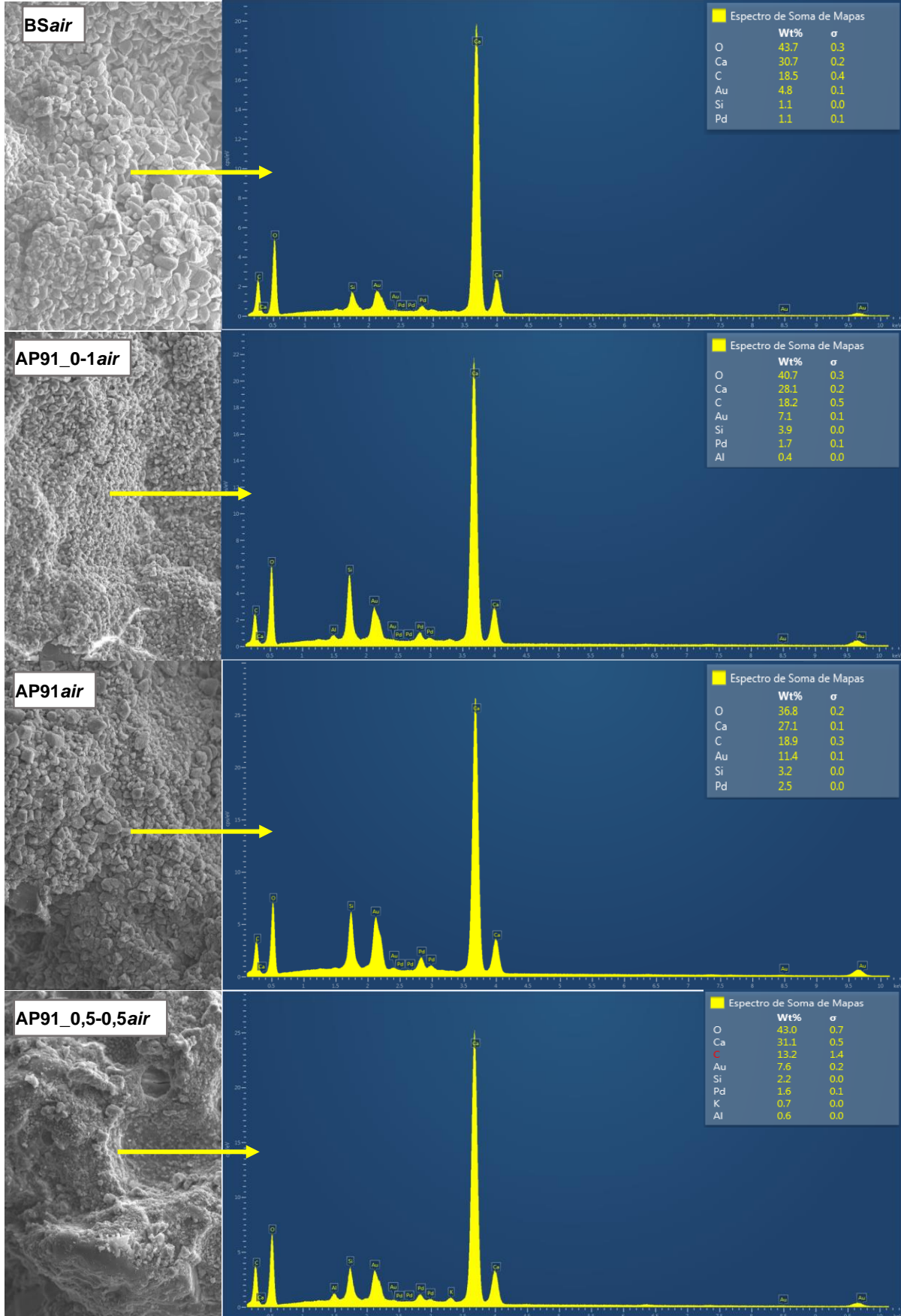
Todas as amostras observadas apresentam a formação de cristais, com exceção da amostra M-REF. As faces fissuradas das amostras BSair, AP91air e AP91\_0-1air são compostas por um aglomerado de cristais precipitados, ao mesmo tempo em que a face fissurada da amostra de referência apresenta superfície lisa.

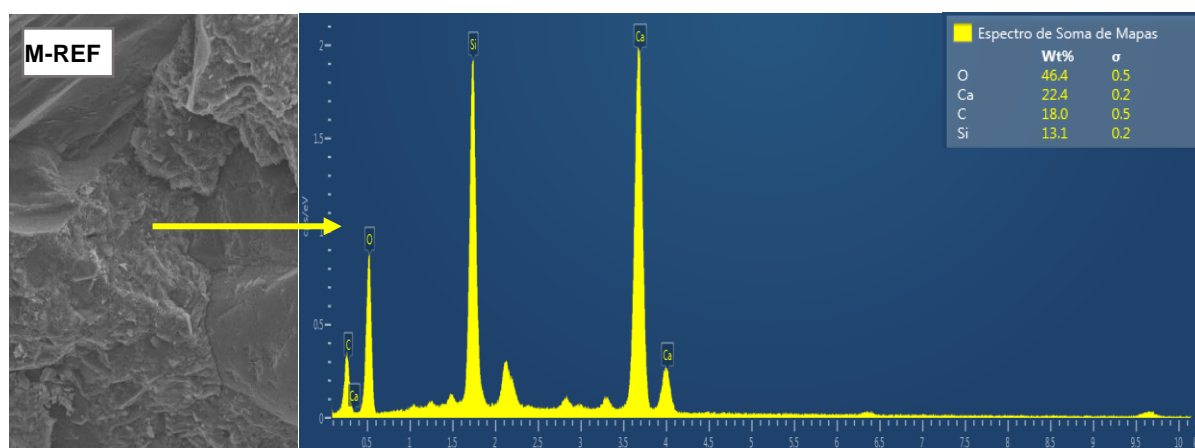
Como a presença substancial de cristais foi observada apenas nas faces fissuradas (FIS), enquanto as faces fraturadas (FRAT) apresentam matriz cimentícia característica, conclui-se que a formação dos cristais esteja relacionada à atividade bacteriana, e que mesmo com os agentes biológicos presentes em toda a matriz cimentícia, devido à incorporação na água de amassamento, a precipitação de fato ocorre onde há a presença de água e oxigênio, ou seja na região da fissura.

Para complementar a análise realizada, e verificar a composição dos cristais precipitados nas fissuras, realizou-se a análise de Espectroscopia por energia dispersiva (EDS). A seguir, na Figura 52, são apresentados os espectros das argamassas com as respectivas imagens analisadas, com aproximação de 1000x. Cabe ressaltar que picos de Ouro (Au) e Paládio (Pd) são oriundos do revestimento das amostras por uma película de Ouro Paládio para melhor nitidez das imagens.

Como pode ser visualizado na Figura 52, as análises da composição dos materiais precipitados nas faces das fissuras usando EDS, apresentaram essencialmente uma associação de átomos de Cálcio, Oxigênio e Carbono, demonstrando que os cristais formados são  $\text{CaCO}_3$ .

Figura 52 – Espectro de EDS de amostras armadas M-REF e as com maior Índice de cicatrização





Fonte: Autora (2022)

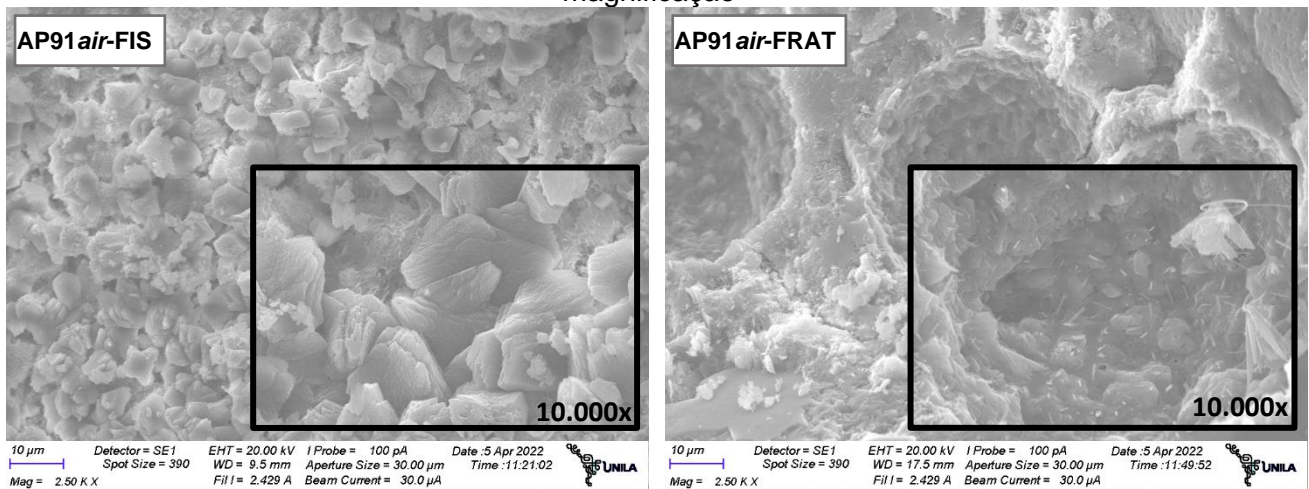
A análise na amostra de referência também constatou picos dos mesmos elementos, C, Ca e O, corroborando com o encontrado na análise visual em Estereomicroscópio, que argamassas sem agentes biológicos apresentam autocicatrização autógena, precipitando carbonato de cálcio em quantidades inferiores às amostras com agentes biológicos.

Além dos picos relacionados à precipitação de  $\text{CaCO}_3$ , a análise em EDS mostrou picos associados à Silício (Si) em todas as amostras, com valor consideravelmente mais significativo na amostra de referência. Além disso, teve-se a visualização de átomos de Alumínio (Al) e Potássio (K), mas em menor quantidade. Todos os compostos são consistentes com a matriz de materiais cimentícios, de acordo com Justo-Reinoso *et al.* (2022).

É possível observar também na Figura 52 que o maior pico de cálcio está associado à argamassa AP91\_0,5-0,5air, mesmo que o seu resultado de autocicatrização não tenha sido o melhor entre as amostras apresentadas. Isso se deve ao fato dessa amostra ter tido adição de uma fonte externa do composto, o Lactato de cálcio.

A análise microestrutural em MEV foi realizada também na amostra sem armadura que apresentou o melhor Índice de cicatrização, AP91 air, tanto na face fissurada como na face fraturada. As imagens obtidas são apresentadas na Figura 53.

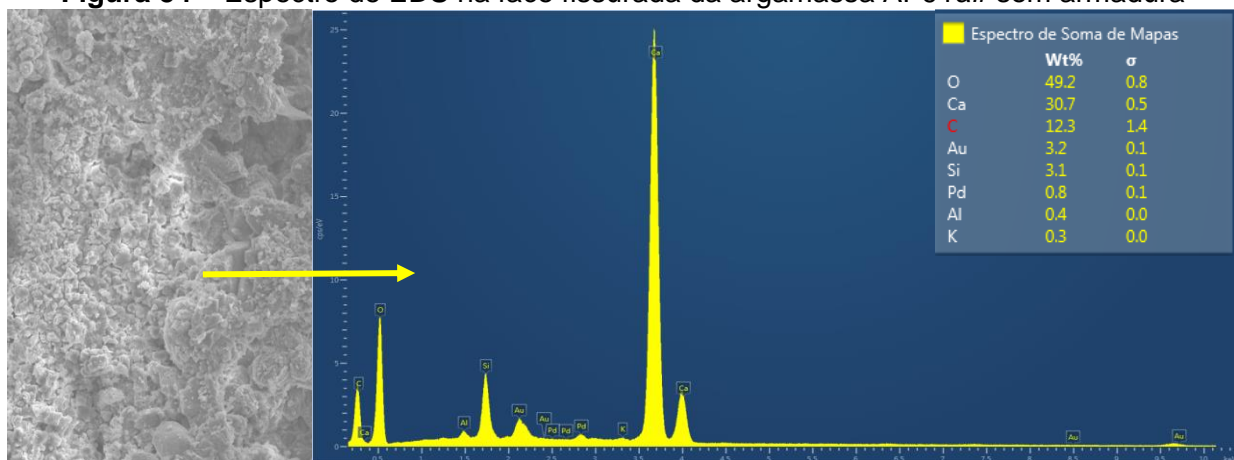
**Figura 53** – Imagem microestrutural em MEV da amostra sem armadura com maior Índice de cicatrização, na região da fissura (FIS) e face fraturada (FRAT) com 2.500x e 10.000x de magnificação



Fonte: Autora (2022)

Além das imagens obtidas em MEV, a Figura 54 ilustra os compostos encontrados em EDS na face fraturada, em imagem com aproximação de 1000x.

**Figura 54** – Espectro de EDS na face fissurada da argamassa AP91 *air* sem armadura



Fonte: Autora (2022)

Percebe-se pela imagem visualizada nas Figura 53 e 54 uma camada espessa de cristais precipitados, que pela apresentação de picos dos elementos C, Ca e O no EDS, trata-se de  $\text{CaCO}_3$ , provavelmente precipitados em maior quantidade pelos agentes biológicos que, dada a presença de AIR, tinham mais espaço para metabolizar e precipitar o produto.

Da mesma forma visualizada nas amostras armadas, percebe-se diferença na matriz entre a face fissurada e a face fraturada, indicando que as bactérias se

desenvolvem substancialmente na região da fissura, devido ao maior espaço e maior presença de água e oxigênio.

## 4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

A avaliação das propriedades das amostras teve como objetivo avaliar a influência que os agentes biológicos podem exercer sobre características importantes dos materiais cimentícios, como resistência à compressão e tração e módulo de elasticidade.

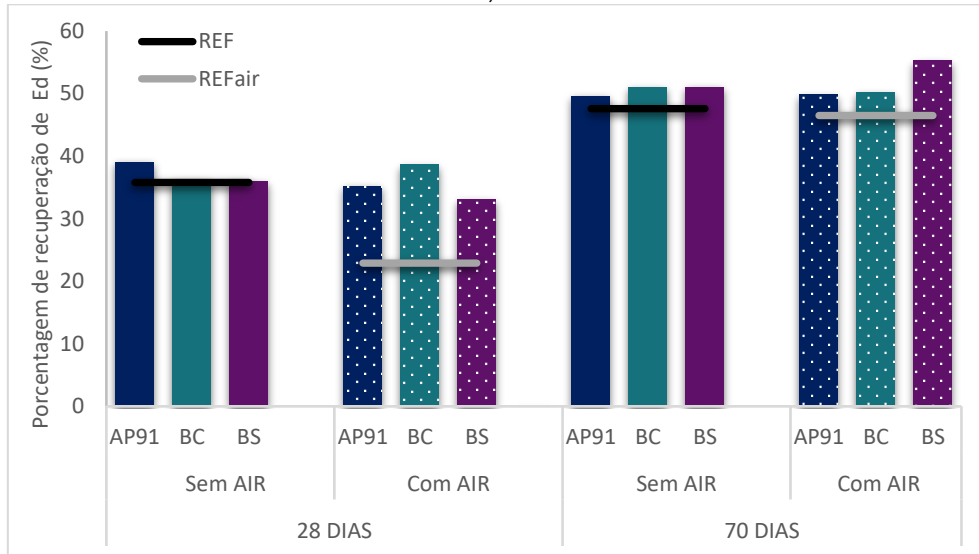
### 4.2.1. Módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ )

O módulo de elasticidade dinâmico foi avaliado em dois grupos (i) amostras fissuradas, armadas e não armadas, (ii) amostras íntegras não armadas.

Foram avaliados dois grupos de amostras fissuradas, o primeiro com 16 variações com armadura e o segundo com 8 variações sem armadura. Nestes grupos de amostras a análise do módulo foi realizada em função da recuperação da propriedade, visto que as fissuras tinham espessuras diferentes, impossibilitando que fosse realizada uma análise de  $E_d$  final. Nas amostras armadas a recuperação do módulo de elasticidade dinâmico foi calculada em função da diferença de módulo entre o dia 7 (data da fissuração) e o dia 70, data final de análise. Os resultados obtidos nas amostras armadas sem nutrientes são apresentados na Figura 55.

A Figura 55 mostra que todas as amostras sem nutrientes tiveram uma recuperação da propriedade superior à referência, tanto aos 28 quanto aos 70 dias, sendo que, na primeira idade a variação AP91 foi a que apresentou melhor resultado, ao passo que aos 70 dias, a BS*air* teve resultado superior, obtendo 55,26% de recuperação de  $E_d$ , ao passo que a M-REF*air* apresentou 46,50% e a M-REF 47,60%. Cabe destacar que a BS*air* foi também a amostra que obteve melhor Índice de cicatrização na análise visual, para o grupo de amostras armadas.

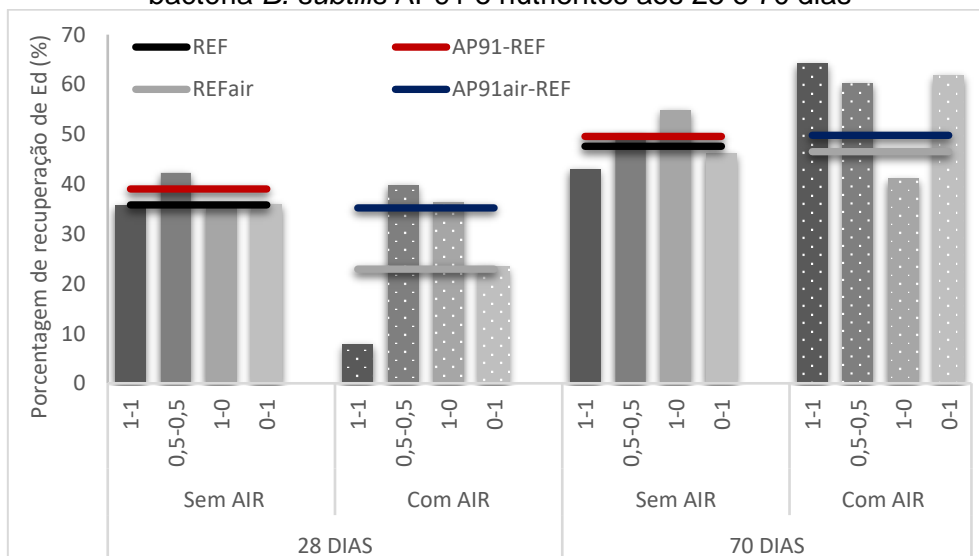
**Figura 55** – Percentagem de recuperação do módulo de elasticidade dinâmico de amostras armadas fissuradas com bactérias AP91, BC e BS sem nutrientes aos 28 e 70 dias



Fonte: Autora (2022)

O resultado de porcentagem de recuperação de módulo ao longo do tempo nas amostras armadas contendo AP91 e nutrientes é apresentado na Figura 56.

