

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS
CAMPUS POÇOS DE CALDAS

ALEX MONSERRAT PEREIRA COSTA

**PRODUÇÃO E ADIÇÃO DE BACTÉRIAS BIOMINERALIZADORAS EM
CONCRETOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL: ESTUDOS PRELIMINARES**

Poços de Caldas/MG

2022

ALEX MONSERRAT PEREIRA COSTA

**PRODUÇÃO E ADIÇÃO DE BACTÉRIAS BIOMINERALIZADORAS EM
CONCRETOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL: ESTUDOS PRELIMINARES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG) *campus* Poços de Caldas como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais. Área de concentração: Cerâmicas
Orientadora: Prof.^a Dr.^a Sylma Carvalho Maestrelli.
Coorientador: Prof.^a Dr.^a Eliana Cristina da Silva Rigo.

Poços de Caldas/MG

2022

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

Costa, Alex Monserrat Pereira.

Produção e adição de bactérias biomineralizadoras em concretos de construção civil : Estudos Preliminares / Alex Monserrat Pereira Costa. - Poços de Caldas, MG, 2022.

88 f. : il. -

Orientador(a): Sylma Carvalho Maestrelli.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2022.

Bibliografia.

1. Carbonato de cálcio. 2. Alginato de sódio. 3. Concreto. 4. Biomineralização. 5. Resistência Mecânica. I. Maestrelli, Sylma Carvalho, orient. II. Título.

ALEX MONSERRAT PEREIRA COSTA

PRODUÇÃO E ADIÇÃO DE BACTÉRIAS BIOMINERALIZADORAS EM CONCRETOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL: ESTUDOS PRELIMINARES

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 agosto de 2022.

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

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

Profa. Dra. Carolina Del Roveri
Instituição: Universidade Federal de Alfenas



Documento assinado eletronicamente por Sylma Carvalho Maestrelli, Professor do Magistério Superior, em 25/08/2022, às 15:32, 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 ANA PAULA MARGARIDO MENEGAZZO, Usuário Externo, em 25/08/2022, às 15:32, 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 Carolina Del Roveri, Professor do Magistério Superior, em 25/08/2022, às 15:41, 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_orcao_acesso_externo=0, informando o código verificador 0801411 e o código CRC 5C49F15B.

Dedico este trabalho a todas
as pessoas que me ajudaram
em sua realização

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a todos os envolvidos nesta pesquisa, direta e indiretamente, a minha família que foi o alicerce para a conclusão da pesquisa, me apoiando de toda forma possível. À minha orientadora Sylma Carvalho Maestrelli e à minha coorientadora Eliana Cristina da Silva Rigo por toda a paciência e ensinamentos transmitidos desde o começo da pesquisa, como também minha namorada e amigos envolvidos e todo apoio recebido no decorrer desta etapa educacional pela qual estou passando.

Agradeço à UNIFAL-MG por ter sido a instituição que inicialmente possibilitou a realização desta pesquisa.

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

Por fim, sou grato a Deus por tudo.

RESUMO

Quando se trabalha com concreto, é necessário prever seu comportamento ao final de uma obra; apesar da alta resistência mecânica que possui frente a esforços de compressão, sua resistência mecânica a tração é baixa, o que faz com que se busque soluções para resolver este problema. O concreto é composto por uma mistura entre água, cimento, agregados graúdos e miúdos, além de aditivos que melhoram ainda mais suas características e propriedades. Dentro de obras, ele em sua maioria é moldado juntamente a uma armadura de aço completando a resistência em todos os sentidos; quando colocado em situações de grandes esforços, não raro, geram-se as fissuras, principais problemas iniciais que levam ao desgaste da estrutura perdendo sua eficiência. A adição de bactérias capazes de produzir a biomineralização, processo no qual se gera a produção de carbonato de cálcio, responsável pelo selamento de fissuras, vêm sendo investigada. Contudo, essas bactérias são frágeis e suscetíveis ao meio reacional, devendo-se então protegê-las através de encapsulamento, de modo que possam realizar a biomineralização quando solicitados. Dado o exposto anterior, esta pesquisa teve como objetivo obter cápsulas de alginato de sódio para serem utilizadas num encapsulamento futuro de bactérias biomineralizadoras e produzir concretos com adição das cápsulas, caracterizando-os através de medidas de propriedades físicas, mecânicas e reológicas. Os testes de intumescimento indicaram que as cápsulas produzidas propiciaram um ambiente adequado para receber as bactérias e nutri-las até o seu uso; também demonstraram que as cápsulas de alginato de sódio possuem uma resistência mecânica que suporta sua inserção (e mistura) no concreto. Dentre as condições investigadas, aquela onde foi utilizado o coeficiente de Andreassen igual a $q=0,37$ e com adição de 1,5% de cápsulas foi a que apresentou os resultados mais promissores da pesquisa; sendo que após 28 dias de cura, a resistência mecânica a compressão encontrada foi de 45,38MPa, estando com o valor dentro da ABNT NBR 11578, uma vez que a mesma estabelece uma resistência mínima de 32MPa.

