

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS  
*CAMPUS* DE POÇOS DE CALDAS

**ALAN RODRIGO SORCE**

BIOMINERALIZAÇÃO EM CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO

Poços de Caldas/MG

2023

**ALAN RODRIGO SORCE**

**BIOMINERALIZAÇÃO EM CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Alfenas *campus* Poços de Caldas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientadora: Profa. Dra. Sylma Carvalho Maestrelli

Coorientador: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Eliana Cristina da Silva Rigo.

**POÇOS DE CALDAS/MG**

**2023**

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas  
Biblioteca Campus Poços de Caldas

Sorce, Alan Rodrigo.

Biomíneralização em Concretos de Alto Desempenho / Alan Rodrigo Sorce. - Poços de Caldas, MG, 2023.

83 f.: il. –

Orientador(a): Dra. Sylma Carvalho Maestrelli.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2023.

Bibliografia.

1. Autocura. 2. Concretos de Pós Reativos. 3. Biomíneralização. 4. Lysinibacillus sphaericus. 5. Concretos do Alto Desempenho. I. Maestrelli, Dra. Sylma Carvalho, orient. II. Título.

Ficha gerada automaticamente com dados fornecidos pelo autor.

ALAN RODRIGO SORCE

## BIOMINERALIZAÇÃO EM CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO

A Banca examinadora abaixo-assinada aprova a Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Ciência e Engenharia de Materiais.

Aprovada em: 25 de abril de 2023

Profa. Dra. Sylma Carvalho Maestrelli  
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Profa. Dra. Ana Paula Margarido  
Instituição: Centro Cerâmico do Brasil

Prof. Dr. Rodrigo Fernando Costa Marques  
Instituição: Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho



Documento assinado eletronicamente por **ANA PAULA MARGARIDO MENEGAZZO, Usuário Externo**, em 25/04/2023, às 16:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sylma Carvalho Maestrelli, Professor do Magistério Superior**, em 25/04/2023, às 16:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **RODRIGO FERNANDO COSTA MARQUES, Usuário Externo**, em 25/04/2023, às 16:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0975532** e o código CRC **EFC9C000**.

Dedico essa pesquisa à memória de uma pessoa que foi minha inspiração para me dedicar aos estudos. Ela abdicou seus estudos aos dezoito para criar seus filhos, pois desejava ser a responsável pela educação deles. Felizmente, concluiu seus estudos, pois sabia que a educação é a base de tudo e que o conhecimento nos abre portas para viver uma vida com mais sabedoria, intensidade e amor. Obrigado, MÃE, por ser presente na minha vida, me apoiando, me dando suporte, me acolhendo e celebrando junto à mim todas as minhas conquistas. Nossa última viagem, juntos, foi em prol desta pesquisa; um dia que guardarei com muito carinho no meu coração.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me assegurar saúde e disposição para que eu consiga batalhar e conseguir atingir meus objetivos e conquistas.

À minha orientadora Professora Doutora Sylma Carvalho Maestrelli pela excelente supervisão e orientação prestada nesta pesquisa, me auxiliando no planejamento, na busca de informações e na elaboração do projeto como um todo, além de me incentivar e colaborar com o desenvolvimento de minhas ideias.

Aos professores Luiz Antônio dos Reis e Dr<sup>a</sup>. Eliana Cristina da Silva Rigo por fornecer informações e procedimentos para realização desta pesquisa e aos professores Dr<sup>a</sup>. Carolina Del Roveri e Dr. José Gabriel Maluf Soler pelas correções e alterações sugeridas na banca de qualificação.

Ao Instituto Federal - IF Sul de Minas, Poços de Caldas, especialmente à Professora Dra. Karin Verônica Freitas Grillo, ao Centro Cerâmico do Brasil, especialmente à Dra. Ana Paula Margarido e à Polimix Concreto Ltda (Unidade Poços de Caldas), na pessoa de Roberto Félix de Souza Júnior. Instituições e profissionais esses que autorizaram a utilização de seus laboratórios para a conformação dos corpos de prova e caracterização mecânica. Ao técnico de laboratório Guilherme Rodrigues e aos meus colegas de pesquisa, Igor, Carolina, Marcos e Giovanna, que me auxiliaram, juntamente com a orientação, na familiarização do tema, direcionamento das pesquisas bibliográficas e execução dos ensaios.

À minha família, em especial à minha mãe, Elaine, ao meu pai, Onivaldo, e à minha irmã, Bruna, que sempre estiveram ao meu lado, me incentivando a caminhar em busca dos meus sonhos e desejos e me ensinando o valor do esforço, do trabalho e da paciência.

Aos meus amigos, Karine, Rafael, Luma e Amanda e Couto, em especial ao meu amigo Wendivan, que esteve ao meu lado me dando suporte e acompanhando de perto o desenvolvimento de toda a pesquisa e produção intelectual.

E por fim, à minha psicóloga Adriana e ao meu psiquiatra Luiz Felipe que me acompanharam durante todo o desenvolvimento do mestrado me auxiliando com conselhos, conversas, suporte e direcionamento emocional e mental para a conclusão desse projeto em meio às adversidades.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## RESUMO

A utilização de materiais cimentícios vêm preocupando cientistas e órgãos do mundo todo devido à crescente demanda de minerais na produção do concreto que chega a ser responsável por um décimo da emissão global de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono). Materiais cimentícios como o concreto convencional e a argamassa estão sujeitos à formação de fissuras, levando à necessidade de reparos e/ou reconstrução e conseqüentemente, demandando mais dos recursos minerais. Os concretos de alto desempenho, como o concreto de pós reativos (CPR), por apresentarem formulação sem agregado graúdo e uso de aditivos diferenciados, permitem a obtenção de maior homogeneidade microestrutural e propriedades mecânicas superiores quando comparados aos concretos tradicionais. Entretanto, eles não estão imunes à formação de fissuras. Várias são as alternativas de reparo, porém, grande parte delas gera produtos nocivos aos seres humanos e ao meio ambiente. Para contornar essa situação, uma alternativa vem ganhando notoriedade nas últimas décadas: a utilização de microrganismos no processo de autocura de matrizes cimentícias por meio da biomineralização de carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>). Visando compreender melhor a fenomenologia associada à utilização dessa técnica e sua aplicabilidade em matrizes de concretos de alto desempenho, esta pesquisa objetivou investigar como variáveis de processamento relacionadas ao processo de biomineralização afetam no processo de autocura desses concretos. Para tal, cápsulas de alginato de sódio foram produzidas e caracterizadas e bactérias *Lysinibacillus sphaericus* foram encapsuladas com sucesso no alginato de sódio. Após a caracterização das matérias primas constituintes dos CPR, três formulações (com adições de 0,5%, 1,0% e 1,5% de cápsulas) e uma referência (sem adição de cápsulas) foram caracterizadas, comprovando-se que a adição de cápsulas não afetou significativamente nenhuma das propriedades do concreto, seja no estado fresco ou endurecido. A fluidez do concreto manteve-se elevada, sem nenhum tipo de segregação, baixos índice de vazios (5,0~5,5%) e absorção de água (2,2~2,5%) foram obtidos para todas as formulações e os valores máximos atingidos para a resistência mecânica a compressão e a flexão após 28 dias foram de 83 e 20,8 MPa, respectivamente. Corpos de prova contendo as bactérias encapsuladas foram ensaiados mecanicamente e a superfície fraturada foi analisada por meio de microscopia ótica, na qual foi comprovado o processo de biomineralização por meio da ação das bactérias após o rompimento das cápsulas.

**Palavras-chave:** autocura; concretos de pós reativos; biomineralização; *Lysinibacillus sphaericus*; concretos de alto desempenho.

## ABSTRACT

The use of cementitious materials has been worrying scientists and organizations around the world. The growing demand for minerals in concrete production is responsible for one-tenth of the global emission of CO<sub>2</sub> (carbon dioxide). Cementitious materials, such as conventional concrete and mortar, are exposed to the formation of cracks, requiring repairs and/or reconstruction, and consequently, demanding more of mineral resources. Ultra-high-performance concretes, such as reactive powder concrete (RPC), since they do not contain coarse aggregate in its formulation and make use of differentiated additives, they allow the achievement of greater microstructural homogeneity and superior mechanical properties when compared to traditional concretes; however, they are not immune to the formation of fissures. There are several repair alternatives; however, most of them generate harmful products to humans and the environment. To overcome this situation, an alternative has been gaining notoriety in recent decades: the use of microorganisms in the process of self-healing cementitious matrices through the biomineralization of calcium carbonate (CaCO<sub>3</sub>). To better understand the phenomenology associated with the use of this technique and its applicability in ultra-high-performance concrete matrices, this research aims to investigate how processing variables related to the biomineralization process affect the self-healing process of these concretes. For this, sodium alginate capsules were produced and characterized and *Lysinibacillus sphaericus* bacteria were successfully encapsulated in sodium alginate. After characterization of the raw materials constituting the RCP, three formulations (with additions of 0.5%, 1.0% and 1.5% of capsules) and a reference (without addition of capsules) were characterized, proving that the addition of capsules does not significantly affect any of the properties of the concrete, either in the fresh and hardened state. The fluidity of the concrete remained high, without any kind of segregation; low voids index (5.0~5.5%) and water absorption (2.2~2.5%) were obtained for all formulations; the maximum values reached for compression and flexural strength after 28 days were 83 and 20.8 MPa, respectively. Specimens containing the encapsulated bacteria were mechanically tested and the fractured surface was analyzed by optical microscopy, where the biomineralization process was proven through the action of the bacteria after rupture of the capsules.

**Keywords:** self-healing; reactive powder concrete; biomineralization; *Lysinibacillus sphaericus*; ultra-high-performance concretes.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema de nomenclatura dos cimentos Portland. ....	22
Figura 2 – Processo de ação de fibras no controle de fissuras em concretos. ....	28
Figura 3 – Processo de preparação de CAD/CPR. ....	29
Figura 4 – Etapas de realização da pesquisa. ....	39
Figura 5 – Esquema de produção das cápsulas por gotejamento. ....	40
Figura 6 – Esquema de filtração à vácuo. ....	40
Figura 7 – Esquema de produção dos corpos de prova. ....	47
Figura 8 – Nomenclatura adotada para a identificação dos corpos de prova. ....	47
Figura 9 – Prensas utilizadas nos ensaios de compressão e flexão. ....	50
Figura 10 – Cápsulas de alginato de sódio, sendo (a) recém gotejadas e (b) secas. ....	52
Figura 11 – Secagem das cápsulas em estufa a 60 °C. ....	53
Figura 12 – Análise comparativa dos métodos de ensaio de intumescimento. ....	54
Figura 13 – Imagens das cápsulas de alginato de sódio obtidas por microscopia óptica. ....	55
Figura 14 – Difrátograma da Areia utilizada na pesquisa ....	56
Figura 15 – Difrátograma do pó de quartzo utilizado na pesquisa. ....	57
Figura 16 – Difrátograma da Microssílica utilizada na pesquisa. ....	57
Figura 17 – Microscopia óptica da areia. ....	58
Figura 18 – Esquema ilustrativo para orientação da avaliação da forma do agregado miúdo. ....	59
Figura 19 – Microscopia da microssílica e pó de quartzo. ....	59
Figura 20 – Curva granulométrica da areia. ....	60
Figura 21 – Médias das densidades obtidas e seus respectivos desvios padrões. ....	61
Figura 22 – Gráfico do coeficiente de inchamento da areia. ....	62
Figura 23 – Índice de Vazios e Absorção de água das formulações. ....	63
Figura 24 – Face de ruptura com presença de vazios (bolhas) e cápsulas. ....	64
Figura 25 – Valores da resistência à compressão agrupados em função da formulação. ....	65
Figura 26 – Resultados do ensaio de flexão. ....	66
Figura 27 – Imagens obtidas por meio de microscopia óptica. ....	68
Figura 28 – Imagens da ação bacteriana obtidas por Cruz (2023). ....	69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação do cimento Portland de acordo com a ABNT NBR 16697.....	21
Tabela 2 – Classificação de acordo com a espessura da fissura.....	32
Tabela 3 – Intensidade dos danos e efeitos causados de acordo com a abertura da fissura. ....	32
Tabela 4 – Nomenclatura dos corpos de prova produzidos.....	48
Tabela 5 – Idade de rompimento e sua tolerância permitida.....	49
Tabela 6 – Idade para ensaios de flexão e tempo de tolerância.....	50
Tabela A-1 – Medidas de intumescimento obtidas pelo teste simples.....	78
Tabela A-2 – Resultados de intumescimento obtidos pelo método de “saquinhos de chá”.....	78
Tabela A-3 – Resultados de intumescimento obtidos pelo método de “filtração.....	78
Tabela B-1 – Valores médios dos ensaios granulométricos.....	79
Tabela C-1 – Resultados do ensaio de massa específica da areia e tratamento estatístico.....	80
Tabela C-2 – Análise de Variância de fator único.....	80
Tabela C-3 – Análise comparativa por teste Q de Tukey.....	80
Tabela D-1 – Dados referentes ao ensaio de inchamento da areia.....	81
Tabela E-1 – Resultados do ensaio de Porosidade (Absorção de água e Índice de vazios).....	82
Tabela F-1 – Resultados dos ensaios de compressão.....	83
Tabela F-2 – Análise de Variância de fator único para os resultados de compressão.....	83
Tabela F-3 – Análise comparativa por teste Q de Tukey para os resultados da compressão...	83
Tabela G-1 – Resultados dos ensaios de flexão.....	84
Tabela G-2 – Análise de Variância de fator único para os resultados de flexão.....	84
Tabela G-3 – Análise comparativa por teste Q de Tukey para os resultados de flexão.....	84

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>μm</b>	Micrômetro
<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials
<b>C<sub>3</sub>A</b>	Silicato tricálcico
<b>C-S-H</b>	Silicatos de Cálcio Hidratados
<b>Cu-K<math>\alpha</math></b>	Radiação Cobre-Potássio-Alpha
<b>g</b>	Gramma
<b>kg</b>	Quilograma
<b>kV</b>	Quilovolts
<b>M</b>	Molar
<b>m/v</b>	Massa/Volume
<b>mA</b>	Miliampére
<b>mm</b>	Milímetro
<b>MPa</b>	Megapascal
<b>Mt</b>	Megatonelada
<b>NBR</b>	Norma Brasileira
<b>pH</b>	Potencial de Hidrogênio
<b>rpm</b>	Rotações por Minuto

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>16</b>
2.1 OBJETIVOS GERAIS .....	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
<b>3 JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>17</b>
3.1 DA JUSTIFICATIVA AMBIENTAL E ECONÔMICA .....	17
3.2 DA JUSTIFICATIVA CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA .....	18
<b>4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>19</b>
4.1 ARGAMASSAS E CONCRETOS CONVENCIONAIS .....	19
<b>4.1.1 Cimento</b> .....	<b>20</b>
<b>4.1.2 Agregados</b> .....	<b>22</b>
<b>4.1.3 Água de amassamento</b> .....	<b>23</b>
4.2 CONCRETOS DE PÓS REATIVOS (CPR).....	23
<b>4.2.1 Definição de Concreto de Alto Desempenho e Concreto de Pós Reativos</b> .....	<b>23</b>
<b>4.2.2 Materiais Constituintes</b> .....	<b>25</b>
4.2.2.1 <i>Cimento para CAD/CPR</i> .....	25
4.2.2.2 <i>Sílica Ativa / Microssílica</i> .....	25
4.2.2.3 <i>Agregados em CAD/CPR</i> .....	26
4.2.2.4 <i>Superplastificantes</i> .....	27
4.2.2.5 <i>Fibras</i> .....	28
<b>4.2.3 Conformação e Cura</b> .....	<b>29</b>
4.2.3.1 <i>Conformação / Preparo de amostras</i> .....	29
4.2.3.2 <i>Processo de Cura</i> .....	30
4.3 FISSURAS E DEFEITOS .....	31
<b>4.3.1 Surgimento e tipos de fissuras e defeitos</b> .....	<b>31</b>
<b>4.3.2 Tratamento de fissuras e defeitos</b> .....	<b>33</b>
4.4 BIOCONCRETO E OS MICRORGANISMOS NA AUTOCURA .....	33
<b>4.4.1 A Biomineralização</b> .....	<b>33</b>
<b>4.4.2 Espécies observadas</b> .....	<b>35</b>
<b>4.4.3 Crescimento Microbiano</b> .....	<b>35</b>
<b>4.4.4 Tipos de aplicação</b> .....	<b>36</b>
<b>5 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>38</b>

5.1 MATERIAIS .....	38
5.2 MÉTODOS.....	39
<b>5.2.1 Etapa I: Cápsulas de alginato de sódio.....</b>	<b>39</b>
5.2.1.1 <i>Obtenção das cápsulas de alginato de sódio</i> .....	39
5.2.1.2 <i>Caracterização das cápsulas de alginato de sódio</i> .....	41
5.2.1.3 <i>Cultivo e encapsulamento das bactérias no alginato de sódio</i> .....	42
<b>5.2.2 Etapa II: Concreto.....</b>	<b>42</b>
5.2.2.1 <i>Caracterização das matérias primas constituintes do concreto</i> .....	43
5.2.2.1.1 <i>Difração de raios X</i> .....	43
5.2.2.1.2 <i>Microscopia Ótica</i> .....	43
5.2.2.1.3 <i>Ensaio granulométricos</i> .....	44
5.2.2.1.4 <i>Ensaio de Massa Específica</i> .....	44
5.2.2.1.5 <i>Ensaio de inchamento</i> .....	45
5.2.2.2 <i>Preparação dos corpos de prova – CPR</i> .....	45
5.2.2.2.1 <i>Formulações</i> .....	45
5.2.2.2.2 <i>Procedimento para obtenção dos corpos de prova</i> .....	46
5.2.2.2.3 <i>Nomenclatura e caracterização dos corpos de provas</i> .....	47
5.2.2.3 <i>Caracterização dos corpos de provas</i> .....	49
5.2.2.3.1 <i>Absorção e índice de vazios (porosidade)</i> .....	49
5.2.2.3.2 <i>Ensaio de Compressão</i> .....	49
5.2.2.3.3 <i>Ensaio de Flexão a três pontos</i> .....	50
5.2.2.3.4 <i>Microscopia Ótica</i> .....	51
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>52</b>
6.1 ETAPA I: CÁPSULAS DE ALGINATO DE SÓDIO .....	52
<b>6.1.1 Obtenção das cápsulas de Alginato de Sódio .....</b>	<b>52</b>
<b>6.1.2 Caracterização das cápsulas de Alginato de Sódio.....</b>	<b>53</b>
6.2 ETAPA II: CONCRETO .....	56
<b>6.2.1 Caracterização das matérias primas.....</b>	<b>56</b>
6.2.1.1 <i>Difração de raios X</i> .....	56
6.2.1.2 <i>Microscopia Ótica</i> .....	58
6.2.1.3 <i>Ensaio Granulométricos</i> .....	60
6.2.1.4 <i>Ensaio de Massa Específica</i> .....	61

<i>6.2.1.5 Ensaio de Inchamento</i> .....	62
<b>6.2.2 Caracterização dos corpos de prova</b> .....	<b>63</b>
<i>6.2.2.1 Ensaio de Porosidade</i> .....	63
<i>6.2.2.2 Ensaio de compressão</i> .....	65
<i>6.2.2.3 Ensaio de Flexão</i> .....	66
<i>6.2.2.4 Microscopia Ótica</i> .....	67
<b>7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS</b> .....	<b>70</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>71</b>
<b>APÊNDICE A – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE INTUMESCIMENTO</b> .....	<b>78</b>
<b>APÊNDICE B – RESULTADOS DO ENSAIO GRANULOMÉTRICO</b> .....	<b>79</b>
<b>APÊNDICE C – RESULTADOS DO ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA</b> .....	<b>80</b>
<b>APÊNDICE D – RESULTADOS DO ENSAIO DE INCHAMENTO</b> .....	<b>81</b>
<b>APÊNDICE E – RESULTADOS DO ENSAIO DE POROSIDADE</b> .....	<b>82</b>
<b>APÊNDICE F – RESULTADOS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO</b> .....	<b>83</b>
<b>APÊNDICE G – RESULTADOS DO ENSAIO DE FLEXÃO</b> .....	<b>84</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A produção mundial de concretos vem crescendo ano a ano. Segundo dados da United States Geological Suvery (2020) a produção mundial atingiu patamares superiores à 4100 megatoneladas no ano de 2019.

Sendo um dos materiais mais consumidos no mundo, o cimento é um dos grandes responsáveis pela emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera devido ao seu processo produtivo – alguns estudos apontam que ele pode ser responsável por até 10% de toda emissão de CO<sub>2</sub> antropogênica (ANDALIB *et al.*, 2016; GONSALVES, 2011).

Apesar de possuírem uma excelente resistência à compressão, boa durabilidade e de poderem ser constituídos por uma grande diversidade de matéria primas – o que pode diminuir seu custo (JOSHI *et al.*, 2019) –, os materiais cimentícios estão suscetíveis à formação de fissuras devido a fatores físicos, químicos e biológicos provenientes da intensa urbanização e poluição (LI *et al.*, 2019). Essas fissuras exigem reparos e em alguns casos até mesmo substituições e, conseqüentemente, demandam ainda mais dos recursos minerais para sua produção, tais como o calcário, argila, areia e água (PELEGRINELLO, 2017).

Por esses motivos, os materiais cimentícios têm chamado a atenção da comunidade acadêmica, que busca meios de tornar argamassas e concretos em materiais mais sustentáveis e duradouros. O desenvolvimento de materiais de alto desempenho, como os concretos de pós reativos (CPR), possibilitou o aumento da resistência desses materiais e da sua longevidade.

Devido à alta concentração de cimento contendo baixo valores de C<sub>3</sub>A, somada à presença de sílica reativa, superplastificantes e fibras e também à existência da limitação do tamanho do grão na mistura (HELA; BODNAROVA; RUNDT, 2018), esse tipo de concreto apresenta alto índice de compactidade, homogeneidade e ductilidade quando comparado ao concreto tradicional. Conseqüentemente, concretos de pós reativos apresentam melhores valores de resistência à compressão, tração e flexão (BIZ, 2001; SHI *et al.*, 2015).

Entretanto, mesmo possuindo características de resistência elevadas, CPR também estão sujeitos à formação de fissuras. Métodos tradicionais no reparo de fissuras, tais como o uso de resinas epóxi, a aplicação de selantes impermeabilizantes e de revestimentos fibrosos, vêm sendo utilizados nos últimos anos. Grande parte deles, porém, apresentam toxicidade e durabilidade com resultados não satisfatórios (AMIRI; AZIMA; BUNDUR, 2018; JONGVIVATSAKUL *et al.*, 2019; PELEGRINELLO, 2017).

Uma das alternativas que vêm ganhando grande interesse e notoriedade pela comunidade acadêmica e científica – principalmente pela sua baixa toxicidade – é a utilização de microrganismos capazes de produzir o  $\text{CaCO}_3$ , os chamados *MICCP* - *Microbial induced calcium-carbonate precipitation* ou, em português, PMICC – Precipitação microbológica induzida de carbonato de cálcio.

Os PMICC possibilitam o fechamento de fissuras e a restauração das propriedades iniciais da estrutura por meio do processo de biomineralização (JONGVIVATSAKUL *et al.*, 2019; PELEGRINELLO, 2017). Embora apresente-se como uma alternativa promissora, a aplicação da PMICC ainda é limitada por alguns fatores responsáveis pela baixa taxa de sobrevivência dos microrganismos no meio, dentre eles destaca-se principalmente ao alto pH encontrado em materiais cimentícios (HEVERAN *et al.*, 2020).

Este projeto estudou as variáveis de processamento envolvidas no processo da biomineralização aplicadas a concretos de pós reativos, com o intuito de entender melhor a sua dinâmica e viabilidade, propondo melhorias e soluções aos problemas expostos anteriormente ainda não solucionados.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVOS GERAIS

Esta pesquisa objetivou investigar como as principais variáveis de processamento relacionadas ao processo de biomineralização (matérias primas constituintes, formulação e encapsulamento de bactérias) afetam no processo de autocura de concretos de pós reativos na construção civil.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir os objetivos gerais, foi necessário:

- a) Levantar e produzir informações em língua portuguesa (revisão bibliográfica) sobre bioconcretos, concretos de pós reativos e bactérias biomineralizadoras;
- b) Determinar as propriedades reológicas, físicas e mecânicas de uma formulação de concreto de pós reativos padrão normatizada;
- c) Inserir bactérias da espécie *Lysinibacillus sphaericus* encapsuladas na formulação padrão e investigar o efeito de como as variáveis de processamento: matérias primas constituintes, formulação e encapsulamento de bactérias influenciam no processo de biomineralização;
- d) Determinar as propriedades físicas e mecânicas de uma formulação de concreto de pós reativos com adições das bactérias, comparando os resultados com a formulação padrão sem adição de bactéria.

### 3 JUSTIFICATIVA

#### 3.1 DA JUSTIFICATIVA AMBIENTAL E ECONÔMICA

O desenvolvimento de novas tecnologias com intuito de minimizar impactos ambientais e a utilização de recursos renováveis de forma sustentável se fazem cada vez mais necessários, principalmente no âmbito da construção civil.

A produção de cimento, segundo a U.S. Geological Survey (2020), atingiu no ano de 2019 valores próximos dos 4.100 megatoneladas, sendo 55 megatoneladas referentes apenas à produção brasileira. A ampla produção de cimento, devido à sua demanda, torna seu processo de fabricação um dos principais emissores de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono). Estimativas apontam que a produção de cimento pode ser responsável por até 8% da emissão antropogênica global de CO<sub>2</sub> (ANDREW, 2018).