**Figura 56** – Percentagem de recuperação de Ed de amostras armadas fissuradas contendo bactéria *B. subtilis* AP91 e nutrientes aos 28 e 70 dias



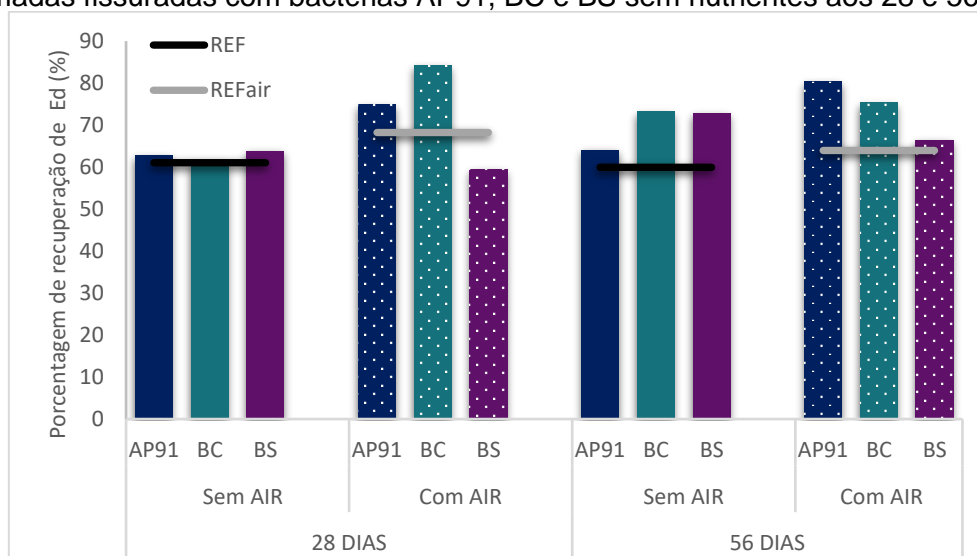
Fonte: Autora (2022)

Neste grupo é possível observar que a maioria das amostras apresentou porcentagem de recuperação superior à referência sem bactéria (M-REF e M-REFair), mas nem todas obtiveram melhores resultados quando comparados à amostra de referência contendo a bactéria AP91 sem nutrientes (AP91 e AP91air).

Aos 28 dias o melhor resultado foi obtido pela amostra AP91\_0,5-0,5, que obteve 42,26% de recuperação da propriedade, ao passo que em 70 dias de análise, percebeu-se superioridade de recuperação da propriedade Ed nas amostras com adição de AIR, sendo as amostras AP91\_1-1 *air* (64,29%), a AP91\_0-1 *air* (61,86%) e a AP91\_0,5-0,5 *air* (60,29%), respectivamente, superiores a todas as referências. Tal fato corrobora com o já mencionado potencial do AIR de permitir a viabilidade bacteriana por mais tempo com a consequente capacidade de metabolizar maiores quantidades de CaCO<sub>3</sub>. Destaca-se que o segundo e terceiro melhor resultado deste grupo de análise (AP91\_0-1 *air* e AP91\_0,5-0,5 *air*), foram também os melhores no grupo respectivo, na análise visual.

No grupo de amostras não armadas fissuradas a análise foi realizada com relação à recuperação da propriedade Ed nas amostras ao longo de 56 dias, desde a data da fissuração, com 24 horas, até o último dia de análise, aos 56 dias. A síntese dos resultados obtidos aos 28 e 56 dias é apresentada na Figura 57.

**Figura 57** – Porcentagem de recuperação do módulo de elasticidade dinâmico de amostras não armadas fissuradas com bactérias AP91, BC e BS sem nutrientes aos 28 e 56 dias



Fonte: Autora (2022)

De acordo com a Figura 57, com exceção da variação BS *air* aos 28 dias, todas as amostras contendo bactérias superaram os valores de referência de recuperação da Ed, tanto aos 28 como aos 56 dias. Aos 28 dias o melhor resultado foi obtido pela amostra BC *air*, que aos 56 dias teve recuperação reduzida, ocasionada possivelmente pelo desprendimento do produto precipitado, observado na análise visual e apresentado e discutido na Tabela 24.

Aos 56 dias, a amostra com maior percentual de recuperação de Ed foi a AP91 *air*, alcançando uma recuperação de 80,35%, em contrapartida à 59,95% da M-REF e 63,96% da M-REF *air*. A amostra AP91 *air* foi também a que apresentou melhor Índice de cicatrização no grupo de amostras sem armadura, na análise visual realizada.

Para Neville (2016), microfissuras presentes na matriz são responsáveis pela redução do módulo de elasticidade dinâmico. Sendo assim, a melhoria desta propriedade pode estar relacionada à cicatrização das microfissuras por ação dos agentes bacterianos ou pela autocicatrização autógena.

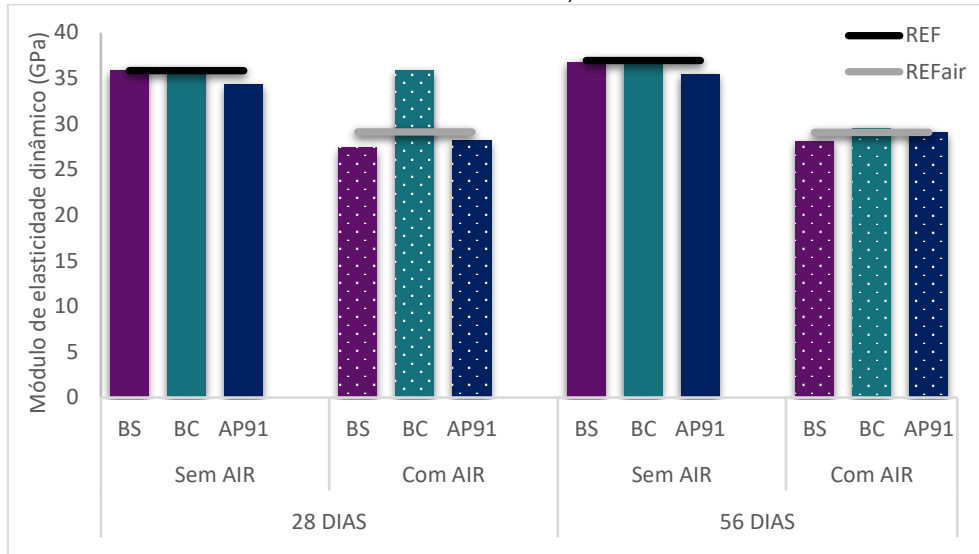
A avaliação da recuperação do módulo de elasticidade dinâmico pela Técnica da Excitação por Impulso (TEI) não é uma técnica frequentemente utilizada para avaliação da efetividade de agentes biológicos na autocicatrização, sendo o estudo de Ghellere (2021) um dos estudos que utilizou esta técnica. No estudo da autora, a análise foi realizada em função do Ed final em cada idade, e não na recuperação da propriedade como neste estudo, não sendo passível de comparativa de resultados.

Constou-se similaridade significativa entre resultados encontrados por meio do TEI, com os resultados da análise visual, indicando que a técnica tem potencial de utilização para avaliação da autocicatrização de matrizes a base de cimento. Ghellere (2021) salienta a facilidade e agilidade de execução do ensaio, aliado ao fato de tratar-se de um ensaio não destrutivo.

Nas amostras íntegras (sem fissuras), também produzidas em triplicata, a comparação não foi de recuperação, mas sim com relação ao módulo de elasticidade dinâmico final, visto que todas as amostras estavam na mesma condição de integridade. A Figura 58 apresenta os resultados obtidos do Ed aos 28 e 56 dias nas amostras com variação de bactérias AP91, BC e BS, com e sem AIR, sem nutrientes.

Na relação de Ed final o efeito dos agentes biológicos não foi satisfatório para todas as amostras, visto que apenas a amostra BC *air* foi superior à amostra M-REF *air* aos 28 dias, mas não conseguiu superar a amostra de referência sem AIR. Aos 56 dias, nenhuma amostra contendo agentes biológicos superou as amostras de referência, mas ao mesmo tempo, nenhuma teve inferioridade maior que 5%.

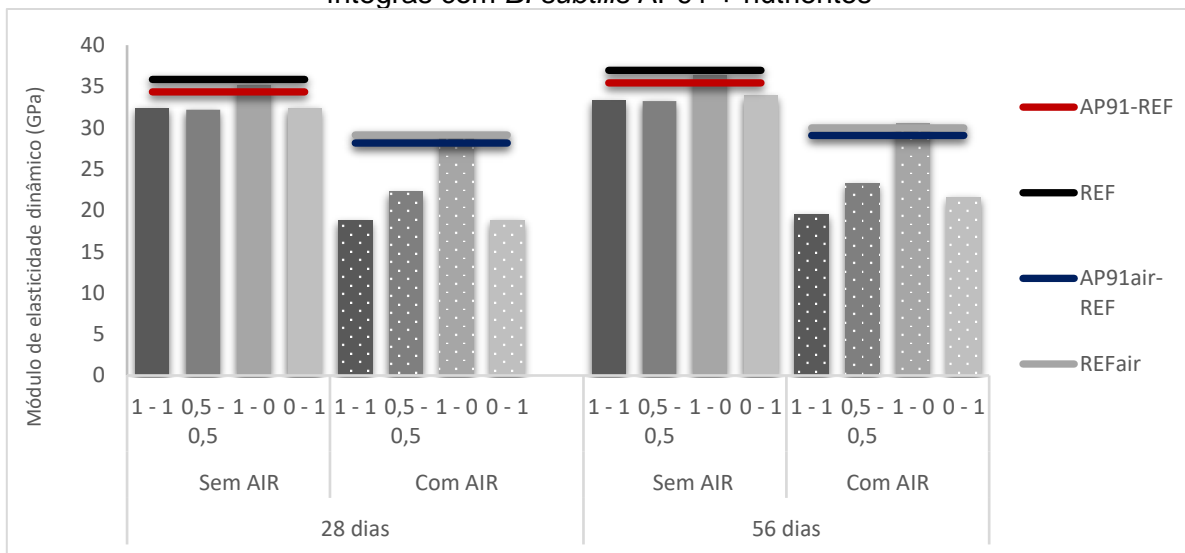
**Figura 58** – Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 e 56 dias de amostras íntegras sem armadura contendo bactérias AP91, BC e BS sem nutrientes



Fonte: Autora (2022)

A Figura 59 mostra os resultados obtidos para o grupo de amostras de argamassa contendo AP91 + nutrientes, com e sem AIR, e por meio dela é possível observar que nenhuma amostra foi eficaz em superar o módulo de elasticidade dinâmico das amostras de referência sem bactéria e com bactéria em condição íntegra.

**Figura 59** – Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 e 56 dias de amostras não armadas e íntegras com *B. subtilis* AP91 + nutrientes



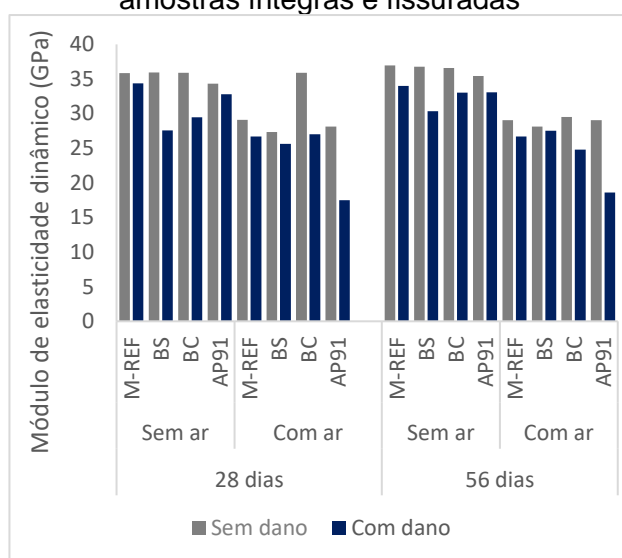
Fonte: Autora (2022)

Percebe-se uma diminuição do módulo de elasticidade dinâmico com a incorporação de AIR à mistura. Tal situação relaciona-se com a incorporação de bolhas na

matriz, diminuindo a resistência e consequentemente, o módulo de elasticidade dos materiais cimentícios.

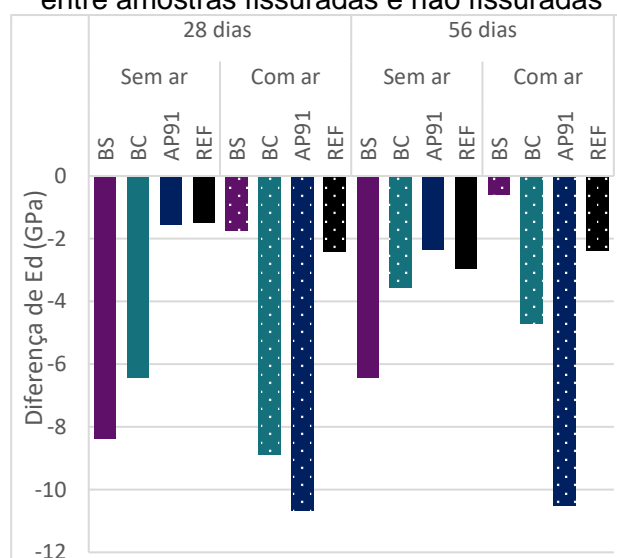
Para o grupo de amostras sem nutrientes<sup>19</sup>, foi possível fazer um comparativo entre o  $E_d$  alcançado aos 56 dias por amostras fissuradas (com dano) e amostras íntegras (sem dano), de modo a identificar se os agentes biológicos foram capazes de melhorar a matriz a ponto de alcançar o  $E_d$  característico de uma amostra íntegra. Os resultados são apresentados nas Figuras 60 e 61.

**Figura 60** – Comparativo de  $E_d$  final de amostras íntegras e fissuradas



Fonte: Autora (2022)

**Figura 61** - Diferença de  $E_d$  final, aos 56 dias, entre amostras fissuradas e não fissuradas



Fonte: Autora (2022)

Conforme observado nas figuras apresentadas, a amostra que ficou mais próxima de alcançar o  $E_d$  da amostra íntegra foi a variação *BSair*, que teve  $E_d=27,53$  GPa aos 56 dias na amostra fissurada, e 28,11 GPa na amostra íntegra. Ressalta-se que as fissuras apresentavam espessuras diferenciadas, podendo influenciar no resultado, visto que fissuras com aberturas maiores conferem  $E_d$  menor.

Verifica-se que em maiores idades (56 dias) a diferença de  $E_d$  entre amostras fissuradas e não fissuradas diminui, um indicativo de que a autocicatrização, autógena e autônoma, ocorre nas amostras ao longo do tempo.

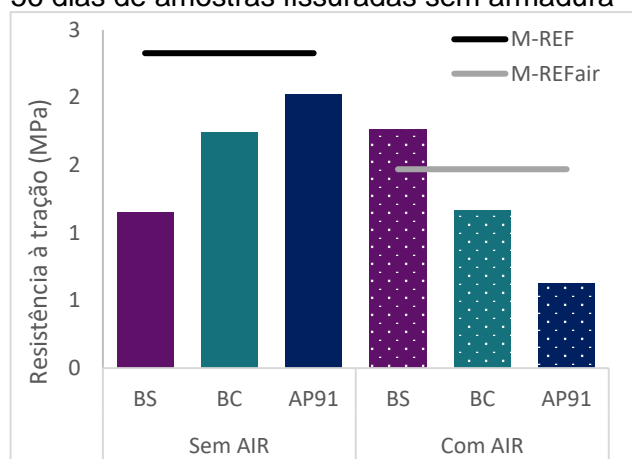
<sup>19</sup> Esse comparativo só foi possível em amostras não armadas sem nutrientes, visto que as amostras com nutrientes fissuradas foram moldadas no grupo contendo armadura, e não estariam em iguais condições com este grupo de amostras íntegras, sem armadura, para fins comparativos.

#### 4.2.2 Resistência à tração na flexão e resistência à compressão

Os ensaios realizados e abordados neste tópico tiveram como objetivo analisar a influência dos agentes biológicos, nutrientes e AIR nas propriedades resistência à tração e compressão dos materiais cimentícios e foram realizados em dois grupos de amostra: (i) 8 traços de amostras fissuradas com bactérias e sem nutrientes, aos 56 dias; (ii) 16 traços de amostras íntegras, dos quais 8 com bactérias e sem nutrientes e 8 com a *B. subtilis* AP91 e nutrientes, em duas idades, 28 e 56 dias.

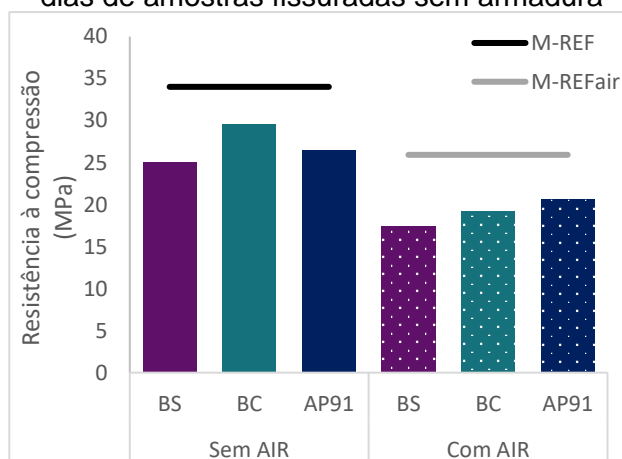
As Figuras 62 e 63 apresentam os resultados obtidos aos 56 dias na resistência à tração na flexão e compressão, respectivamente em amostras fissuradas.

**Figura 62** - Resistência à tração na flexão aos 56 dias de amostras fissuradas sem armadura



Autora (2022)

**Figura 63** - Resistência à compressão aos 56 dias de amostras fissuradas sem armadura



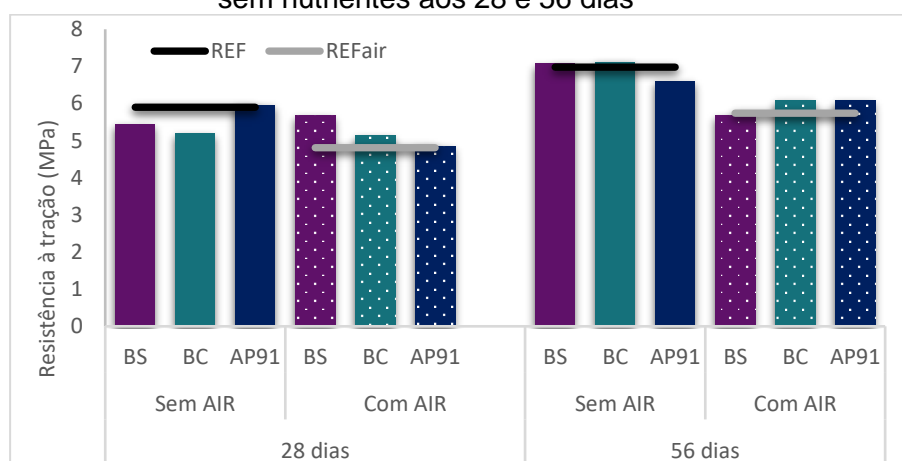
Autora (2022)

Devido à grande diferença de espessura entre uma variação de argamassa e outra (de 0,10 mm da amostra M-REF à 1,62 mm da amostra AP91 *air*), todas as amostras contendo bactérias apresentaram uma resistência à tração e compressão inferior às amostras de referência, com exceção da BS *air* que superou na tração as amostras de referência M-REFair, mas não a referência sem AIR. Para evitar tal situação, reitera-se a recomendação de se obter fissuras com espessuras similares, sugerido por Pacheco (2020) e Hollmann (2020).