Palavras-chave: carbonato de cálcio; alginato de sódio; concreto; biomineralização; resistência mecânica.

ABSTRACT

Knowing the behaviour of a concrete is necessary after finishing a construction work; despite having high mechanical strength under compression stress, its mechanical tensile strength is low, making necessary the search for solutions to solve such problem. Concrete is composed of a mixture of water, cement, fine and coarse aggregates as well as additives, used to improve the concrete characteristics and properties. On-site, it is mostly molded with an embedded steel reinforcing bars completing the strength in all direction. When placed under great amount of stress, it is not seldom that the fissures are generated on concrete, which is the main initial issue that may cause structure-wear leading it to a loss of efficiency. The addition of bacteria capable of producing biomineralization, process in which calcium carbonate is produced and responsible for sealing fissures, has been investigated. Nevertheless, these bacteria are fragile and susceptible to the reaction medium, requiring protection by encapsulation that allows the bacteria to execute the biomineralization when required. Given that, this research aims to use biomineralizing bacteria encapsulated with sodium alginate, to produce samples of concrete without the addition of the capsules and characterize them according to their physical and rheological properties. Swelling tests indicated that the capsules produced provided an adequate environment to receive the bacteria and nourish them until their use; also demonstrated that sodium alginate capsules have a mechanical resistance that supports their insertion (and mixing) in concrete. Among the conditions investigated, the one where the Andreassen coefficient equal to $q=0.37$ and with the addition of 1.5% of capsules was the one that presented the most promising results of the research; after 28 days of cure, the mechanical resistance to compression was 45.38MPa, being the value within ABTN NBR 11578, since it establishes a minimum resistance of 32MPa.

Key words: calcium carbonate; sodium alginate; concrete; biomineralization; mechanical strength.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Poros Capilares do concreto	32
Figura 2 – Comportamento de fissura em concreto convencional sem e com fibras.	39
Figura 3 - Processo de biomineralização	42
Figura 4 - Unidade estrutural de repetição (mero) do alginato.	47
Figura 5 – Fluxograma da síntese das cápsulas de alginato de sódio	50
Figura 6 – Preparo de solução de alginato de sódio	53
Figura 7 – Cápsulas de alginato de sódio	54
Figura 8 – Esferas de alginato de sódio com diferença de tempo.....	56
Figura 9 – Saquinhos de chá secos	57
Figura 10 – Sachês contendo as esferas de alginato de sódio pendurados nos béqueres	59
Figura 11 - Método do saquinho de chá.....	60
Figura 12 – Esquema ilustrativo para ensaio de intumescimento (método de filtração)	61
Figura 13 – Esferas pesadas.....	62
Figura 14 – Esferas nos béqueres com água.....	62
Figura 15 – Esquema de filtração.....	63
Figura 16 – Peneirador Granulométrico	64
Figura 17 - Fluxograma da execução da Etapa 2.....	66
Figura 18 – Corpos de prova moldados em molde cilíndrico	66
Figura 19 – Corpos de prova desmoldados	67
Figura 20 - Corpos de prova em imersão.....	67
Figura 21 - Atuador pneumático Bel Air	69