A fim de minimizar os impactos ambientais e econômicos e elevar o nível de sustentabilidade na produção de materiais e matrizes cimentícios, inúmeras alternativas vêm sendo pesquisadas e propostas. Uma delas é a utilização de organismos biológicos capazes de promover a autocura – a regeneração (mesmo que parcial) das propriedades da estrutura devido ao fechamento de fissuras por meio da deposição de camadas de carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) (GONSALVES, 2011).

De acordo com Zhu *et al.* (2015), a utilização de microrganismos na remediação de matrizes cimentícias, como argamassas e concreto, pode produzir menos poluição, reduzir o valor da mão-de-obra, promover a formação de uma camada de calcita coerente com o meio, além de aumentar a resistência à compressão, a durabilidade do material e reduzir a absorção e a permeabilidade à água (ACHAL *et al.*, 2015; CHAURASIA *et al.*, 2019; LI *et al.*, 2019).

Entretanto, apesar de possuir benefícios econômicos à longo prazo, e devido à pequena presença desse tipo de biomaterial no mercado, a inserção de microrganismos nos concretos convencionais ainda é uma realidade que eleva de maneira significativa o custo do material final.

Para melhor entender o processo de autocura em materiais cimentícios por meio de microrganismos e tendo em vista o seu custo de aplicação, a utilização de microrganismos pode ser mais bem justificada, neste momento, quando aplicada em materiais de alto desempenho como os concretos de pós reativos (CPR).

Os concretos de alto desempenho (CAD) possuem melhores propriedades mecânicas e de resistência quando comparados aos concretos tradicionais. Isso é possível devido à utilização de matérias primas mais selecionadas e homogêneas, à utilização de aditivos que auxiliam na redução da porosidade levando à uma maior compactação, e pelo processo de cura diferenciado (SHI *et al.*, 2015). Esses fatores por si, já elevam o custo de produção do CAD, o que torna o custo da inserção de microrganismos nesses tipos de matérias menos significativo.

Como a utilização de CAD em construções ocorre quando se há a necessidade de maior durabilidade e qualidade do concreto, o uso de microrganismos biomineralizadores se torna uma grande alternativa de melhoria da produção de CAD podendo oferecer valores de desempenhos e durabilidade ainda melhores.

Sob o ponto de vista ambiental, esse tipo de bioconcreto pode levar ainda à redução do uso dos recursos naturais e da contaminação ambiental, já que propõe o uso e a inserção de bactérias como agentes biomineralizadores para autocura, ao invés de produtos químicos que afetam negativamente o meio ambiente.

### 3.2 DA JUSTIFICATIVA CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA

Pesquisas na área de biomateriais na construção civil, especialmente fora do Brasil, vem ganhando notoriedade e alguns trabalhos vêm sendo realizados nesta área; entretanto, pouco ainda se conhece sobre o comportamento exato dos microrganismos em ambientes tão hostis e severos como os dos concretos e das argamassas, os quais apresentam pH extremamente alcalino, variando de 10 a 13 (ACHAL *et al.*, 2015; ZHU *et al.*, 2015).

Essa pesquisa buscou analisar e compreender como as principais variáveis de processamento (matérias primas constituintes, formulação e encapsulamento de bactérias) atreladas à produção de concretos de pós reativos, influenciam no comportamento e sobrevivência de bactérias biomineralizadoras (*Lysinibacillus sphaericus* especificamente) responsáveis pelo processo de autocura em matrizes cimentícias, especialmente quando o processo é realizado com microrganismos encapsulados.

A compreensão do comportamento de tais variáveis, bem como a busca de uma solução para otimizar a atuação das bactérias não é trivial e demanda uma pesquisa científica assertiva, de modo que os resultados possam ser extrapolados para o cotidiano, contribuindo para o desenvolvimento de tecnologias mais limpas e renováveis.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 ARGAMASSAS E CONCRETOS CONVENCIONAIS

Segundo a ABNT NBR 7200 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), 1998), as argamassas podem ser definidas como uma “mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento” sendo utilizadas em diversas aplicações, tais como a união de blocos, alvenaria de vedação ou estrutural, revestimentos (chapisco/emboço e reboco), rejuntamento e impermeabilização (PEREIRA, 2019).

Pereira (2019) classifica os tipos de argamassa de acordo com seu uso. Assim, pode-se encontrar argamassas de:

- a) *Assentamento*: utilizada na união de blocos de alvenaria e atuando como ancoragem mecânica nos poros dos blocos;
- b) *Revestimento*: utilizada para recobrir áreas a fim de se corrigir defeitos ou oferecer rugosidade. Pode ainda ser subdividida em chapisco/emboço e reboco sendo que o primeiro é aplicado para obter uma melhor aderência entre a alvenaria e o reboco, que é aplicado para corrigir imperfeições e dar o formato final desejado;
- c) *Colante*: mistura pronta com cimento Portland e polímeros que oferecem melhor adesividade à estrutura e;
- d) *Rejuntamento*: mistura pronta, podendo conter pigmentos, utilizada no preenchimento de vãos em placas cerâmicas.

O concreto convencional, por sua vez, é um material compósito constituído basicamente de água, cimento, areia e agregados graúdos, podendo também conter a adição de fibras, aditivos químicos, pigmentos ou agregados especiais, dependendo da sua finalidade e das propriedades que se deseja obter (MÂNICA, 2019).

Por possuir agregados graúdos de diferentes tamanho e formas, o concreto tradicional é considerado um sistema bifásico à nível macroscópico, sendo entendido também como uma argamassa com a adição de agregados graúdos. (CIMENTOS MAUÁ, 2018; EUZEBIO; ALVES; FERNANDES, 2017). Segundo o site da Cimentos Mauá (2018), os principais agregados utilizados na formulação do concreto são a areia (que devem possuir diâmetros entre 0,15 e 6,3mm), a brita, o cascalho e o *filler* calcário.

Apesar de tanto a argamassa como o concreto convencional serem amplamente utilizados no setor da construção civil, ambos diferem entre si não apenas nos seus constituintes, mas também na sua utilização. Enquanto a argamassa é utilizada para assentamentos, rejuntas, revestimentos e como material colante, o concreto possui uma função mais estrutural (já que consegue ser extremamente resistente à compressão) e de proteção às armações de aço (no caso de construções de concreto armado em que vigas de aço são intercaladas com o concreto para obter melhores valores de resistência) (LAFARGE HOLCIM, 2018). Mesmo apresentando estas diferenças, ambos possuem constituintes em comum, descritos a seguir.

#### 4.1.1 Cimento

Batizado por Joseph Aspdin em 1824 em referência a uma rocha arenosa comumente utilizada nas construções da região de Portland, na Inglaterra, o cimento Portland basicamente se constitui de uma mistura calcinada de calcário e argila, aquecida a altas temperaturas e moída (GONSALVES, 2011; SILVA, 2006).

Uma definição mais precisa pode ser encontrada na ABNT NBR 5732, que define o cimento Portland comum como um “ligante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland, ao qual se adiciona, durante a fabricação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e adições minerais (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), 2018, p. 2).

Desde a revolução industrial, com a produção do cimento Portland, esse composto vem sendo utilizado em grande escala na área da construção devido a algumas de suas propriedades, como a facilidade de moldagem, a alta resistência à compressão e ao fogo e à vasta disponibilidade de seus constituintes (WANG *et al.*, 2016).

O processo de fabricação do cimento pode possuir algumas variantes; entretanto, de acordo com a *World Cement Association* (2020) e com a empresa Cimentos Mauá (2020), o processo pode ser compreendido através das seguintes etapas:

- 1 – A rocha calcária é extraída das jazidas e levada à planta da fábrica;
- 2 – Na fábrica, a rocha é britada, onde seu tamanho é reduzido;
- 3 – A argila, também extraída de lavras de extração, passa pelo britador;
- 4 – A mistura é homogeneizada no “moinho cru” onde ocorre a formação de uma “farinha” com partículas em torno de 90  $\mu\text{m}$ ;

5 – Esta farinha é encaminhada para a clínquerização (queima) em um forno a temperaturas altas (cerca de 1400 °C) de forma a produzir o clínquer (esferas de até 25 mm de diâmetro);

6 – O clínquer agora pode receber aditivos (como gesso, pozolana, *filler*, calcário e escória) e ser encaminhado à moagem para a formação de um pó fino, o cimento;

7 – O cimento pronto é encaminhado para silos de armazenamento e/ou ensacados e enviados aos consumidores.

O cimento Portland pode ser aplicado nas mais diversas áreas, tais como argamassas, concretos, edificações, pavimentação, alvenarias, blocos de concretos, saneamento, drenagem, barragens e, inclusive, artefatos e monumentos artísticos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP), 2019). De acordo com a ABNT (2018), o cimento Portland pode ainda ser classificado conforme a tabela 1.

Tabela 1 – Classificação do cimento Portland de acordo com a ABNT NBR 16697

Designação normalizada (tipo)	Subtipo	Sigla	Classe de resistência	Sufixo
<b>Cimento Portland Comum</b>	Sem adição	CP I		
	Com adição	CP I-S		
<b>Cimento Portland Composto</b>	Com escória granulada de alto forno	CP II-E	25, 32 ou 40 <sup>c</sup>	RS <sup>a</sup> ou BC <sup>b</sup>
	Com material carbonático	CP II-F		
	Com material pozolânico	CP II-Z		
<b>Cimento Portland de Alto-Forno</b>		CP III		
<b>Cimento Portland Pozolânico</b>		CP IV		
<b>Cimento Portland de Alta Resistência Inicial</b>		CP V	ARI <sup>d</sup>	
<b>Cimento Portland Branco</b>	Estrutural	CPB	25, 32 ou 40 <sup>c</sup>	
	Não Estrutural	CPB	-	-

a. O sufixo RS significa resistente a sulfatados e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos em 5.3, além dos requisitos para seu tipo e classe originais.

b. O Sufixo BC significa baixo calor de hidratação e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos em 5.3, além dos requisitos para seu tipo e classe originais.

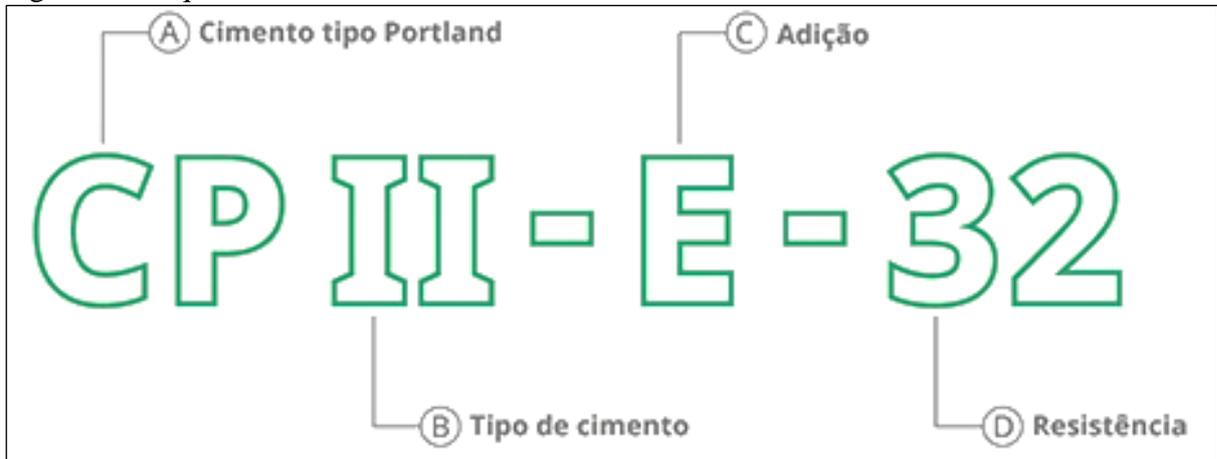
c. As classes 25, 32 e 40 representam os valores mínimos de resistência à compressão aos 28 dias de idade, em megapascals (MPa), conforme método de ensaio estabelecido pela ABNT NBR 7215.

d. Cimento Portland de Alta Resistência Inicial, CP V, que apresenta a 1 dia de idade resistência igual ou maior que 14 MPa, quando ensaiado de acordo com a ABNT NBR 7215 e atende aos demais requisitos estabelecidos nesta Norma para esse tipo de cimento.

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 16697 (2018, p. 4).

A nomenclatura do cimento se dá de acordo com cada tipo de uso e pode ser compreendida por meio da figura 1 (CIMENTOS MAUÁ, 2020):

Figura 1 – Esquema de nomenclatura dos cimentos Portland



Fonte: Cimentos Mauá (2020).

#### 4.1.2 Agregados

Os agregados, de acordo com a ABNT (2005), são resultantes da britagem beneficiada de rochas, devendo ser duros, compactos, estáveis e não conter substâncias que possam interferir de maneira significativa na hidratação e endurecimento do concreto. Eles podem ser classificados de acordo com seu tamanho em agregados miúdos (que passam por uma peneira de malha de 4,75 mm) e agregados graúdos (que ficam retidos na malha de 4,75 mm e passam na malha de 75 mm) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), 2005).

Segundo a Tecnosil (2019), os agregados podem ser ainda classificados de acordo com sua origem, sendo artificial (ação antrópica na alteração do tamanho dos grãos) e natural (obtidos diretamente da natureza em rios, barrancos, bancos de areia etc.) ou de acordo com sua massa específica aparente, sendo classificados como leves (com massa unitária inferior à 1120 kg/m<sup>3</sup>, como a argila expandida e a vermiculita), normais (com massa unitária entre 1500 a 1800 kg/m<sup>3</sup>, como brita, areia e seixos) e pesados (com massa unitária maior que 1800 kg/m<sup>3</sup>, como a hematita, magnetita e barita, utilizadas na blindagem de radiação).

Os agregados influenciam diretamente no custo e nas propriedades do concreto e da argamassa; podendo promover o aumento da resistência devido à transferência de tensões aplicadas ao concreto e à redução de efeitos de variações volumétricas. Suas características derivam de sua rocha de origem, sendo a porosidade, a absorção de água, a forma, a resistência à compressão e a distribuição granulométrica as características mais relevantes quando utilizadas na formulação de argamassas e concretos (TECNOSIL, 2019).

### 4.1.3 Água de amassamento

A água é um componente essencial na confecção da argamassa e do concreto, podendo chegar até 20% de seu volume e interfere diretamente na qualidade do concreto (GONÇALVES; GODINHO, 2016). A água tem a finalidade de promover a hidratação do cimento, de permitir a ligação entre os componentes da mistura, de fornecer plasticidade à mistura, além de ser responsável pelas reações de endurecimento e cura da matriz cimentícia (CIMENTO.ORG, 2010).

Um parâmetro de grande importância é a dosagem de água no meio. O fator água/cimento (a/c) não deve ser nem muito grande (água em excesso), pois pode escorrer ou subir para a superfície da massa, carregando consigo partículas finas; mas também nem muito pequeno (água em escassez), pois dificulta a mistura e os processos de lançamento e adensamento da mistura no local a ser aplicado (CIMENTOS MAUÁ, 2017). Além disso, tanto o excesso quanto a falta de água podem provocar o surgimento de fissuras e alterações das propriedades como porosidade, trabalhabilidade, permeabilidade e capacidade de absorção (GONÇALVES; GODINHO, 2016).

Segundo a ABNT NBR 15900-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), 2009), a água para formulação da argamassa e do concreto deve possuir pH acima de 5,0, apresentar material sólido máximo de 5.000 mg/L, teor de sulfato máximo de 2.000 mg/L, nitratos com concentração máxima de 500 mg/L e teores de açúcar, fosfato, chumbo e zinco abaixo de 100 mg/L. Valores fora dos estabelecidos pela norma podem gerar alterações negativas nas propriedades finais do produto, influenciando no tempo de pega (tempo para enrijecimento), na resistência final, aparecimento de manchas, corrosão da armadura e surgimento de eflorescências (CIMENTO.ORG, 2010; GONÇALVES; GODINHO, 2016).

## 4.2 CONCRETOS DE PÓS REATIVOS (CPR)

### 4.2.1 Definição de Concreto de Alto Desempenho e Concreto de Pós Reativos

Ao longo da segunda metade do século XX, pesquisadores gradualmente desenvolveram um novo tipo de concreto capaz de suportar maiores tensões. Esse desenvolvimento se deu devido à evolução tecnológica que possibilitou estudos mais detalhados sobre a microestrutura, a reologia e a produção do concreto tradicional. Inicialmente chamado de “concreto de alta

resistência”, esse novo material possuía melhores valores de resistência à compressão devido à utilização de um agregado mais homogêneo em termos dimensionais que, conseqüentemente, permitiu um aumento da homogeneidade e da compacidade da mistura. O uso de fibras de aço, além disso, também permitiu um aumento da ductilidade do novo concreto (BIZ, 2001).

Devido às mudanças ocasionadas pelo aumento dos valores das resistências máximas obtidas em cada novo estudo que se realizava, o termo “concreto de alta resistência” se alterava a cada ano, até que por fim, passou a ser designado como “concreto de alto desempenho” (CAD). O novo termo não agregaria somente concretos com maiores valores de resistência, mas também concretos que possuíssem maiores rigidez, maior estabilidade dimensional e menores valores de permeabilidade (BIZ, 2001).

Também denominado de UHPC da sigla inglesa “*ultra-high performance concrete*”, o concreto de alto desempenho teve sua primeira utilização estrutural em 1997 na construção de uma ponte para pedestres em Sherbrooke, Canadá (SHI *et al.*, 2015). Ao longo dos anos seguintes, segundo Shi *et al.* (2015), outras aplicações estruturais puderam ser vistas em países da Europa, da América do Norte, da Ásia, da Austrália e da Nova Zelândia. Em 2001, ocorre então a construção da primeira ponte rodoviária utilizando CAD em *Bourg-Lès-Valence*, na França.

Enfrentando grandes desafios (como a falta de padrões para testes, de guias de design para engenheiros e de métodos que permitissem melhor controle na qualidade de produção) e buscando obter um concreto com o mínimo de defeitos possíveis, pesquisadores da França e do Canadá, em meados da década de 1990, desenvolvem um novo concreto que possuía alta compacidade e resistência (SHI *et al.*, 2015).

Inicialmente idealizado para atender a demanda de concretos para ambientes agressivos e posteriormente para uso militar (BIZ, 2001), os estudos sobre o “concreto de pós reativos” (CPR) foram realizados baseados no aumento da homogeneidade (devido à diminuição da porção de agregados graúdos) e da compacidade (decorrente da melhor distribuição granulométrica e aplicação de pressão antes e após o processo de cura), na melhoria da microestrutura (devido ao tratamento térmico após o endurecimento) e da ductilidade (por meio da adição de fibras) e na manutenção dos processos de moldagem e mistura os mais próximos dos já existentes (BIZ, 2001).

Segundo Biz (2001), o CPR é caracterizado pela alta quantidade de cimento somado à presença de sílica reativa (microsílica) e materiais em pó. Características essas que proporcionam uma maior compacidade e homogeneidade ao concreto. Ainda segundo o autor

e segundo Hela, Bodnarova e Rundt (2018), várias são as formulações e composições de CRP. Porém, sua composição básica pode ser definida pela presença de areia de quartzo, sílica ativa, pó de quartzo, fibras de aço em pequenas dimensões, cimento com baixo teor de  $C_3A$  e baixa finura de Blaine e superplastificantes de alta eficiência.

O CPR difere do CAD/UHPC por apresentar maiores concentrações de cimento e valores máximos de grãos não ultrapassando os 600  $\mu\text{m}$  (micrômetros). Esses parâmetros permitem a obtenção de valores de resistência à compressão que variam de 100 a 800 MPa (HELA; BODNAROVA; RUNDT, 2018). A seguir será feita uma apresentação sobre os principais materiais constituinte dos concretos de pós reativos.

## 4.2.2 Materiais Constituintes

### 4.2.2.1 Cimento para CAD/CPR

De acordo com os autores Shi *et al.* (2015) e, Hela, Bodnarova e Rundt (2018), a quantidade de cimento utilizado na produção de CAD e CPR varia de 700 a 1100  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  (aproximadamente 3 vezes mais que concretos convencionais). A alta concentração de cimento é um dos principais fatores que afeta não somente o valor final do concreto de alto desempenho, como também o desenvolvimento do calor de hidratação e a estabilidade dimensional. Além disso, o cimento a ser utilizado na produção de CAD e CPR deverá possuir baixo valor de  $C_3A$  permitindo a redução da quantidade de água na mistura. (BIZ, 2001; HELA; BODNAROVA; RUNDT, 2018; SHI *et al.*, 2015).

Alguns estudos realizados recomendam a utilização de cimento padronizado segundo as normas ASTM tipo I (padrão norte americano) (BIZ, 2001; SHI *et al.*, 2015) e CEM tipo I (padrão britânico) (HELA; BODNAROVA; RUNDT, 2018), ambos correspondente ao cimento Portland comum sem adição, que corresponde ao CP I nacional de acordo com a ABNT NBR – 16697 (2018).

### 4.2.2.2 Sílica Ativa / Microsílica

A sílica ativa, conhecida também como microsílica, é um subproduto derivado da produção de ligas de ferro-silício. Com um diâmetro médio de 0,1  $\mu\text{m}$  a 0,2  $\mu\text{m}$ , a sílica ativa influencia tanto nas propriedades do cimento fresco como endurecido.

Segundo Biz (2001) o uso de sílica ativa possui diversas funções estruturais no concreto de pós reativos, dentre elas o preenchimento de vazios, produção de hidratos secundários e melhoria das características reológicas. Vale salientar que a sílica ativa auxilia na redução significativa da exsudação interna e superficial e da permeabilidade da pasta e no aumento da aderência com o agregado miúdo (na zona de transição) e aumenta a atividade das reações pozolânicas.

De acordo com Shi *et al.* (2015), a concentração ótima de sílica ativa varia de 20% a 35%, porém, a concentração de carbono na sílica pode levar a uma queda na fluidez da pasta e resíduos de carvão não queimados podem causar o escurecimento superficial do concreto levando à possíveis problemas estéticos. Além disso, por necessitar de maior quantidade de água para hidratação, o uso de sílica ativa está condicionado com a presença de superplastificantes (vide seção 4.2.2.4) que auxiliam no controle da necessidade de água. (BIZ, 2001; SHI *et al.*, 2015).

Os autores ainda enumeram substitutos à sílica ativa, tais como a escória granulada de alto forno, cinzas volantes, metacaulim, pó de calcário, pó de escória de aço, cinzas de casca de arroz e nanopartículas (nano SiO<sub>2</sub>, nano-CaCO<sub>3</sub>, nano-TiO<sub>2</sub> e nano-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Entretanto, também reforçam que melhores resultados foram obtidos em formulações em que esses materiais eram combinados entre si.

#### 4.2.2.3 Agregados em CAD/CPR

Segundo Biz e colaboradores (2001), para que se obtenha altos valores de resistência à compressão (valores acima de 200 MPa) é recomendado que o tamanho dos grãos dos agregados seja pequeno. Os valores de diâmetro máximo recomendado podem se diferenciar, porém, valores abaixo de 600 µm de diâmetro são recomendados, segundo os autores. Yu *et al.* (2018), por exemplo, utilizou em seus estudos areia de sílica com tamanho máximo de grão de 180 µm e média de 135 µm, chegando a obter valores de resistência à compressão por volta de 115 MPa.

Os agregados, na formulação de CAD e CPR, são os elementos mais baratos quando comparados com restante dos constituintes. Por esse motivo, tem-se o intuito de utilizar o máximo possível desses agregados em formulações de concretos de alto desempenho (HELA; BODNAROVA; RUNDT, 2018; SHI *et al.*, 2015). Entretanto, é importante observar que, mesmo sendo elementos com baixo custo inicial na formulação, há um custo financeiro

significativamente alto para se obter areia de quartzo com diâmetros muito pequenos, o que pode elevar o valor de produção do concreto final (SHI *et al.*, 2015).

Alguns materiais vêm sendo estudados e implementados no lugar de pó de quartzo, a fim de reduzir o custo final do CAD. Dentre eles podemos destacar: o pó de vidro reciclado, areia natural e agregados artificiais. Segundo Shi *et al.* (2015), o uso de pó de vidro reciclado pode reduzir os valores de resistência à compressão e flexão em até 15%, não sendo uma alternativa viável. Já o uso de materiais como rejeito de minério de ferro, basalto moído/esmagado (com diâmetro menor que 8 mm), e calcário moído conseguiram gerar resultados próximos aos do pó de quartzo.

Os autores ainda citam que em algumas pesquisas, o uso de basalto e calcário com diâmetro médio de 20 mm como agregado graúdo gerou resultados promissores, levando-os a concluir de que a chave para o sucesso na produção de CAD está na diminuição dos defeitos e falhas causadas pelo agregado graúdo, ao invés da remoção do agregado em si.

#### 4.2.2.4 Superplastificantes

Superplastificantes são de extrema importância na produção de CAD e CPR, uma vez que desempenham papéis essenciais para a elevação do desempenho do concreto. De acordo com Biz (2001), o uso de superplastificantes se justifica pela capacidade desse aditivo de reduzir a quantidade de água utilizada na mistura, impactando diretamente na relação água/cimento e na diminuição de efeitos adversos provenientes da hidratação do cimento, além de influenciar e melhorar a trabalhabilidade e fluidez da mistura.