A figura 64 apresenta os resultados de resistência à tração na flexão das amostras sem nutrientes obtidos no grupo de amostras íntegras, em triplicata, onde observa-se que a incorporação de ar prejudicou o desempenho à tração na flexão das argamassas, principalmente aos 56 dias, tanto nas amostras de referência como nas

amostras contendo bactérias. Resultado similar foi encontrado por Justo-Reinoso *et al.* (2022), que obtiveram redução de cerca de 48% na flexão em amostras contendo AIR, quando comparadas às amostras de referência. Neste estudo, a redução aos 56 dias nas amostras de referência foi de cerca de 18%, ao passo que nas amostras com bactérias a maior redução foi obtida na amostra BS*air* (20%) e a menor na amostra AP91*air* (8%).

**Figura 64** - Resistência à tração na flexão de amostras íntegras com bactérias AP91, BC e BS sem nutrientes aos 28 e 56 dias

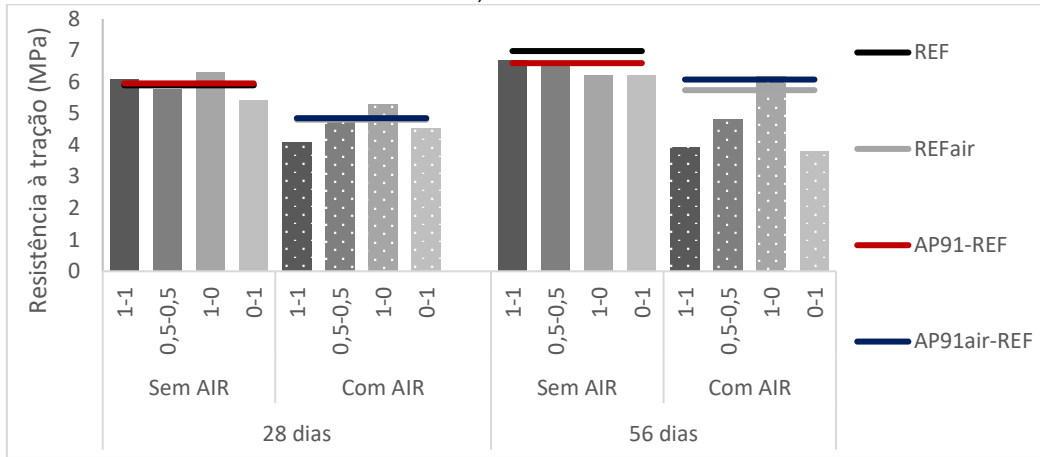


Fonte: Autora (2022)

É possível observar também que as amostras contendo AP91*air* e BC*air* tiveram valores de resistência à tração superiores à referência com AIR, mas não à referência sem AIR. Entre as amostras sem adição de ar incorporado aos 56 dias, nenhuma atingiu resultados superiores à referência, porém as amostras BS e BC obtiveram resultados similares.

Nas amostras com adição de nutrientes (Figura 65) a tendência foi similar. A incorporação de ar mostrou-se desfavorável para a propriedade, sendo que nenhuma amostra foi eficiente em superar a referência aos 56 dias, e apenas a amostra AP91\_1-0*air* conseguiu alcançar resistência aproximadamente igual à referência com bactéria e AIR (AP91*air*) e ser superior à referência sem bactéria (M-REF*air*). Nas amostras sem AIR, aos 56 dias, as variações AP91\_1-1 e AP91\_0,5-0,5 apresentaram resistência à tração similar à amostra de referência AP91, mas não alcançaram os valores da referência sem bactérias.

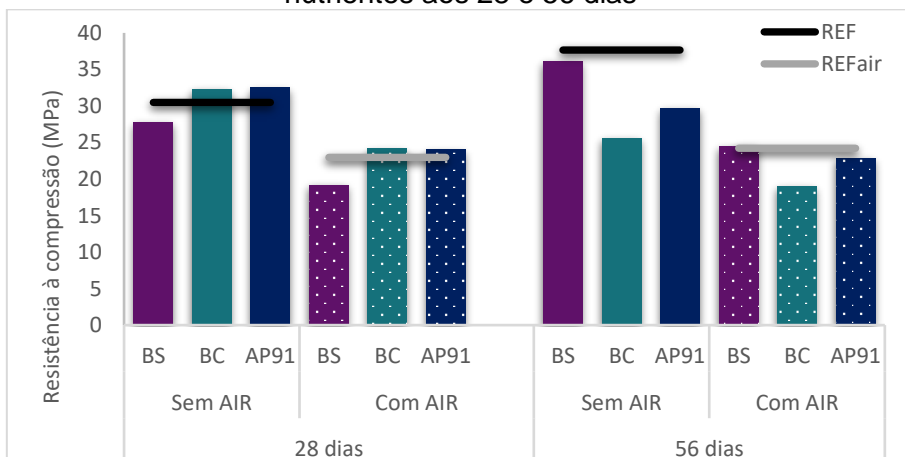
**Figura 65 – Resistência à tração na flexão de amostras íntegras com bactéria B. subtilis AP91 e nutrientes, aos 28 e 56 dias**



Fonte: Autora (2022)

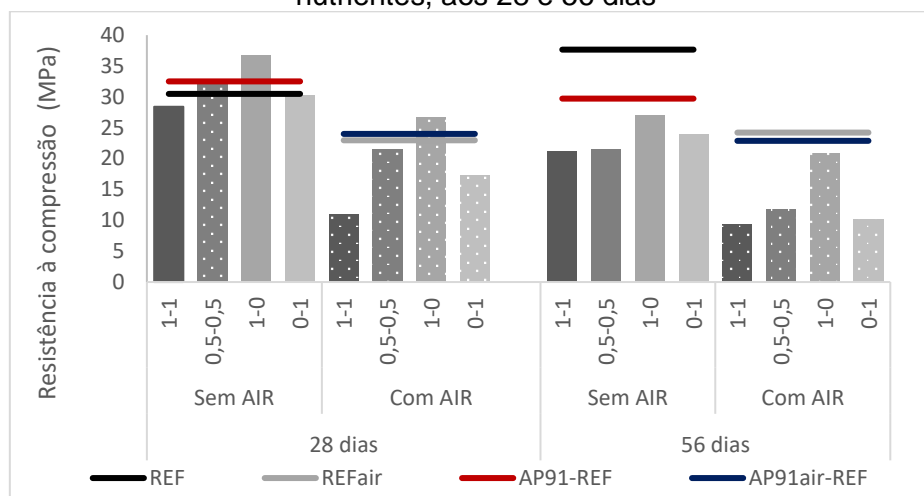
Nas Figuras 66 e 67 são apresentados os valores de resistência à compressão das amostras sem nutrientes e com nutrientes, respectivamente. Por meio das duas figuras é possível observar que, com exceção das variações M-REF, M-REFair, BS e BSair, todas as amostras apresentaram decréscimo da resistência aos 56 dias, quando comparados ao resultado obtido aos 28 dias. Pacheco (2020) observou resultado similar ao obter que 4 entre as 6 variações contendo solução bacteriana imobilizadas em perlita expandida apresentaram valor de resistência aos 84 dias inferior ao obtido aos 28 dias. Supõe-se que, neste estudo, a redução tenha ocorrido por influência da solução salina utilizada para diluição dos agentes biológicos, que é prejudicial à matriz cimentícia ao longo do tempo. Pode ter sido, também, influenciado por processos de lixiviação dos produtos à base de cálcio (CAPPELLESSO, 2018, TERZAGHI, 1948)

**Figura 66 – Resistência à compressão de amostras íntegras com bactérias AP91, BC e BS sem nutrientes aos 28 e 56 dias**



Fonte: Autora (2022)

**Figura 67** – Resistência à compressão de amostras íntegras com bactéria *B. subtilis* AP91 e nutrientes, aos 28 e 56 dias



Fonte: Autora (2022)

Percebe-se nas amostras com e sem nutrientes, uma diminuição na resistência à compressão das amostras com a incorporação do AIR, de igual forma ao ocorrido nos resultados de resistência à tração. Nos estudos de Justo-Reinoso *et al.* (2022) foi observado redução da ordem de 56% na resistência à compressão de amostras aos 28 dias. Os autores citam que essa diminuição é oriunda, principalmente, dos vazios de ar adicionais à matriz, originados pelo AIR. Neste estudo, as amostras com bactérias *BCair* e *AP91air* reduziram a resistência à compressão em 21,64% e 5,5%, respectivamente, ao passo que a *BSair* apresentou um pequeno acréscimo, de 1,17%, todas com relação à *M-REFair*.

As soluções bacterianas adicionadas livremente na mistura, sem a adição do AIR, também apresentaram valores de resistência reduzidos. As bactérias *BC*, *AP91* e *BS* tiveram redução de 32,18%, 21,07% e 4,10%, respectivamente, em relação à *M-REF*. Estes resultados diferem dos estudos de Schwantes (2017) que ao utilizar  $10^5$  esporos/mL da *B. subtilis* AP91 diluídos em tampão fosfato adicionados no lugar da água de amassamento, obteve um aumento de 53% na resistência à compressão. Ghellere (2021), observou acréscimo de aproximadamente 12% na resistência à compressão aos 120 dias ao adicionar a bactéria *B. subtilis* AP91 e a *Bacillus cf. cereus*, junto com 1% de acetato de cálcio e extrato de levedura na mistura. Todavia, os resultados obtidos neste estudo corroboram com os encontrados por Jonkers *et al.* (2010) que obtiveram redução de cerca de 10% na resistência à compressão ao incorporar  $6 \times 10^8$  esporos bacterianos de *B. pseudofirmus* e *B. cohnii* livremente na mistura. Reforça-se que o resultado satisfatório de

resistência mecânica das amostras bacterianas pode estar relacionado à solução salina utilizada na diluição dos esporos e adicionada à água de amassamento.

É perceptível que as amostras com a associação de 1% de extrato de levedura com AIR são as que apresentam maior redução da resistência, tanto aos 28 como aos 56 dias. Tal situação se deve à formação de bolhas pelo AIR e também, de acordo Justo-Reinoso *et al.* (2022) pelas bolhas de ar formadas pelo extrato de levedura. Os autores perceberam em seu estudo que amostras de argamassa contendo 1% (em relação a massa de cimento) de extrato de levedura obtiveram aumento de 115% no teor de ar quando comparado à mistura de referência. Situação semelhante foi obtida quando Chen, Yuan e Alazhari (2019) utilizaram teor de 0,06% de extrato de levedura em argamassas, e obtiveram um aumento de 81% no teor de ar, em comparação à referência.

#### 4.3 VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS

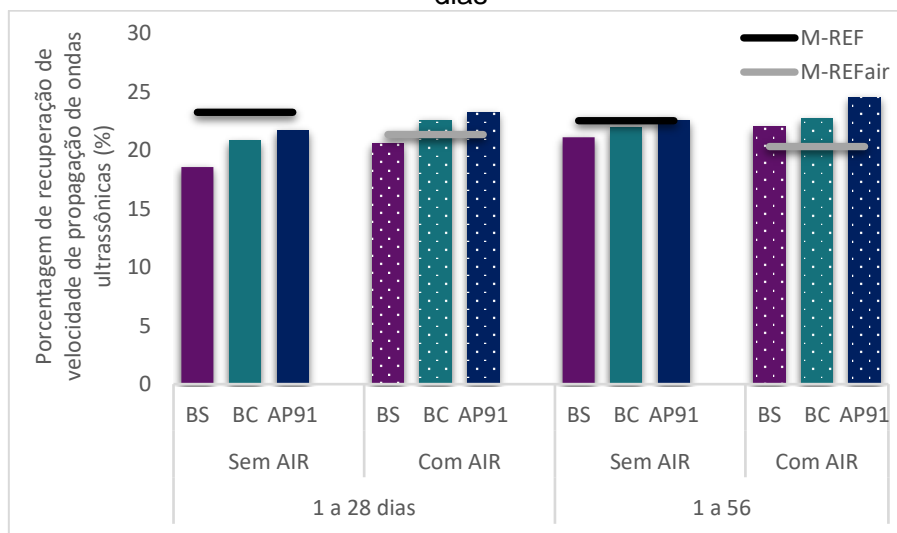
O ensaio de Ultrassom foi realizado para verificar a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas das amostras de argamassa ao longo do tempo, pois se o tempo de transmissão for reduzido, pode ser associado à melhoria da matriz devido à precipitação de  $\text{CaCO}_3$  pelos agentes biológicos. A análise foi realizada em dois grupos de amostra: (i) 8 misturas de amostras fissuradas contendo bactérias AP91, BS e BC sem nutrientes, (ii) 16 misturas de amostras íntegras, contendo bactérias AP91, BS e BC sem nutrientes e bactérias AP91 + nutrientes isolados e combinados, com e sem AIR;

No grupo (i) (amostras fissuradas, Figura 68), foi avaliada a taxa de recuperação da integridade das amostras, por meio da diferença de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas final (aos 28 e 56 dias) e inicial (1 dia), visto que a avaliação entre resultados finais não foi possível devido à variação entre espessuras de fissuras.

Aos 28 dias, a mistura que apresentou melhor porcentagem de recuperação foi a de referência (M-REF) sem ar incorporado e sem nenhuma bactéria. Na mesma idade, verificou-se que as amostras BC<sub>air</sub> e AP91<sub>air</sub> foram superiores à M-REF<sub>air</sub>, mas não a M-REF. Já aos 56 dias, todas as amostras contendo bactérias + AIR apresentaram resultado superior à M-REF<sub>air</sub>, porém a única que superou também a amostra de referência sem AIR foi a amostra AP91<sub>air</sub>, que apresentou o melhor resultado de recuperação. Destaca-se que foi essa a amostra a apresentar o melhor Índice de

cicatrização na análise visual de amostras sem armadura, demonstrando que o resultado de ambos os ensaios pode ser associado.

**Figura 68** – Porcentagem de recuperação de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas em amostras sem armadura fissuradas com bactérias AP91, BC e BS sem nutrientes aos 28 e 56 dias



Fonte: Autora (2022)

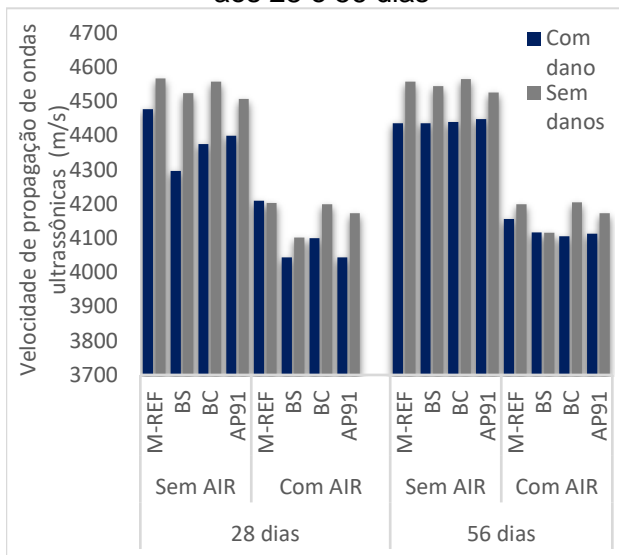
Fato importante a ser observado é que, nas amostras de referência, com e sem AIR, a taxa de recuperação apresentou queda, ou seja, os valores de recuperação aos 28 dias foram superiores aos resultados de recuperação observados aos 56 dias, isso porque, na idade de avaliação final, a velocidade de propagação de ondas obtida teve decréscimo, quando comparada aos 28 dias. Tal fato não foi observado em nenhuma argamassa contendo qualquer uma das bactérias, visto que todas elas proporcionaram aumento na velocidade de propagação de ondas ultrassônicas aos 56 dias, consequentemente, aumentando a taxa de recuperação.

O resultado de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas encontrado aos 56 dias nas amostras com dano sem nutrientes<sup>20</sup> e sem armadura (grupo i) pôde ser comparado ao resultado encontrado nas amostras sem danos, de modo a identificar se as bactérias foram capazes de alcançar o valor característico de uma amostra íntegra. Os resultados são apresentados nas Figuras 69 e 70.

<sup>20</sup> Esse comparativo só foi possível em amostras sem nutrientes, visto que não foi possível produzir amostras com nutrientes fissuradas, por motivos anteriormente mencionados.

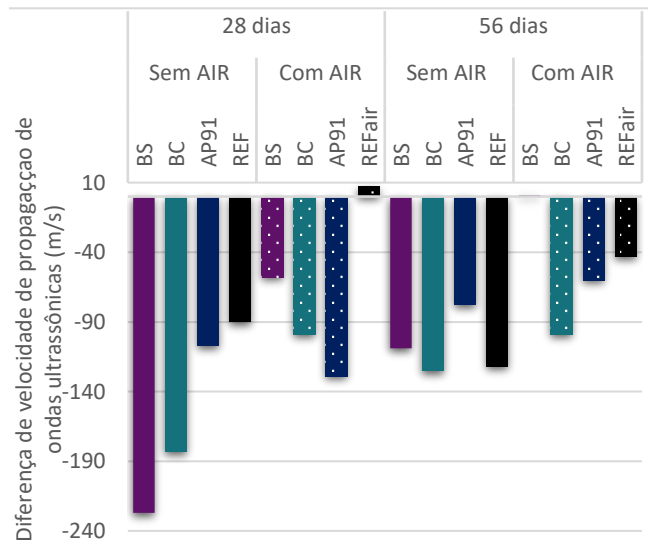
Verifica-se (Figura 69) que as amostras com ar incorporado apresentam velocidade de propagação de ondas ultrassônicas reduzida, quando comparadas às amostras sem AIR. Essa situação justifica-se, pois, a matriz cimentícia com incorporação do aditivo tende a apresentar maior volume de vazios, o que faz aumentar o percurso da onda ultrassônica no interior da mistura, pois é necessário que ela “contorne” as irregularidades.