Figura 22 – Corpos de Prova antes (esquerda) e após retificação (direita)	69
Figura 23 – Prensa eletro hidráulica A.M.C.....	70
Figura 24 – Ensaio de consistência (slump test)	74
Figura 25 - Detalhe da fratura de um corpo de prova com coeficiente de Andreassen igual a 0,37, indicando o contorno da trinca pelo agregado grosseiro.	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Proporções de materiais em dosagens de diferentes resistências.....	22
Tabela 2 – Tipos de cimentos fabricados no Brasil.	25
Tabela 3 - Constituintes (fases) do cimento.	26
Tabela 4 – Ensaio de peneiramento normal das areias	27
Tabela 5 - Denominação dos agregados graúdos e suas dimensões.....	27
Tabela 6 – Causas dos Poros na Massa do Concreto	31
Tabela 7 - Equações relacionando tensão e taxa de cisalhamento	34
Tabela 8 – Classificação dos tipos de rompimentos de concretos	36
Tabela 9 – Classificação dos tipos de fissuras em concretos	37
Tabela 10 - Aplicação de bactérias na área de construção civil.....	41
Tabela 11 – Composições de cimento	49
Tabela 12 – Exigências químicas do cimento	49
Tabela 13 – Exigências físicas e mecânicas.....	49
Tabela 14 – Formulação otimizada de concreto desenvolvida por Cruz, utilizando-se $q = 0,37$ (2019).....	51
Tabela 15 – Relação em massa, consumo e quantidade (em kg) de materiais necessários para a formulação dos corpos de prova.	51
Tabela 16 – Massa específica (kg/m^3) utilizada na formulação de Cruz (2019), para $q = 0,37$	52
Tabela 17 – Cálculo do volume total dos corpos de prova e da massa total de alginato de sódio a ser usado na segunda etapa	52
Tabela 18 – Massa dos saquinhos de chá a seco e úmido.....	58
Tabela 19 – Massa dos sachês sem e com esferas de alginato de sódio.....	59

Tabela 20 – Massa m3 nos tempos de pesagem.....	59
Tabela 21 - Classificação da consistência do concreto.....	65
Tabela 22 - Medidas de intumescimento obtidas pelo teste simples.....	71
Tabela 23 – Resultados de intumescimento obtidos pelo método de “saquinhos de chá” em função do tempo.....	72
Tabela 24 – Resultados de intumescimento obtidos pelo método de “filtração” em função do tempo.....	72
Tabela 25 - Valores de abatimento (<i>slump test</i>) das composições investigadas	74
Tabela 26 – Medidas obtidas para as amostras investigadas	89
Tabela 27 - Resultados do Ensaio de Compressão – Etapa 1	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

C ₃ S	Silicato tricálcico
C ₂ S	Silicato dicálcico
C ₃ A	Aluminato tricálcico
C ₄ AF	Ferroaluminato tetracálcico
C ₃ S ₂ H ₃	Bissilicato Tricálcico
C-S-H	Cálcio hidratado
Ca(OH) ₂	Hidróxido de Cálcio
CO ₂	Dióxido de carbono
CP II E 32	Cimento Portland – Composto de escória granulada de alto forno
D _p	Diâmetro da partícula
DL	Diâmetro da partícula maior
MICP	Microbially induced calcium carbonate precipitation
MAAH	Metacrilato anidrido
MO	Microscopia Ótica
Mili-Q	Aparelho de purificação de Água
PVA	Acetato de Polivinila
q	Coefficiente de distribuição de Andreassen

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	18
3 JUSTIFICATIVAS	19
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
4.1 CONCRETOS	21
4.1.1 Componentes do concreto	23
4.1.1.1 Cimento	23
4.1.1.2 Agregados	26
4.1.1.3 Água	28
4.1.1.4 Aditivos	29
4.2 FORMULAÇÃO EM CONCRETOS	30
4.2.1 Reologia do Concreto	33
4.3 FISSURAS	35
4.3.1 Tratamento de fissuras	37
4.4 BIOMINERALIZAÇÃO E BACTÉRIAS BIOMINERALIZADORAS	40
4.4.1 Encapsulamento das bactérias	44
4.4.2 Alginato de sódio	46
5 MATERIAIS E METODOLOGIA	48
5.1 MATERIAIS	48
5.2 METODOLOGIA	50
5.2.1 Etapa 1	50
5.2.1.1 Cálculo da quantidade de alginato de sódio	50
5.2.1.2 Preparo da solução do alginato de sódio	52
5.2.1.3 Preparo da solução de cloreto de cálcio	53
5.2.1.4 Preparo das esferas de alginato de sódio	54
5.2.1.5 Testes de intumescimento	56
5.2.2 Etapa 2	63
5.2.2.1 Secagem e pesagem das matérias primas utilizadas na formulação dos concretos	63
5.2.2.2 Slump test	64
5.2.2.3 Produção e caracterização dos corpos de prova	65

5.2.2.4 Determinação das propriedades físicas	68
5.2.2.5 Ensaios mecânicos de compressão	68
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	71
6.1 ETAPA 1.....	71
6.1.1 Testes de intumescimento	71
6.2 ETAPA 2.....	73
6.2.1 Slump test	73
6.2.2 Determinação das propriedades físicas.....	75
6.2.3 Ensaios mecânicos de compressão	78
7 CONCLUSÕES	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
APÊNDICE A - Valores dos testes realizados	89

1 INTRODUÇÃO

O uso do concreto é muito comum no cotidiano devido ao seu baixo custo e fácil produção. É o segundo material mais utilizado no mundo (sendo suplantado somente pela água); sua produção mundial ultrapassa os 40 bilhões de toneladas anuais (GLOBAL CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION, 2019).