Isso ocorre pelo fato de os polímeros presentes nos superplastificantes possuírem grupos com cargas negativas. Esses polímeros se acumulam na superfície das partículas do cimento e elevam a carga negativa dessa superfície, causando repulsão elétrica entre as partículas. Como resultado, há uma melhor dispersão das partículas de cimento na mistura, e conseqüentemente a melhora da fluidificação na mistura (BIZ, 2001).

A quantidade de superplastificantes utilizadas em CAD e CPR pode ser até 15 vezes maior que a quantidade usada em um concreto tradicional (HIRSCHI; WOMBACHER, 2008), sendo os mais efetivos os baseados em policarboxilatos, de acordo com Hela, Bodnarova e Rundt (2018) e Shi *et al.* (2015).

As gerações mais antigas de superplastificantes e dispersantes eram baseadas em melamina formaldeído sulfonada, naftaleno formaldeído sulfonado, e lignossulfeto (BIZ, 2001;

SCRIVENER; KIRKPATRICK, 2008); já as gerações mais atuais são à base de éter policarboxílico, sendo este um dos mais importantes recentes avanços na área de concretos.

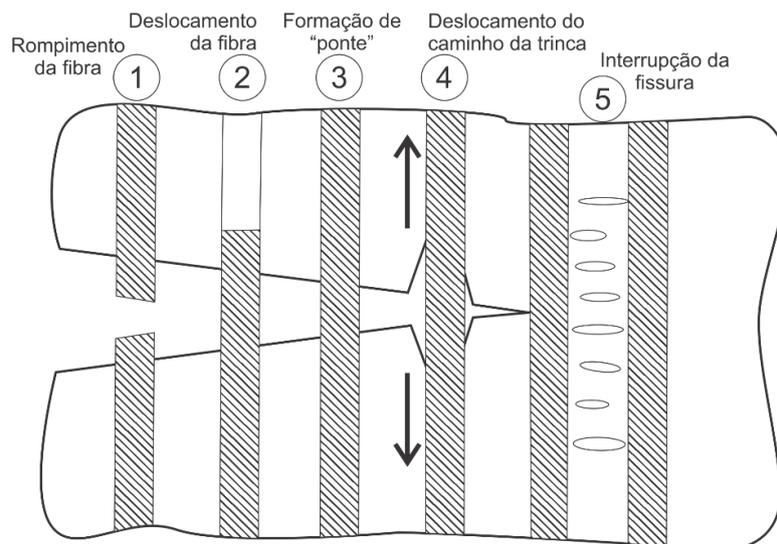
De acordo com Schröfl, Gruber e Plank. (2012), a combinação de dois ou mais tipos diferentes de policarboxilatos pode gerar resultados ainda melhores na dispersão das partículas de cimento, quando comparado com a utilização de apenas um tipo. Segundo os autores, superplastificantes baseados em alilo éter adsorvem preferencialmente à sílica e os baseados em ácido metacrílico interagem melhor com a superfície hidratada do cimento.

#### 4.2.2.5 Fibras

Como já dito, o concreto possui uma excelente resistência à compressão, porém, pouca resistência à tração, sendo tratado assim como um material frágil (SHI *et al.*, 2015). Para elevar a resistência à tração, pode-se, então, adicionar barras de aço, telas ou fibras (BIZ, 2001).

O uso de fibras em CAD e CPR, auxilia na prevenção da formação e propagação de fissuras no meio, por meio da transferência de carregamento da matriz para a fibra pela interface matriz-fibra (SHI *et al.*, 2015). A figura 2 mostra como as fibras absorvem a energia e auxiliam no controle da propagação de fissuras.

Figura 2 – Processo de ação de fibras no controle de fissuras em concretos



Fonte: adaptado de SHI *et al.* (2015, p. 744).

Como visto na imagem, o caminho da fissura segue da esquerda para a direita. No processo hipotético apresentado na figura, observa-se a fibra 1 sendo rompida, a segunda fibra sendo puxada e arrancada do seu lugar inicial; na terceira fibra observa-se a formação de uma

“ponte” que levará a um deslocamento do caminho original da fissura (fibra 4), colocando um fim à propagação da fissura (fibras 5).

Compreendendo 0,5% a 3% do volume da mistura (1,5% a 3% para CPR) (BIZ, 2001; HELA; BODNAROVA; RUNDT, 2018), as fibras mais comuns de serem usadas em CAD e CPR são as de aço e de carbono, por apresentarem melhores propriedades. As fibras de aço, por exemplo, melhoram não somente a capacidade de controlar a propagação de fissuras, como também a tenacidade, a ductilidade e a capacidade do concreto em absorver energia (BIZ, 2001). Alguns estudos comprovam a importância das fibras no compósito de alta resistência e no aumento da ductilidade ao realizarem testes de flexão e observar que as amostras que não continham fibras falham imediatamente após o aparecimento das primeiras fissuras (SHAFIEIFAR; FARZAD; AZIZINAMINI, 2017).

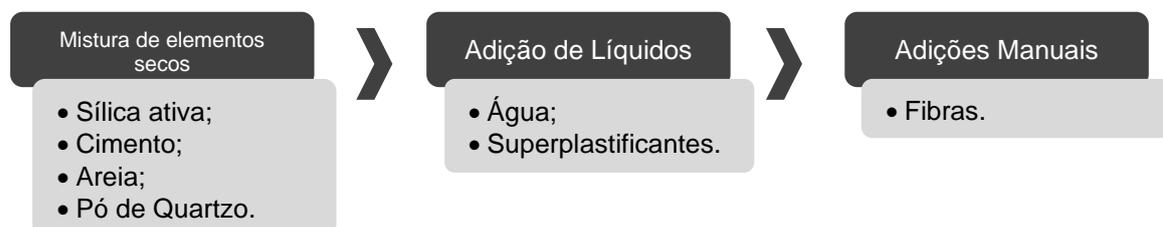
Fibras de vidro e de polímeros (como polipropileno e poliéster) também são alternativas que já foram incorporadas em estudos, porém, apresentaram valores de resistência menores que as amostras sem fibras (SHI *et al.*, 2015).

### 4.2.3 Conformação e Cura

#### 4.2.3.1 Conformação / Preparo de amostras

O preparo de amostras e peças de concretos de alto desempenho e de concretos de pós reativos se diferem na preparação quando comparados com a de concretos convencionais. Equipamentos como misturadores à vácuo/pressão podem ser utilizados para diminuir o tamanho dos poros e melhorar as propriedades de resistência à compressão, dureza e módulo de Young. Entretanto, esses equipamentos são sofisticados e apresentam alto custo de operação, não se tornando uma opção viável para produção em larga escala (SHI *et al.*, 2015). Em geral, são seguidas as etapas mostradas na figura 3 para a produção de amostras, corpos de prova e peças de CAD/CPR.

Figura 3 – Processo de preparação de CAD/CPR



Fonte: Autor (2023).

Como indicado na figura 3, primeiramente os elementos secos são misturados por alguns minutos em um misturador. Essa mistura pode ser realizada em um misturador a força (BIZ, 2001; HELA; BODNAROVA; RUNDT, 2018), misturador planetário (WANG *et al.*, 2016) ou de maneira convencional (SHI *et al.*, 2015). O tempo pode variar de acordo com cada autor, entretanto, observa-se que em grande parte das pesquisas essa primeira mistura foi realizada por cerca de 5 a 15 minutos.

Em um segundo momento, são adicionados a água e o superplastificante, geralmente já misturados. Alguns pesquisadores, como Wille e Boisvert-Cotulio (2015) adicionam primeiramente uma fração do superplastificante à água e posteriormente adicionam o restante do superplastificante diretamente na mistura. Novamente o tempo de mistura varia de acordo com cada autor, girando em torno de 2 a 10 minutos (SHAFIEIFAR; FARZAD; AZIZINAMINI, 2017; SHI *et al.*, 2015; YU *et al.*, 2018).

Por fim, as fibras são manualmente distribuídas de maneira cautelosa e uniforme por toda a massa. O tempo de mistura nessa última etapa é menor e pode variar de 1 a 5 minutos. Após a mistura das fibras a massa é despejada em moldes e, caso necessário, cobertas por um plástico para evitar perda de hidratação (SHAFIEIFAR; FARZAD; AZIZINAMINI, 2017).

Para obter melhores propriedades, alguns autores promovem a vibração das amostras a fim de se remover o máximo possível de bolhas de ar e poros e, assim, aumentar a compactação do material.

#### 4.2.3.2 Processo de Cura

A cura das amostras/peças pode ser realizada de diferentes formas, sendo as mais comuns a cura à temperatura ambiente (SHI *et al.*, 2015; YU *et al.*, 2018) e a cura por imersão em água (HELA; BODNAROVA; RUNDT, 2018; SHAFIEIFAR; FARZAD; AZIZINAMINI, 2017; WILLE; BOISVERT-COTULIO, 2015). Outros tratamentos, porém, podem melhorar ainda mais as propriedades do concreto, como a cura térmica e por pressão.

A cura térmica pode melhorar a resistência a compressão do CAD/CPR de 15 a 30 MPa quando comparado com concretos curados à temperatura ambiente. Isso se deve pelo fato de que a cura em temperaturas próximas de 90 °C, por exemplo, favorece a atividade pozolânicas das partículas de sílica ativa e do pó de quartzo, além de aumentar o comprimento das cadeias de C-S-H (BIZ, 2001; SHI *et al.*, 2015).

Já a cura sob pressão, que pode ocorrer com ou sem o aumento da temperatura, também pode elevar a resistência à compressão para valores acima de 200 MPa (SHI *et al.*, 2015). Esse tipo de cura permite uma maior compactação da massa no molde devido à remoção de bolhas de ar, da remoção do excesso de água na mistura e da diminuição da espessura da zona de transição agregado-massa. Além disso, segundo Biz (2001), a utilização de cura sob pressão por tempos prolongados (de 6 a 12 horas) pode reduzir a porosidade química que seria gerada pelo processo de hidratação do cimento.

É notável que a utilização de procedimentos de cura por pressão e temperatura elevam e muito as características desejáveis dos concretos de alto desempenho. Entretanto, como esses procedimentos demandam maiores gastos energéticos e operacionais e, elevam a complexidade da produção, há uma limitação para seus usos na prática e em grande escala. Segundo Shi *et al.* (2015), a chave para melhorar a aplicabilidade de CAD e CPR é a melhora na produção desses tipos de concretos com processos de cura em pressão e temperatura ambientes.

#### 4.3 FISSURAS E DEFEITOS

##### 4.3.1 Surgimento e tipos de fissuras e defeitos

Apesar de possuírem grandes vantagens como a alta resistência à compressão e matéria-prima com grande disponibilidade, os materiais cimentícios, tais como argamassa e o concreto, possuem baixa resistência à tração. Devido à ação de forças internas decorrentes de fatores como a variação de temperatura, da carga e da umidade, esses tipos de materiais estão suscetíveis à formação de fissuras (BUNDUR; KIRISITS; FERRON, 2017), o que possibilita a entrada de água e de agentes que, embora a curto prazo possam não causar danos, a longo prazo podem comprometer a integridade da estrutura (ESPITIA-NERY *et al.*, 2019; REDDY; REVATHI, 2019).

Segundo Zanzarini (2016), a ocorrência de falhas nas várias etapas de um projeto pode levar à ocorrência de patologias – termo designado a problemas estéticos, funcionais e/ou estruturais. O autor comenta que as patologias podem ser decorrentes de três etapas:

1) *Na fase de projeto* (erros de dimensionamento, falta de detalhes, especificações inadequadas);

2) *Na fase de execução* (mão de obra não qualificada, falta de controle tecnológico e fiscalização, uso de materiais fora das normas e especificações) e;

3) *Na fase de utilização* (posterior à construção, como falhas no sistema hidráulico, recalque/movimentação do solo, sobrecargas não previstas, falta de manutenção).

Alguns autores como Santos (2014) e Zanzarini (2016) classificam as fissuras de acordo com sua espessura (como mostrado na tabela 2) relacionando-as com a intensidade e a severidade do possível dano (tabela 3).

Tabela 2 – Classificação de acordo com a espessura da fissura

<b>Denominação</b>	<b>Abertura da fissura (mm)</b>
Fissura capilar	Menor que 0,2
Fissura	0,2 a 0,5
Trinca	0,5 a 15
Rachadura	1,5 a 5,0
Fenda	5,0 a 10,0
Brecha	Maior que 10,0

Fonte: Zanzarini (2016, p. 25) e Santos (2014, p. 74).

Tabela 3 – Intensidade dos danos e efeitos causados de acordo com a abertura da fissura

<b>Abertura da fissura (mm)</b>	<b>Intensidade dos danos</b>			<b>Efeitos na estrutura e uso da edificação</b>
	<b>Residencial</b>	<b>Comercial ou Público</b>	<b>Industrial</b>	
<b>&lt; 0,1</b>	Insignificante	Insignificante	Insignificante	Nenhum
<b>0,1 a 0,3</b>	Muito leve	Muito Leve	Insignificante	Nenhum
<b>0,3 a 1</b>	Leve	Leve	Muito leve	Apenas estética; deterioração acelerada do aspecto externo
<b>1 a 2</b>	Leve a moderada	Leve a moderada	Muito leve	
<b>2 a 5</b>	Moderada	Moderada	Leve	
<b>5 a 15</b>	Moderada a Severa	Moderada a severa	Moderada	Utilização do edifício será afetada e, no limite superior, a estabilidade também pode estar em risco
<b>15 a 25</b>	Severa a muito severa	Severa a muito severa	Moderada a severa	
<b>&gt; 25</b>	Muito severa a perigosa	Severa a perigosa	Severa a perigosa	Cresce o risco de a estrutura tornar-se perigosa

Fonte: (Thornburn e Hutchinson, 1985) citado por Santos (2014).

Nas argamassas, especificamente as de revestimento, as principais patologias manifestadas são as *fissuras* (ocasionadas principalmente pela movimentação e/ou deformação da base onde está aplicada e pela perda de água), *os deslocamentos e deslamentos* (fortemente relacionados à não aderência do revestimento à base, a hidratação retardada da cal e presença de purezas e torrões de argila na mistura) e *manchas e colônias de microrganismos* (resultante de alguns fatores como infiltração, impermeabilização pobre, vazamento hidráulico, e umidade alta com baixa incidência de sol) (MASUERO; AECWEB, 2020).

### 4.3.2 Tratamento de fissuras e defeitos

Para Zanzarini (2016) e Junior e Cerqueira (2019), o tratamento e a recuperação das fissuras em estruturas cimentícias, tais como concretos e argamassas, devem ser realizados somente após a inspeção e verificação dos agentes causadores da patologia, assim como sua possível eliminação ou redução. Os autores enumeram algumas formas de remediação, a saber:

- a) Restauração com pintura acrílica;
- b) Aplicação de tela de poliéster;
- c) Recuperação por grampos de fixação;
- d) Substituição do revestimento;
- e) Argamassa e reboco armado;
- f) Injeção de resina epóxi;
- g) Reforço com materiais compósitos.

Zanzarini (2016) ainda salienta em suas conclusões, que é de grande importância a adoção de medidas preservativas para proteger as estruturas de agentes causadores de fissuras, como a impermeabilização do solo, remoção de árvores próximas às edificações e desvio de águas pluviais.

Para Pelegrinello (2017), Jongvivatsakul (2019) e Pacheco-Torgal e Labrincha (2013), novas técnicas de reparação mais sustentáveis devem ser encontradas, uma vez que muitas das técnicas tradicionais utilizam-se de materiais orgânicos contendo componentes com algum grau de toxicidade tanto na sua produção quanto na sua utilização.

Como alternativa às técnicas tradicionais, a utilização de microrganismos redutores de carbonato de cálcio por meio da biomineralização vem chamando atenção de cientistas, devido à sua baixa toxicidade e capacidade de aumentar a durabilidade e a resistência à compressão de matrizes cimentícias (CHOUDHARY *et al.*, 2019; JONGVIVATSAKUL *et al.*, 2019).

## 4.4 BIOCONCRETO E OS MICRORGANISMOS NA AUTOCURA

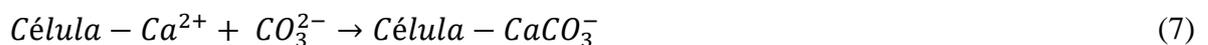
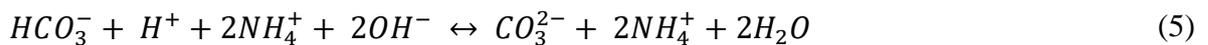
### 4.4.1 A Biomineralização

A “biomineralização” é o processo natural de precipitação de minerais cristalinos ou amorfos, tais como carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), oxalatos [ $(\text{C}_2\text{O}_4)^{2-}$ ], sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e ferro (GHOSH *et al.*, 2009), decorrentes da atividade metabólica de certos microrganismos.

No caso dos MICCP (*Microbial induced calcium-carbonate precipitation*), ou em português, PMICC (*Precipitação microbiológica induzida de carbonato de cálcio*) essa atividade metabólica, que também é conhecida como *carbonatogênese*, precipita os íons carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) que reagem com o cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), formando o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) (CHAPARRO-ACUÑA *et al.*, 2017; GONZÁLES; SANTANA; CARVALHO, 2014).

González, Santana e Carvalho (2014) reforçam ainda que para a produção de íon carbonato se faz necessário obter um meio alcalino, uma vez que a atuação ótima das bactérias ocorre em pH próximo de 8,0. Já a precipitação de  $\text{CaCO}_3$  é realizada mais facilmente na abundante presença de cálcio e amônia.

Apesar de existirem diferentes métodos para a precipitação de carbonato de cálcio, ou calcita, como a fotossíntese, a oxidação anaeróbica de sulfeto e os exopolissacarídeos, de acordo com Chaparro-Acuña *et al.* (2017), a ureólise é o método mais utilizado na precipitação da calcita. As equações a seguir indicam as reações que ocorrem durante o processo de biomineralização (ACHAL *et al.*, 2015).



Os primeiros cristais de  $\text{CaCO}_3$  geralmente se formam dentro do corpo celular bacteriano e são posteriormente expulsos para fora da célula ou então aparecem na superfície dos corpos onde se aglomeram até formar uma “capa” rígida. Essas estruturas iniciais apresentam-se geralmente amorfas e hidratadas. A agregação dessas partículas iniciais gera uma nova estrutura pré-cristalina. A partir deste processo, os primeiros conjuntos de “biocristais secundários” começam a se formar e a crescer, evidenciando uma estrutura mais cristalina (GONZÁLES; SANTANA; CARVALHO, 2014).

#### 4.4.2 Espécies observadas

A pesquisa e o estudo da bioprecipitação por microrganismos data do final do século XIX, na Rússia. A produção intelectual posterior pôde identificar diversas espécies e gêneros de bactérias, como: *Shewanella sp.* (GHOSH *et al.*, 2009), *Bacillus spp.* (*B. subtilis*, *B. amyloliquefacies*, *B. cereus*), *Pseudomonas spp.*, *Variovorax spp.*, *Micrococcus spp.*, *Leuconostoc mesenteroides*, *Myxococcus xanthus*, *Sporosarcina pasteurii*, *S. ureae*, *Escherichia coli*, *Beijerinckia indica* e *Penicillium chrysogenum* (GONZÁLES; SANTANA; CARVALHO, 2014). Os autores em questão enfatizam que as espécies do gênero *Bacillus* destacam-se na precipitação de carbonado de cálcio em ambientes naturais.

Neste projeto, será utilizada a espécie *Lysinibacillus sphaericus* (inicialmente conhecida como *Bacillus sphaericus*). De acordo com Wang *et al.* (2012) citado por Achal *et al.* (2015), a *L. sphaericus*, imobilizada em sílica gel para protegê-la do concreto, promoveu uma maior atividade da urease (enzima) e, conseqüentemente, uma maior deposição de  $\text{CaCO}_3$ , quando comparada à mesma bactéria imobilizada em poliuretano. Além disso, o  $\text{CaCO}_3$  precipitado por essas bactérias provocaram uma melhora na impermeabilidade e na resistência ao ataque por ácidos (ACHAL *et al.*, 2015).

#### 4.4.3 Crescimento Microbiano

A utilização de meios para o crescimento microbiano pode variar muito de acordo com as preferências do pesquisador, o tipo de bactéria, a região e a disponibilidade de recursos. Alguns desses meios são apresentados a seguir.

Gonzáles, Santana e Carvalho (2014) apresentam em seus estudos três meios de cultura bacteriana: o primeiro, chamado de B4 (proporções 1), constituído de 2,5 g de acetato de cálcio, 4 g de extrato de levedura, 5 g de glicose e 12 g de ágar para 1 litro de água destilada; o segundo, chamado de B4 (proporções 2), apresenta os mesmos constituintes em proporções diferentes, sendo 15 g de acetato de cálcio, 4 g de extrato de levedura, 5 g de glicose e 12 g de ágar, para 1 litro de água destilada; e o terceiro proposto por Stock-Fisher, em 1999, contendo 3 g de ágar nutriente, 20 g de ureia, 10 g de cloreto de amônio, 2,12 g de bicarbonato de sódio, 5,6 g de cloreto de cálcio e 12 g de ágar em 1 litro de água destilada (STOCK-FISHER *et.al*, 1999 apud GONZÁLES; SANTANA; CARVALHO, 2014). Dentre estes três meios, segundo os autores, o que apresentou melhor resultado na precipitação de carbonato de cálcio a uma temperatura de

25 °C foi o meio B4 (proporções 2), com o acréscimo de hidróxido de sódio a fim de se alcalinizar o meio, elevando o pH próximo de 8,0.

Bundur, Kirisits e Ferron (2017) realizaram o crescimento da bactéria *Sporosarcina pasteurii* (ATCC 6453) em um meio a ureia e extrato de levedura (UYE sigla em inglês para Urea-Yeast Extract) contendo uma solução tampão de tris-(hidroximetil)-aminometano à 0,13 M preparada em um litro de água destilada deionizada (ADD), 10 g de uréia, 20 g de extrato de levedura e 20g de ágar (caso um meio físico fosse requerido) a um pH próximo de 9,0. De acordo com os autores, este meio apresentou bons resultados, principalmente quando analisadas as concentrações de células disponíveis e vegetativas, capazes de realizar processos metabólicos. O mesmo meio foi utilizado pro Liu *et al.* (2016) em seus estudos.

Ghosh (2009), por sua vez, realizou o crescimento bacteriano em um meio anaeróbio contendo  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  à 0,1 M,  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  à 0,6 g/L,  $\text{KCl}$  – 0,33 g/L,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  – 2,5 g/L, extrato de levedura à 0,02% e peptona à 0,5% em um pH igual a 8,0 na temperatura de 65 °C, obtendo ótimos resultados para a espécie da família *Shewanella*.

#### 4.4.4 Tipos de aplicação

O uso de microrganismos na autocura de concretos e argamassas vem se tornando cada vez mais popular na última década (ESPITIA-NERY *et al.*, 2019). A aplicação de organismos bacterianos no meio pode ser realizada através de duas maneiras: microrganismos encapsulados/imobilizados e não encapsulados.

Na incorporação bacteriana não encapsulada, adiciona-se os esporos bacterianos, juntamente com substratos contendo nutrientes, à água de amassamento no processo de confecção do concreto. Ao entrar em contato com a fissura, o microrganismo sai de seu estado vegetativo e começa a agir no meio (EUZEBIO; ALVES; FERNANDES, 2017; JUNIOR; CERQUEIRA, 2019). Euzébio, Alves e Fernandes (2017) esclarecem ainda que, ao serem diretamente introduzidas na matriz cimentícia, as bactérias limitam seu tempo de vida a poucos meses devido aos diâmetros dos poros das matrizes e à alta alcalinidade do meio.

Já a técnica de encapsulamento consiste basicamente na aplicação bacteriana encapsulada (protegida) com os nutrientes necessários para sua ação. Ao entrar em contato com a fissura, e assim encontrar uma variação de umidade e oxigênio, a capsula se rompe, liberando o agente redutor bacteriano (ESPITIA-NERY *et al.*, 2019). De acordo com Pacheco-Torgal e Labrincha (2013), pesquisadores vêm estudando tipos de encapsulamento para solucionar o

problema da alta alcalinidade do concreto e argamassas e do esmagamento de esporos, os quais impedem o crescimento bacteriano (EUZEBIO; ALVES; FERNANDES, 2017).

Poucos se sabe como modificações feitas na formulação e nos constituintes da argamassa e do concreto podem contribuir para a sobrevivência dos microrganismos, o que resulta na necessidade de estudo mais aprofundados sobre a questão e justifica esta pesquisa.