**Figura 69** – Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas entre amostras fissuradas (com dano) e íntegras (sem danos) aos 28 e 56 dias



Fonte: Autora (2022)

**Figura 70** – Diferença de velocidade de propagação de ondas entre amostras íntegras e fissuradas



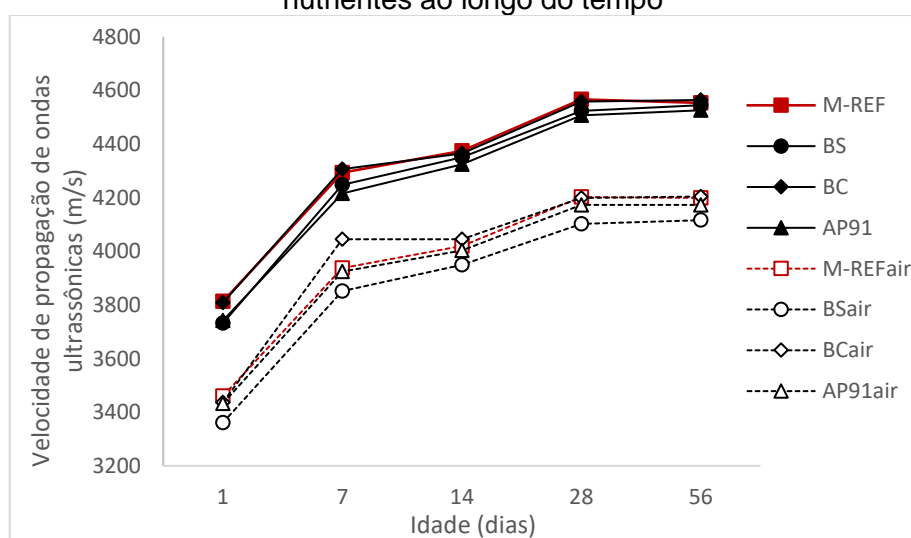
Fonte: Autora (2022)

Observa-se que aos 28 dias a amostra M-REFair atingiu e ultrapassou a velocidade de propagação de ondas da amostra sem danos, mas não manteve esse desempenho aos 56 dias, atuação que foi alcançada apenas pela amostra BSair. Tendo em vista que o aumento da velocidade de pulso ultrassônico evidencia a diminuição de danos (CAPPELLESSO, 2018), sugere-se que a amostra BSair obteve este desempenho pela ação dos agentes biológicos que puderam metabolizar nos vazios de ar criado pelo AIR, preenchendo-os com CaCO<sub>3</sub> metabolicamente precipitado e melhorando a integridade da matriz cimentícia.

No grupo de amostras (ii) foi possível avaliar a velocidade de propagação de ondas final e ao longo do tempo, visto que todas apresentavam a mesma condição de integridade, sem fissuras. A Figura 71 ilustra a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (média de três leituras de três amostras) obtida nas amostras íntegras sem

nutrientes, ao longo do tempo, onde é possível observar que todas as amostras obtiveram melhoria da matriz ao longo do tempo e as amostras contendo adição de AIR apresentaram velocidade de transmissão reduzida, visto que apresentam mais vazios na matriz, dificultando a passagem das ondas ultrassônicas. Ao final dos 56 dias, todas as amostras do grupo sem AIR apresentaram resultado similar, e o mesmo ocorreu nas amostras com AIR, por isso julgou-se interessante a avaliação da recuperação, para avaliar o quanto as amostras melhoraram a matriz dentro do período.

**Figura 71** – Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas de amostras íntegras sem nutrientes ao longo do tempo

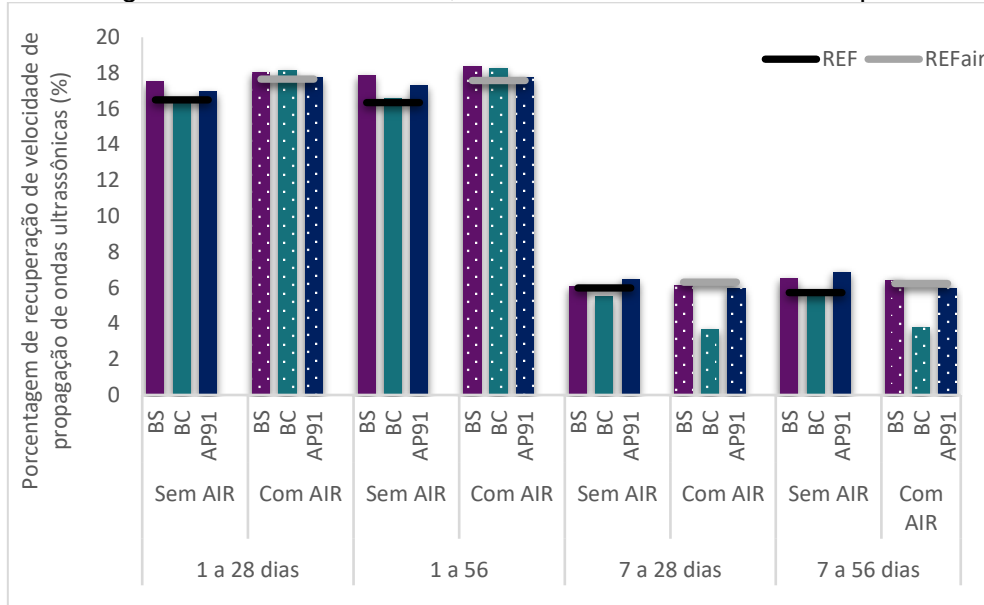


Fonte: Autora (2022)

Neste sentido, para o grupo de amostras íntegras sem nutrientes foi possível calcular a taxa de recuperação da integridade partindo da idade 1 e partindo da idade 7, conforme apresentado na Figura 72. Por meio dela é possível observar que entre as idades 1 a 28 e 1 a 56 dias a recuperação foi superior em todas as amostras contendo AIR, tanto nas amostras de referência quanto nas amostras contendo bactérias.

A diminuição da taxa de recuperação nas amostras de referência M-REF e M-REFair, obtida nas amostras fissuradas, também pôde ser observado neste grupo de amostras, o que novamente não aconteceu com nenhuma amostra contendo bactérias. É possível observar também que é nos primeiros 7 dias que ocorre a maior taxa de recuperação da integridade, avaliada por meio da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, provavelmente por combinação de autocicatrização autógena e autônoma.

**Figura 72 –** Porcentagem de recuperação de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas em amostras íntegras com bactérias AP91, BC e BS sem nutrientes em 4 períodos de tempo

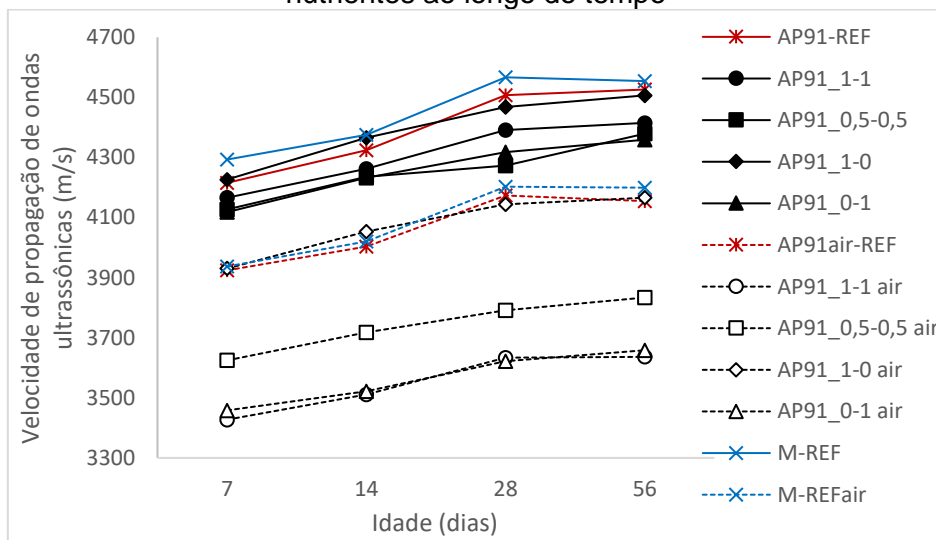


Fonte: Autora (2022)

Tendo como base a recuperação desde o início, do dia 1, ao dia 56, tem-se que as maiores recuperações são de amostras contendo bactérias e aditivo incorporador de ar, BSair e BCair, respectivamente, ultrapassando o desempenho das referências, ao passo que a amostra AP91air obteve resultado similar à referência.

Na Figura 73 são apresentados os valores de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas obtidos nas amostras íntegras com AP91 e nutrientes.

**Figura 73 -** Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas de amostras íntegras com nutrientes ao longo do tempo

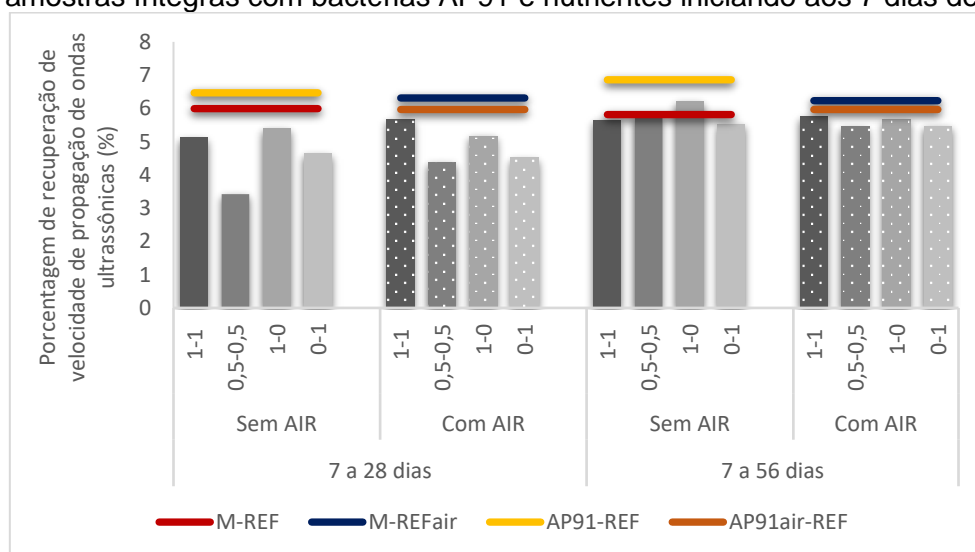


Fonte: Autora (2022)

Observa-se que, da mesma forma ocorrida nas amostras sem nutrientes, neste grupo de amostras também ocorreu a diminuição na velocidade ultrassônica nas amostras com a incorporação de AIR. As duas amostras contendo 1% de YE + AIR foram as que obtiveram o pior desempenho, dos 7 aos 56 dias. Isso pode ser explicado devido à formação de bolhas de ar pelo AIR e também pelo extrato de levedura, que conforme citado anteriormente, ocasionou um aumento de 115% no teor de ar nos estudos de Justo-Reinoso *et al.* (2022), ao adicionar 1% em relação a massa de cimento, e 81% nas pesquisas de Chen, Yuan e Alazhari (2019), ao adicionar 0,06%.

De maneira geral, ao final dos 56 dias de análise, todas as amostras contendo nutrientes apresentaram velocidade inferior às amostras de referência. Essa situação também pode ser visualizada na Figura 74, que mostra os resultados de recuperação (ganho de velocidade no período) obtidos nas amostras.

**Figura 74** - Porcentagem de recuperação de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas em amostras íntegras com bactérias AP91 e nutrientes iniciando aos 7 dias de cura



Fonte: Autora (2022)

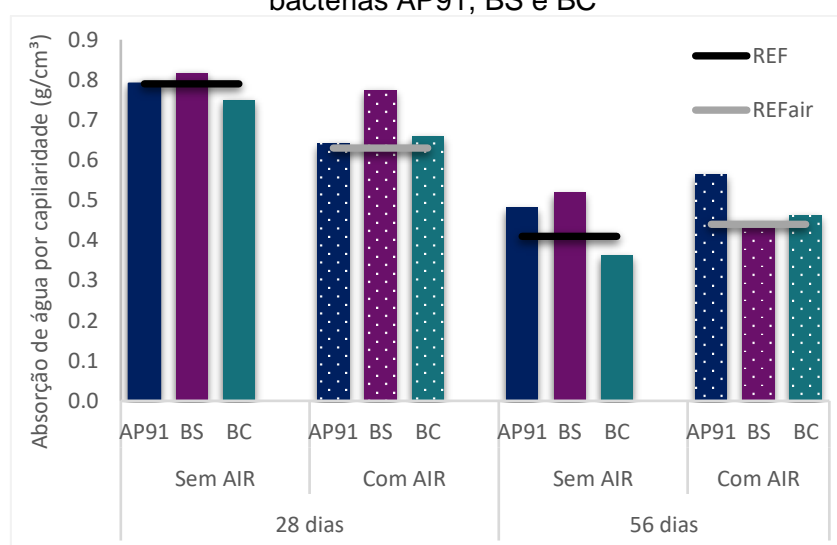
O melhor resultado de recuperação encontrado aos 28 dias, partindo do dia 7, foi obtido pela amostra AP91\_1-1air e aos 56 dias pelas amostras AP91\_1-0, AP91\_1-1air e AP91\_1-0air, porém, nenhuma das três alcançou as referências.

Dado o resultado obtido no grupo de amostras sem nutrientes, em que a maior taxa de recuperação foi observada dos 1 aos 7 dias, supõe-se que se a análise tivesse iniciado no dia 1, o resultado poderia ser diferente. Porém, tal situação não foi possível devido ao já mencionado retardamento da pega causado pelos nutrientes, impossibilitando o desmolde das amostras antes de 48 horas.

#### 4.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado em amostras cilíndricas íntegras com dimensões de 50x100mm aos 28 e 56 dias de cura, nos 16 traços desta pesquisa, com objetivo de verificar a influência dos agentes biológicos na estanqueidade. Na Figura 75 são apresentados os resultados obtidos em amostras contendo bactérias, sem nutrientes, com e sem AIR, aos 28 e 56 dias.

**Figura 75** – Absorção de água por capilaridade em 72 horas aos 28 e 56 dias de amostras com bactérias AP91, BS e BC



Fonte: Autora (2022)

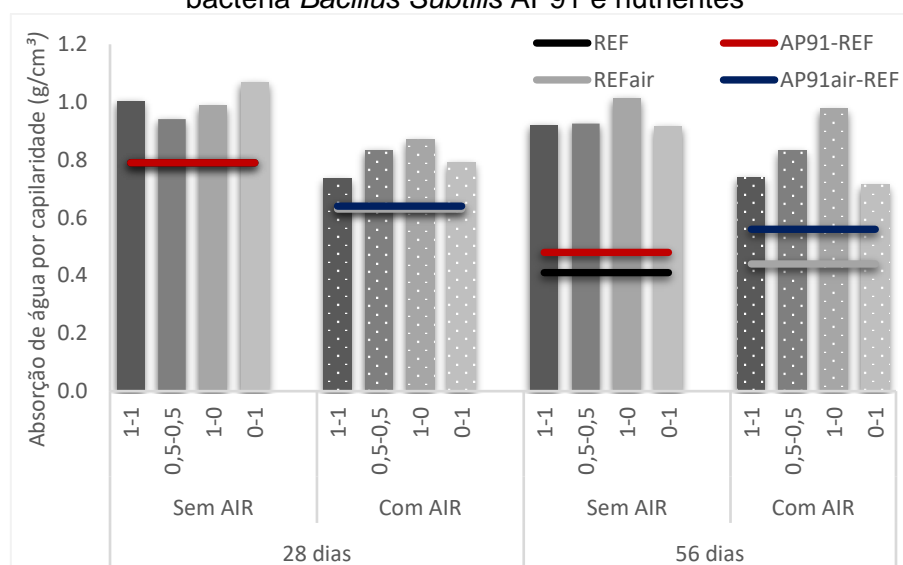
Por meio da Figura 75 é possível observar uma diminuição na absorção de água por capilaridade em todas as amostras contendo AIR. Este efeito pode ser resultante da interrupção do capilar pelos poros originado pelo AIR, dificultando a ascensão da água. Pode ser, ainda, oriundo de uma maior precipitação de  $\text{CaCO}_3$  pelas bactérias, visto que há mais espaço para seu desenvolvimento. Neste sentido, sugere-se a realização de ensaio de absorção de água total para maiores esclarecimentos.

Nota-se, ainda na Figura 75, que aos 56 dias a absorção de água diminuiu para todas as amostras, demonstrando melhora na matriz, seja pela contínua hidratação de porções anidras de cimento, ou pela precipitação de  $\text{CaCO}_3$  pelas bactérias. Dos 28 aos 56 dias, a amostra que apresentou maior diminuição na absorção foi a BC, única que permaneceu abaixo da amostra de referência. A amostra obteve redução de 51,81% na absorção dos 28 aos 56 dias, comparados à 48,10% de redução da referência. Outra amostra que teve desempenho considerável foi a amostra BS<sub>air</sub>, que no mesmo período

reduziu a absorção em 43,09%, comparado à 30,16% da amostra M-REF<sub>air</sub>, tendo as duas obtido o mesmo resultado de absorção de água aos 56 dias. As amostras AP91 e AP91<sub>air</sub>, BS e BC<sub>air</sub> não atingiram os valores de absorção da água por capilaridade das amostras de referência.

A Figura 76 mostra os resultados de absorção de água aos 28 e 56 dias de amostras íntegras contendo a bactéria AP91 e nutrientes, com e sem AIR.

**Figura 76** – Absorção de água por capilaridade em 72 horas aos 28 e 56 dias de amostras com a bactéria *Bacillus Subtilis* AP91 e nutrientes



Fonte: Autora (2022)

Da mesma forma ocorrida nas amostras sem nutrientes, todas as amostras com adição de AIR deste grupo de amostras apresentaram redução na absorção de água, tanto aos 28 como aos 56 dias.

A amostra que apresentou maior redução de absorção entre 28 e 56 dias foi a AP91\_0-1, tendo diminuição de 14,16%, muito abaixo da redução apresentada pelas amostras AP91 (39,13%) e M-REF (48,10%). De maneira geral, as amostras contendo adições de nutrientes não obtiveram um bom desempenho na redução da absorção de água por capilaridade de amostras íntegras.

De acordo com Schwantes (2017), quando ao longo do período de cura ocorre a precipitação de  $\text{CaCO}_3$  pelas bactérias nos poros e fissuras, conseqüentemente ocorre uma diminuição da absorção de água das amostras, diferente do resultado obtido neste estudo. Porém, dada análise da microestrutura em MEV (Figuras 50 e 51), onde percebeu-se que as bactérias precipitam maiores quantidades de  $\text{CaCO}_3$  na região

fissurada, supõe-se que se as amostras submetidas ao ensaio de capilaridade estivessem fissuradas, o resultado seria diferente. Tang, Kardani e Cui (2015) explicam que para avaliação da absorção de água por capilaridade, além da fissura, é necessário que haja uma envoltória para análise pontual da fissura, de modo a conter a troca de umidade com o ambiente externo.

Por fim, acrescenta-se às discussões que a determinação da eficiência da inserção de agentes biológicos precipitadores de  $\text{CaCO}_3$  para fins de autocicatrização autônoma de fissuras em materiais cimentícios deve seguir uma metodologia meticulosa, realizando avaliações visuais das fissuras, análises da durabilidade e recuperação de propriedades mecânicas, de modo a estabelecer uma correlação entre elas.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio da realização desta pesquisa, constatou-se que a incorporação de bactérias dos gêneros *Bacillus subtilis* (AP91), *Bacillus cf. subtilis* (BS) e *Bacillus cf. cereus* (BC), promovem autocicatrização de fissuras em matrizes a base de cimento pela precipitação metabólica de carbonato de cálcio.

Verificou-se que o desempenho da bactéria *B. subtilis* AP91 é intensificado com a presença dos nutrientes lactato de cálcio e extrato de levedura combinados na concentração de 0,5% e extrato de levedura no teor de 1%, ambos aliados a ar incorporado.

Entre os 3 agentes investigados, a *Bacillus cf. subtilis*, isolada de uma edificação em Foz do Iguaçu-PR, apresentou melhor desempenho, recuperando fissuras com espessura da ordem 1,58 mm, quando aliada a ar incorporado, tendo a bactéria *B. subtilis* AP91, amplamente utilizada em estudos nacionais, também apresentado resultados satisfatórios. Por meio da análise morfológica em MEV e EDS, constatou-se que os cristais precipitados nas fissuras são de  $\text{CaCO}_3$ .