A origem do concreto ainda remonta do período pré-histórico, quando o homem abandonou as cavernas e procurou por novas formas de abrigo. Assim, ele passou a utilizar estruturas de pedras que preenchiam seus espaços, juntamente com materiais de lama e argila, garantindo a proteção do vento e do frio. Foi então que surgiu a ideia de usar agregados com substâncias mais resistentes, para que garantisse maior dureza a mistura (FREITAS, 2021).

Durante a Revolução Industrial, o cimento Portland apareceu nas estruturas juntamente com o aço laminado, dando origem ao concreto armado em meados do século XIX. O barco construído por Lambot, na França, no ano de 1849 é considerado a primeira peça de concreto armado, e essa data é considerada no mundo todo como sendo a do nascimento do concreto armado. Atualmente, este é o tipo de concreto mais utilizado no mundo (FUSCO, 2008 apud CORMAC, 2015) ¹.

Entretanto, não se pode atribuir a invenção do concreto armado a uma única pessoa, pois muitos foram os pioneiros nesse material novo, como Mounier, Lambot e Coignet, franceses e também um norte-americano, Hyatt. Em 1902, Morsch publica sua primeira edição sobre a “Teoria e a prática do Concreto Armado”, que por sua vez, em muitos aspectos, é válida até os dias atuais (FUSCO, 2008 apud CORMAC, 2015)¹.

Na formulação do concreto são utilizadas matérias primas relativamente fáceis de serem encontradas e que apresentam baixo custo. Os concretos são compostos por água, uma fase aglomerante (cimento) e por agregados graúdos e miúdos, sendo comum a utilização de alguns aditivos a fim de melhorar suas propriedades (NEVILLE, 2016).

A alta resistência mecânica após a secagem desses materiais é atribuída a uma formulação bem fundamentada nos princípios que envolvem o empacotamento das partículas, garantindo uma melhor característica do produto acabado. Propriedades como a durabilidade, resistência ao fogo, resistência elevada à compressão, entre

outras, também estão relacionadas diretamente à qualidade do empacotamento das partículas (MEYER, 2009).

O concreto muitas vezes é colocado em situações em que suas propriedades mecânicas são muito solicitadas; embora seja resistente à compressão, a resistência à tração acaba sendo baixa ao longo de sua vida útil, ocorrendo a formação de fissuras que irão iniciar um processo de patologia interna, gerando principalmente a oxidação de sua armadura de aço, causando uma deterioração e uma diminuição em sua durabilidade (SEIFAN; SAMANI; BERENJIAN, 2016). Devido a esse tipo de patologia, muitos estudos têm sido voltados para a recuperação e autocura do concreto, já que os métodos utilizados de formas convencionais para o reparo das estruturas são trabalhosos, lentos e custosos, como por exemplo, o uso da nata de cimento para preencher as fissuras ou até provocando quebras na estrutura para aplicação de produtos químicos e refazer a concretagem posteriormente (WANG, 2018).

Esses inconvenientes contribuíram para o desenvolvimento de novos meios para os reparos do concreto; dentre eles, o estudo da adição de bactérias em esporos dentro da formulação do concreto (SEIFAN; SAMANI; BERENJIAN, 2016). Um esporo é uma estrutura dormente e resistente mecanicamente, produzido pelas bactérias para que consigam viver em um ambiente em condições extremas, como dessecação, alta temperatura, entre outros. Essa adição ocorre a partir do encapsulamento de bactérias capazes de realizar a biomineralização, que consiste na sintetização de minerais inorgânicos através de organismos vivos. O processo ocorre quando a cápsula entra em contato com um ambiente externo ou até mesmo pela mudança de pH do concreto, por meio de uma fissura que aconteceu no local, fazendo com que a bactéria, por meio de uma atividade microbiana, comece a formar minerais. A partir da reação dos elementos externos como oxigênio, a umidade causada pela água, o CO₂, diferentes tipos de esforços solicitados, ou até mesmo alterações climáticas associado às atividades metabólicas do organismo, observa-se a precipitação do carbonato de cálcio. O cálcio oriundo deste processo é considerado um dos melhores *fillers* por ser compatível com o concreto, ajudando no fechamento da fissura no momento de sua solicitação. Assim, quando as fissuras estiverem preenchidas, as bactérias entram novamente em seu estado de hibernação (SEIFAN; SAMANI; BERENJIAN, 2016; TEBO *et al.*, 2015; ZHU *et al.*, 2021).