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

### 5.1 MATERIAIS

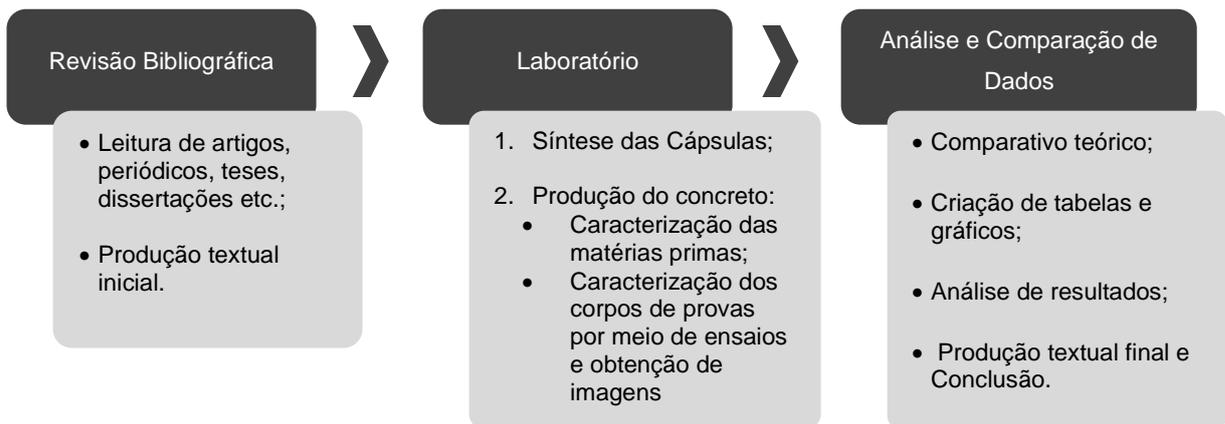
As matérias primas utilizadas nessa pesquisa foram:

- a) Areia: proveniente da região de Pirassununga, ensacada e de origem natural, comercializada pela empresa Gato Neves Materiais de Construção e de acordo com a ABNT NBR 7211:2009.
- b) Cimento: fabricado pela empresa Cimento Nacional, do tipo CP V-ARI apresentando, segundo fabricante, alta resistência inicial com desforma rápida, excelente aderência na aplicação e máxima coesão em concretos autoadensáveis e de acordo com a ABNT NBR 16697:2018.
- c) Microsílica: também conhecida por sílica ativa, produzida pela empresa Tecnosil Indústria de Comércio de Materiais de Construção LTDA, encontrada em forma de esferas com diâmetro médio de 0,2  $\mu\text{m}$ , apresentando coloração cinza e com teor de  $\text{SiO}_2$  superior a 90%.
- d) Pó de Quatzo: produzido pela empresa Brasilminas, coloração branca e granulometria ultrafina (malha 1000 mesh)
- e) Superplastificante: fabricada pela BASF S/A, à base de policarboxilato éter, classificado como aditivo dispersante de terceira geração e com nome comercial Glenium 51®.
- f) Água de amassamento: proveniente da rede de abastecimento hídrico da cidade de Poços de Caldas, controlada pelo DMAE (Departamento Municipal de Água e Esgoto) e de acordo com a ABNT NBR 15900-1 (2009) para o uso na produção de concretos.
- g) Alginato de sódio: material com teor de pureza de 90%, de acordo com os dados do fabricante - Dinâmica Química Contemporânea LTDA.
- h) Cloreto de cálcio: material com teor de pureza entre 74% e 78%, de acordo com o fornecedor Vetec Química Fina.
- i) Bactéria: esporos da bactéria *Lysinibacillus sphaericus* já incorporadas nas cápsulas de alginato de sódio.

## 5.2 MÉTODOS

Para melhor entendimento da pesquisa, a metodologia foi dividida em duas etapas, denominadas Etapas I e II, descritas a seguir. A figura 4 ilustra as etapas realizadas nesta pesquisa.

Figura 4 – Etapas de realização da pesquisa



Fonte: Autor (2023).

### 5.2.1 Etapa I: Cápsulas de alginato de sódio

A Etapa I refere-se às práticas realizadas na obtenção e na caracterização das cápsulas de alginato de sódio, e no encapsulamento das bactérias nas cápsulas.

#### 5.2.1.1 Obtenção das cápsulas de alginato de sódio

Foram preparadas as soluções de alginato de sódio 2% (m/v) e solução de cloreto de cálcio 5% (m/v), utilizando os reagentes citados na seção 5.1, itens “g” e “h”, da seguinte maneira:

Para a solução de alginato de sódio, a massa desse reagente foi mensurada sobre um vidro de relógio. Em seguida, essa massa foi transferida gradativamente para um béquer contendo água destilada sob constante agitação decorrente do uso de um agitador magnético. A solução então foi mantida sob agitação constante até a dissolução e homogeneização completa.

A solução de cloreto de cálcio foi preparada de forma semelhante, pesando-se a massa em um vidro de relógio, transferida para um Erlenmeyer contendo água destilada e mantida sob agitação até completa solubilização e homogeneização.

Com ambas as soluções prontas, partiu-se para o processo de gotejamento da solução de alginato de sódio na solução de cloreto de cálcio com o auxílio de uma bomba peristáltica de Marca Cole-Parmer, modelo Masterflex® C/L.

As esferas obtidas mediante esse processo foram então peneiradas com o auxílio de um sistema de filtração à vácuo contendo um Kitassato, funil de Büchner, papel de filtro e bomba à vácuo (da empresa TECNAL, modelo TE-058) e dispostas em uma bandeja forrada com papel toalha para remoção do excesso de água inicial. Por fim, as esferas foram colocadas para secar em temperatura ambiente por no mínimo 72h ou até a secagem completa e posteriormente foram armazenadas em frascos opacos. As figuras 5 e 6 ilustram o procedimento descrito (gotejamento da solução de alginato de sódio na solução de cloreto de cálcio e filtração das esferas de alginato de sódio).

Figura 5 – Esquema de produção das cápsulas por gotejamento



Fonte: Autor (2023).

Figura 6 – Esquema de filtração à vácuo



Fonte: Autor (2023).

### 5.2.1.2 Caracterização das cápsulas de alginato de sódio

Testes de intumescimento foram realizados para se obter maiores informações a respeito do comportamento das cápsulas de alginato quando inseridas no concreto. Os testes foram realizados por um mestrando, Costa (2022), do mesmo grupo de pesquisa, envolvendo a utilização das cápsulas de alginato de sódio.

Costa (2022) utilizou-se de três metodologias diferentes para avaliar o intumescimento das cápsulas. Na primeira metodologia, realizada em triplicata e nomeada de “teste simples”, foram acrescentados 0,2 g de cápsulas secas em um béquer contendo 30 g de água destilada, então vedou-se o béquer com filme plástico para evitar perda de água por evaporação. Após 24 horas de imersão, as esferas de alginato de sódio foram então filtradas para um recipiente com massa conhecida utilizando um papel filtro previamente saturado de água destilada.

A segunda metodologia, conhecida como método do saquinho de chá – do inglês *tea-bag method* – foi desenvolvida por Snoeck (2018) (SNOECK, 2018 apud COSTA, 2022). Nela, dez saquinhos de chá vazios foram numerados e pesados, obtendo-se a massa seca. Em seguida, foram imersos em água destilada por dez segundos, secas levemente por um pano e novamente pesadas, obtendo-se a massa úmida. Assim, pôde-se obter a massa de líquido absorvido pelo saquinho ( $m_0$ ) pela diferença entre a massa úmida e a massa seca. Em seguida, em um dos dez saquinhos escolhido aleatoriamente e novamente pesado ( $m_1$ ), coloca-se 0,2 g de cápsulas e realiza-se uma nova pesagem, agora de todo o sistema saquinho-cápsulas ( $m_2$ ).

Após esse processo, o sistema saquinho-cápsulas é imerso em 200 ml de água destilada contidas em um béquer que é coberto por plástico filme para evitar a perda de água. O sistema saquinho-cápsulas é então removido nos tempos de 1, 5, 10, 30, 60, 180 e 1440 minutos, levemente secos e pesados ( $m_3$ ). O valor da massa de água absorvida é obtido por meio da divisão da diferença entre as massas  $m_3$ ,  $m_2$  e  $m_0$  pela diferença entre as massas  $m_2$  e  $m_1$ .

O terceiro método, novamente realizado em triplicata e, também desenvolvida por Snoeck (2018) (SNOECK, 2018 apud COSTA, 2022), foi nomeada como “método de filtração”. Nesse método, 0,2 g de esferas de alginato de sódio previamente secas ( $m_1$ ) foram adicionados em um béquer contendo 100 ml de água destilada ( $m_2$ ). O béquer então foi selado com plástico filme para evitar a evaporação da água. Esse procedimento foi repetido para sete sistemas idênticos a fim de se fazer a filtração da solução água-cápsulas em sete diferentes tempos, sendo eles 1, 5, 10, 30, 60, 180 e 1440 minutos.

A filtração foi realizada em papel de filtro saturado em água destilada e em um sistema tampado para que não haja evaporação da água. O término da filtração se dá quando o intervalo de gotejamento for maior que 1 minuto. Então, a massa de líquido que passou pelo filtro é pesada ( $m_3$ ). O valor da massa de absorção de líquido das esferas é obtido pela divisão entre diferença da massa inicial de água no béquer ( $m_2$ ) e da massa final de água que passou pelo filtro ( $m_3$ ) pela massa inicial das esferas de alginato de sódio ( $m_1$ )

### 5.2.1.3 Cultivo e encapsulamento das bactérias no alginato de sódio

As células vegetativas da bactéria *Lysinibacillus sphaericus* foram produzidas em meio de cultivo contendo extrato de levedura (autoclavado) e ureia (esterilizada por filtração estéril Millipore 0,22  $\mu\text{m}$ ) a uma concentração de 20 g/l de ambas as substâncias. O pH do meio foi de 7,0 e a incubação ocorreu à temperatura de 28°C por 24 horas à 100 rpm.

Para cultivar os esporos da *L. sphaericus*, células vegetativas da bactéria foram adicionadas a um meio MBS<sup>1</sup>, com o pH ajustado para 7,4. A cultura foi então incubada com agitação constante de 100 rpm até que a esporulação atingisse 90% (14~28 dias). Os esporos obtidos foram então centrifugados a 7000 rpm por 7 minutos e então, foram suspensos em uma solução de cloreto de sódio estéril a uma concentração de 8,5 g/L.

Antes da sua adição na solução de alginato de sódio, os esporos foram novamente centrifugados a 7000 rpm por 7 minutos e suspensos em quantidade igual de água deionizada. O processo de produção das cápsulas de alginato de sódio contendo as bactérias se deu conforme descrito no item 5.2.1.1.

## 5.2.2 Etapa II: Concreto

A Etapa II refere-se à caracterização das matérias primas, à produção dos corpos de prova e à realização de ensaios com posterior análise dos dados obtidos.

---

<sup>1</sup> MBS: MgSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O (0,3 g/l), MnSO<sub>4</sub> (0,02 g/l), Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> (0,02 g/l), ZnSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O (0,02 g/l), CaCl<sub>2</sub> (0,2 g/l), triptose (10 g/l), extrato de levedura (2 g/l).

### 5.2.2.1 Caracterização das matérias primas constituintes do concreto

A fim de se caracterizar as matérias primas constituintes do concreto, foram realizados alguns ensaios, a saber: difração de raios X, microscopia óptica, granulometria, massa específica real e intumescimento.

#### 5.2.2.1.1 Difração de raios X

A difração de raios X da areia, da microssílica e do pó de quartzo foi realizada no Laboratório de Cristalografia da Universidade Federal de Alfenas, no campus de Alfenas/MG. Foi empregado para o teste um tubo de cobre ( $K\alpha = 0,1542$  nm), com potencial de aceleração e corrente de 40 kV e 30 mA, respectivamente, em varredura angular contínua entre 15 e 70°, passo de 0,02° e tempo de contagem por passo de 1s. Para análise dos resultados, os óxidos tiveram os picos identificados por meio de indexação ao banco de dados cristalográficos PDF 2003 (Powder Diffraction File) da JCPDS-ICDD (- International Centre for Diffraction Data). Foi utilizado o programa Match! Phase Identification from Powder Diffraction, versão 2, da empresa Crystal Impact para identificação dos picos.

#### 5.2.2.1.2 Microscopia Ótica

Amostras da areia, microssílica e pó de quartzo foram preparadas e caracterizadas via microscopia ótica, avaliando-se a homogeneidade química dos desses agregados, os aspectos geométricos e os detalhes microestruturais. O ensaio ocorreu na UNIFAL-MG, no Laboratório Multiusuário III. As análises foram realizadas por meio de microscópio ótico de bancada da marca Zeiss, modelo Scope A1.

Para a preparação e realização dos ensaios, pequenas porções das amostras de cada material foram dispostas em uma placa de Petri de maneira a estarem o mais uniformemente espalhadas quanto possível. A placa, então, é colocada sob a lente do microscópio e os ajustes de iluminação, zoom e nitidez são realizados com o auxílio do Software Zeiss ZEN 3.3 (blue edition); imagens foram capturadas com a câmera AxioCam, modelo ERc 5s, da empresa Zeiss.

### 5.2.2.1.3 Ensaio granulométricos

A caracterização granulométrica da areia foi realizada por meio do ensaio de granulometria conforme ABNT NBR NM 248:2003 – Agregados – Determinação da composição granulométrica. Esse ensaio possibilita a determinação da composição e da curva granulométrica, assim como o diâmetro máximo das partículas e o módulo de finura.

Para a realização desse ensaio, foram separadas duas amostras de 1000 g de areia, pesadas em balança com precisão de 0,01 g, marca Mart-E, modelo ad3300, com intuito de fazer a prova e a contraprova. Essas amostras foram secas em estufa à 105 °C por 24 horas e, após esse período, foram coletadas dessas duas amostras iniciais, agora já secas, outras duas amostras de 500 g cada, uma para a prova e outra para a contraprova.

Em seguida, as amostras foram, separadamente, colocadas no agitador contendo peneiras Bertel da série normal organizadas em ordem crescente da base para o topo e agitadas durante 5 minutos. Após esse tempo, destacou-se a peneira superior e a encaixou com a base e a tampa sendo este novo conjunto agitado até que, após um minuto de agitação manual, a massa de material que passa pela peneira fosse inferior à 1% da massa do material retido. Esse processo foi repetido para todas as outras peneiras. Ao término do processo, foram calculadas as massas retidas em cada peneira assim como a massa do fundo e todo o processo foi repetido para a segunda amostra (contraprova). Por fim, foram obtidas as médias dos valores, a curva granulométrica, o módulo de finura e o diâmetro máximo em milímetros da amostra.

### 5.2.2.1.4 Ensaio de Massa Específica

Foi determinada a massa específica real da areia utilizando-se da norma ABNT NBR NM 52:2009 - Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Para tal, foi pesada uma amostra de 500 g de areia e transferida para um frasco aferido de 500 ml, registrando logo em seguida a massa do conjunto. Em seguida, foi colocada água no frasco até próximo à marca de 500 ml e esse novo conjunto foi colocado em um banho à temperatura constante de 25 °C por aproximadamente 1 hora. Após esse tempo, completou-se com água até a marca de 500 ml e logo em seguida, determinada a massa do conjunto.

Posteriormente, toda a areia foi removida do frasco e posta para secar em temperatura constante de 105 °C até obter-se uma massa relativamente constante ( $\pm 0,1$  g). Por fim, a areia

foi colocada para esfriar à temperatura ambiente em dessecador e sua massa foi registrada para a realização dos cálculos conforme a norma citada.

#### 5.2.2.1.5 Ensaio de inchamento

Por meio da norma ABNT NBR 6467/2006 (Versão Corrigida - 2009), foi determinado o valor de inchamento do agregado miúdo. A curva de inchamento é realizada para se obter os valores do coeficiente de inchamento médio e máximo e o valor da umidade crítica.

Para a execução do ensaio, 1000 g de areia, previamente seca em estufa à 105 °C, foi homogeneizada, determinando-se a sua massa unitária (massa específica aparente) de acordo com a ABNT NBR 7251. Em seguida, adicionou-se água em quantidades sucessivas para se obter teores de umidade próximo dos valores de 0,5%, 1%, 2%, 4%, 5%, 7%, 9% e 12%. Para cada adição de água foram retiradas duas porções da amostra; a primeira foi utilizada para determinar massa unitária correspondente à umidade em questão, e a segunda, foi homogeneizada para o preenchimento de uma cápsula.

Após repetir o processo para todas as umidades, as massas das cápsulas contendo a segunda porção de areia foram mensuradas e levadas à estufa a uma temperatura de 105 °C durante 24 horas.

Ao término do tempo estipulado, foram determinadas novamente as massas de cada conjunto (agora com a areia seca), e realizado os cálculos do teor de umidade de cada cápsula e do seu coeficiente de inchamento, para que se pudesse confeccionar o gráfico da curva de inchamento e encontrar os valores de umidade crítica, coeficiente de inchamento médio.

#### 5.2.2.2 Preparação dos corpos de prova – CPR

##### 5.2.2.2.1 Formulações

A formulação de referência para a produção do concreto de alto desempenho foi desenvolvida pelo Professor Luiz Antônio dos Reis da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais *campus* de Poços de Caldas, baseada em método de empacotamento de partículas, realizando-se também o ajuste da relação água/cimento, além do teor do aditivo superplastificante para ajuste de trabalhabilidade.

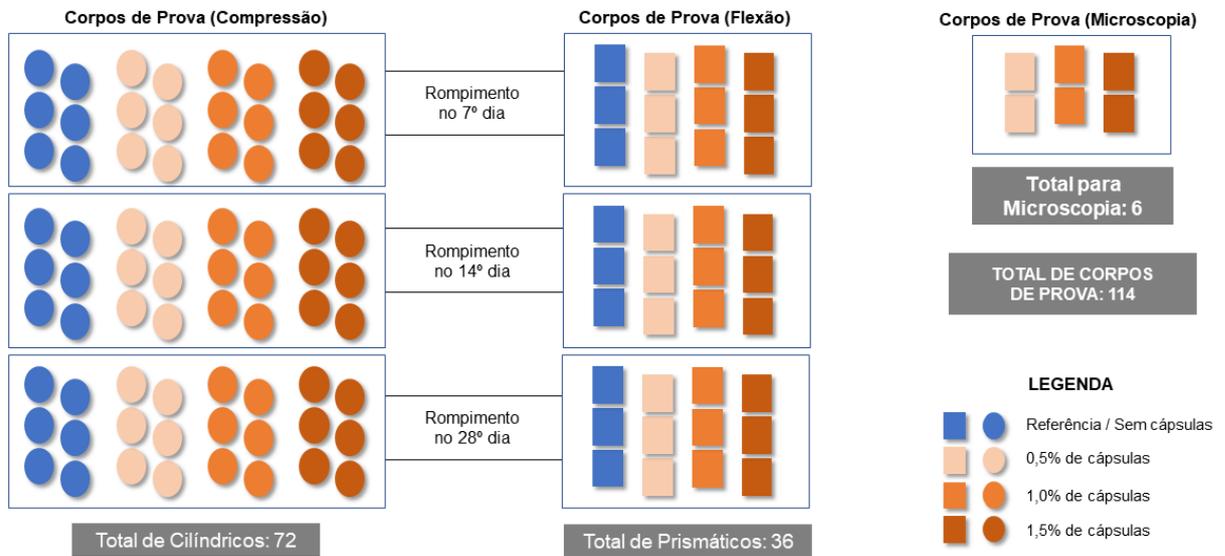
#### 5.2.2.2.2 Procedimento para obtenção dos corpos de prova

Os corpos de prova foram produzidos no IF (Instituto Federal) Sul de Minas, na cidade de Poços de Caldas/MG, totalizando 114 corpos de prova moldados em dois formatos diferentes, como especificado a seguir:

- a) Corpos de prova de Referência: obtidos a partir da formulação base (referência) sem adição de cápsulas de alginato de sódio;
- b) Corpos de prova contendo cápsulas de alginato de sódio nas proporções de 0,5%, 1,0% e 1,5% em massa de cápsulas de alginato em relação à massa do cimento;
- c) Formato cilíndrico, com 50 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento, totalizando 72 corpos de prova, sendo 24 deles rompidos ao 7º dia, 24 no 14º dia e os outros 24 no 28º dia. Esses corpos foram moldados de acordo com a ABNT NBR 7215:2019 e destinados à realização de ensaios de compressão para avaliar os efeitos da presença e do teor de cápsulas de alginato de sódio na formulação do concreto e em suas propriedades;
- d) Formato prismático/retangular, moldado de acordo com a norma ABNT NBR 13279:2015, possuindo dimensões de 40 mm x 40 mm de seção transversal por 160 mm de comprimento. Foram produzidos 42 corpos de prova nesse formato, utilizados na realização de ensaios de flexão, sendo 12 deles rompidos no 7º dia, 12 no 14º dia e 12 no 28º dia. Além disso, outros 6 corpos de prova, agora contendo cápsulas de alginato com as bactérias, foram rompidos, “reconectados”, submersos em água e mantidos juntos utilizando-se de fita adesiva. Esses corpos foram posteriormente utilizados na obtenção de imagens para verificar a atividade microbiana no preenchimento das fissuras.

A figura 7 representa visualmente a distribuição dos corpos de prova de acordo com a finalidade de ensaio.

Figura 7 – Esquema de produção dos corpos de prova



Fonte: Autor (2023)

#### 5.2.2.2.3 Nomenclatura e caracterização dos corpos de provas

A nomenclatura utilizada para identificação dos corpos de prova produzidos de acordo com a descrição feita no item 5.2.2.2.2 é mostrada na Figura 8.

Figura 8 – Nomenclatura adotada para a identificação dos corpos de prova



Fonte: Autor (2023).

Conforme mostra a figura 8 acima, a primeira letra da nomenclatura indica se o corpo de prova foi feito para ser submetido ao ensaio de compressão (C), flexão (F) ou microscopia (M). Em seguida, os primeiros dois números indicam quantos dias após a confecção dos corpos em que os ensaios foram realizados (7, 14 ou 28 dias). Já os dois últimos números, descrevem

o teor de cápsulas de alginato na formulação do corpo de prova sendo: referência (00), 0,5% (05), 1,0% (10) e 1,5% (15). Por fim, a última letra nomeia o corpo de prova dentro do grupo a qual ele pertence. A tabela 4 apresenta a nomenclatura de todos os corpos de provas produzidos.

Tabela 4 – Nomenclatura dos corpos de prova produzidos

		COMPRESSÃO				FLEXÃO			
		Referência	0,5% de cápsulas	1,0% de capsulas	1,5% de cápsulas	Referência	0,5% de cápsulas	1,0% de capsulas	1,5% de cápsulas
Compressão à 07 dias	C0700A	C0705A	C0710A	C0715A	Compressão à 07 dias	F0700A	F0705A	F0710A	F0715A
	C0700B	C0705B	C0710B	C0715B		F0700B	F0705B	F0710B	F0715B
	C0700C	C0705C	C0710C	C0715C		F0700C	F0705C	F0710C	F0715C
	C0700D	C0705D	C0710D	C0715D		-	-	-	-
	C0700E	C0705E	C0710E	C0715E		-	-	-	-
	C0700F	C0705F	C0710F	C0715F		-	-	-	-
Compressão à 14 dias	C1400A	C1405A	C1410A	C1415A	Compressão à 14 dias	F1400A	F1405A	F1410A	F1415A
	C1400B	C1405B	C1410B	C1415B		F1400B	F1405B	F1410B	F1415B
	C1400C	C1405C	C1410C	C1415C		F1400C	F1405C	F1410C	F1415C
	C1400D	C1405D	C1410D	C1415D		-	-	-	-
	C1400E	C1405E	C1410E	C1415E		-	-	-	-
	C1400F	C1405F	C1410F	C1415F		-	-	-	-
Compressão à 28 dias	C2800A	C2805A	C2810A	C2815A	Compressão à 28 dias	F2800A	F2805A	F2810A	F2815A
	C2800B	C2805B	C2810B	C2815B		F2800B	F2805B	F2810B	F2815B
	C2800C	C2805C	C2810C	C2815C		F2800C	F2805C	F2810C	F2815C
	C2800D	C2805D	C2810D	C2815D		-	-	-	-
	C2800E	C2805E	C2810E	C2815E		-	-	-	-
	C2800F	C2805F	C2810F	C2815F		-	-	-	-
<b>MICROSCOPIA</b>									
		Referência	0,5% de cápsulas	1,0% de capsulas	1,5% de cápsulas				
Microscopia Ótica		-	M05A	M10A	M15A				
		-	M05B	M10B	M15B				

Fonte: Autor (2023)

### 5.2.2.3 Caracterização dos corpos de provas

Para realizar a caracterização dos corpos de prova foram realizados ensaios de compressão, flexão e análises de imagens a partir de microscopia ótica. Os dados obtidos foram tratados estatisticamente por meio de Análise de Variância (ANOVA) de fator único e Teste Q de Tukey.

#### 5.2.2.3.1 Absorção e índice de vazios (porosidade)

Para determinação da absorção e índices de vazios, utilizou-se a norma ABNT NBR 9778:2005. Esse ensaio foi realizado para as peças cilíndricas em triplicata para cada uma das três formulações (com adições de 0,5%, 1,0% e 1,5% de cápsulas) e para a referência (sem adição de cápsulas). Esse ensaio traz informações importantes a respeito da porosidade dos corpos de prova assim como o nível de empacotamento do material.

#### 5.2.2.3.2 Ensaios de Compressão

Foi utilizada a norma ABNT NBR 7215:2019, a qual estabelece o método de ensaio de compressão para os corpos de prova cilíndricos de argamassa. Devido à ausência de agregados graúdos, a massa dos corpos de prova se torna parecido com as de argamassa, justificando assim o uso da norma acima citada para a produção e realização dos ensaios de compressão.

A norma estabelece ainda que os corpos de prova devem ser rompidos à compressão em uma dada idade específica. As idades de rompimento dos corpos de prova, assim como a tolerância da variação em horas para cada idade de rompimento estão descritas na tabela 5.

Tabela 5 – Idade de rompimento e sua tolerância permitida

<b>Idade de Ensaio (dias)</b>	<b>Tolerância (horas)</b>
7	2
14	3*
28	4

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7215 (2019, p7)

\*Valor obtido por interpolação, conforme requerido pela norma.