Com relação à incorporação de AIR à mistura, percebeu-se que o aditivo se mostrou favorável à autocicatrização, visto que todas as fissuras foram seladas de forma mais acentuada nas amostras contendo ar incorporado.

Amostras com adição de bactérias, nutrientes e ar incorporado, isolados ou combinados, apresentaram desempenho insatisfatório nas propriedades de resistência a tração, compressão e absorção de água por capilaridade das argamassas. Supõe-se que alterando alguns fatores, como a solução salina utilizada e a integridade das amostras (no ensaio de absorção), os resultados podem ser diferentes.

Além dos objetivos propostos no estudo, pôde-se associar os resultados positivos encontrados na análise visual aos resultados de recuperação do módulo de elasticidade dinâmico determinado pela técnica da excitação por impulso, sugerindo que a técnica, de fácil e rápida execução, se aprimorada, pode ser promissora em análises de autocicatrização de fissuras em materiais cimentícios.

Observou-se diferença no desempenho das bactérias na autocicatrização de fissuras entre amostras com e sem armadura, tendo sido percebido, nas amostras com armaduras, índices de cicatrização mais favoráveis. Destaca-se que, em situações reais, há a presença do aço no concreto.

Além disso, por meio da análise em MEV na região fissurada *versus* face fraturada (interior da amostra), pode-se comprovar que as bactérias apesar de estarem dispersas na matriz, tendem a metabolizar e precipitar carbonatos na região fissurada, onde há maior disponibilidade de oxigênio e água.

De forma geral, conclui-se que a adição de agentes biológicos precipitadores de  $\text{CaCO}_3$  na matriz cimentícia é promissora na autocicatrização de fissuras, e que a viabilidade das bactérias é aumentada em matrizes com ar incorporado.

No entanto, são necessários maiores estudos que aprimorem procedimentos laboratoriais, com o desenvolvimento de protocolos de investigação confiáveis e replicáveis. A expectativa é que seja possível desenvolver a tecnologia laboratorialmente para que futuramente possam ser desenvolvidos biomateriais para aplicação em construções reais, dando também subsídio à produção de materiais de reparo com potencial de autocicatrização, de modo a contribuir com o aumento da durabilidade e extensão de vida útil das estruturas de concreto.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A autocicatrização cimentícia por meio do emprego de agentes biológicos precipitadores de  $\text{CaCO}_3$  ainda é um assunto recente no Brasil, e para que se obtenha mais informações acerca do processo, fazem-se necessários estudos sobre os vários parâmetros que interferem no fenômeno. Sendo assim, sugere-se os seguintes estudos:

- Produzir amostras com fissuras realistas padronizadas para análise de autocicatrização, de modo a facilitar o entendimento dos resultados e a comparação dos dados obtidos em todos os ensaios;
- Estudar outra solução, que não a salina, para diluir as bactérias e incorporar na mistura, visto que a utilizada solução com NaCl pode danificar a matriz cimentícia;
- Utilizar os agentes biológicos de forma liofilizada nas matrizes cimentícias para facilitar o controle dos microrganismos;
- Estudar o efeito dos nutrientes extrato de levedura e lactato de cálcio, e do aditivo incorporador de ar em matrizes cimentícias sem a presença de bactérias;
- Utilizar a bactéria BS, que apresentou melhor índice de autocicatrização neste estudo, com a incorporação de nutrientes;

- Estudar menores quantidades de adições do nutriente extrato de levedura e AIR combinados, para verificar a eficiência da cicatrização e a influência nas propriedades mecânicas;

## REFERÊNCIAS

ACHAL, V. *et al.* Strain improvement of *Sporosarcina pasteurii* for enhanced urease and calcite production. **Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology**, [S.L.], v. 36, n. 7, p. 981-988, mai. 2009. Oxford University Press (OUP). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10295-009-0578-z>.

ACHAL, V. *et al.* Biomineralization for sustainable construction – A review of processes and applications. **Earth-Science Reviews**, [S.L.], v. 148, p. 1-17, set. 2015. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.05.008>.

ACHAL, V.; MUKERJEE, A.; REDDY, M. S. Biogenic treatment improves the durability and remediates the cracks of concrete structures. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 48, p. 1-5, nov. 2013. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.061>

ACHAL, V.; MUKHERJEE, A. A review of microbial precipitation for sustainable construction. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 93, p. 1224-1235, set. 2015. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.051>

ACHAL, V.; PAN, X. Influence of Calcium Sources on Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation by *Bacillus* sp. CR2. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, [S.L.], v. 173, n. 1, p. 307-317, 19 mar. 2014. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s12010-014-0842-1>.

ALAZHARI, M. *et al.* Application of expanded perlite encapsulated bacteria and growth media for self-healing concrete. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 160, p. 610-619, jan. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.086>.

ALYOUSIF, A. **Self-healing capability of engineered cementitious composites incorporating different types of pozzolanic materials**. 2016. 115 f. Doctoral dissertation - Civil Engineering, Ryerson University, Toronto, Canada, 2016

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1876-15**: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. ASTM International. West Conshohocken, p. 17. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ABNT. **ABNT NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT. **ABNT NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT. **ABNT NBR 16916**: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

ABNT. **ABNT NBR 16972**: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.

ABNT. **ABNT NBR 8802**: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2019.

ABNT. **ABNT NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT. **ABNT NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

BUNDUR, Z. B. et al. Impact of air entraining admixtures on biogenic calcium carbonate precipitation and bacterial viability. **Cement and Concrete Research**, v. 98, n. April, p. 44–49, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.04.005>

BASILISK Self-healing concrete. **Water basin Port of Rotterdam**. Basilisk Concrete. Disponível em: <https://www.basiliskconcrete.com/en/portfolio-items/bluswaterbassin-havenbedrijf-rotterdam-2/>. Acesso em: 23 jul. 2021.

BASILISK, Self-healing concrete. **Self-healing concrete in lower wall construction at Evides buffer tank**. 2020. Basilisk Concrete. Disponível em: <https://www.basiliskconcrete.com/en/portfolio-items/self-healing-concrete-in-wall-construction-at-evides-buffer-tank/>. Acesso em: 23 jul. 2021.

CAPPELLESSO, V. G. **Avaliação da autocicatrização de fissuras em concretos com diferentes cimentos**. 2018. 295 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

CHAHAL, N.; SIDDIQUE, R. Permeation properties of concrete made with fly ash and silica fume: influence of ureolytic bacteria. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 49, p. 161-174, dez. 2013. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.023>.

CO2.EARTH. **Global Carbon Emissions**. Canada, 2020. Disponível em: <https://www.co2.earth/65/>.

CHEN, B. et al. Crack sealing evaluation of self-healing mortar with *Sporosarcina pasteurii*: Influence of bacterial concentration and air-entraining agent. **Process Biochemistry**, v. 107, n. December 2020, p. 100–111, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procbio.2021.05.001>

CHEN, X.; YUAN, J.; ALAZHARI, M. Effect of microbiological growth components for bacteria-based self-healing on the properties of cement mortar. **Materials**, v. 12, n. 8, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/ma12081303>

DAVIES, R. et al. Large scale application of self-healing concrete: Design, construction,

and testing. **Frontiers in Materials**, v. 5, n. September, p. 1–12, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3389/fmats.2018.00051>

BELIE, N de; MUYNCK, W de. Crack repair in concrete using biodeposition. **Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II**, [S.L.], p. 291-292, out. 2009. CRC Press. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1201/9781439828403.ch107>.

DE MUYNCK, W. *et al.* Bacterial carbonate precipitation as an alternative surface treatment for concrete. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 22, n. 5, p. 875-885, maio 2008. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.12.011>.

DE MUYNCK, W.; BELIE, N.; VERSTRAETE, W. Microbial carbonate precipitation in construction materials: a review. **Ecological Engineering**, [S.L.], v. 36, n. 2, p. 118-136, fev. 2010. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.02.006>.

DE ROOIJ, M. *et al.* **RILEM TC 221-SHC: Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013. v. 11

DHAMI, N. K.; REDDY, S. M.; MUKHERJEE, A. Biofilm and Microbial Applications in Biomineralized Concrete. **Advanced Topics in Biomineralization**, [S.L.], v. 2, p. 1-15, 17 fev. 2012. InTech. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5772/31124>.

DHAMI, N. K.; REDDY, M. S.; MUKHERJEE, A. Biomineralization of calcium carbonates and their engineered applications: a review. **Frontiers In Microbiology**, [S.L.], v. 4, p. 1-13, 2013. Frontiers Media SA. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3389/fmicb.2013.00314>.

ERŞAN, Y. Ç. *et al.* Screening of bacteria and concrete compatible protection materials. **Construction and Building Materials**, v. 88, p. 196–203, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.027>

ERŞAN, Y. Ç. *et al.* Nitrite producing bacteria inhibit reinforcement bar corrosion in cementitious materials. **Scientific Reports**, [S.L.], v. 8, n. 1, p. 1-10, 20 set. 2018. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-018-32463-6>.

EUZEBIO, L. A.; ALVES, T. R.; FERNANDES, V. A. **Estudo exploratório de concreto com introdução de Bacillus subtilis, Bacillus licheniformis, acetato de calcio e ureia**. 2017. 60 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.

FERRARA, L. *et al.* Experimental characterization of the self-Healing capacity of cement based materials: an overview. **Materials Science and Engineering**, [S.L.]. p. 454, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/442/1/012007>

GAGNÉ, R.; ARGOUGES, M. A study of the natural self-healing of mortars using air-flow measurements. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 45, n. 11, p. 1625–1638, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-012-9861-y>

GHELLERE, P. **Seleção e avaliação do desempenho de bactérias produtoras de CaCO<sub>3</sub> na recuperação de fissuras dos materiais a base de cimento**. 2021. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2021.

GOROSPE, C. M. *et al.* Effects of different calcium salts on calcium carbonate crystal formation by *Sporosarcina pasteurii* KCTC 3558. **Biotechnology and Bioprocess Engineering**, [S.L.], v. 18, n. 5, p. 903-908, set. 2013. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s12257-013-0030-0>.

GULIN, L. B. **Viabilidade do uso de Sílica Gel na imobilização da bactéria *Bacillus Subtilis* para materiais cimentícios autocicatrizantes**. 2019. 54 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2019.

HAMMES, F.; VERSTRAETE, W. Key roles of pH and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation. **Environmental Science & Bio/Technology**, Ghent, p. 3-7, 2002

HILLOULIN, B. *et al.* Monitoring of autogenous crack healing in cementitious materials by the nonlinear modulation of ultrasonic coda waves, 3D microscopy and X-ray microtomography. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 143–152, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.138>

HUANG, H. *et al.* Self-healing in cementitious materials: materials, methods and service conditions. **Materials & Design**, [S.L.], v. 92, p. 499-511, fev. 2016. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.12.091>

JONKERS, H. M. *et al.* Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. **Ecological Engineering**, [S.L.], v. 36, n. 2, p. 230-235, fev. 2010. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.036>

JONKERS, H. M. *et al.* Bacteria-based self-healing concrete. **Heron**. Delft, p. 1-12. fev. 2011. Disponível em: <http://heronjournal.nl/56-12/1.pdf>.

JONKERS, H. M.; SCHLANGEN, E. **Self-healing of cracked concrete: A bacterial approach**. Proceedings of the 6th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures. Anais. 6 f. 2007.

JONKERS, H. M.; THIJSEN, A. **Bacteria Mediated of Concrete Structures**. 2nd International Symposium on Service Life Design for Infrastructure 4-6 October 2010, Delft, The Netherlands, p. 833–840, 2010.

JUSTO-REINOSO, I. *et al.* Air-entraining admixtures as a protection method for bacterial spores in self-healing cementitious composites: Healing evaluation of early and later-age cracks. **Construction and Building Materials**, v. 327, n. January, p. 126877, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126877>

KHALIQ, W.; EHSAN, M. B. Crack healing in concrete using various bio influenced self-healing techniques. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 102, p. 349-357, jan. 2016. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.006>.

LE MÉTAYER-LEVREL, G. L. *et al.* Applications of bacterial carbonatogenesis to the protection and regeneration of limestones in buildings and historic patrimony. **Sedimentary Geology**, [S.L.], v. 126, n. 1-4, p. 25-34, jul. 1999. Elsevier BV. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/s0037-0738\(99\)00029-9](http://dx.doi.org/10.1016/s0037-0738(99)00029-9).

LUO, M.; QIAN, C. Influences of bacteria-based self-healing agents on cementitious materials hydration kinetics and compressive strength. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 121, p. 659-663, set. 2016. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.075>.

LUO, M.; QIAN, C. X.; LI, R. Y. Factors affecting crack repairing capacity of bacteria-based self-healing concrete. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 87, p. 1-7, jul. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.117>.

MADIGAN, M. T. *et al.* **Microbiologia de Brock**. 14. ed. Porto Alegre: Grupo A Educação S.A., 2016.

MARVASI, M. *et al.* Physiological requirements for carbonate precipitation during biofilm development of *Bacillus subtilis* e f Amutant. *Fems Microbiology Ecology*, [S.L.], v. 71, n. 3, p. 341-350, mar. 2010. Oxford University Press (OUP). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1574-6941.2009.00805.x>.

MARVASI, M.; DAVILA-VAZQUEZ, Y. C.; MARTINEZ, L. C. Laboratory Activity to Effectively Teach Introductory Geomicrobiology Concepts to Non-Geology Majors. **Journal of Microbiology & Biology Education**, [S.L.], v. 14, n. 2, p. 206-212, jan. 2013. American Society for Microbiology. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1128/jmbe.v14i2.578>.

MEDEIROS, M. H. F.; ANDRADE, J. J. DE O.; HELENE, P. Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1º Edição ed. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 37.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2º Edição em Português, 2014.

MULLEM, T. V. *et al.* First Large Scale Application with Self-Healing Concrete in Belgium: analysis of the laboratory control tests. **Materials**, [S.L.], v. 13, n. 4, p. 997, 23 fev. 2020. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/ma13040997>.

NEVES JUNIOR, A. **Captura de CO<sub>2</sub> em materiais cimentícios através de carbonatação acelerada**. 2014. 179 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

PACHECO, F. **Análise da eficácia dos mecanismos de autorregeneração e autocicatrização do concreto**. 2020. 367 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2020.

PARASTEGARI, N.; MOSTOFINEJAD, D. Influence of Bacteria on Performance of Air Entrained Concrete. **Journal of Civil Engineering**, [S.L.], n. p. 355-358, abr. 2018.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.22060/ceej.2018.12371.5188>.

PARASTEGARI, N.; MOSTOFINEJAD, D.; POURSIINA, D. Use of bacteria to improve electrical resistivity and chloride penetration of air-entrained concrete. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 210, p. 588-595, jun. 2019. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.150>.

QIAN, C. *et al.* Self-healing of early age cracks in cement-based materials by mineralization of carbonic anhydrase microorganism. **Frontiers in Microbiology**, [S.L.], v. 6, p. 1-9, 4 nov. 2015. Frontiers Media SA. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3389/fmicb.2015.01225>.

RAMACHANDRAN, S. K.; RAMAKRISHNAN, V.; BANG, S. S. Remediation of Concrete Using Microorganisms. **ACI Materials Journal**, [S.L.], v. 98, n. 1, p. 3-9, 2001. American Concrete Institute. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14359/10154>.

ROADMAP. Technology Roadmap: **Low-Carbon Transition in the Cement Industry. Geneva: International Energy Agency (IEA) and the Cement Sustainability Initiative (CSI)**., 2009. Disponível em: <https://www.wbcsd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative/Resources/Technology-Roadmap-Low-Carbon-Transition-in-the-Cement-Industry>. Acesso em: 23 jul. 2021.

RAMPANELLI, C. H. O. **Proporcionamento de materiais cimentícios para reparo de estruturas hidráulicas empregando modelo de empacotamento de partículas**. 2021. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2021.

ROIG-FLORES, M. *et al.* Effect of crystalline admixtures on the self-healing capability of early-age concrete studied by means of permeability and crack closing tests. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 447–457, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.091>

SCHWANTES-CEZARIO, N. *et al.* Bioprecipitation of calcium carbonate induced by *Bacillus subtilis* isolated in Brazil. **International Biodeterioration & Biodegradation**, [S.L.], v. 123, p. 200-205, set. 2017. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.06.021>.

SCHWANTES-CEZARIO, N. *et al.* Crack filling in concrete by addition of *Bacillus subtilis* spores – Preliminary study. **Dyna**, [S.L.], v. 85, n. 205, p. 132-139, 1 abr. 2018. Universidad Nacional de Colombia. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v85n205.68591>.

SCHWANTES-CEZARIO, N.; NOGUEIRA, G. S. F.; TORALLES, B. M. Biocimentação de compósitos cimentícios mediante adição de esporos de *B. subtilis* AP91. **Revista de Engenharia Civil Imed**, [S.L.], v. 4, n. 2, p. 142, 22 dez. 2017. Complexo de Ensino Superior Meridional S.A. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.18256/2358-6508.2017.v4i2.2072>.

SCHWANTES, N. **Desempenho de bacillus sp. na biocimentação de materiais cimentícios**. 2017. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Edificações e

Saneamento, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2017.

SCHWANTES-CEZARIO, N. **Autocicatrização de Fissuras em Concreto por Adição de Bactérias**. 2020. Vídeo (49min). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=a0xKgg5LP-Y>. Acesso em: 23 jul. 2021.

SCHWANTES-CEZÁRIO, N. **Case Startup - Concreto Regenerativo Autocicatrizante (Cimebio)**. 2021. Construtech Week 2021 - PAINEL ACADEMIA E MERCADO. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=hxSUJzeGwZY>. Acesso em: 11 mai. 2022.

SIDIQ, A.; GRAVINA, R.; GIUSTOZZI, F. Is concrete healing really efficient? A review. **Construction and Building Materials**, [S.L.] 30 abr. 2019, p. 257–273. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.002>

SISOMPHON, K.; COPUROGLU, O.; KOENDERS, E.A.B. Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive. **Cement and Concrete Composites**, [S.L.], v. 34, n. 4, p. 566-574, abr. 2012. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.01.005>.

STUCKRATH, C. et al. Quantification of chemical and biological calcium carbonate precipitation: Performance of self-healing in reinforced mortar containing chemical admixtures. **Cement and Concrete Composites**, v. 50, p. 10–15, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.02.005>

TANG, W.; KARDANI, O.; CUI, H. **Robust evaluation of self-healing efficiency in cementitious materials - A review** **Construction and Building Materials** Elsevier Ltd, , 15 abr. 2015.

TITTELBOOM, K. V. *et al.* Use of bacteria to repair cracks in concrete. **Cement and Concrete Research**, [S.L.], v. 40, n. 1, p. 157-166, jan. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.025>.

TITTELBOOM, K. V.; BELIE, N. Self-Healing in Cementitious Materials: A Review. **Materials**, [S.L.], v. 6, n. 6, p. 2182-2217, 27 maio 2013. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma6062182>.

TORTORA, G. J.; FUNKE, B. R.; CASE, C. L. **Microbiologia**. 12. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

VALENCIA GONZÁLEZ, Y.; SANTANA, Â. P.; CARVALHO, J. C. DE. Bactérias nativas indutoras de precipitação de minerais de carbonato de cálcio em solos tropicais. **Revista de la Sociedad Venezolana de Microbiología**, v. 34, n. 1, p. 15–21, 2014.

VANDINE, R; WEST, C.; HANSEN, M. Self-healing concrete. **Concrete under Severe Conditions**, Two Volume Set, [S.L.], p. 927-934, 28 maio 2010. CRC Press. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1201/b10552-117>

VIEIRA, G. L. **Influência da microfissuração causada por carregamento precoce nas propriedades mecânicas de concretos produzidos com diferentes tipos de cimento**.

2008. 189 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

VIJAY, K.; MURMU, M.; DEO, S. V. Bacteria based self-healing concrete: a review. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 152, p. 1008-1014, out. 2017. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.040>

WANG, J. *et al.* Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 26, n. 1, p. 532-540, jan. 2012. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.054>

WANG, J. *et al.* A chitosan based pH-responsive hydrogel for encapsulation of bacteria for self-sealing concrete. **Cement and Concrete Composites**, [S.L.], v. 93, p. 309-322, out. 2018. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.08.007>

WANG, J. Y. *et al.* **Potential of applying bacteria to heal cracks in concrete**. 2nd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies. Anais. 2010.

WANG, J.Y. *et al.* Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores. **Cement and Concrete Research**, [S.L.], v. 56, p. 139-152, fev. 2014a. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.11.009>.

WANG, J.Y. *et al.* Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 68, p. 110-119, out. 2014b. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.018>

WIKTOR, V.; JONKERS, H. M. Un nouveau béton auto-cicatrisant grâce à l'incorporation de bactéries. **Matériaux & Techniques**, [S.L.], v. 99, n. 5, p. 565-571, 2011. EDP Sciences. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1051/mattech/20111110>.

WIKTOR, V.; JONKERS, H.M. Field performance of bacteria-based repair system: pilot study in a parking garage. **Case Studies in Construction Materials**, [S.L.], v. 2, p. 11-17, jun. 2015. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2014.12.004>.

WIKTOR, V.; JONKERS, H. M. Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. **Cement and Concrete Composites**, [S.L.], v. 33, n. 7, p. 763-770, ago. 2011. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.03.012>

XU, H. *et al.* Self-healing concrete using rubber particles to immobilize bacterial spores. **Materials**, v. 12, n. 14, 1 jul. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/ma12142313>

XU, J; WANG, X. Self-healing of concrete cracks by use of bacteria-containing low alkali cementitious material. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 167, p. 1-14, abr. 2018. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.020>.

XU, J.; YAO, W. Multiscale mechanical quantification of self-healing concrete incorporating non-ureolytic bacteria-based healing agent. **Cement and Concrete Research**, [S.L.], v.

64, p. 1-10, out. 2014. Elsevier BV. Disponível em:  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.06.003>.

ZHANG, J. *et al.* Immobilizing bacteria in expanded perlite for the crack self-healing in concrete. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 148, p. 610-617, set. 2017. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.021>.

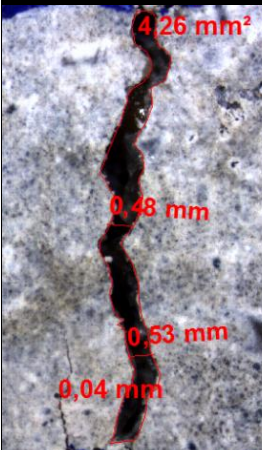

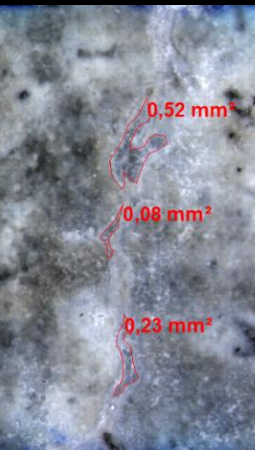

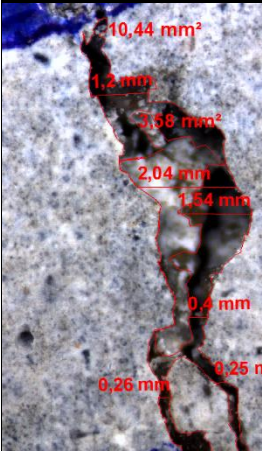
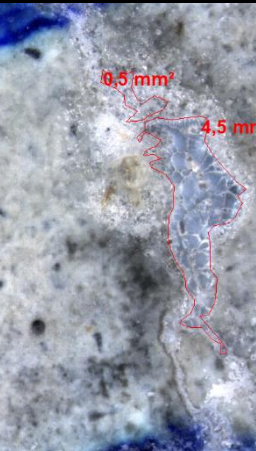
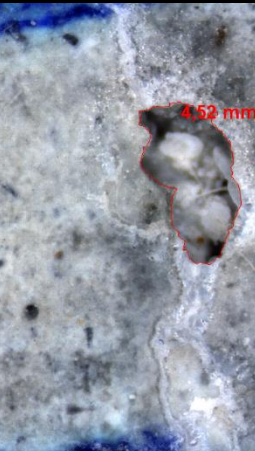
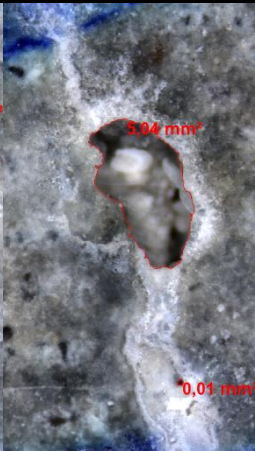
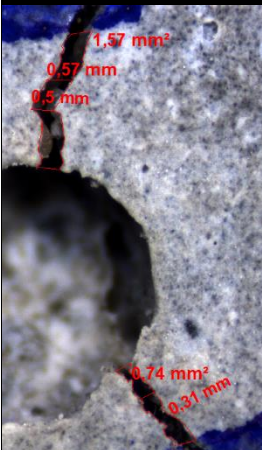
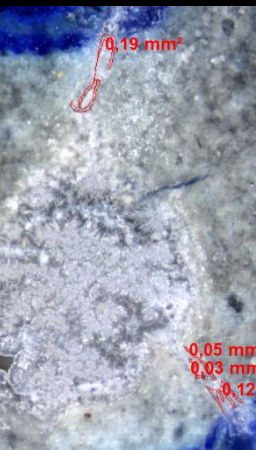


ZHANG, W. *et al.* Self-healing cement concrete composites for resilient infrastructures: a review. **Composites Part B: Engineering**, [S.L.], v. 189, p. 107892, maio 2020. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107892>

## APÊNDICES

## APÊNDICE A – CÁLCULOS DO TEOR DE AR INCORPORADO NA ARGAMASSA

0% de aditivo			ESCOLHIDO			0,10% de aditivo		
CALIBRAÇÃO DO RECIPIENTE CILÍNDRICO			CALIBRAÇÃO DO RECIPIENTE CILÍNDRICO			CALIBRAÇÃO DO RECIPIENTE CILÍNDRICO		
Recipiente vazio com a placa de vidro	mV	1255,75	Recipiente vazio com a placa de vidro	mV	1255,75	Recipiente vazio com a placa de vidro	mV	1255,75
Recipiente com água e placa de vidro	ma	1657,5	Recipiente com água e placa de vidro	ma	1657,5	Recipiente com água e placa de vidro	ma	1657,5
Volume: Vr = ma - mv		401,75	Volume: Vr = ma - mv		401,75	Volume: Vr = ma - mv		401,75
DENSIDADE DA MASSA			DENSIDADE DA MASSA			DENSIDADE DA MASSA		
Massa do molde com argamassa (g)	mC	2023,05	Massa do molde com argamassa (g)	mC	1,98898	Massa do molde com argamassa (g)	mC	1980,59
Massa do molde vazio (g)	mV	1183,46	Massa do molde vazio (g)	mV	1,18346	Massa do molde vazio (g)	mV	1183,46
Volume do recipiente	Vr	401,75	Volume do recipiente	Vr	0,40175	Volume do recipiente	Vr	401,75
$d = \frac{mc - mv}{vr} \times 1000$			$d = \frac{mc - mv}{vr} \times 1000$			$d = \frac{mc - mv}{vr} \times 1000$		
Densidade (kg/m³)	d	2089,83	Densidade (kg/m³)	d	2005,03	Densidade (kg/m³)	d	1984,14
TEOR DE AR INCORPORADO			TEOR DE AR INCORPORADO			TEOR DE AR INCORPORADO		
$A = 100 \left(1 - \frac{d}{dt}\right)$			$A = 100 \left(1 - \frac{d}{dt}\right)$			$A = 100 \left(1 - \frac{d}{dt}\right)$		
Teor de ar incorporado (%)	A	6,86	Teor de ar incorporado (%)	A	10,64	Teor de ar incorporado (%)	A	11,57
Densidade calculada	d	2089,83	Densidade calculada	d	2005,028	Densidade calculada	d	1984,14
Densidade de massa teórica	dt	2243,75	Densidade de massa teórica	dt	2243,77	Densidade de massa teórica	dt	2243,76
$dt = \frac{\sum mi}{\sum \frac{mi}{yi}}$			$dt = \frac{\sum mi}{\sum \frac{mi}{yi}}$			$dt = \frac{\sum mi}{\sum \frac{mi}{yi}}$		
Massa seca de cada componente da argamassa + massa da água	$\sum mi$	901,4258	Massa seca de cada componente da argamassa + massa da água	$\sum mi$	901,42138	Massa seca de cada componente da argamassa + massa da água	$\sum mi$	901,4258
Massa específica de cada componente da argamassa	$\sum yi$	6,621	Massa específica de cada componente da argamassa	$\sum yi$	7,631	Massa específica de cada componente da argamassa	$\sum yi$	7,631
Volume		401,75	Volume		0,40175	Volume		401,75
Quantidade de material para o volume calibrado			Quantidade de material para o volume calibrado			Quantidade de material para o volume calibrado		
Material	Qtidade	Massa específica	Material	Qtidade	Massa específica	Material	Qtidade	Massa específica
Cimento	201,21	3,111	Cimento	201,21	3,111	Cimento	201,21	3,111
Areia	603,63	2,51	Areia	603,63	2,51	Areia	603,63	2,51
Água	96,58	1	Água	96,48	1	Água	96,38	1
			Aditivo	0,10	1,01	Aditivo	0,20	1,01

**APÊNDICE B – CÁLCULO DA TAXA E ÍNDICE DE CICATRIZAÇÃO DE AMOSTRAS ARMADAS**

<b>M-REF</b>				
7 dias (L <sub>0</sub> )	14 dias	28 dias	70 dias	Autocicatrização
				$A_0 = 4,26 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,50 \text{ mm}$
				$A_{14} = 1,07 \text{ mm}^2$ $T_{C14} = 74,90 \%$ $I_{C14} = 37,45 \%$
				$A_{28} = 0,44 \text{ mm}^2$ $T_{C28} = 79,34 \%$ $I_{C28} = 39,67 \%$
				$A_{70} = 0,26 \text{ mm}^2$ $T_{C70} = 93,90 \%$
				<b>I<sub>C70</sub> = 46,95</b>
				$A_0 = 12,23 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,83 \text{ mm}$
				$A_{14} = 2,5 \text{ mm}^2$ $T_{C14} = 79,56 \%$ $I_{C14} = 66,03 \%$
				$A_{28} = 4,52 \text{ mm}^2$ $T_{C28} = 63,04 \%$ $I_{C28} = 52,32 \%$
				$A_{70} = 5,05 \text{ mm}^2$ $T_{C70} = 58,71 \%$
				<b>I<sub>C70</sub> = 48,73 %</b>
				$A_0 = 2,31 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,46 \text{ mm}$
				$A_{14} = 0,21 \text{ mm}^2$ $T_{C14} = 90,91 \%$ $I_{C14} = 41,82 \%$
				$A_{28} = 0,45 \text{ mm}^2$ $T_{C28} = 80,52 \%$ $I_{C28} = 37,04 \%$
				$A_{70} = 0 \text{ mm}^2$ $T_{C70} = 100 \%$
				<b>I<sub>C70</sub> = 46,00 %</b>
Índice de cicatrização médio	48,43%	43,01%	<b>I<sub>Cm</sub> = 47,23%</b>	

M-REFair				
7 dias (L <sub>0</sub> )	14 dias	28 dias	70 dias	Autocicatrização
				$A_0 = 2,72 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,35 \text{ mm}$ $A_{14} = 3,27 \text{ mm}^2$ $T_{C14} = -20,0\%$ $I_{C14} = -7,00\%$ $A_{28} = 1,52 \text{ mm}^2$ $T_{C28} = 44,12\%$ $I_{C28} = 15,44\%$ $A_{70} = 0,32 \text{ mm}^2$ $T_{C70} = 88,24\%$ $I_{C70} = 30,88\%$
				$A_0 = 3,45 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,37 \text{ mm}$ $A_{14} = 2,98 \text{ mm}^2$ $T_{C14} = 13,62\%$ $I_{C14} = 5,04\%$ $A_{28} = 0,45 \text{ mm}^2$ $T_{C28} = 86,96\%$ $I_{C28} = 32,18\%$ $A_{70} = 0 \text{ mm}^2$ $T_{C70} = 100\%$ $I_{C70} = 37,00\%$
				$A_0 = 2,55 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,29 \text{ mm}$ $A_{14} = 0,89 \text{ mm}^2$ $T_{C14} = 65,10\%$ $I_{C14} = 18,88\%$ $A_{28} = 0,19 \text{ mm}^2$ $T_{C28} = 92,55\%$ $I_{C28} = 26,84\%$ $A_{70} = 0,14 \text{ mm}^2$ $T_{C70} = 94,51\%$ $I_{C70} = 27,41\%$
Índice de cicatrização médio	5,64%	24,82%	<b>lcm = 31,76%</b>	

AP91				
7 dias (L <sub>0</sub> )	14 dias	28 dias	70 dias	Autocicatrização
				$A_0 = 2,50 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,43\text{mm}$ $A_{14} = 0,68 \text{ mm}^2$ $T_{C14} = 72,80\%$ $I_{C14} = 31,30\%$ $A_{28} = 0,48\text{mm}^2$ $T_{C28} = 80,80\%$ $I_{C28} = 34,74\%$ $A_{70} = 0,31 \text{ mm}^2$ $T_{C70} = 87,60\%$ $I_{C70} = 37,67\%$
				$A_0 = 4,28\text{mm}^2$ $e_m = 0,55\text{mm}$ $A_{14} = 0,55 \text{ mm}^2$ $T_{C14} = 87,15\%$ $I_{C14} = 47,93\%$ $A_{28} = 0,18 \text{ mm}^2$ $T_{C28} = 95,80\%$ $I_{C28} = 52,69\%$ $A_{70} = 0,015 \text{ mm}^2$ $T_{C70} = 99,65\%$ $I_{C70} = 54,81\%$
				$A_0 = 5,66 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,72\text{mm}$ $A_{14} = 2,50 \text{ mm}^2$ $T_{C14} = 55,83\%$ $I_{C14} = 40,20\%$ $A_{28} = 2,44 \text{ mm}^2$ $T_{C28} = 56,89\%$ $I_{C28} = 40,96\%$ $A_{70} = 0,67 \text{ mm}^2$ $T_{C70} = 88,16\%$ $I_{C70} = 63,48\%$
Índice de cicatrização médio	39,81%	42,80%	<b>I<sub>Cm</sub> = 51,98%</b>	

AP91air				
7 dias (L <sub>0</sub> )	14 dias	28 dias	70 dias	Autocicatrização
				$A_0 = 9,55 \text{ mm}^2$ $e_m = 1,2 \text{ mm}$ $A_{14} = 7,57 \text{ mm}^2$ $Tc_{14} = 20,74\%$ $Ic_{14} = 24,89\%$ $A_{28} = 7,26 \text{ mm}^2$ $Tc_{28} = 23,98\%$ $Ic_{28} = 28,78\%$ $A_{70} = 2,67 \text{ mm}^2$ $Tc_{70} = 72,04\%$ $Ic_{70} = 86,45\%$
				$A_0 = 1,61 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,37 \text{ mm}$ $A_{14} = 0,56 \text{ mm}^2$ $Tc_{14} = 65,22\%$ $Ic_{14} = 24,13\%$ $A_{28} = 0,45 \text{ mm}^2$ $Tc_{28} = 72,05\%$ $Ic_{28} = 26,66\%$ $A_{70} = 0,21 \text{ mm}^2$ $Tc_{70} = 86,96\%$ $Ic_{70} = 32,18\%$
				$A_0 = 4,03 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,74 \text{ mm}$ $A_{14} = 3,19 \text{ mm}^2$ $Tc_{14} = 20,84\%$ $Ic_{14} = 15,42\%$ $A_{28} = 2,57 \text{ mm}^2$ $Tc_{28} = 36,23\%$ $Ic_{28} = 26,81\%$ $A_{70} = 1,09 \text{ mm}^2$ $Tc_{70} = 72,95\%$ $Ic_{70} = 53,98\%$
Índice de cicatrização médio	21,48%	27,41%	<b>Ic<sub>m</sub> = 57,54%</b>	

BC				
7 dias (L <sub>0</sub> )	14 dias	28 dias	70 dias	Autocicatrização
				$A_0 = 2,36 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,57 \text{ mm}$ $A_{14} = 1,66 \text{ mm}^2$ $Tc_{14} = 28,81\%$ $Ic_{14} = 16,42\%$ $A_{28} = 1,38 \text{ mm}^2$ $Tc_{28} = 41,53\%$ $Ic_{28} = 23,67\%$ $A_{70} = 0,12 \text{ mm}^2$ $Tc_{70} = 94,92\%$ $Ic_{70} = 54,10\%$
				$A_0 = 3,48 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,55 \text{ mm}$ $A_{14} = 3,11 \text{ mm}^2$ $Tc_{14} = 10,63\%$ $Ic_{14} = 5,85\%$ $A_{28} = 2,79 \text{ mm}^2$ $Tc_{28} = 19,83\%$ $Ic_{28} = 10,91\%$ $A_{70} = 1,20 \text{ mm}^2$ $Tc_{70} = 65,52\%$ $Ic_{70} = 36,04\%$
				$A_0 = 3,82 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,41 \text{ mm}$ $A_{14} = 3,38 \text{ mm}^2$ $Tc_{14} = 11,52\%$ $Ic_{14} = 4,72\%$ $A_{28} = 3,89 \text{ mm}^2$ $Tc_{28} = -1,83\%$ $Ic_{28} = -0,75\%$ $A_{70} = 0,895 \text{ mm}^2$ $Tc_{70} = 76,57\%$ $Ic_{70} = 31,39\%$
Índice de cicatrização médio	9,00%	11,28%	<b>Ic<sub>m</sub> = 40,51%</b>	