Para a realização do ensaio utilizou-se a Prensa Hidráulica Elétrica Digital (Contenco/Pavitest, modelo 200T I-3025-E), capacidade para 200 tf, com sistema de indicação

digital e resolução de 1 kgf. A aplicação de força é realizada de forma contínua por meio de duas válvulas reguladoras de incremento e decremento de carga.

A figura 9 representa as prensas utilizadas nos ensaios de compressão e flexão. Os ensaios foram realizados no Centro Cerâmico do Brasil, na cidade de Santa Gertrudes/SP.

Figura 9 – Prensas utilizadas nos ensaios de compressão e flexão



Fonte: (A) Contenco (2023) e (B) Autor (2023). Legenda: (A) Prensa Hidráulica da empresa Contenco/Pavitest 200T I-3025-E e (B) Máquina universal de ensaios EMIC.

#### 5.2.2.3.3 Ensaios de Flexão a três pontos

Foi utilizada a norma ABNT NBR 13279:2015 na realização dos ensaios de flexão a três pontos para corpos prismáticos/retangulares. Para a realização dos ensaios, utilizou-se de uma máquina universal de ensaios da empresa EMIC (atualmente incorporada pela multinacional INSTRON), linha DL-30000 com células de carga de 200 kN.

A figura 9 mostra a prensa universal utilizada nos ensaios de flexão, o ensaio também foi realizado no Centro Cerâmico do Brasil, na cidade de Santa Gertrudes/SP.

A norma estabelece idades específicas para realização dos ensaios, controlada a partir da hora de moldagem, assim como as tolerâncias das variações em horas para cada idade de rompimento (tabela 6).

Tabela 6 – Idade para ensaios de flexão e tempo de tolerância

Idade de Ensaio (dias)	Tolerância (horas)
7	4
14	6
28	8

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 13279 (2015, p3).

#### 5.2.2.3.4 *Microscopia Óptica*

A microscopia óptica foi utilizada como ferramenta auxiliar na interpretação dos resultados obtidos em termos da biomineralização. Dessa forma, foram analisados apenas os corpos de prova prismáticos/retangulares contendo cápsulas de alginato de sódio com bactérias (M05A, M05B, M10A, M10B, M15A, M15B). Esses corpos de prova foram previamente rompidos, e reconectados como descritos na seção 5.2.2.2, item d.

Os corpos de prova foram mantidos em imersão em água por 28 dias. Decorrido esse período, foram secos à temperatura ambiente e levados ao Laboratório Multiusuário III da UNIFAL - MG para a realização de análises microscópicas por meio de microscópio ótico de bancada.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As análises realizadas, os resultados obtidos e a discussão para cada uma das etapas descritas na seção 5 são apresentadas a seguir.

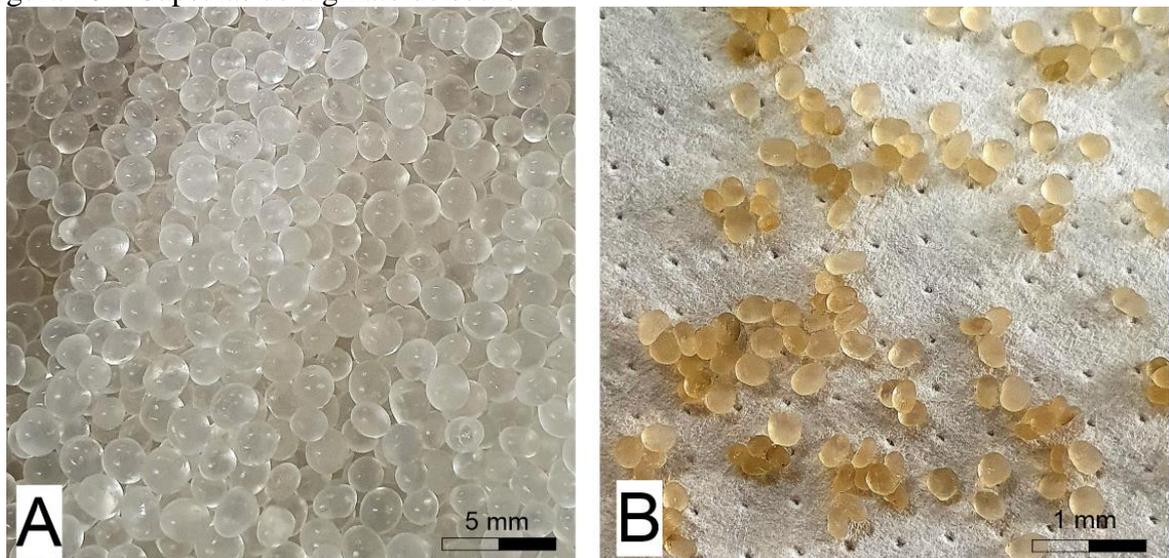
### 6.1 ETAPA I: CÁPSULAS DE ALGINATO DE SÓDIO

#### 6.1.1 Obtenção das cápsulas de Alginato de Sódio

Após a realização do procedimento descrito em 5.2.1.1 obteve-se uma quantidade de cápsulas de alginato de sódio com diâmetro variando de 3 a 5 mm, como mostrado na figura 10 (a). Essas cápsulas apresentavam uma textura gelatinosa, porém levemente rígidas, sendo necessário um pequeno esforço para estourá-las.

Após o processo de secagem, porém, as cápsulas passaram a apresentar um aspecto bem rígido e um tamanho muito menor ao anterior (figura 10 (b)) resultante, obviamente, da grande perda de massa de água. As imagens referentes à figura 10 foram obtidas logo após a produção das cápsulas de alginato de sódio e após secagem, respectivamente.

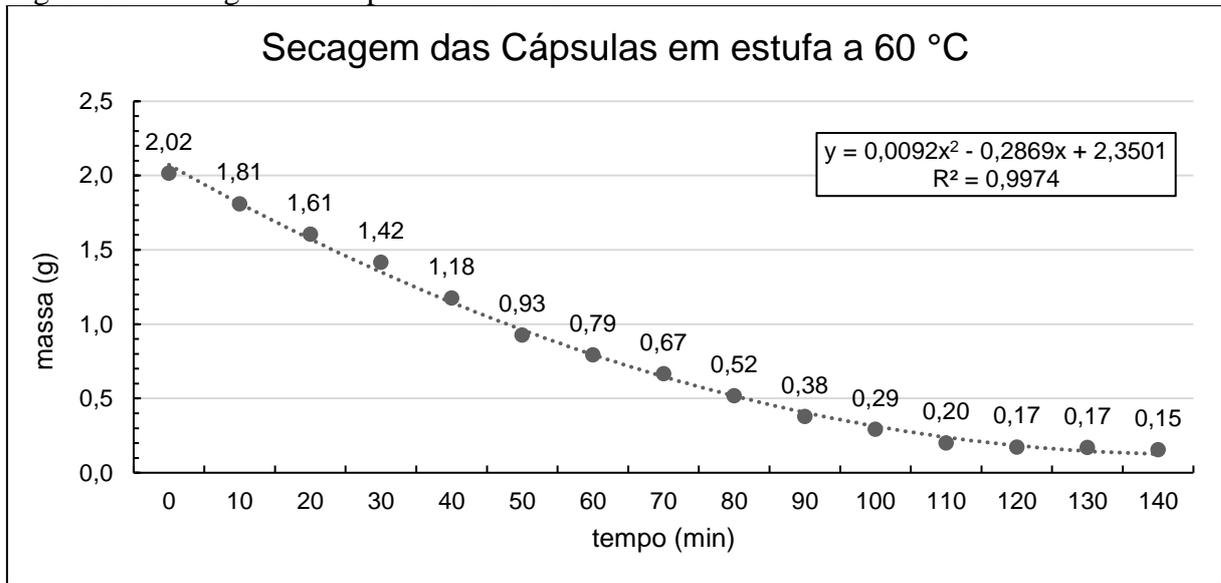
Figura 10 – Cápsulas de alginato de sódio



Fonte: Autor (2023). Legenda: (A) cápsulas recém gotejadas e (B) cápsulas secas

A figura 11 apresenta os valores das cápsulas de alginato de sódio em massa à medida em que foram secas em estufa por até 140 minutos a 60 °C, como uma forma de acelerar o processo de secagem a fim de se analisar a perda de água das cápsulas.

Figura 11 – Secagem das cápsulas em estufa a 60 °C



Fonte: Autor (2023).

Como é possível observar na figura 11, a perda de água é consideravelmente grande, fazendo com que a cápsula perca mais de 90% de sua massa inicial, justificando assim a grande diferença de dimensão entre as cápsulas úmidas e secas.

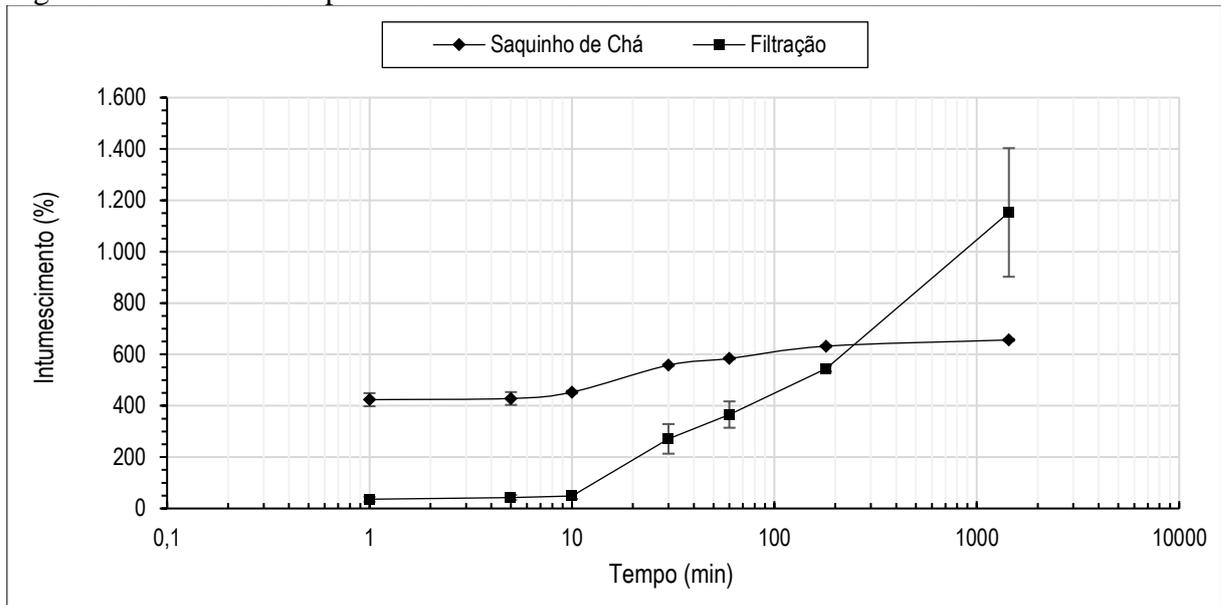
### 6.1.2 Caracterização das cápsulas de Alginato de Sódio

Como descrito na seção 5.2.1.2, foram utilizadas três diferentes metodologias para a obtenção do valor de intumescimento. A figura 12 mostra o comparativo dessas três metodologias. Os dados referentes ao ensaio se encontram descritos no Apêndice A, nas tabelas A-1, A-2 e A-3.

O teste simples apresenta um único resultado de intumescimento de  $(203 \pm 1) \%$  (figura 12 e tabela A1). Analisando os resultados do método de saquinho de chá (figura 12 e tabela A-2), observa-se que os valores de intumescimento tendem a aumentar de uma maneira mais linear e sutil, tendendo a se manter constantes após o tempo de 180 minutos. Quando analisados os dados do método por filtração (figura 12 e tabela A-3), vê-se que essa tendência a se manter constante não ocorre dentro do tempo analisado.

Essa disparidade, possivelmente se deve à barreira física que o saquinho de chá oferece às cápsulas, impedindo-as de incharem mais. Assim, ao estarem livres no líquido, as cápsulas não possuem um impedimento da sua expansão, provocando um aumento no seu valor de intumescimento com o decorrer do tempo.

Figura 12 – Análise comparativa dos métodos de ensaio de intumescimento



Fonte: Autor (2023). Nota: A escala logarítmica foi aplicada para melhor visualização dos dados.

Percebe-se também que em ambos os métodos (filtração e saquinhos de chá) o valor do intumescimento começa a ter um aumento significativo após 10 minutos submersos.

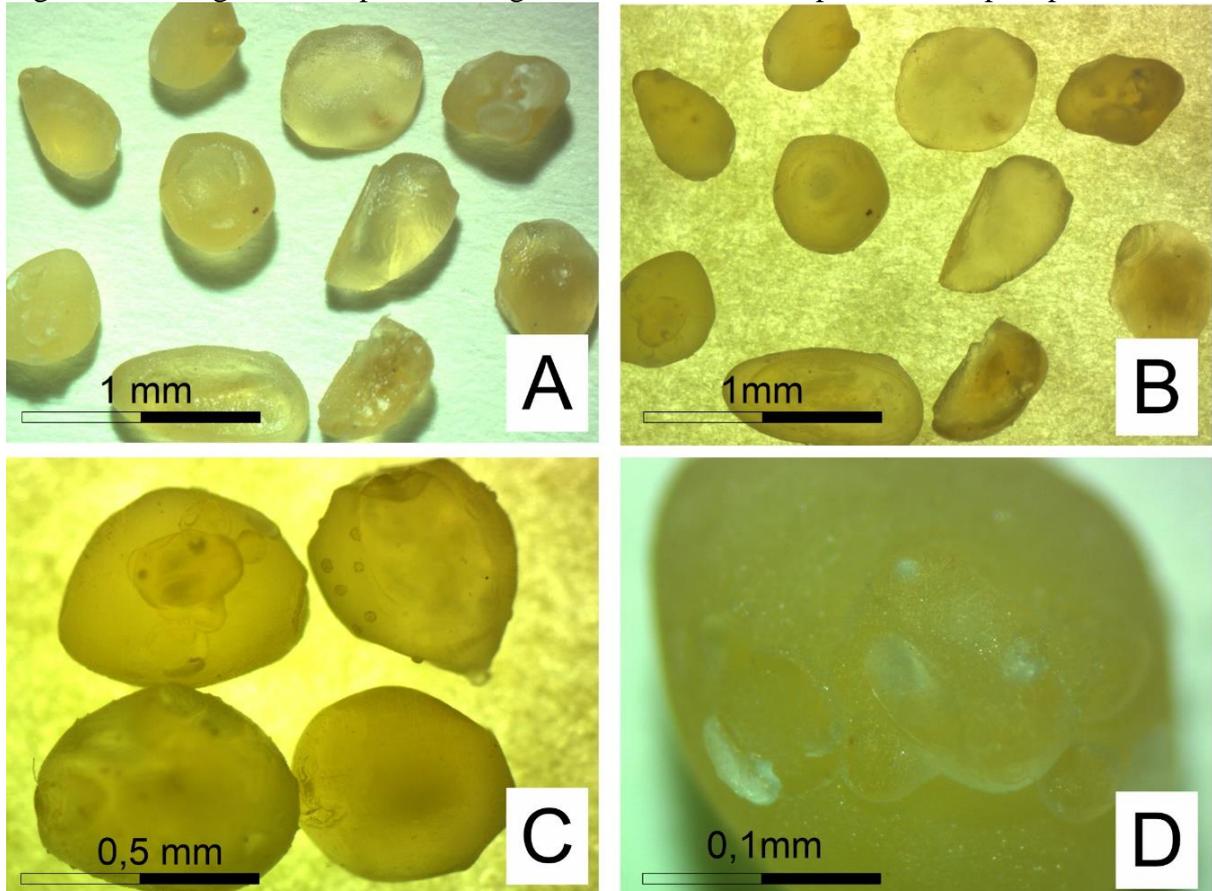
De acordo com Reis (2019), alguns materiais, como a quitosana e géis de alginato, possuem menos resistência aparente quando comparada com as cápsulas de alginato de sódio. Esse fator favorece uma dissolução mais fácil e rápida (geralmente inferior a 10 minutos) do material em meio aquoso. Por outro lado, as cápsulas de alginato de sódio, por suportarem maior valores de intumescimento, se tornam componentes interessantes na utilização em materiais cimentícios.

Outra caracterização realizada com o as cápsulas de alginato de sódio foi a obtenção de imagens de microscopia ótica. A figura 13 mostra o resultado dessa análise.

Como pode ser observado na figura 13, as cápsulas de alginato de sódio apresentam uma certa esfericidade, com grande variabilidade, sendo que algumas delas apresentam seções pontiagudas, planas ou achatadas.

Essa variação no formato das cápsulas pode ter sido influenciada pelos parâmetros utilizados no processo de fabricação, tais como a altura e velocidade do gotejamento e a velocidade de agitação da solução de cloreto de cálcio. Vargas (2017) aponta que diferenças na própria viscosidade da solução de alginato de sódio assim como no tempo que a cápsula passa pelo processo de gelificação na solução de cloreto de cálcio e no tempo e temperatura de secagem das capsulas podem promover alterações morfológicas da cápsula.

Figura 13 – Imagens das cápsulas de alginato de sódio obtidas por microscopia óptica



Fonte: Autor (2023). Legenda: (A) Cápsulas de alginato de sódio sob zoom de 10x por imagem refletida; (B) Cápsulas de alginato de sódio sob zoom de 10x por imagem transmitida; (C) Cápsulas de alginato de sódio sob zoom de 20x por imagem transmitida; (D) Cápsulas de alginato de sódio sob zoom de 50x por imagem refletida.

O acúmulo de esferas na solução de cloreto de cálcio pode ter influenciado também na alteração do formato desejado das cápsulas de alginato. Após certo tempo de gotejamento, e ao cair na solução de cloreto de cálcio, a nova gota pode se chocar com as cápsulas presentes na solução alterando assim o seu formato. A figura 13d mostra com maiores detalhes as concavidades nas cápsulas possivelmente causadas pelos fatores supracitados.

Entretanto, apesar de possuir certa variação na esfericidade, a presença das cápsulas no meio é relativamente pequena (0,5%; 1,0% e 1,5% em relação à massa do cimento), tornando sua influência mínima ou pouco significativa no empacotamento final da mistura, resultado este que é reforçado pelos valores obtidos no ensaio de índice de vazios (seção 6.2.2.4).

## 6.2 ETAPA II: CONCRETO

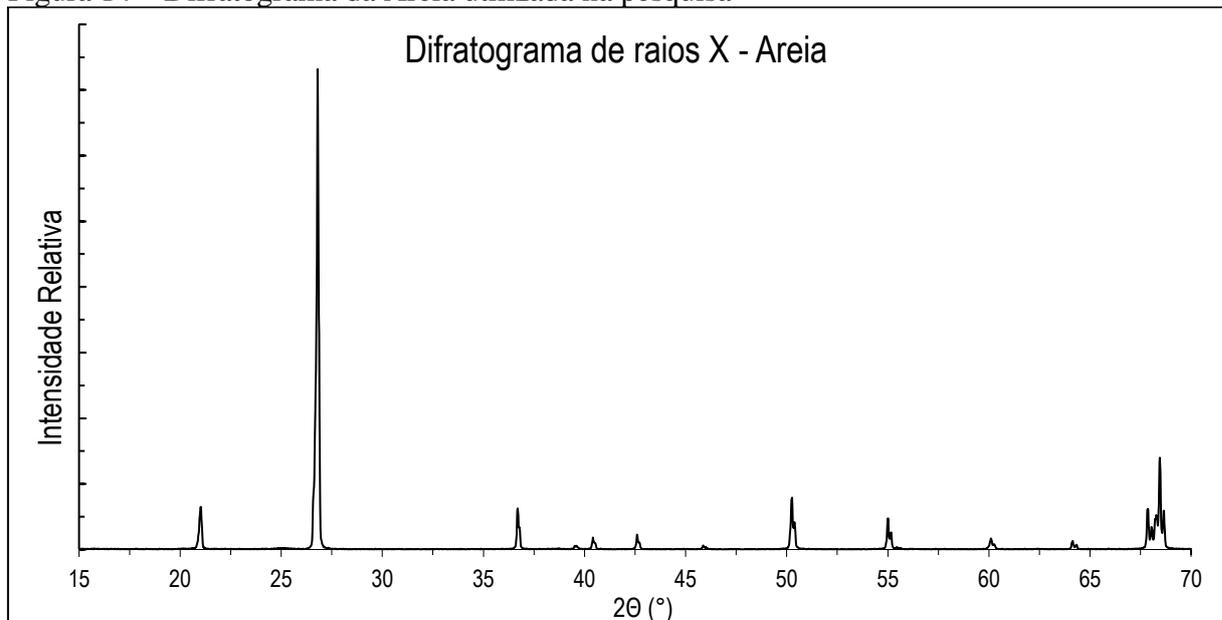
### 6.2.1 Caracterização das matérias primas

As matérias primas foram caracterizadas como descrito no item 5.2.2.1 e os resultados encontram-se a seguir, bem como a discussão.

#### 6.2.1.1 Difração de raios X

As figuras 14, 15 e 16 mostram os difratogramas da areia, do pó de quartzo e da microssílica, respectivamente.

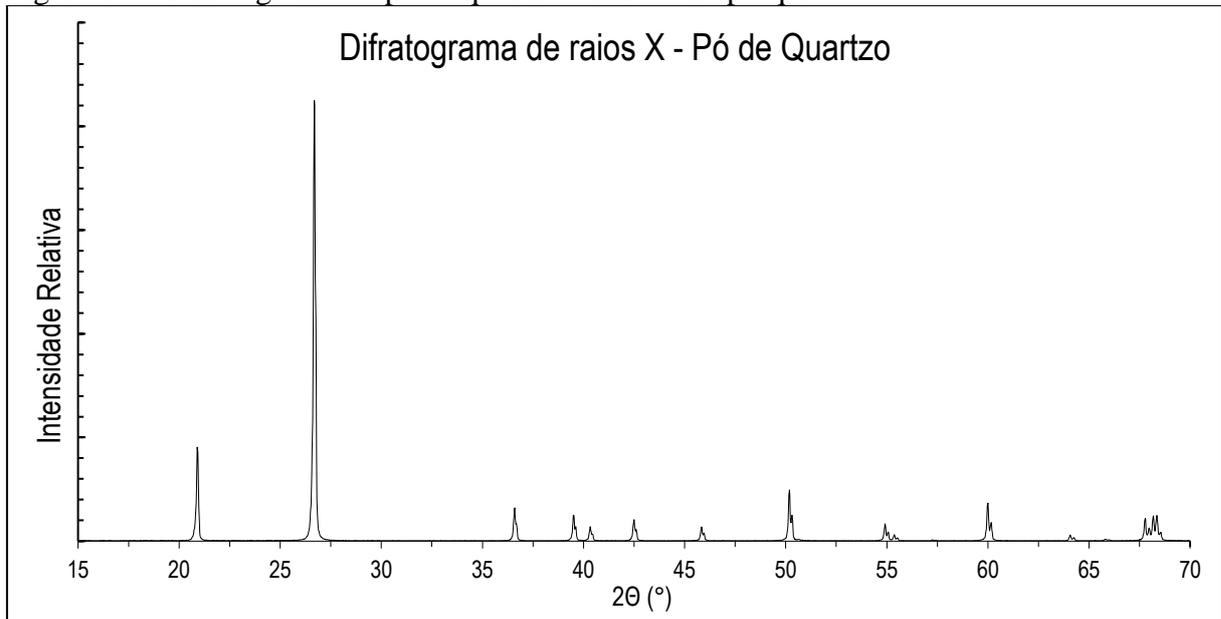
Figura 14 – Difratograma da Areia utilizada na pesquisa



Fonte: Autor (2023).

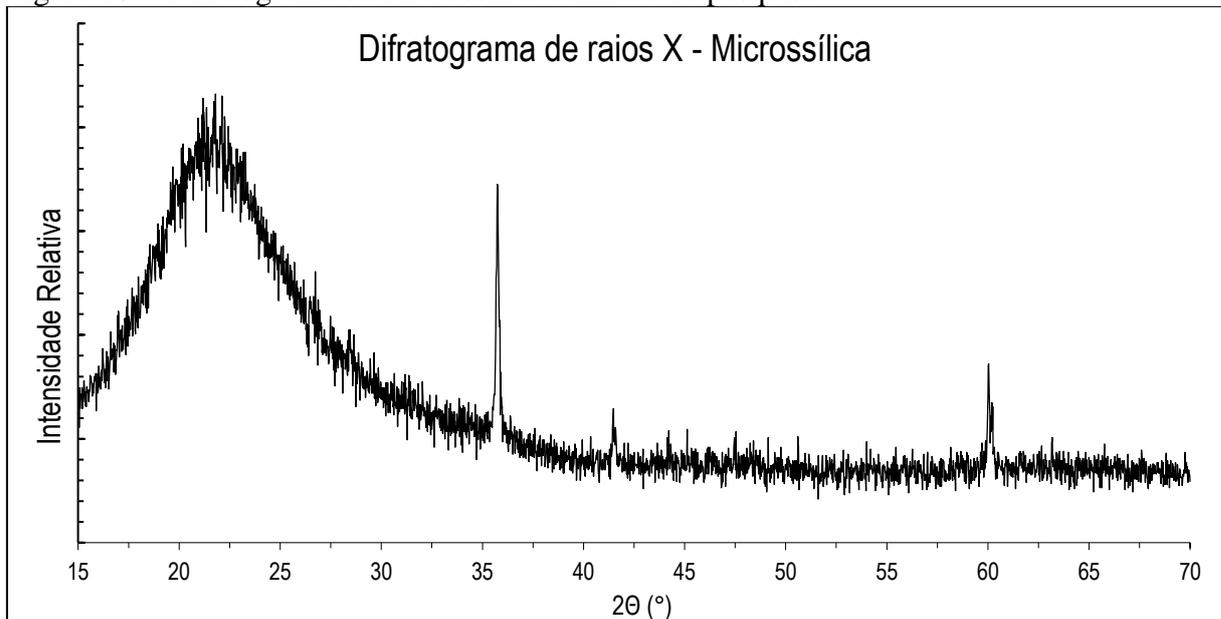
Como esperado, a areia encontra-se na forma de quartzo, cuja estrutura é trigonal (Ficha PDF 2003 #152-6861 - JCPDS-ICDD). O mesmo ocorre para o pó de quartzo (figura 15). Esses ensaios foram realizados com o intuito de verificar a possível presença de outros materiais que poderiam afetar a mistura das matérias primas, principalmente no que se refere às propriedades reológicas.