<b>BCair</b>				
7 dias (L <sub>0</sub> )	14 dias	28 dias	70 dias	Autocicatrização
				$A_0 = 3,25 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,36 \text{ mm}$ $A_{14} = 1,45 \text{ mm}^2$ $Tc_{14} = 55,38\%$ $Ic_{14} = 19,94\%$ $A_{28} = 0,9 \text{ mm}^2$ $Tc_{28} = 72,31\%$ $Ic_{28} = 26,03\%$ $A_{70} = 0,44 \text{ mm}^2$ $Tc_{70} = 86,46\%$ $Ic_{70} = 31,13\%$
				$A_0 = 4,51 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,65 \text{ mm}$ $A_{14} = 1,10 \text{ mm}^2$ $Tc_{14} = 75,61\%$ $Ic_{14} = 49,15\%$ $A_{28} = 1,56 \text{ mm}^2$ $Tc_{28} = 65,41\%$ $Ic_{28} = 42,52\%$ $A_{70} = 1,01 \text{ mm}^2$ $Tc_{70} = 77,61\%$ $Ic_{70} = 50,45\%$
				$A_0 = 4,02 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,54 \text{ mm}$ $A_{14} = 0,59 \text{ mm}^2$ $Tc_{14} = 85,32\%$ $Ic_{14} = 46,07\%$ $A_{28} = 0,83 \text{ mm}^2$ $Tc_{28} = 79,35\%$ $Ic_{28} = 42,85\%$ $A_{70} = 0,36 \text{ mm}^2$ $Tc_{70} = 91,04\%$ $Ic_{70} = 49,16\%$
Índice de cicatrização médio	38,39%	37,13%	<b>Ic<sub>m</sub> = 43,58%</b>	

<b>BS</b>				
7 dias (L <sub>0</sub> )	14 dias	28 dias	70 dias	Autocicatrização
				$A_0 = 4,81 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,53 \text{ mm}$
				$A_{14} = 1,00 \text{ mm}^2$ $T_{C14} = 79,21\%$ $I_{C14} = 41,98\%$
				$A_{28} = 0,45 \text{ mm}^2$ $T_{C28} = 90,65\%$ $I_{C28} = 48,04\%$
				$A_{70} = 0 \text{ mm}^2$ $T_{C70} = 100\%$
				<b><math>I_{C70} = 53,00\%</math></b>
				$A_0 = 4,98 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,5 \text{ mm}$
				$A_{14} = 2,13 \text{ mm}^2$ $T_{C14} = 57,23\%$ $I_{C14} = 28,62\%$
				$A_{28} = 0,55 \text{ mm}^2$ $T_{C28} = 88,96\%$ $I_{C28} = 44,48\%$
				$A_{70} = 0,23 \text{ mm}^2$ $T_{C70} = 95,38\%$
				<b><math>I_{C70} = 47,69\%</math></b>
				$A_0 = 4,00 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,65 \text{ mm}$
				$A_{14} = 2,08 \text{ mm}^2$ $T_{C14} = 48,00\%$ $I_{C14} = 31,20\%$
				$A_{28} = 0,67 \text{ mm}^2$ $T_{C28} = 83,25\%$ $I_{C28} = 54,11\%$
				$A_{70} = 0,15 \text{ mm}^2$ $T_{C70} = 96,25\%$
				<b><math>I_{C70} = 62,56\%</math></b>
Índice de cicatrização médio	33,93%	48,88%	<b><math>I_{Cm} = 54,42\%</math></b>	

BSair				
7 dias (L <sub>0</sub> )	14 dias	28 dias	70 dias	Autocicatrização
				$A_0 = 6,3\text{mm}^2$ $e_m = 0,85$ $A_{14} = 4,06\text{ mm}^2$ $T_{C14} = 35,56\%$ $I_{C14} = 30,23\%$ $A_{28} = 5,44\text{mm}^2$ $T_{C28} = 13,65\%$ $I_{C28} = 11,60\%$ $A_{70} = 0,54\text{mm}^2$ $T_{C70} = 91,43\%$ $I_{C70} = 77,72\%$
				$A_0 = 5,39\text{ mm}^2$ $e_m = 0,78$ $A_{14} = 1,97\text{ mm}^2$ $T_{C14} = 63,45\%$ $I_{C14} = 49,49\%$ $A_{28} = 4,25\text{ mm}^2$ $T_{C28} = 21,15\%$ $I_{C28} = 16,50\%$ $A_{70} = 0,065\text{ mm}^2$ $T_{C70} = 98,79\%$ $I_{C70} = 77,06\%$
				$A_0 = 6,77\text{ mm}^2$ $e_m = 0,91$ $A_{14} = 2,77\text{ mm}^2$ $T_{C14} = 59,08\%$ $I_{C14} = 53,76\%$ $A_{28} = 2,97\text{ mm}^2$ $T_{C28} = 56,13\%$ $I_{C28} = 51,08\%$ $A_{70} = 0,29\text{ mm}^2$ $T_{C70} = 95,72\%$ $I_{C70} = 87,11\%$
Índice de cicatrização médio	44,49%	26,39%	$I_{Cm} = 80,63\%$	

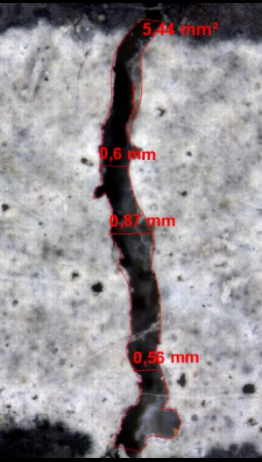

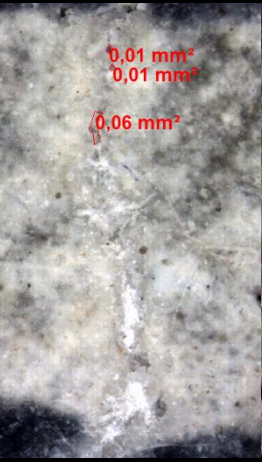
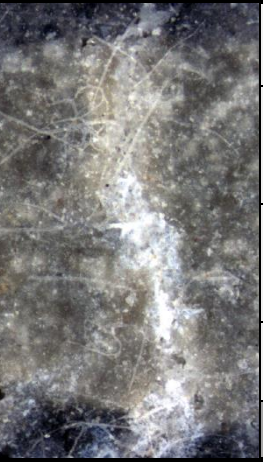
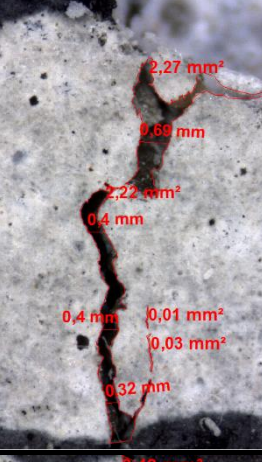
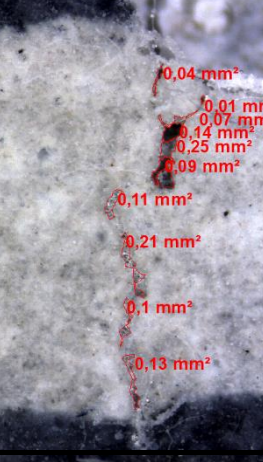
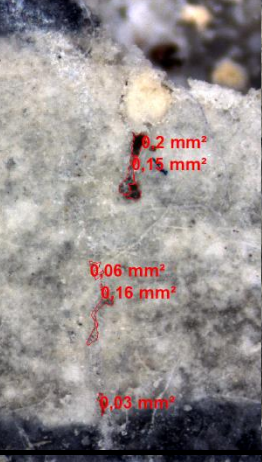
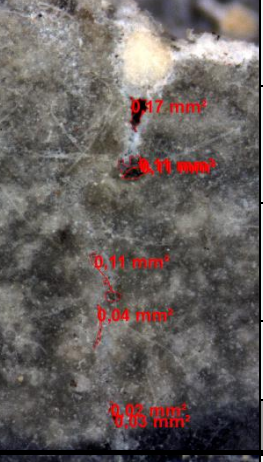
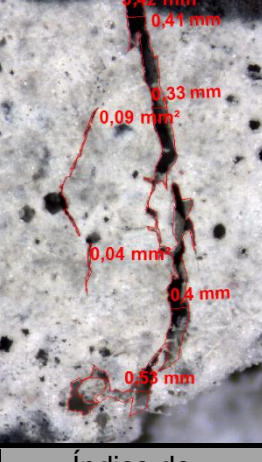
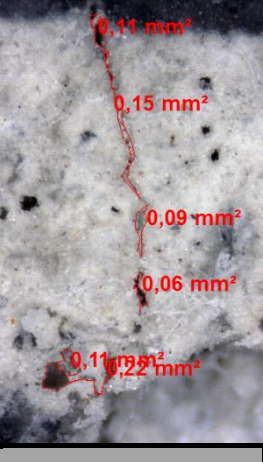
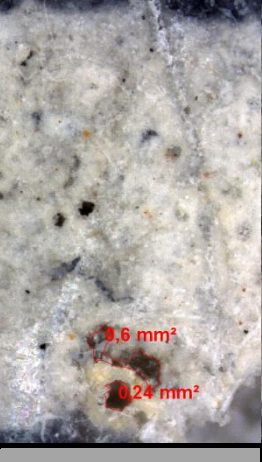
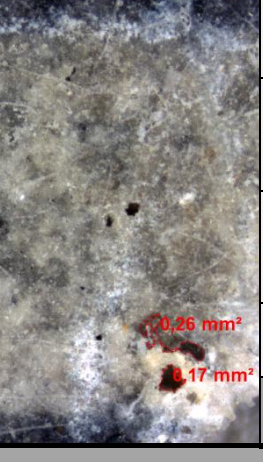
AP91_1-1				
7 dias (L <sub>0</sub> )	14 dias	28 dias	70 dias	Autocicatrização
				$A_0 = 3,17 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,39 \text{ mm}$ $A_{14} = 1,18 \text{ mm}^2$ $Tc_{14} = 62,78\%$ $Ic_{14} = 24,48\%$ $A_{28} = 0,27 \text{ mm}^2$ $Tc_{28} = 91,48\%$ $Ic_{28} = 35,68\%$ $A_{70} = 0,66 \text{ mm}^2$ $Tc_{70} = 79,18\%$ <b><math>Ic_{70} = 30,88\%</math></b>
				$A_0 = 1,66 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,26 \text{ mm}$ $A_{14} = 0,38 \text{ mm}^2$ $Tc_{14} = 77,11\%$ $Ic_{14} = 20,05\%$ $A_{28} = 0,10 \text{ mm}^2$ $Tc_{28} = 93,98\%$ $Ic_{28} = 24,43\%$ $A_{70} = 0,58 \text{ mm}^2$ $Tc_{70} = 65,06\%$ <b><math>Ic_{70} = 16,92\%</math></b>
				$A_0 = 2,15 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,3 \text{ mm}$ $A_{14} = 0,36 \text{ mm}^2$ $Tc_{14} = 83,26\%$ $Ic_{14} = 24,98\%$ $A_{28} = 0,11 \text{ mm}^2$ $Tc_{28} = 94,88\%$ $Ic_{28} = 28,46\%$ $A_{70} = 0,85 \text{ mm}^2$ $Tc_{70} = 60,47\%$ <b><math>Ic_{70} = 18,14\%</math></b>
Índice de cicatrização médio	23,17%	29,53%	<b><math>Ic_m = 21,98\%</math></b>	

AP91_1-1air				
7 dias (L <sub>0</sub> )	14 dias	28 dias	70 dias	Autocicatrização
				$A_0 = 4,33 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,35 \text{ mm}$ $A_{14} = 1,92 \text{ mm}^2$ $Tc_{14} = 41,64\%$ $lc_{14} = 14,57\%$ $A_{28} = 0,82 \text{ mm}^2$ $Tc_{28} = 75,08\%$ $lc_{28} = 26,28\%$ $A_{70} = 0,73 \text{ mm}^2$ $Tc_{70} = 77,81\%$ $lc_{70} = 27,23\%$
				$A_0 = 4,33 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,5 \text{ mm}$ $A_{14} = 2,2 \text{ mm}^2$ $Tc_{14} = 49,19\%$ $lc_{14} = 24,60\%$ $A_{28} = 2,15 \text{ mm}^2$ $Tc_{28} = 50,35\%$ $lc_{28} = 25,18\%$ $A_{70} = 1,19 \text{ mm}^2$ $Tc_{70} = 72,52\%$ $lc_{70} = 36,26\%$
				$A_0 = 4,08 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,29 \text{ mm}$ $A_{14} = 1,46 \text{ mm}^2$ $Tc_{14} = 64,22\%$ $lc_{14} = 18,62\%$ $A_{28} = 0,4 \text{ mm}^2$ $Tc_{28} = 90,20\%$ $lc_{28} = 26,16\%$ $A_{70} = 0,29 \text{ mm}^2$ $Tc_{70} = 92,89\%$ $lc_{70} = 26,94\%$
Índice de cicatrização médio	19,26%	25,87%	<b>lc<sub>m</sub> = 30,14%</b>	

AP91_0,5-0,5				
7 dias (L <sub>0</sub> )	14 dias	28 dias	70 dias	Autocicatrização
				A <sub>0</sub> = 1,71 mm <sup>2</sup> e <sub>m</sub> = 0,2 mm
				A <sub>14</sub> = 0,87 mm <sup>2</sup> T <sub>C14</sub> = 49,12% I <sub>C14</sub> = 9,82%
				A <sub>28</sub> = 0,49 mm <sup>2</sup> T <sub>C28</sub> = 71,35% I <sub>C28</sub> = 14,27%
				A <sub>70</sub> = 0,20 mm <sup>2</sup> T <sub>C70</sub> = 88,30%
				<b>I<sub>C70</sub> = 17,66%</b>
				A <sub>0</sub> = 1,89 mm <sup>2</sup> e <sub>m</sub> = 0,29 mm
				A <sub>14</sub> = 0,56 mm <sup>2</sup> T <sub>C14</sub> = 70,37% I <sub>C14</sub> = 20,41%
				A <sub>28</sub> = 0,25 mm <sup>2</sup> T <sub>C28</sub> = 86,77% I <sub>C28</sub> = 25,16%
				A <sub>70</sub> = 0,18 mm <sup>2</sup> T <sub>C70</sub> = 90,48%
				<b>I<sub>C70</sub> = 26,24%</b>
				A <sub>0</sub> = 2,96 mm <sup>2</sup> e <sub>m</sub> = 0,35 mm
				A <sub>14</sub> = 0,84 mm <sup>2</sup> T <sub>C14</sub> = 71,62% I <sub>C14</sub> = 25,07%
				A <sub>28</sub> = 0,67 mm <sup>2</sup> T <sub>C28</sub> = 90,20% I <sub>C28</sub> = 31,57%
				A <sub>70</sub> = 0,20 mm <sup>2</sup> T <sub>C70</sub> = 93,24%
				<b>I<sub>C70</sub> = 32,63%</b>
Índice de cicatrização médio	18,43%	23,67%	<b>I<sub>Cm</sub> = 25,51%</b>	

AP91_0,5-0,5air				
7 dias (L <sub>0</sub> )	14 dias	28 dias	70 dias	Autocicatrização
				$A_0 = 10,11 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,91 \text{ mm}$ $A_{14} = 3,08 \text{ mm}^2$ $Tc_{14} = 69,54\%$ $Ic_{14} = 63,28\%$ $A_{28} = 2,09 \text{ mm}^2$ $Tc_{28} = 79,33\%$ $Ic_{28} = 72,19\%$ $A_{70} = 2,16 \text{ mm}^2$ $Tc_{70} = 78,64\%$ $Ic_{70} = 71,56\%$
				$A_0 = 7,04 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,61 \text{ mm}$ $A_{14} = 2,93 \text{ mm}^2$ $Tc_{14} = 58,38\%$ $Ic_{14} = 35,61\%$ $A_{28} = 1,97 \text{ mm}^2$ $Tc_{28} = 72,02\%$ $Ic_{28} = 43,93\%$ $A_{70} = 1,88 \text{ mm}^2$ $Tc_{70} = 73,30\%$ $Ic_{70} = 44,71\%$
				$A_0 = 5,05 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,49 \text{ mm}$ $A_{14} = 0,51 \text{ mm}^2$ $Tc_{14} = 89,91\%$ $Ic_{14} = 44,06\%$ $A_{28} = 0,07 \text{ mm}^2$ $Tc_{28} = 98,61\%$ $Ic_{28} = 48,32\%$ $A_{70} = 0,03 \text{ mm}^2$ $Tc_{70} = 99,41\%$ $Ic_{70} = 48,71\%$
Índice de cicatrização médio	47,65%	54,81%	<b>Ic<sub>m</sub> = 55,00%</b>	

AP91_1-0				
7 dias (L <sub>0</sub> )	14 dias	28 dias	70 dias	Autocicatrização
				$A_0 = 5,16 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,56 \text{ mm}$
				$A_{14} = 2,74 \text{ mm}^2$ $T_{C14} = 46,90\%$ $I_{C14} = 26,26\%$
				$A_{28} = 1,04 \text{ mm}^2$ $T_{C28} = 79,84\%$ $I_{C28} = 44,71\%$
				$A_{70} = 0,41 \text{ mm}^2$ $T_{C70} = 92,05\%$
				<b><math>I_{C70} = 51,55\%</math></b>
				$A_0 = 5,25 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,66 \text{ mm}$
				$A_{14} = 3,73 \text{ mm}^2$ $T_{C14} = 28,95\%$ $I_{C14} = 19,11\%$
				$A_{28} = 1,10 \text{ mm}^2$ $T_{C28} = 79,04\%$ $I_{C28} = 52,17\%$
				$A_{70} = 0,75 \text{ mm}^2$ $T_{C70} = 85,71\%$
				<b><math>I_{C70} = 56,57\%</math></b>
				$A_0 = 3,76 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,41 \text{ mm}$
				$A_{14} = 2,42 \text{ mm}^2$ $T_{C14} = 90,91\%$ $I_{C14} = 37,27\%$
				$A_{28} = 0,23 \text{ mm}^2$ $T_{C28} = 80,52\%$ $I_{C28} = 33,01\%$
				$A_{70} = 0 \text{ mm}^2$ $T_{C70} = 100\%$
				<b><math>I_{C70} = 41,00\%</math></b>
Índice de cicatrização médio	27,55%	43,30%	<b><math>I_{Cm} = 49,71\%</math></b>	

AP91_1-0air				
7 dias (L <sub>0</sub> )	14 dias	28 dias	70 dias	Autocicatrização
				$A_0 = 5,44 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,68 \text{ mm}$ $A_{14} = 1,23 \text{ mm}^2$ $T_{C14} = 77,39\%$ $I_{C14} = 52,63\%$ $A_{28} = 0,05 \text{ mm}^2$ $T_{C28} = 99,08\%$ $I_{C28} = 67,37\%$ $A_{70} = 0,00 \text{ mm}^2$ $T_{C70} = 100,00\%$ $I_{C70} = 68,00\%$
				$A_0 = 4,52 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,45 \text{ mm}$ $A_{14} = 0,72 \text{ mm}^2$ $T_{C14} = 84,07\%$ $I_{C14} = 37,83\%$ $A_{28} = 0,42 \text{ mm}^2$ $T_{C28} = 90,71\%$ $I_{C28} = 40,82\%$ $A_{70} = 0,45 \text{ mm}^2$ $T_{C70} = 90,04\%$ $I_{C70} = 40,52\%$
				$A_0 = 3,55 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,42 \text{ mm}$ $A_{14} = 0,57 \text{ mm}^2$ $T_{C14} = 83,94\%$ $I_{C14} = 35,25\%$ $A_{28} = 0,54 \text{ mm}^2$ $T_{C28} = 84,79\%$ $I_{C28} = 35,61\%$ $A_{70} = 0,43 \text{ mm}^2$ $T_{C70} = 87,89\%$ $I_{C70} = 36,91\%$
Índice de cicatrização médio	41,90%	47,94%	<b>I<sub>Cm</sub> = 48,48%</b>	

AP91_0-1				
7 dias (L <sub>0</sub> )	14 dias	28 dias	70 dias	Autocicatrização
				$A_0 = 2,81 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,37 \text{ mm}$ $A_{14} = 1,17 \text{ mm}^2$ $T_{C14} = 58,36\%$ $I_{C14} = 21,59\%$ $A_{28} = 0,48 \text{ mm}^2$ $T_{C28} = 82,92\%$ $I_{C28} = 30,68\%$ $A_{70} = 0,46 \text{ mm}^2$ $T_{C70} = 83,63\%$ $I_{C70} = 30,94\%$
				$A_0 = 3,30 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,35 \text{ mm}$ $A_{14} = 2,13 \text{ mm}^2$ $T_{C14} = 35,45\%$ $I_{C14} =$ $A_{28} = 0,46 \text{ mm}^2$ $T_{C28} = 86,06\%$ $I_{C28} = 30,12\%$ $A_{70} = 0,30 \text{ mm}^2$ $T_{C70} = 90,90\%$ $I_{C70} = 31,82\%$
				$A_0 = 2,43 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,29 \text{ mm}$ $A_{14} = 1,55 \text{ mm}^2$ $T_{C14} = 36,21\%$ $I_{C14} = 10,50\%$ $A_{28} = 0,59 \text{ mm}^2$ $T_{C28} = 75,72\%$ $I_{C28} = 21,96\%$ $A_{70} = 0,26 \text{ mm}^2$ $T_{C70} = 89,30\%$ $I_{C70} = 25,90\%$
Índice de cicatrização médio	14,83%	27,59%	$I_{Cm} = 29,55\%$	

AP91_0-1air				
7 dias (L <sub>0</sub> )	14 dias	28 dias	70 dias	Autocicatrização
				$A_0 = 2,83 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,39 \text{ mm}$ $A_{14} = 2,09 \text{ mm}^2$ $T_{C14} = 26,15\%$ $I_{C14} = 10,20\%$ $A_{28} = 0,15 \text{ mm}^2$ $T_{C28} = 94,70\%$ $I_{C28} = 36,93\%$ $A_{70} = 0,0 \text{ mm}^2$ $T_{C70} = 100\%$ $I_{C70} = 39,00\%$
				$A_0 = 8,05 \text{ mm}^2$ $e_m = 1,06 \text{ mm}$ $A_{14} = 7,3 \text{ mm}^2$ $T_{C14} = 9,32\%$ $I_{C14} = 9,88\%$ $A_{28} = 6,09 \text{ mm}^2$ $T_{C28} = 24,35\%$ $I_{C28} = 25,81\%$ $A_{70} = 0,84 \text{ mm}^2$ $T_{C70} = 89,57\%$ $I_{C70} = 94,94\%$
				$A_0 = 5,53 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,77 \text{ mm}$ $A_{14} = 4,71 \text{ mm}^2$ $T_{C14} = 14,83\%$ $I_{C14} = 11,42\%$ $A_{28} = 1,21 \text{ mm}^2$ $T_{C28} = 78,12\%$ $I_{C28} = 60,15\%$ $A_{70} = 0,72 \text{ mm}^2$ $T_{C70} = 86,98\%$ $I_{C70} = 66,97\%$
Índice de cicatrização médio	10,50%	40,97%	<b>I<sub>Cm</sub> = 66,97%</b>	

CÁLCULO DA TAXA E ÍNDICE DE CICATRIZAÇÃO DE AMOSTRAS SEM ARMADURA

M-REF				
1 dia (L <sub>0</sub> )	14 dias	28 dias	56 dias	Autocicatrização
				$A_0 = 1,44 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,19 \text{ mm}$ $A_{14} = 0,2 \text{ mm}^2$ $Tc_{14} = 86,11\%$ $Ic_{14} = 16,36\%$ $A_{28} = 0,26 \text{ mm}^2$ $Tc_{28} = 81,94\%$ $Ic_{28} = 15,57\%$ $A_{56} = 0,55 \text{ mm}^2$ $Tc_{56} = 61,81\%$ $Ic_{56} = 11,74\%$
				$A_0 = 1,2 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,17 \text{ mm}$ $A_{14} = 0,49 \text{ mm}^2$ $Tc_{14} = 59,17\%$ $Ic_{14} = 10,06\%$ $A_{28} = 0,25 \text{ mm}^2$ $Tc_{28} = 79,17\%$ $Ic_{28} = 13,46\%$ $A_{56} = 0,34 \text{ mm}^2$ $Tc_{56} = 71,67\%$ $Ic_{56} = 12,18\%$
				$A_0 = 0,84 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,1 \text{ mm}$ $A_{14} = 0,29 \text{ mm}^2$ $Tc_{14} = 65,48\%$ $Ic_{14} = 6,55\%$ $A_{28} = 0,24 \text{ mm}^2$ $Tc_{28} = 71,43\%$ $Ic_{28} = 7,14\%$ $A_{56} = 0,28 \text{ mm}^2$ $Tc_{56} = 66,67\%$ $Ic_{56} = 6,67\%$
Índice de cicatrização médio	10,99%	12,06%	<b>Ic<sub>m</sub> = 10,20%</b>	

M-REFair				
1 dia (L <sub>0</sub> )	14 dias	28 dias	56 dias	Autocicatrização
				$A_0 = 4,33 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,51 \text{ mm}$ $A_{14} = 5,09 \text{ mm}^2$ $Tc_{14} = -14,90\%$ $lc_{14} = -7,60\%$ $A_{28} = 2,69 \text{ mm}^2$ $Tc_{28} = 37,88\%$ $lc_{28} = 19,32\%$ $A_{56} = 2,23 \text{ mm}^2$ $Tc_{56} = 48,50\%$ <b><math>lc_{56} = 24,74\%</math></b>
				$A_0 = 3,17 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,38 \text{ mm}$ $A_{14} = 1,87 \text{ mm}^2$ $Tc_{14} = 41,01\%$ $lc_{14} = 15,58\%$ $A_{28} = 0,54 \text{ mm}^2$ $Tc_{28} = 82,97\%$ $lc_{28} = 31,53\%$ $A_{56} = 0,08 \text{ mm}^2$ $Tc_{56} = 97,48\%$ <b><math>lc_{56} = 37,04\%</math></b>
				$A_0 = 4,10 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,33 \text{ mm}$ $A_{14} = 1,61 \text{ mm}^2$ $Tc_{14} = 60,73\%$ $lc_{14} = 20,04\%$ $A_{28} = 0,35 \text{ mm}^2$ $Tc_{28} = 91,46\%$ $lc_{28} = 30,18\%$ $A_{56} = 0,21 \text{ mm}^2$ $Tc_{56} = 94,88\%$ <b><math>lc_{56} = 31,31\%</math></b>
Índice de cicatrização médio	9,34%	27,01%	<b><math>lc_m = 31,03\%</math></b>	

AP91				
1 dia (L <sub>0</sub> )	14 dias	28 dias	56 dias	Autocicatrização
				$A_0 = 4,25 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,77$
				$A_{14} = 3,63$ $Tc_{14} = 14,59\%$ $Ic_{14} = 11,23\%$
				$A_{28} = 3,82$ $Tc_{28} = 10,12\%$ $Ic_{28} = 7,79\%$
				$A_{56} = 2,19$ $Tc_{56} = 48,47\%$
				<b><math>Ic_{56} = 37,32\%</math></b>
				$A_0 = 2,46 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,36$
				$A_{14} = 2,07 \text{ mm}^2$ $Tc_{14} = 15,85\%$ $Ic_{14} = 5,71\%$
				$A_{28} = 1,61 \text{ mm}^2$ $Tc_{28} = 34,55\%$ $Ic_{28} = 12,44\%$
				$A_{56} = 0,91 \text{ mm}^2$ $Tc_{56} = 63,01\%$
				<b><math>Ic_{56} = 22,68\%</math></b>
				$A_0 = 3,15 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,38$
				$A_{14} = 2,56 \text{ mm}^2$ $Tc_{14} = 18,73\%$ $Ic_{14} = 7,12\%$
				$A_{28} = 2,01 \text{ mm}^2$ $Tc_{28} = 36,19\%$ $Ic_{28} = 13,75\%$
				$A_{56} = 0,79 \text{ mm}^2$ $Tc_{56} = 74,92\%$
				<b><math>Ic_{56} = 28,47\%</math></b>
Índice de cicatrização médio	8,04%	14,23%	$Ic_m = 26,84\%$	

AP91air				
1 dia (L <sub>0</sub> )	14 dias	28 dias	56 dias	Autocicatrização
				$A_0 = 3,52 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,48 \text{ mm}$ $A_{14} = 1,32 \text{ mm}^2$ $Tc_{14} = 62,50\%$ $Ic_{14} = 30,00\%$ $A_{28} = 0,82 \text{ mm}^2$ $Tc_{28} = 76,70\%$ $Ic_{28} = 36,82\%$ $A_{56} = 0,25 \text{ mm}^2$ $Tc_{56} = 92,90\%$ $Ic_{56} = 44,59\%$
				$A_0 = 6,61 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,75 \text{ mm}$ $A_{14} = 1,54 \text{ mm}^2$ $Tc_{14} = 76,70\%$ $Ic_{14} = 57,53\%$ $A_{28} = 0,99 \text{ mm}^2$ $Tc_{28} = 85,02\%$ $Ic_{28} = 63,77\%$ $A_{56} = 0,54 \text{ mm}^2$ $Tc_{56} = 91,83\%$ $Ic_{56} = 68,87\%$
				$A_0 = 9,86 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,99 \text{ mm}$ $A_{14} = 2,76 \text{ mm}^2$ $Tc_{14} = 72,01\%$ $Ic_{14} = 71,29\%$ $A_{28} = 0,92 \text{ mm}^2$ $Tc_{28} = 90,67\%$ $Ic_{28} = 89,76\%$ $A_{56} = 0,76 \text{ mm}^2$ $Tc_{56} = 92,29\%$ $Ic_{56} = 91,37\%$
Índice de cicatrização médio	52,94%	63,45%	<b>Ic<sub>m</sub> = 68,28%</b>	

<b>BC</b>				
1 dia (L <sub>0</sub> )	14 dias	28 dias	56 dias	Autocicatrização
				$A_0 = 3,91 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,42 \text{ mm}$ $A_{14} = 2,16 \text{ mm}^2$ $Tc_{14} = 44,76\%$ $Ic_{14} = 18,80\%$ $A_{28} = 1,50 \text{ mm}^2$ $Tc_{28} = 61,64\%$ $Ic_{28} = 25,89\%$ $A_{56} = 1,60 \text{ mm}^2$ $Tc_{56} = 59,08\%$ <b><math>Ic_{56} = 24,81\%</math></b>
				$A_0 = 2,83 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,29 \text{ mm}$ $A_{14} = 1,99 \text{ mm}^2$ $Tc_{14} = 29,68\%$ $Ic_{14} = 8,61\%$ $A_{28} = 1,23 \text{ mm}^2$ $Tc_{28} = 56,54\%$ $Ic_{28} = 16,40\%$ $A_{56} = 1,31 \text{ mm}^2$ $Tc_{56} = 53,71\%$ <b><math>Ic_{56} = 15,58\%</math></b>
				$A_0 = 3,14 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,29 \text{ mm}$ $A_{14} = 2,09 \text{ mm}^2$ $Tc_{14} = 33,44\%$ $Ic_{14} = 9,70\%$ $A_{28} = 1,55 \text{ mm}^2$ $Tc_{28} = 50,64\%$ $Ic_{28} = 14,69\%$ $A_{56} = 1,91 \text{ mm}^2$ $Tc_{56} = 39,17\%$ <b><math>Ic_{56} = 11,36\%</math></b>
Índice de cicatrização médio	12,37%	18,99%	<b><math>Ic_m = 17,25\%</math></b>	

BCair				
1 dia (L <sub>0</sub> )	14 dias	28 dias	56 dias	Autocicatrização
				$A_0 = 2,42 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,32 \text{ mm}$ $A_{14} = 0,66 \text{ mm}^2$ $T_{C14} = 72,73\%$ $I_{C14} = 23,27\%$ $A_{28} = 0,71 \text{ mm}^2$ $T_{C28} = 70,66\%$ $I_{C28} = 22,61\%$ $A_{56} = 0,02 \text{ mm}^2$ $T_{C56} = 99,17\%$ $I_{C56} = 31,73\%$
				$A_0 = 2,31 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,3 \text{ mm}$ $A_{14} = 1,31 \text{ mm}^2$ $T_{C14} = 43,29\%$ $I_{C14} = 12,99\%$ $A_{28} = 1,10 \text{ mm}^2$ $T_{C28} = 52,38\%$ $I_{C28} = 15,71\%$ $A_{56} = 0,07 \text{ mm}^2$ $T_{C56} = 96,97\%$ $I_{C56} = 29,09\%$
				$A_0 = 4,96 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,65 \text{ mm}$ $A_{14} = 1,95 \text{ mm}^2$ $T_{C14} = 60,69\%$ $I_{C14} = 39,45\%$ $A_{28} = 1,92 \text{ mm}^2$ $T_{C28} = 61,29\%$ $I_{C28} = 39,84\%$ $A_{56} = 0,82 \text{ mm}^2$ $T_{C56} = 83,47\%$ $I_{C56} = 54,26\%$
Índice de cicatrização médio	25,24%	26,05%	<b>I<sub>Cm</sub> = 38,36%</b>	

<b>BS</b>				
1 dia (L <sub>0</sub> )	14 dias	28 dias	56 dias	Autocicatrização
				$A_0 = 5,86 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,64 \text{ mm}$ $A_{14} = 3,54 \text{ mm}^2$ $Tc_{14} = 39,59\%$ $Ic_{14} = 25,34\%$ $A_{28} = 3,17 \text{ mm}^2$ $Tc_{28} = 45,90\%$ $Ic_{28} = 29,38\%$ $A_{56} = 2,26 \text{ mm}^2$ $Tc_{56} = 61,43\%$ $Ic_{56} = 39,32\%$
				$A_0 = 5,08 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,59 \text{ mm}$ $A_{14} = 3,58 \text{ mm}^2$ $Tc_{14} = 29,53\%$ $Ic_{14} = 17,42\%$ $A_{28} = 2,35 \text{ mm}^2$ $Tc_{28} = 53,74\%$ $Ic_{28} = 31,71\%$ $A_{56} = 0,3 \text{ mm}^2$ $Tc_{56} = 94,09\%$ $Ic_{56} = 55,51\%$
				$A_0 = 5,82 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,51 \text{ mm}$ $A_{14} = 4,18 \text{ mm}^2$ $Tc_{14} = 28,18\%$ $Ic_{14} = 14,37\%$ $A_{28} = 3,7 \text{ mm}^2$ $Tc_{28} = 36,43\%$ $Ic_{28} = 18,58\%$ $A_{56} = 0,99 \text{ mm}^2$ $Tc_{56} = 82,99\%$ $Ic_{56} = 42,32\%$
Índice de cicatrização médio	19,04%	26,55%	<b>Ic<sub>m</sub> = 45,72%</b>	

<b>BSair</b>				
1 dia (L <sub>0</sub> )	14 dias	28 dias	56 dias	Autocicatrização
				$A_0 = 2,91 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,42 \text{ mm}$ $A_{14} = 1,51 \text{ mm}^2$ $Tc_{14} = 48,11\%$ $Ic_{14} = 20,21\%$ $A_{28} = 0,83 \text{ mm}^2$ $Tc_{28} = 71,48\%$ $Ic_{28} = 30,02\%$ $A_{56} = 0,95 \text{ mm}^2$ $Tc_{56} = 67,35\%$ $Ic_{56} = 28,29\%$
				$A_0 = 1,89 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,29 \text{ mm}$ $A_{14} = 0,99 \text{ mm}^2$ $Tc_{14} = 47,62\%$ $Ic_{14} = 13,81\%$ $A_{28} = 0,93 \text{ mm}^2$ $Tc_{28} = 50,79\%$ $Ic_{28} = 14,73\%$ $A_{56} = 0,98 \text{ mm}^2$ $Tc_{56} = 48,15\%$ $Ic_{56} = 13,96\%$
				$A_0 = 2,32 \text{ mm}^2$ $e_m = 0,26 \text{ mm}$ $A_{14} = 1,16 \text{ mm}^2$ $Tc_{14} = 50\%$ $Ic_{14} = 13,00\%$ $A_{28} = 0,24 \text{ mm}^2$ $Tc_{28} = 89,66\%$ $Ic_{28} = 23,31\%$ $A_{56} = 0,19 \text{ mm}^2$ $Tc_{56} = 91,81\%$ $Ic_{56} = 23,87\%$
Índice de cicatrização médio	15,67%	22,69%	<b>Ic<sub>m</sub> = 22,04%</b>	

## APÊNDICE C – ÍNDICE DE CICATRIZAÇÃO DE FISSURAS AO LONGO DO TEMPO

Índice de cicatrização de amostras armadas fissuradas sem nutrientes ao longo do tempo

Amostra	Índice de cicatrização (%)		
	14 dias	28 dias	70 dias
M-REF	48,43	43,01	47,23
M-REF <i>air</i>	5,64	24,82	31,76
AP91	39,07	42,04	50,81
AP91 <i>air</i>	21,48	27,41	57,54
BC	9,00	11,28	40,51
BC <i>air</i>	38,39	37,13	43,58
BS	33,93	48,88	54,42
BS <i>air</i>	44,49	26,39	80,63

Fonte: Autora (2022)

Índice de cicatrização de amostras armadas fissuradas com nutrientes ao longo do tempo

Amostra	Índice de cicatrização (%)		
	14 dias	28 dias	70 dias
AP91_1-1	23,17	29,53	21,98
AP91_1-1 <i>air</i>	19,26	25,87	30,14
AP91_0,5-0,5	18,43	23,67	25,51
AP91_0,5-0,5 <i>air</i>	47,65	54,81	55,00
AP91_1-0	27,55	43,30	49,71
AP91_1-0 <i>air</i>	41,90	47,94	48,48
AP91_0-1	14,83	27,59	29,69
AP91_0-1 <i>air</i>	10,50	40,97	66,97

Fonte: Autora (2022)

Índice de cicatrização de amostras não armadas fissuradas ao longo do tempo

Amostra	Índice de cicatrização (%)		
	14 dias	28 dias	56 dias
M-REF	10,99	12,06	10,20
M-REF <i>air</i>	9,34	27,01	31,03
AP91	8,04	14,23	26,84
AP91 <i>air</i>	52,94	63,45	68,28
BC	12,37	18,99	17,25
BC <i>air</i>	25,24	26,05	38,36
BS	19,04	26,55	45,72
BS <i>air</i>	15,67	22,69	22,04

Fonte: Autora (2022)