Figura 15 – Difratoograma do pó de quartzo utilizado na pesquisa



Fonte: Autor (2023).

Figura 16 – Difratoograma da Microssílica utilizada na pesquisa



Fonte: Autor (2023).

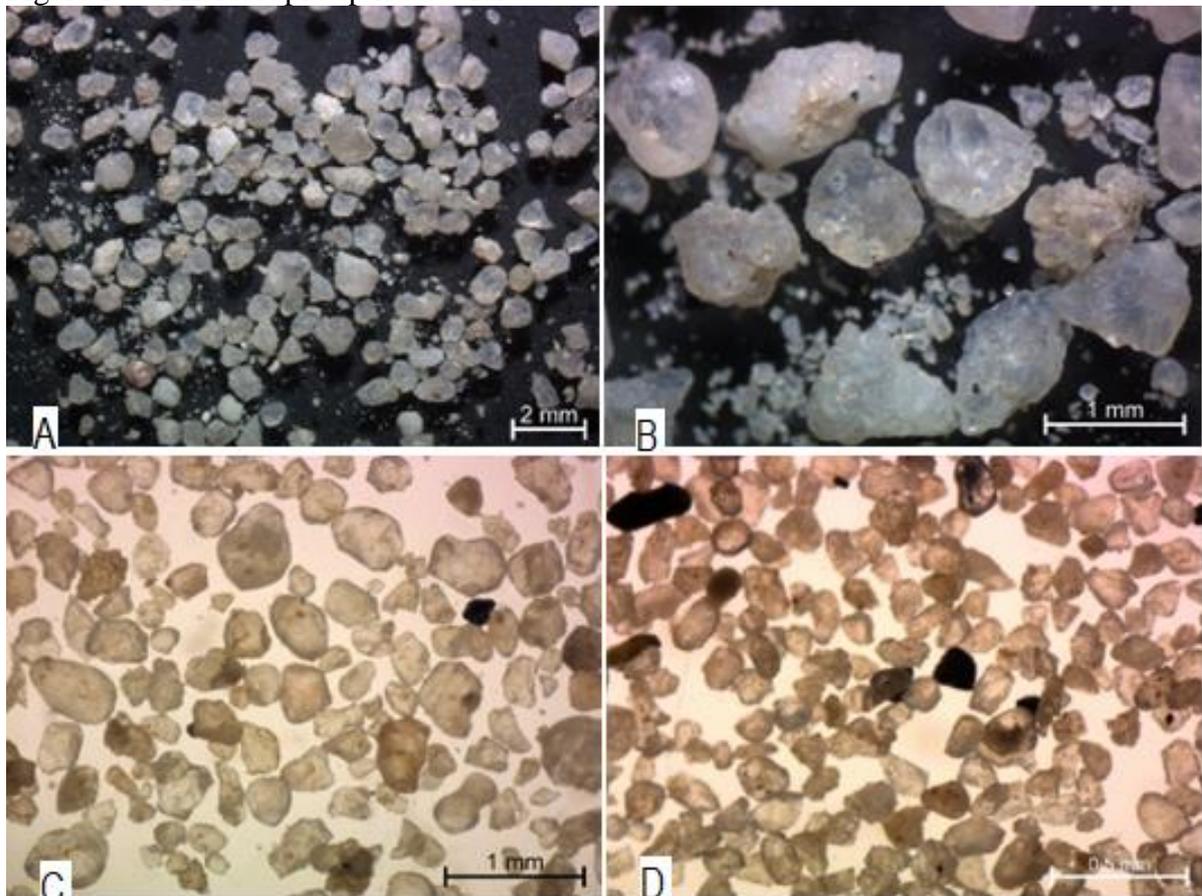
O difratograma da microssílica (figura 16) apresentou uma região de amorfização (halo-amorfa, banda com background elevado), como esperado. A microssílica possui elevada reatividade devido à sua finura extrema e ao alto teor de óxido de silício amorfo. A presença de sílica amorfa no concreto contribui para uma maior resistência à compressão, no aumento da resistência à flexão e no módulo de elasticidade, além de menor permeabilidade, aumentando sua resistência aos ataques químicos.

Ainda, a adição de microssílica promove uma mudança na interface entre os agregados e a pasta, pois ao invés dos vazios e do hidróxido de cálcio, evidencia-se formações compactas de CSH, que é o produto de hidratação mais resistente da pasta endurecida. De acordo com Prameetthaa, Bhartkumar e Iyer (2015), ela reage com produtos de hidratação e forma mais gel de CSH, sendo considerada uma pozolana altamente reativa (CHANDRA & BERNTSSON, 1996).

#### 6.2.1.2 Microscopia Óptica

A figura 17 mostra imagens dos grãos de areia obtidas por meio de microscopia óptica.

Figura 17 – Microscopia óptica da areia

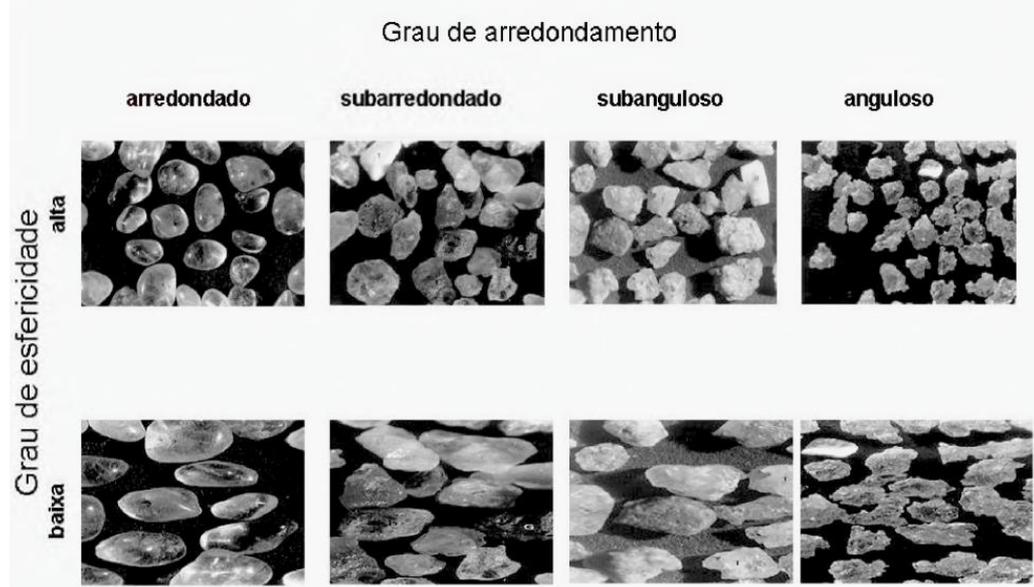


Fonte: Autor (2023). Legenda: (a) areia malha 30 por luz refletida, zoom de 6,5x. (b) areia malha 30 por luz refletida, zoom de 100x. (c) areia malha 50 por luz transmitida, zoom de 25x. (d) areia malha 200 por luz transmitida, zoom de 50x.

De acordo com a norma ABNT NBR 7389-1 (2009), a determinação do grau de esfericidade e de arredondamento é realizada de forma qualitativa à olho nu com auxílio de

equipamento óptico. A avaliação então poderá ser comparada com um esquema ilustrativo (figura 18) a fim de melhor orientar a classificação da amostra.

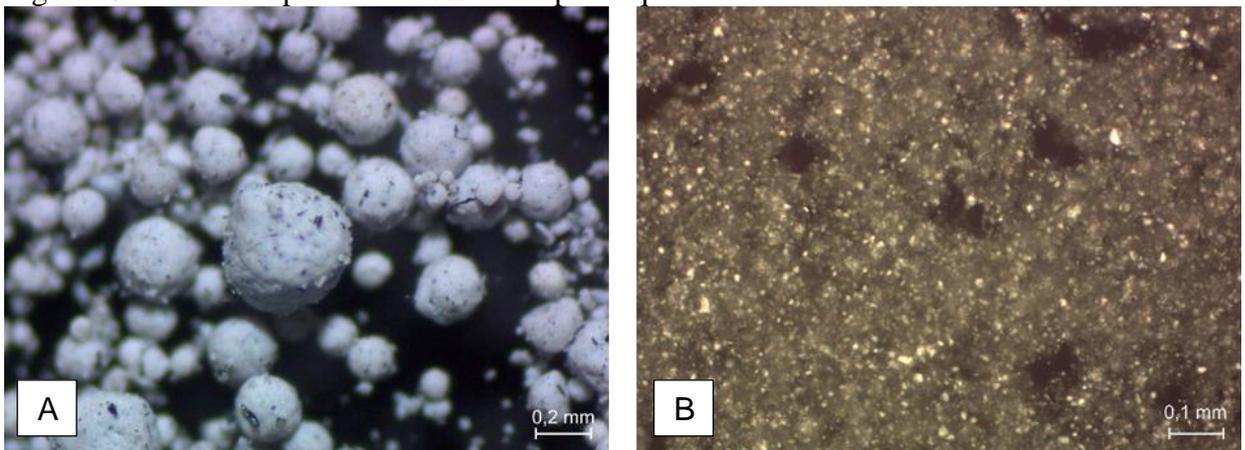
Figura 18 – Esquema ilustrativo para orientação da avaliação da forma do agregado miúdo



Fonte: ABNT NBR 7389-1 (2009, p3).

Ao avaliar visualmente a amostra, representada pela figura 17, e comparando-a com o esquema apresentado na figura 18, concluiu-se que a areia em estudo apresenta alto grau de esfericidade e grau de arredondamento subarredondado. Também foram avaliadas amostras de microssílica e do pó de quartzo (figuras 19a e 19b respectivamente).

Figura 19 – Microscopia da microssílica e pó de quartzo



Fonte: Autor (2023). Legenda: (a) Microssílica obtida por luz refletida, zoom de 50x. (b) pó de quartzo obtida por luz transmitida, zoom de 100x.

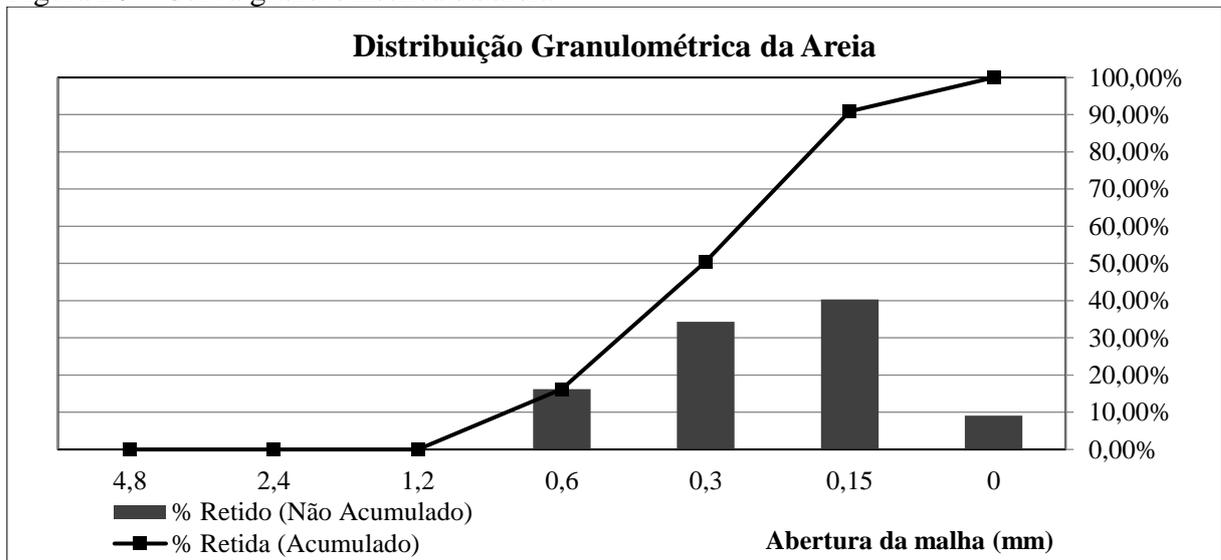
Como é possível observar na figura 19a, a microssílica, constituída basicamente de sílica amorfa, forma aglomerados esféricos devido às forças de van der Waals quando em estado seco

(Dellamano, 1995). A figura 19b, por sua vez, exemplifica o alto grau de finura do pó de quartzo, o que, por um lado, dificulta a obtenção de imagens com alta nitidez, e por outro, comprova que o material possui granulometria extremamente fina como esperado, o que contribui fortemente para o preenchimento de vazios e maior empacotamento, fato atrelado diretamente ao aumento da resistência mecânica.

### 6.2.1.3 Ensaios Granulométricos

A curva granulométrica obtida para a areia é representada na figura 20. Os valores médios obtidos dos resultados relativos aos ensaios granulométricos são apresentados no Apêndice B, tabela B-1.

Figura 20 – Curva granulométrica da areia



Fonte: Adaptado de Oliveira (2022).

Ao analisar os dados obtidos pela tabela B-1, é possível observar que a maior fração dos grãos de areia, 40,35% da massa, encontra-se retida na peneira de 100 mesh, com abertura de 0,15 mm. É possível observar também que os diâmetros máximos dos grãos se encontram entre 1,20 mm e 0,6 mm, representando 16,24% da massa total da areia estudada.

A areia apresentou uma distribuição contínua com maior concentração nas peneiras de maior malha, indicando a presença de grãos mais finos (entre 0,15 e 0,30 mm) em 83,76% da massa. Entende-se assim que a areia em questão possui uma uniformidade em sua distribuição sendo considerada adequada para o uso no preenchimento e diminuição de vazios do concreto, melhorando o empacotamento e auxiliando no ganho de resistência mecânica.

#### 6.2.1.4 Ensaio de Massa Específica

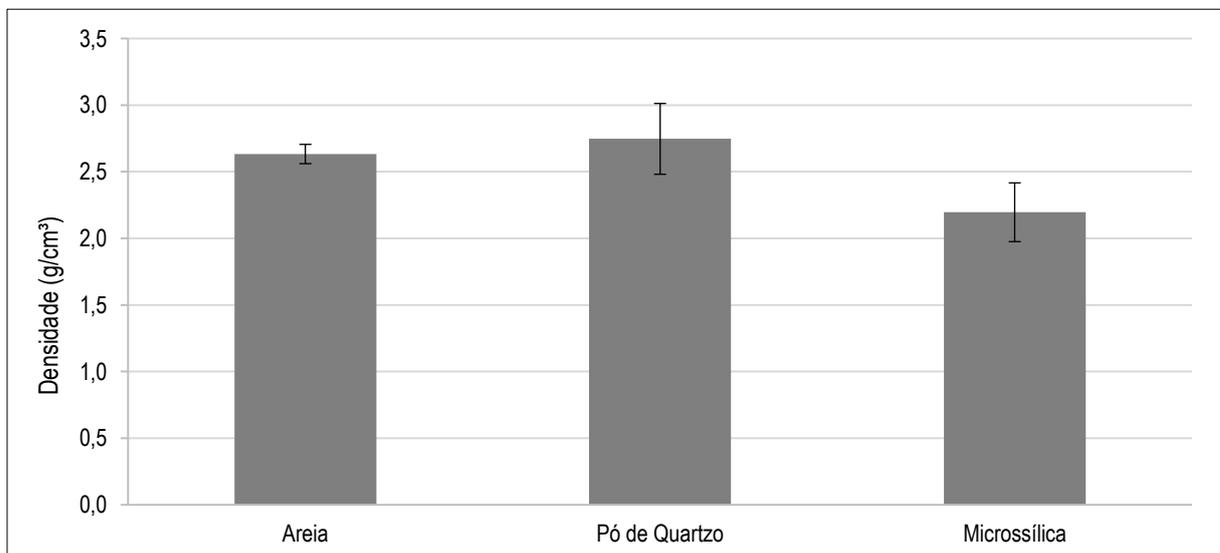
Os resultados da massa específica obtidos ( $2,63 \pm 0,07$  para a areia;  $2,7 \pm 0,3$  para o pó de quartzo e  $2,2 \pm 0,2$  para a microssílica) se encontram em concordância com os valores tipicamente encontrados para as matérias primas em questão (GUZZO, 2008; SILVA e LIBORIO, 2007; LUZ e LINS, 2005).

As tabelas C-1, C-2 e C-3 (Apêndice C) relacionam com mais detalhes os dados obtidos nos ensaios de massa específica (densidade) para a areia, o pó de quartzo e a microssílica, assim como o tratamento estatístico dos respectivos dados.

Os resultados da análise de variância (ANOVA), tabela C-2, mostram os valores F (6,112) acima do valor F crítico (5,143) e valor-p (0,04) abaixo do nível de significância estabelecido de 0,05. Por meio desses dados, pode se verificar que há uma diferença significativa entre pelo menos duas das massas específicas obtidas. Em outras palavras, a ANOVA permite avaliar que, apesar dos materiais analisados (areia, pó de quartzo e microssílica) possuírem o dióxido de silício como composto comum, suas densidades se diferem em pelo menos uma das comparações realizadas em pares.

Ao analisar os dados por meio do Teste Q de Tukey, encontrado na tabela C-3 do Apêndice C, percebe-se que o valor-p encontrado para o par Pó de Quartzo - Microssílica (0,03719) se encontra abaixo do valor de significância (0,05), o que mostra que há uma diferença significativa nas médias entre os pares. A figura 21 auxilia na melhor visualização destas comparações.

Figura 21 – Médias das densidades obtidas e seus respectivos desvios padrões



Fonte: Autor (2023).

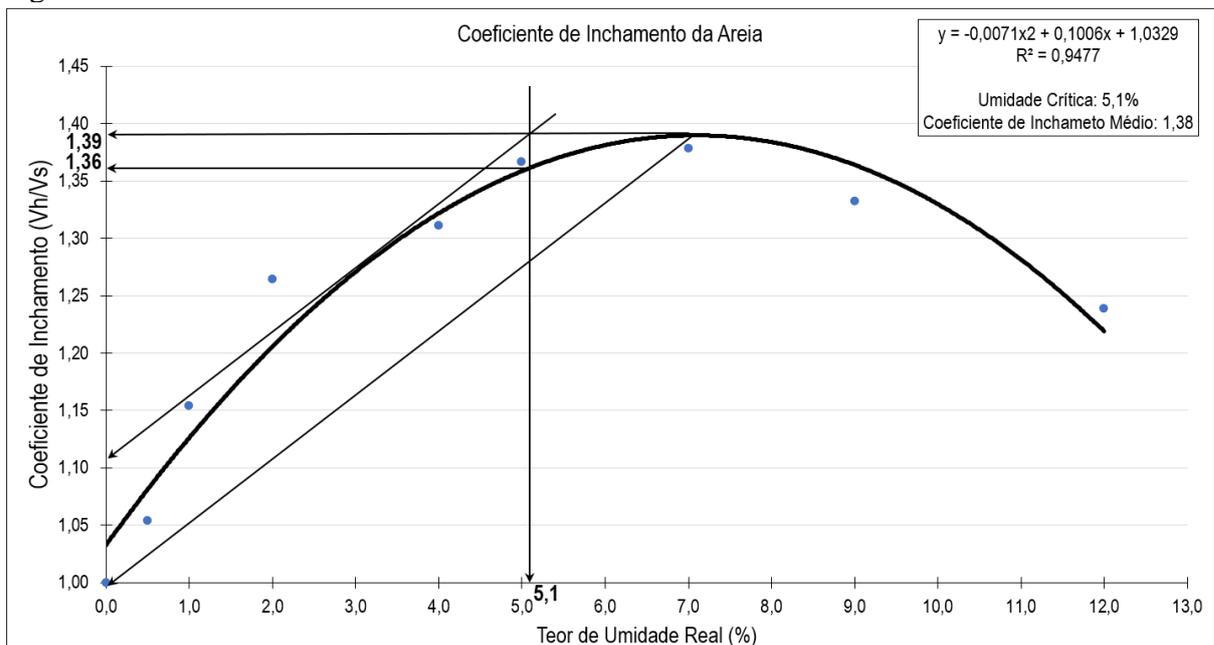
Como é possível observar na figura 21, o valor da densidade obtida para a areia – levando em consideração o seu desvio padrão – se sobrepõe com o do pó de quartzo. Ambas, porém, não se sobrepõem com o valor da microssílica, como sugerido pela ANOVA e pelo teste Q de Tukey.

É perceptível, também, que as densidades da areia e do pó de quartzo se encontram próximas, sendo estatisticamente semelhantes. Fatores como a presença de impurezas, comumente encontradas em areia e quartzo, podem contribuir para as variações encontradas.

#### 6.2.1.5 Ensaio de Inchamento

Os valores de umidade crítica (5,1%) e do coeficiente de inchamento médio (1,38) estão indicados na figura 22. A tabela D-1, disposta no Apêndice D, mostra os dados obtidos no ensaio de inchamento utilizados para a elaboração da figura 23.

Figura 22 – Gráfico do coeficiente de inchamento da areia



Fonte: Autor (2023).

Os resultados apresentados demonstram o comportamento da areia utilizada quanto inchamento, ou seja, na capacidade de retenção de água. Para a confecção dos corpos de prova desta pesquisa, foi utilizada areia previamente seca em estufa, tornando sua umidade próxima de zero. Assim, o intuito desse ensaio foi apenas para confirmar que a areia está nas condições adequadas para uso (conformação dos corpos de prova).

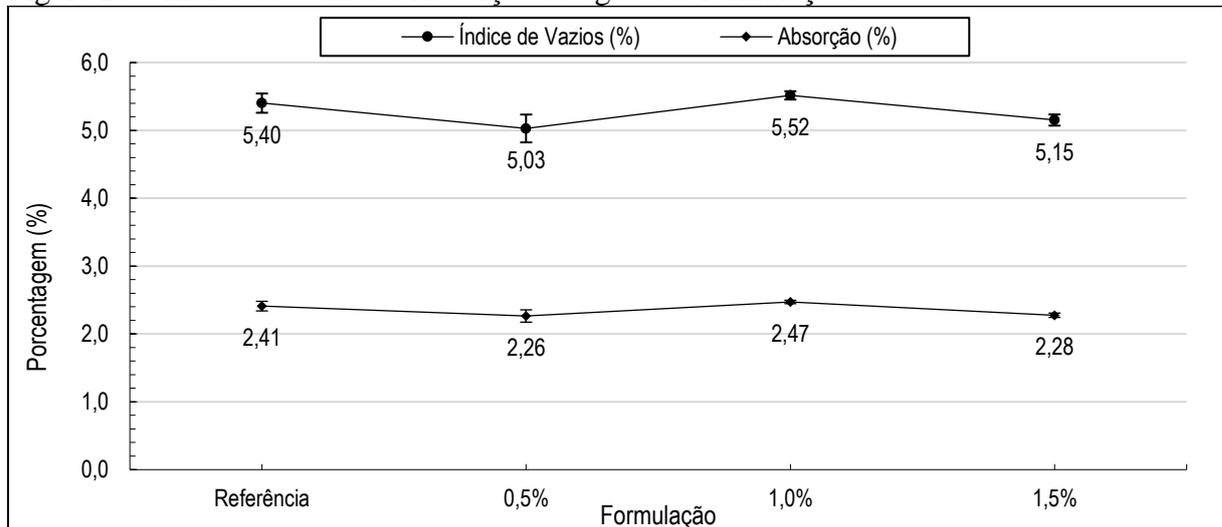
## 6.2.2 Caracterização dos corpos de prova

Foram realizados ensaios de porosidade, resistência mecânica à compressão e flexão, e microscopia ótica dos corpos de prova confeccionados.

### 6.2.2.1 Ensaio de Porosidade

Os resultados para o ensaio de porosidade realizado para as diferentes formulações são exibidos na tabela E-1 (Apêndice E) e dispostos de maneira gráfica na figura 23. Esse ensaio permite analisar os valores relacionados à absorção de água e ao índice de vazios.

Figura 23 – Índice de Vazios e Absorção de água das formulações



Fonte: Autor (2023).

Com base nos dados apresentados, é possível perceber que todas as formulações estudadas apresentaram baixo índice de vazios (5,0~5,5 %) e baixa absorção de água (2,2~2,5%). Conclui-se então, que a presença das cápsulas de alginato de sódio não interferem muito na absorção de água e na presença de vazios no corpo de prova. Muito provavelmente essa baixa influência das cápsulas no meio se dá pelo fato de suas proporções serem relativamente baixas e, portanto, influenciam muito pouco no empacotamento final do material.

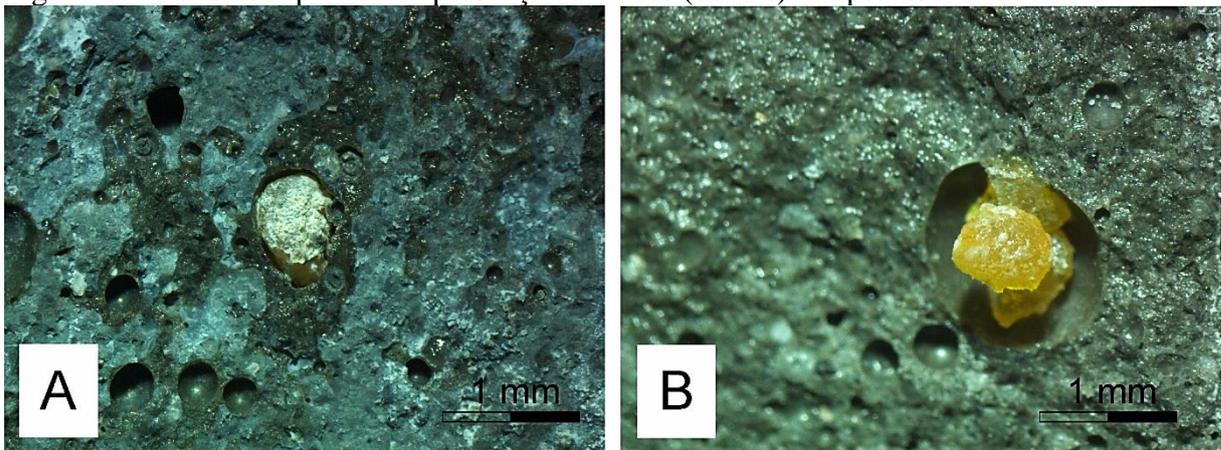
Outro fator que possa ter contribuído para a baixa porosidade do material, além da não presença de agregados graúdo e da baixa relação água-cimento, foi a utilização de argamassadeira na elaboração dos corpos de prova. O uso deste equipamento permite uma maior homogeneização da massa promovendo, assim, uma melhor distribuição das partículas.

Como é possível observar na figura 23, os valores de absorção seguem uma tendência similar aos do índice de vazios. Vale ressaltar ainda, que a formulação contendo 1,0% cápsulas possui um valor mais elevado (até mesmo que a formulação de 1,5%) em ambas as variáveis estudadas. Entretanto, esse aumento não é significativo o bastante para justificar uma queda considerável nos valores de resistência mecânica.

Ao se realizar os ensaios mecânicos, é possível observar que, como esperado, a ruptura se dá pelo caminho onde há uma maior presença de vazios e, nesse caso, por onde também há uma maior presença de cápsulas. A princípio, este fato se torna algo benéfico pois, ao se fraturar, o caminho da fissura irá passar pelas cápsulas, permitindo, então, que haja a ativação metabólica das bactérias encapsuladas e o posterior preenchimento da respectiva fissura.

A figura 24 mostra com mais detalhes a face de ruptura de um dos corpos de prova e da presença de poros e cápsulas no corpo de prova.

Figura 24 – Face de ruptura com presença de vazios (bolhas) e cápsulas



Fonte: Autor (2023).

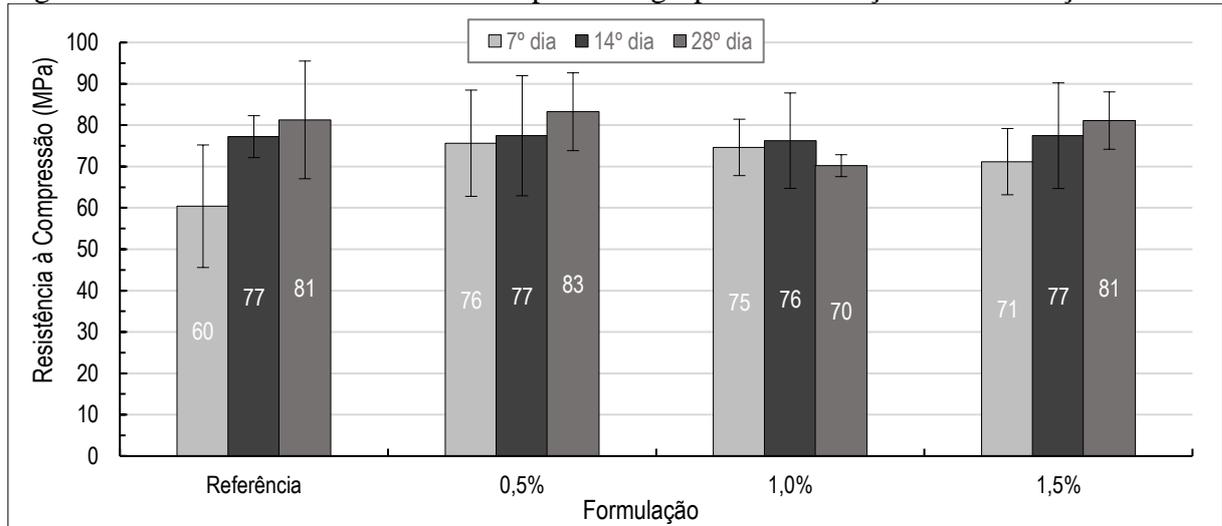
Como pode ser visto nas figuras 24a e 24b, há a presença de “bolhas partidas ao meio”, comprovando o caminho preferencial da fissura e do rompimento. Essas “bolhas” (vazios), entretanto, possuem tamanhos com dimensões capilares, confirmando os resultados de alto empacotamento e baixo valores de índice de vazios.

Ao olhar para as cápsulas de alginato presentes na figura 24, pode-se perceber que na figura 24a, a cápsula de alginato possui uma superfície branca, fato atribuído ao início da ação bacteriana; já na figura 24b é possível verificar que a cápsula se encontra aparentemente “colada” na parede interna da bolha.

### 6.2.2.2 Ensaio de compressão

A figura 25 ilustra o comportamento mecânico (resistência mecânica à compressão) em função da formulação investigada. Os dados utilizados para a elaboração da figura 25 encontram-se tabela F-1, Apêndice F.

Figura 25 – Valores da resistência à compressão agrupados em função da formulação



Fonte: Autor (2023).

Observa-se uma tendência no aumento dos valores de resistência com o passar dos dias, principalmente quando se compara os valores obtidos no 7º e 28º dia. Em todos os grupos de formulações, houve esse aumento. Todavia, observa-se uma queda não esperada nos valores de resistência à compressão nos resultados do 7º para o 14º dia da formulação sem cápsulas (referência) e entre os 14º e 28º dias da formulação contendo 1,0% de cápsulas. Algumas hipóteses foram levantadas para a ocorrência dessas quedas. Dentre elas, entende-se que possa ter ocorrido uma falha humana na execução do ensaio ou até mesmo na confecção dos corpos de prova, ocasionando variações fora do esperado. Outro fator a ser considerado para essa variação seria a execução do ensaio em diferentes prensas.

A inexistência de equipamentos na UNIFAL/MG para a realização dos ensaios mecânicos trouxe a necessidade da realização de parcerias para a sua execução. Entretanto, devido à impossibilidade de finalizar os ensaios no Centro Cerâmico do Brasil – ocasionado pela manutenção do equipamento –, a execução do ensaio de compressão dos corpos de prova ensaiados no 28º dia necessitou ser finalizado em equipamentos diferente, pertencente à Polimix – Poços de Caldas.

A presença de bolhas de ar e espaços vazios são outros fatores que possivelmente vieram a influenciar a alteração dos resultados esperados. Entretanto, como visto nos resultados da seção 6.2.2.1, vê-se que a porosidade do material se encontra em níveis relativamente baixos, entre 5,0% e 5,5%, e que, mesmo na formulação de 1,0%, que apresenta um valor ligeiramente mais alto que as demais, esses valores não seriam capazes de promover grandes alterações nos resultados de um grupo inteiro de corpos de prova.

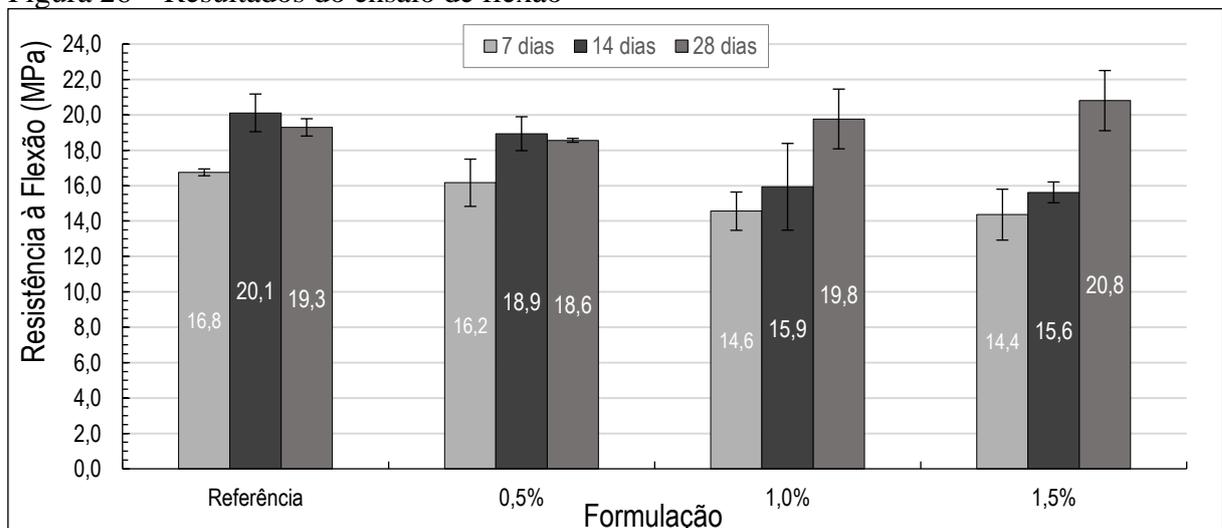
Um último fator a ser considerado seria a presença das cápsulas de alginato de sódio. Observa-se que o grupo de corpos de prova que sofreu a maior queda não esperada nos valores, foi justamente o grupo de referência (não contendo cápsulas), levando a descartar a possibilidade de que a presença das cápsulas teria influência nessa queda.

Salienta-se, porém, que, ao se analisar os dados de uma maneira mais apurada, é possível observar uma tendência de uma pequena diminuição nas resistências conforme se aumenta a porcentagem de cápsulas no meio. Estatisticamente, entretanto, não há a diferença significativa entre as médias de resistência com o aumento da porcentagem de cápsulas no meio – conforme pode ser verificado pela Análise de Variância (ANOVA) e Teste Q de Tukey que se encontram no apêndice F, tabelas F-2 e F-3 respectivamente.

### 6.2.2.3 Ensaio de Flexão

Os valores médios obtidos para o ensaio de flexão a três pontos podem ser vistos na figura 26; os dados obtidos para o ensaio de flexão se encontram na tabela G-1.

Figura 26 – Resultados do ensaio de flexão



Fonte: Autor (2023).

Os valores encontram-se dentro do esperado para esse tipo de concreto. Observa-se que a presença das cápsulas de alginato de sódio teve muita pouca influência na redução da resistência mecânica à flexão (como visto também na compressão). Diante disso, entende-se que o uso das cápsulas contendo a bactéria não causa prejuízos às propriedades mecânicas do concreto.

Ao analisar os gráficos com mais cautela, fica evidente que houve um aumento da resistência mecânica ao longo dos dias, e que as formulações contendo 1,0% e 1,5% de cápsulas de alginato de sódio apresentaram um elevado ganho de resistência mecânica nos ensaios realizados ao 28º dia.

Ao contrário das formulações de 1,0% e 1,5%, as formulações de referência e de 0,5% de cápsulas obtiveram, aparentemente, uma leve e inesperada queda em sua resistência. Entretanto, ao se realizar a análise de variância e o teste de Tukey (tabelas G-2 e G-3), observa-se que essa queda na realidade não possui significância estatística.

#### 6.2.2.4 Microscopia Ótica

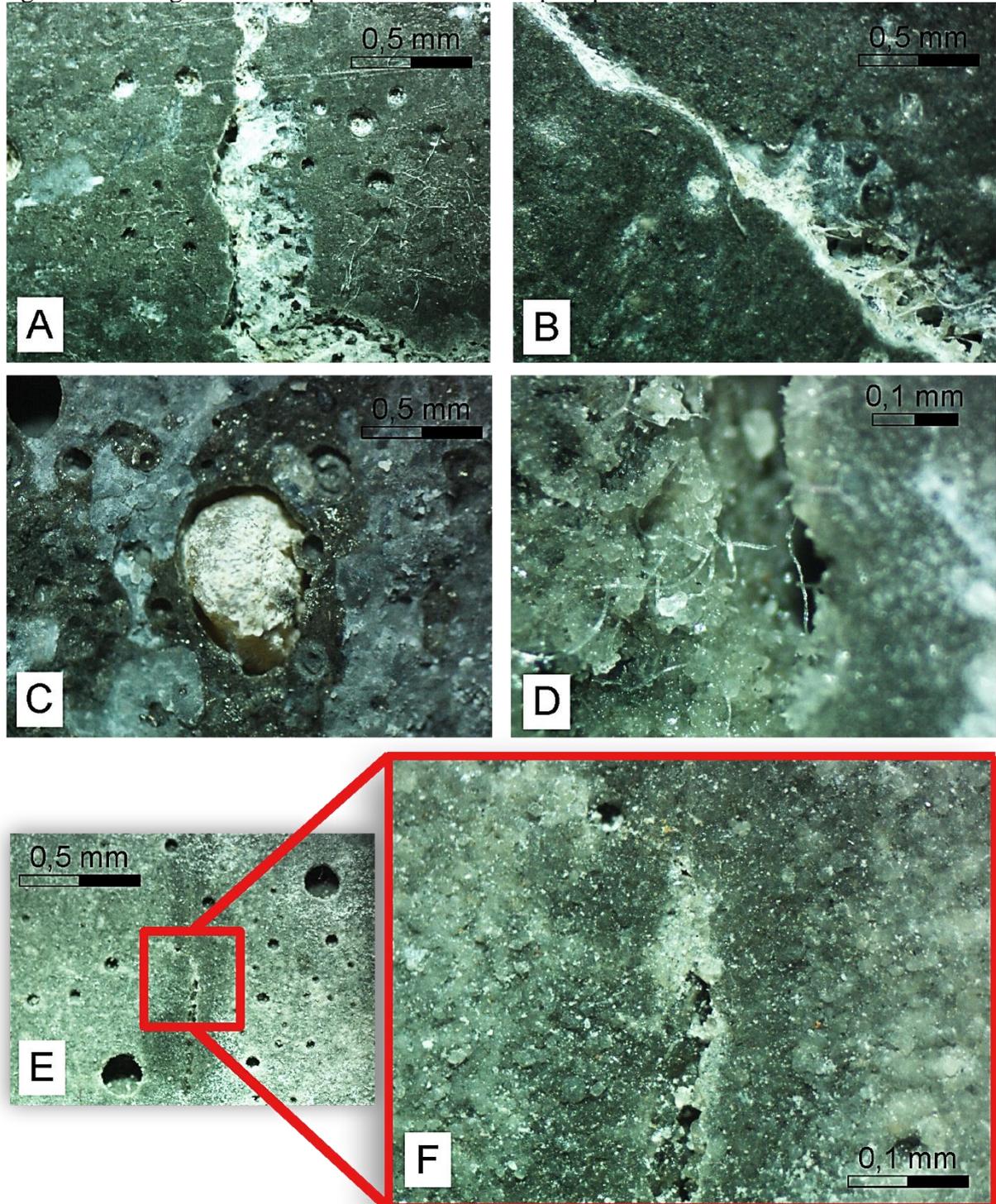
A Figura 27 mostra as imagens obtidas por microscopia ótica da superfície das amostras fraturadas dos corpos de prova ensaiados mecanicamente por flexão.

As figuras 27a e 27b evidenciam o preenchimento da fissura por via metabólica das bactérias *Lysinibacillus sphaericus*. Como é possível analisar, ambas as figuras mostram que as fissuras foram preenchidas por um material branco (visto com mais detalhes na figura 27c), mesmo possuindo diferentes espessuras. É possível observar também a formação de carbonato de cálcio na forma de uma estrutura “fibrosa” em aberturas mais espessas. Essas estruturas são mais bem analisadas na figura 27d, onde é possível ver com mais detalhes que as “fibras” produzidas pelas bactérias possuem formatos irregulares, não lineares, arredondados e “engrumados”. Outra estrutura associada à ação metabólica das bactérias poder ser vista na mesma imagem; pequenos grânulos parecidos com grãos de açúcar cristalizados. Ambas as estruturas esbranquiçadas podem ser vistas por toda a extensão da fissura.

A figura 27e apresenta uma porção do corpo de prova, onde quase não se vê a fissura e, junto a ela, outra porção contendo o preenchimento mais evidente. Essas áreas estão destacadas em vermelho e ampliadas para melhor visualização na figura 27f. A figura 27c, por fim, mostra uma cápsula esbranquiçada evidenciando seu rompimento e a ação bacteriana, algo já evidenciado na figura 24a.

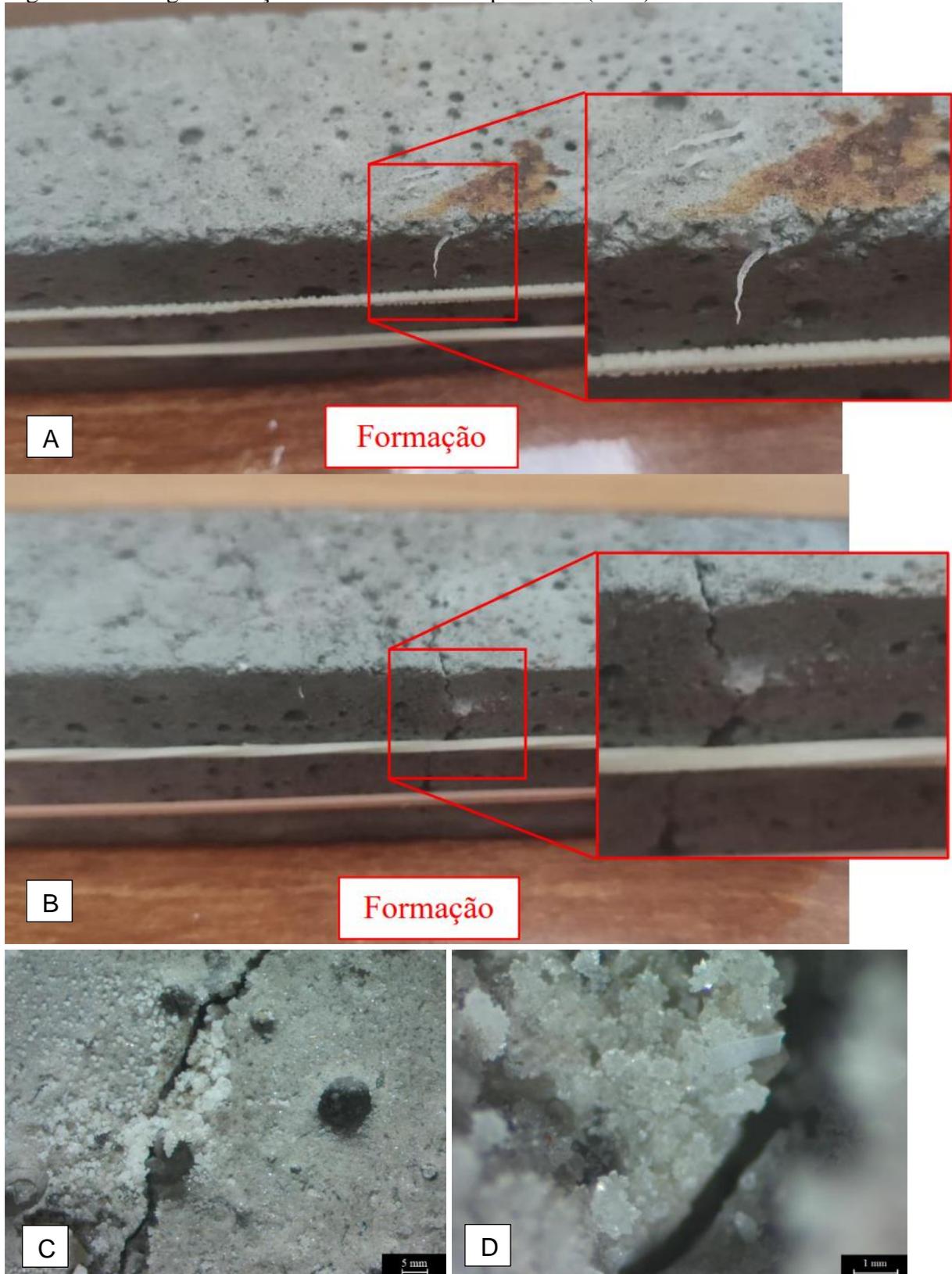
As informações obtidas por meio da microscopia óptica se encontram semelhantes aos encontrada por Cruz (2023) em seu estudo que analisou o uso das mesmas bactérias em concretos tradicional; alguns desses resultados estão evidenciados na figura 28.

Figura 27 – Imagens obtidas por meio de microscopia óptica



Fonte: Autor (2023). Legenda: (a) Preenchimento de fissuras pelas bactérias, zoom de 32x. (b) Preenchimento de fissuras de diversas espessuras, aumento de 32x. (c) Cápsula esbranquiçada, aberta, zoom de 10x. (d) Formação fibrosa e cristalização resultante da ação bacteriana, zoom de 50x. (e) Preenchimento parcial de fissura de diferentes espessuras, aumento de 6,5x. (f) Corte e aumento de visualização da figura (e), aumento de 32x.

Figura 28 – Imagens da ação bacteriana obtidas por Cruz (2023)



Fonte: Cruz (2023, p. 64-66). Legenda: (a) Formação de fibras (b) Formação de pó esbranquiçado (c) Cristalização de fissuras, aumento de 65x. (d) Cristalização de fissuras, aumento de 500x.

## 7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A partir dos resultados obtidos pôde-se constatar que a adição das bactérias na formulação dos concretos não afetou significativamente no empacotamento e qualidade das massas obtidas nos estados fresco e endurecido. Além disso, não foi observada nenhuma influência significativa das cápsulas nas propriedades reológicas aparentes, físicas e mecânicas das composições investigadas. Nesse caso, atribui-se que o processamento, a produção e as condições de ensaio provavelmente maior influência nos resultados do que a própria presença das cápsulas de alginato de sódio.

O fato de a adição das bactérias não comprometer nenhuma das propriedades e características do concreto no estado fresco ou endurecido é um aspecto bastante positivo, que abre margem para a continuidade dos estudos dentro dessa temática.

Observou-se também que o meio em que as bactérias foram inseridas e o uso das cápsulas de alginato de sódio para sua proteção permitiram que elas permanecessem seguras até o momento de sua ação metabólica (processo de biomineralização).

Conclui-se que a utilização das bactérias no tratamento de fissuras é viável, uma vez que sua inserção não compromete as propriedades do concreto, sendo capazes de atuar positivamente no fechamento de fissuras de menores dimensões por meio da biomineralização.

Por fim, sugere-se para trabalhos futuros:

- a) maior aprofundamento no estudo da biomineralização nesse tipo de material;
- b) otimizações das variáveis de influência no processo de biomineralização;
- c) estudo detalhado do mecanismo e etapas do processo;
- d) estudo da adição de cápsulas em diferentes formulações;
- e) obtenção de imagens por MEV;
- f) estudo detalhado e mais preciso sobre a resistência do material à compressão e à flexão;
- g) verificação da viabilidade e aplicabilidade do processo em larga escala.

## REFERÊNCIAS

- ACHAL, Varenyam *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: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.05.008>. Acesso em: 11 jun. 2020.
- AMIRI, Ali; AZIMA, Mahzad; BUNDUR, Zeynep B. Crack remediation in mortar via biomineralization: Effects of chemical admixtures on biogenic calcium carbonate. **Construction and Building Materials**, Istambul, Turquia, v. 190, p. 317–325, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.083>. Acesso em: 12 jun. 2020.
- ANDALIB, Ramin *et al.* Optimum concentration of *Bacillus megaterium* for strengthening structural concrete. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 118, p. 180–193, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.142>. Acesso em: 12 jun 2020.
- ANDREW, Robbie M. Global CO2 Emissions from Cement Production. **Earth System Science Data Discussions**, Oslo, Noruega, v. 10, p. 195–217, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/essd-2017-77>. Acesso em: 11 jun. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Aplicações do Cimento**. São Paulo, 2019. Disponível em: <https://abcp.org.br/cimento/aplicacoes-do-cimento/>. Acesso em: 11 jun. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 5732: Cimento Portland comum**. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 6467: Agregados – Determinação do inchamento de agregado miúdo – Método de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 7200: Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 7211: Agregados para concreto-Especificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 7251: Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária**. Rio de Janeiro: ABNT, 1982.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 7389-1: Agregados – Análises petrográfica de agregado para concreto. Parte 1: Agregado miúdo**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2005b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (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: ABNT, 2005c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 15900-1:** Água para amassamento do concreto: Parte 1 - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2009b.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR NM 52:** Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2003a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR NM 248:** Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003b.

BIZ, C. E. **Concreto de pós reativos**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, 2001

BUNDUR, Z. B; KIRISITS, M. J.; FERRON, R. D. Use of pre-wetted lightweight fine expanded shale aggregates as internal nutrient reservoirs for mic. **Cement And Concrete Composites**, [s. l.], v. 84, p. 167-174, nov. 2017. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.09.003>. Acesso em: 11 jun. 2020.

CHAPARRO-ACUÑA, Sandra Patricia *et al.* Soil bacteria that precipitate calcium carbonate: mechanism and applications of the process. **Acta Agronómica**, [s. l.], v. 67, n. 2, p. 277-288, 1 abr. 2018. Universidad Nacional de Colombia. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.15446/acag.v67n2.66109>. Acesso em: 11 jun. 2020.

CHAURASIA, Leena *et al.* A novel approach of biomineralization for improving micro and macro-properties of concrete. **Construction And Building Materials**. [S. l.], v. 195, p. 340-351, jan. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.031>.

CHOUDHARY, Rajan *et al.* Biomineralization, antibacterial activity and mechanical properties of biowaste derived *diopside* nanopowders. **Advanced Powder Technology**, [S.L.], v. 30, n. 9, p. 1950-1964, set. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apt.2019.06.014>.

CIMENTO.ORG (Brasil). **Efeitos da qualidade da água no concreto**. [S. l.], 2010. Disponível em: <https://cimento.org/efeito-da-qualidade-da-agua-no-concreto/>. Acesso em: 26 jun. 2020.

CIMENTOS MAUÁ (Brasil). **Traço de concreto: a importância da água para a mistura do material**. São Paulo, 2017. Disponível em: <https://cimentomaua.com.br/blog/traco-de-concreto-importancia-da-agua-para-mistura-material/>. Acesso em: 11 jun. 2020

CIMENTOS MAUÁ (Brasil). **Principais agregados para concretos**. São Paulo, 2018. Disponível em: <https://cimentomaua.com.br/blog/principais-agregados-para-concreto/>. Acesso em: 11 jun. 2020.

CIMENTOS MAUÁ (Brasil). **Como é feito o cimento, sua composição e nomenclatura no mercado**. São Paulo, 2020. Disponível em: <https://cimentomaua.com.br/blog/cimento-como-feito-composicao-e-nomenclatura/>. Acesso em: 11 jun 2020.

CONTECO (Brasil). **Produtos**. São José da Lapa (MG), 2022. Disponível em: Disponível em: <https://contenco.com.br/produto/prensa-hidraulica-eletrica-200t-i-3025-e/>. Acesso em: 24 jan. 2023.

COSTA, Alex Monserrat Pereira. **Produção e Adição de Bactérias Biomineralizadoras em Concretos de Construção Civil: Estudos preliminares**. 2022. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Alfenas Unifal-MG, Poços de Caldas (MG), 2022.

CRUZ, Caroline Moraes da. **Estudo da biomineralização aplicada a argamassas de construção civil e sua viabilidade tecnológica**. 2022. 110 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia e Ciência de Materiais, Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga - SP, 2022.

DELLAMANO, José Claudio. **Uso de microssílica como aditivo na imobilização de rejeitos radioativos em cimento**. 1995. 73 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências na Área de Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Autarquia Associada à Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

ESPITIA-NERY, Martín Eduardo *et al.* Mechanisms of encapsulation of bacteria in self-healing concrete: review. **DYNA (Colombia)**, Bogotá, v. 86, n. 210, p. 17-22, 1 jul. 2019. Universidad Nacional de Colombia. Disponível em: <http://doi.org/10.15446/dyna.v86n210.75343>. Acesso em: 11 jun. 2020.

EUZÉBIO, Luíz Antônio; ALVES, Thiago Rodrigues; FERNANDES, Vítor Andrade. **Bioconcreto: Estudo exploratório de concreto com introdução de *Bacillus subtilis*, *Bacillus licheniformis*, acetato de cálcio e ureia**. 2017. 59f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação no Curso de Engenharia Civil), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.

GHOSH, S. *et al.* Microbial activity on the microstructure of bacteria modified mortar. **Cement And Concrete Composites**, Kolkata, India, v. 31, n. 2, p. 93-98, fev. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.01.001>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.01.001>. Acesso em: 11 jun. 2020.

GONÇALVES, Gabriel da Rosa; GODINHO, Daiane dos Santos da Silva. Análise da Influência da Água de Amassamento Contaminada por Elementos Químicos Oriundos de Mineração de Carvão nas Propriedades do Concreto. **UNESC**, Criciúma, v. 1, n. 1, p. 1-20, dez. 2016.

GONSALVES, Gayle Maria. **Bioconcrete - a sustainable substitute for concrete?**. 2011. 55 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Master in Sustainable Development, Polytechnic University of Catalonia (Upc), Barcelona, 2011.

GONZÁLEZ, Yamile Valencia *et al.* Bactérias nativas indutoras de precipitação de minerais de carbonato de cálcio em solos tropicais. **Revista de La Sociedad Venezolana de Microbiología**, Caracas, v. 34, n. 1, p. 15-21, nov. 2013.

GUZZO, Pedro Luiz. Quartzo. **Rochas e Minerais Industriais: usos e especificações**. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2008. Cap. 31. p. 681-721.

HELA, R; BODNAROVA, L; RUNDT, L. Development of Ultra High-Performance Concrete and Reactive Powder Concrete with Nanosilica. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, Czech Republic. v. 371, p. 12-17, jun. 2018. IOP Publishing. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899x/371/1/012017>. Acesso em 11 jun. 2020.

HEVERAN, Chelsea M. *et al.* Biomineralization and Successive Regeneration of Engineered Living Building Materials. **Matter**, Colorado, v. 2, n. 2, p. 481-494, fev. 2020. Elsevier BV. Disponível em: [j.matt.2019.11.016](https://doi.org/10.1016/j.matt.2019.11.016). Acesso em: 12 jun. 2020.

HIRSCHI, Thomas; WOMBACHER, Franz. Influence of different supersplasticizers on UHPC. In: **International Symposium on Ultra High-Performance Concrete, 2.**, 2008. Zurich: Anais, 2008. p. 77-84.

JONGVIVATSAKUL, Pitcha *et al.* Investigation of the crack healing performance in mortar using microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) method. **Construction and Building Materials**, Bangkok, v. 212, p. 737-744, jul. 2019. Elsevier BV. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.035>. Acesso em: 12 jun. 2020.

JOSHI, Sumit *et al.* Protection of concrete structures under sulfate environments by using calcifying bacteria. **Construction and Building Materials**, Punjab, v. 209, p. 156-166, jun. 2019. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.079>. Acesso em: 11 jun. 2020.

JUNIOR, Agenilson; CERQUEIRA, Leilson. **Bioconcreto - Uma Nova Tecnologia na Recuperação de Estruturas**. Salvador: Faculdade Área 1, 2019. 25 p. Relatório de Iniciação Científica.

LAFARGE HOLCIM. **Concreto e argamassa – um guia para aprender a diferenciar**. [s. l.], 2018. Disponível em: <https://www.juntosnaobra.com.br/concreto-e-argamassa-um-guia-para-aprender-a-diferenciar/>. Acesso em: 23 jun. 2020.

LI, Mengmeng *et al.* Bio-consolidation of cracks in masonry cement mortars by *Acinetobacter* sp. SC4 isolated from a karst cave. **International Biodeterioration & Biodegradation**, Wuhan, v. 141, p. 94-100, jul. 2019. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.03.008>. Acesso em: 23 jun. 2020.

LIU, Shukui *et al.* Evaluation of self-healing of internal cracks in biomimetic mortar using coda wave interferometry. *Cement And Concrete Research*, [s. l.], v. 83, p. 70-78, maio 2016. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.01.006>. Acesso em: 12 jun. 2020.

LUZ, Adão Benvindo da; LINS, Fernando Freitas. Areia industrial. **Rochas e minerais industriais: usos e especificações**. Rio de Janeiro: CETEM, 2005. Parte II, Cap.5, p.107-126.

MÂNICA, Graciela. **Utilização de microrganismo autógeno para a recuperação de fissuras em corpos de prova de argamassa de cimento Portland**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas - Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES, Lajeado, 2019.

MASUERO, A. B.; AECWEB. **Manifestações patológicas associadas à argamassa de revestimento**. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/revista/materias/manifestacoes-patologicas-associadas-a-argamassa-de-revestimento/16459>. Acesso em: 12 jun. 2020.

OLIVEIRA, Igor Rafael Buttignol de. **Materiais compósitos à base de cimento com adições de vidro cominuído como agregado fino para aplicação na construção civil**. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2022.

PACHECO-TORGAL, F.; LABRINCHA, J. A. Biotechconcrete: An innovative approach for concrete with enhanced durability. **Eco-Efficient Concrete**, [s. l.], v. 40, p. 565–576, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1533/9780857098993.4.565>. Acesso em: 12 jun. 2020.

PELEGRINELLO, Mateus. **Estudo da influência do uso de bactérias na biocalcificação de argamassas**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Departamento Acadêmico de Construção Civil - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

PEREIRA, Caio. **Argamassa: O que é, principais tipos e propriedades**. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://www.escolaengenharia.com.br/argamassa>. Acesso em: 11 jun. 2020.

PRAMEETTHAA, J.; BHARATKUMAR, B.H.; IYER, N. Investigation on micronized biomass silica as a sustainable material, **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 60, p.25-33, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.04.004>. Acesso em: 23 jun. 2020.

REDDY, B. Madhu Sudana; REVATHI, D. An experimental study on effect of *Bacillus sphaericus* bacteria in crack filling and strength enhancement of concrete. **Materials Today: Proceedings**, [s. l.], v. 19, p. 803–809, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.135>. Acesso em: 23 jun. 2020.

SANTOS, Guilherme Veloso dos. **Patologias devido ao recalque diferencial em fundações**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas – FATECS - Centro Universitário de Brasília – UniCEUB, Brasília, 2014.

SCHRÖFL, C.; GRUBER, M.; PLANK, J. Preferential adsorption of polycarboxylate superplasticizers on cement and silica fume in ultra-high-performance concrete (UHPC). **Cement and Concrete Research**, Garching b. München, v. 42, n. 11, p. 1401–1408, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.08.013>. Acesso em: 12 jun. 2020.

SEIFAN, Mostafa; SAMANI, Alo Khajeh; BERENJIAN, Aydin. Bioconcrete: next generation of self-healing concrete. **Applied Microbiology and Biotechnology**, Hamilton - Nova Zelândia, v. 100, n. 6, p. 2591–2602, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7316-z>. Acesso em: 12 jun. 2020.

SHAFIEIFAR, Mohamadreza; FARZAD, Mahsa; AZIZINAMINI, Atorod. Experimental and numerical study on mechanical properties of Ultra High-Performance Concrete (UHPC). **Construction and Building Materials**, Maiami - USA, v. 156, p. 402–411, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.170>. Acesso em: 11 jun. 2020.

SHI, Caijun *et al.* A review on ultra-high-performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. **Construction and Building Materials**, Changsha - China, v. 101, p. 741–751, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.088>. Acesso em: 11 jun. 2020.

SILVA, Fernanda Giannotti da; LIBORIO, Jefferson B. L. Durabilidade do concreto de alto desempenho com sílica de Fe-Si ou silício metálico em ambientes marinhos. **VETOR - Revista de Ciências Exatas e Engenharias**, vol. 15, nº 2, dezembro de 2007, p. 35-47, <https://periodicos.furg.br/vetor/article/view/183>. Acesso em: 23 jun. 2020.

SILVA, Narciso Gonçalves da. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

TECNOSIL. **Agregados para concretos o que são e para que servem?**. Itupeva, 2019. Disponível em: <https://www.tecnosilbr.com.br/agregados-para-concreto-o-que-sao-e-para-que-servem/>. Acesso em: 11 jun. 2020.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. **Mineral Commodity Summaries (Report)**. Reston, VA, USA: [s. n.], 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3133/mcs2020>. Acesso em: 11 jun. 2020.

VARGAS, Pâmela Oliveira. **Secagens de partículas de alginato de sódio**. 2017. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte do Fluminense Darcy Ribeiro, Campus dos Goytacazes, Rio de Janeiro, 2017.

WANG, Jianyun *et al.* Application of microorganisms in concrete: a promising sustainable strategy to improve concrete durability. **Applied Microbiology and Biotechnology**, Ghent - Belgium, v. 100, n. 7, p. 2993–3007, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7370-6>. Acesso em: 11 jun. 2020.

WCA. **Cement Plant: The Manufacturing Process**. [S. l.]: World Cement Association, 2020. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/s0041-2678\(68\)80580-9](https://doi.org/10.1016/s0041-2678(68)80580-9). Acesso em: 12 jun. 2020.

WILLE, Kay; BOISVERT-COTULIO, Christopher. Material efficiency in the design of ultra-high-performance concrete. **Construction and Building Materials**, Connecticut - USA, v. 86, p. 33–43, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.087>. Acesso em: 11 jun. 2020.

YU, K. Q. *et al.* Development of ultra-high performance engineered cementitious composites using polyethylene (PE) fibers. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 158, p. 217–227, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.040>. Acesso em: 11 jun. 2020.

ZANZARINI, J. C. **Análise das Causas e Recuperação de Fissuras em Edificação Residencial em Alvenaria Estrutural**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2016.

ZHU, T. *et al.* Potential application of biomineralization by *Synechococcus* PCC8806 for concrete restoration. **Ecological Engineering**, [s. l.], v. 82, p. 459–468, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.05.017>. Acesso em: 12 jun. 2020.

## APÊNDICE A – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE INTUMESCIMENTO

Tabela A-1 – Medidas de intumescimento obtidas pelo teste simples

<b>Amostra</b>	<b>Intumescimento (%)</b>
1	204,4
2	201,9
3	203,6
Média	203 ± 1

Fonte: Adaptado de Costa (2022).

Tabela A-2 – Resultados de intumescimento obtidos pelo método de “saquinhos de chá”

<b>Intumescimento pelo método de Saquinhos de Chá</b>				
<b>Tempo (min)</b>	<b>Amostra 1 (g)</b>	<b>Amostra 2 (g)</b>	<b>Amostra 3 (g)</b>	<b>Média e Desvio Padrão (g)</b>
<b>1</b>	3,97	4,48	4,26	4,2 ± 0,3
<b>5</b>	4,03	4,53	4,29	4,3 ± 0,3
<b>10</b>	4,51	4,59	4,49	4,53 ± 0,05
<b>30</b>	5,62	5,56	5,56	5,58 ± 0,03
<b>60</b>	5,8	5,86	5,86	5,84 ± 0,03
<b>180</b>	6,29	6,35	6,32	6,32 ± 0,03
<b>1440</b>	6,52	6,59	6,58	6,56 ± 0,04

Fonte: Adaptado de Costa (2022).

Tabela A-3 – Resultados de intumescimento obtidos pelo método de “filtração

<b>Intumescimento pelo método de Filtração</b>				
<b>Tempo (min)</b>	<b>Amostra 1 (g)</b>	<b>Amostra 2 (g)</b>	<b>Amostra 3 (g)</b>	<b>Média e Desvio Padrão</b>
1	0,31	0,47	0,3	0,4 ± 0,1
5	0,36	0,54	0,38	0,4 ± 0,1
10	0,39	0,61	0,45	0,5 ± 0,1
30	3,19	2,87	2,07	2,7 ± 0,6
60	4,09	3,79	3,09	3,7 ± 0,5
180	5,45	5,56	5,33	5,4 ± 0,1
1440	10,28	14,41	9,89	12 ± 3

Fonte: Adaptado de Costa (2022).

## APÊNDICE B – RESULTADOS DO ENSAIO GRANULOMÉTRICO

Tabela B-1 – Valores médios dos ensaios granulométricos

<b>Médias das amostras da areia natural com massa inicial de 500g</b>			
<b>Peneira #Mesh</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>% Retida</b>	<b>% Acumulada</b>
<b>4</b>	4,80	0,0	0,0
<b>8</b>	2,40	0,0	0,0
<b>16</b>	1,20	0,0	0,0
<b>30</b>	0,60	16,24	16,24
<b>50</b>	0,30	34,33	50,57
<b>100</b>	0,15	40,35	90,92
<b>Prato de Fundo</b>	-	9,09	100,00
<b>Módulo de Finura (mm): 1,58</b>		<b>Diâmetro Máximo (mm): 0,6</b>	

Fonte: Adaptado do Oliveira (2022)

## APÊNDICE C – RESULTADOS DO ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA

Tabela C-1 – Resultados do ensaio de massa específica da areia e tratamento estatístico

	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )		
	Areia	Pó de Quartzo	Microssílica
<b>Amostra A</b>	2,69	2,58	2,20
<b>Amostra B</b>	2,55	3,05	2,42
<b>Amostra C</b>	2,66	2,61	1,97
<b>Média ± Desvio Padrão</b>	<b>2,63 ± 0,07</b>	<b>2,7 ± 0,3</b>	<b>2,2 ± 0,2</b>
<b>Variância</b>	0,005	0,07	0,05

Fonte: Autor (20023).

Tabela C-2 – Análise de Variância de fator único

Análise de Variância (ANOVA de fator único)						
Fonte da Variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
<b>Entre Grupos</b>	0,507	2	0,253	6,112	0,04	5,143
<b>Dentro dos Grupos</b>	0,249	6	0,041			
<b>Total</b>	0,756	8	0,095			

Fonte: Autor (2023). Legenda: SQ: Soma de Quadrados; gl: Graus de Liberdade; MQ: Média Quadrada; F: valor “F”, valor-P: probabilidade e; F crítico: valor de “F” crítico.

Tabela C-3 – Análise comparativa por teste Q de Tukey

Teste Q de Tukey (Significância $\alpha$ de 0,05)			
	Areia	Pó de Quartzo	Microssílica
<b>Areia</b>	..	0,7815	0,08673
<b>Pó de Quartzo</b>	0,9661	..	0,03719
<b>Microssílica</b>	3,717	4,683	..

Fonte: Autor (2023).

## APENDICE D – RESULTADOS DO ENSAIO DE INCHAMENTO

Tabela D-1 – Dados referentes ao ensaio de inchamento da areia

Teor de Umidade (%)	Massa Unitária [ $\gamma_u$ ] (g/cm <sup>3</sup> )	Coeficiente de inchamento (Vs/Vh)
<b>0,0</b>	1,49	1,00
<b>0,5</b>	1,42	1,05
<b>1,0</b>	1,30	1,15
<b>2,0</b>	1,19	1,26
<b>4,0</b>	1,17	1,31
<b>5,0</b>	1,14	1,37
<b>7,0</b>	1,15	1,38
<b>9,0</b>	1,21	1,33
<b>12,0</b>	1,34	1,24
<b>Umidade Crítica (%): 5,1%</b>		<b>Coeficiente de Inchamento Médio: 1,38</b>

Fonte: Autor (2023).

**APÊNDICE E – RESULTADOS DO ENSAIO DE POROSIDADE**

Tabela E-1 – Resultados do ensaio de Porosidade (Absorção de água e Índice de vazios)

<b>Formulação</b>	<b>Absorção de água (%)</b>	<b>Índice de Vazios (%)</b>
<b>Referência (0,0%)</b>	2,41 ± 0,07	5,4 ± 0,1
<b>0,5% de cápsulas</b>	2,26 ± 0,09	5,0 ± 0,2
<b>1,0% de cápsulas</b>	2,47 ± 0,02	5,5 ± 0,1
<b>1,5% de cápsulas</b>	2,28 ± 0,03	5,2 ± 0,1

Fonte: Autor (2023).

## APÊNDICE F – RESULTADOS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO

Tabela F-1 – Resultados dos ensaios de compressão

<b>Resistência à compressão e desvios padrões (MPa)</b>			
<b>Formulação</b>	<b>7° Dia</b>	<b>14° Dia</b>	<b>28° Dia</b>
<b>Referência</b>	60 ± 15	77 ± 5	81 ± 14
<b>0,5%</b>	76 ± 13	77 ± 15	83 ± 9
<b>1,0%</b>	75 ± 7	76 ± 12	70 ± 3
<b>1,5%</b>	71 ± 8	77 ± 13	81 ± 7

Fonte: Autor (2023).

Tabela F-2 – Análise de Variância de fator único para os resultados de compressão

<b>Análise de Variância (ANOVA de fator único)</b>						
<b>Fonte da Variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>Valor-P</b>	<b>F crítico</b>
<b>Entre Grupos</b>	2092,83	11	190,26	1,81	0,07	1,98
<b>Dentro dos Grupos</b>	5374,35	51	105,38			
<b>Total</b>	7467,18	62	120,44			

Fonte: Autor (2023). Legenda: SQ: Soma de Quadrados; gl: Graus de Liberdade; MQ: Média Quadrada; F: valor “F”, valor-P: probabilidade e; F crítico: valor de “F” crítico.

Tabela F-3 – Análise comparativa por teste Q de Tukey para os resultados da compressão

<b>Teste Q de Tukey (Significância <math>\alpha</math> de 0,05)</b>												
	<b>C0700</b>	<b>C1400</b>	<b>C2800</b>	<b>C0705</b>	<b>C1405</b>	<b>C2805</b>	<b>C0710</b>	<b>C1410</b>	<b>C2810</b>	<b>C0715</b>	<b>C1415</b>	<b>C2815</b>
<b>C0700</b>		0,25	0,06	0,46	0,29	0,07	0,56	0,40	0,91	0,88	0,29	0,06
<b>C1400</b>	3,83		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00
<b>C2800</b>	4,75	0,97		1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	0,77	0,89	1,00	1,00
<b>C0705</b>	3,32	0,36	1,28		1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>C1405</b>	3,71	0,05	0,87	0,39		1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00
<b>C2805</b>	4,69	1,29	0,42	1,56	1,19		0,98	1,00	0,71	0,84	1,00	1,00
<b>C0710</b>	3,10	0,59	1,51	0,22	0,61	1,77		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>C1410</b>	3,45	0,22	1,14	0,13	0,26	1,44	0,36		1,00	1,00	1,00	1,00
<b>C2810</b>	2,23	1,67	2,64	1,24	1,65	2,78	1,01	1,38		1,00	0,99	0,79
<b>C0715</b>	2,35	1,37	2,30	0,97	1,36	2,48	0,75	1,10	0,22		1,00	0,90
<b>C1415</b>	3,71	0,05	0,87	0,40	0,00	1,19	0,62	0,26	1,65	1,37		1,00
<b>C2815</b>	4,71	0,93	0,05	1,25	0,83	0,46	1,48	1,10	2,6	2,26	0,83	

Fonte: Autor (2023)

## APÊNDICE G – RESULTADOS DO ENSAIO DE FLEXÃO

Tabela G-1 – Resultados dos ensaios de flexão

<b>Resistência à compressão e desvios padrões (MPa)</b>			
<b>Formulação</b>	<b>7° Dia</b>	<b>14° Dia</b>	<b>28° Dia</b>
<b>Referência</b>	16,8 ± 0,2	20 ± 1	19,3 ± 0,5
<b>0,5%</b>	16 ± 1	19 ± 1	18,6 ± 0,1
<b>1,0%</b>	15 ± 1	16 ± 2	20 ± 2
<b>1,5%</b>	14 ± 1	15,6 ± 0,6	21 ± 2

Fonte: Autor (2023).

Tabela G-2 – Análise de Variância de fator único para os resultados de flexão

<b>Análise de Variância (ANOVA de fator único)</b>						
<b>Fonte da Variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>Valor-P</b>	<b>F crítico</b>
<b>Entre Grupos</b>	187,12	11	17,01	8,73	0,000007	2,24
<b>Dentro dos Grupos</b>	44,78	23	1,95			
<b>Total</b>	231,92	34				

Fonte: Autor (2023). Legenda: SQ: Soma de Quadrados; gl: Graus de Liberdade; MQ: Média Quadrada; F: valor “F”, valor-P: probabilidade e; F crítico: valor de “F” crítico.

Tabela G-3 – Análise comparativa por teste Q de Tukey para os resultados de flexão

<b>Teste Q de Tukey (Significância <math>\alpha</math> de 0,05)</b>												
	<b>F0700</b>	<b>F0705</b>	<b>F0710</b>	<b>F0715</b>	<b>F1400</b>	<b>F1405</b>	<b>F1410</b>	<b>F1415</b>	<b>F2800</b>	<b>F2805</b>	<b>F2810</b>	<b>F2815</b>
<b>F0700</b>		0,85	1,00	1,00	0,07	1,00	0,84	0,76	0,69	0,95	0,46	0,12
<b>F0705</b>	2,42		0,32	0,20	0,70	0,43	0,03	0,02	1,00	1,00	1,00	0,88
<b>F0710</b>	0,90	3,72		1,00	0,005	1,00	0,98	0,96	0,19	0,50	0,09	0,01
<b>F0715</b>	1,26	4,11	0,40		0,003	1,00	1,00	0,99	0,11	0,35	0,04	0,006
<b>F1400</b>	4,93	2,81	6,52	6,92		0,009	0,0003	0,0002	0,86	0,49	0,98	1,00
<b>F1405</b>	0,65	3,44	0,28	0,68	6,24		0,95	0,90	0,27	0,63	0,13	0,02
<b>F1410</b>	2,44	5,43	1,71	1,32	8,24	1,99		1,00	0,02	0,06	0,006	0,0007
<b>F1415</b>	2,65	5,67	1,96	1,56	8,48	2,24	0,24		0,01	0,04	0,004	0,0005
<b>F2800</b>	2,82	0,44	4,16	4,56	2,37	3,88	5,87	6,11		1,00	1,00	0,97
<b>F2805</b>	2,00	0,47	3,25	3,65	3,27	2,97	4,96	5,21	0,91		0,99	0,71
<b>F2810</b>	3,34	1,03	4,75	5,15	1,77	4,47	6,46	6,71	0,59	1,50		1,00
<b>F2815</b>	4,49	2,32	6,04	6,43	0,49	5,75	7,75	7,99	1,88	2,79	1,29	

Fonte: Autor (2023).