A incorporação das bactérias pode ser realizada diretamente no concreto; contudo, a sua taxa de sobrevivência é relativamente baixa devido ao ambiente

fortemente alcalino. Assim, há uma necessidade de proteção para as bactérias sobreviverem. Embora existam muitos trabalhos avaliando a proteção de bactérias por cápsulas preparadas por diversos tipos de materiais, pouca informação se tem a respeito da resistência mecânica destas cápsulas na mistura e influência na produção do concreto (JONKERS, 2007).

Esta pesquisa visou estudar as condições de produção de cápsulas de alginato de sódio para uso como material de encapsulamento de bactérias biomineralizadoras a serem usadas no processo de autocura de concretos. O efeito da adição dessas cápsulas em concretos também foi investigado. A temática deste projeto é bastante atual e poucas informações são conhecidas no que se refere à melhores condições para produção das cápsulas, do processo de encapsulamento, bem como da inserção destas no concreto e sua ação.

2 OBJETIVOS

Este trabalho objetivou produzir cápsulas de alginato de sódio para contenção e proteção da bactéria do tipo *Lysinibacillus sphaericus* e avaliar o efeito da presença destas cápsulas no concreto.

Para atingir o objetivo geral desta pesquisa foi necessário realizar as seguintes atividades:

- a) Obter cápsulas de alginato de sódio com resistência mecânica suficiente para que esta não se rompa durante o processo de mistura de uma massa de concreto e que, ao mesmo tempo, seja capaz de abrigar a bactéria dentro do concreto CP II - E.
- b) Viabilizar a produção em maior escala das cápsulas através do controle de parâmetros de processamento como velocidade de gotejamento da solução para formação do alginato e condições de agitação do sistema, entre outros.
- c) Utilizar o modelo de empacotamento de Andreassen para a formulação de concretos com e sem a adição das cápsulas, levando em consideração os resultados obtidos no estado fresco e endurecido.
- d) Avaliar o efeito da presença das cápsulas de alginato nas propriedades finais das massas de concreto.

3 JUSTIFICATIVAS

Um dos maiores problemas na construção civil atualmente é o elevado descarte no meio ambiente do concreto gerado por obras e projetos falhos que decorrem na demolição e, muitas vezes, no não aproveitamento do mesmo.

Uma vez que o concreto é o segundo material mais utilizado mundialmente, faz-se necessário o desenvolvimento de pesquisas e estudos de como utilizar da melhor forma tal material. Para isso é importante conhecer as matérias primas envolvidas no processo de fabricação do mesmo - agregados graúdos e miúdos, fase aglomerante (cimento) e água - bem como a interação físico-química entre elas (GLOBAL CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION, 2019; NEVILLE, 2016).

Uma maior resistência do concreto é atingida ao se partir de uma formulação mais adequada; ou seja, de um maior empacotamento de partículas, trazendo também resultados positivos em sua adaptabilidade, durabilidade e resistência (MEYER, 2009).

O tempo de vida útil de uma estrutura de concreto é diminuído por uma série de eventos gerados a partir de uma simples fissura: nela ocorre a penetração de elementos do ambiente até a armadura de aço interna do concreto que, por exemplo, em contato com o oxigênio, começa a oxidar afetando toda a resistência da peça. Além disso, a própria fissura, por si só, pode se propagar gerando outras microfissuras ou fissuras maiores, provocando uma queda na resistência mecânica do concreto, podendo ocasionar um comprometimento na interface entre metal e concreto.

Ainda, o custo relacionado a reparos e manutenções de problemas que são originados das fissuras chega a atingir bilhões de dólares a cada ano, podendo ser comparado com o mesmo valor gasto para a construção do imóvel. Assim, torna-se de extrema necessidade que se evite ao máximo problemas deste âmbito (WU; HU; ZHANG; XUE; ZHAO, 2019)

Bactérias do tipo *Lysinibacillus sphaericus* na formulação de concretos vêm sendo estudadas uma vez que suas atividades metabólicas geram uma biomineralização, com produção de carbonato de cálcio, material este utilizado para vedação inicial das fissuras decorrente de esforços mecânicos. Assim, os problemas subsequentes provocados pelo aparecimento das fissuras são minimizados, tendo como resultado uma maior durabilidade do produto (SEIFAN; SAMANI; BERENJIAN, 2016).

Ao se trabalhar com bactérias em um ambiente muito reativo, onde se tem um teor alcalino elevado e uma forte reação química nas idades iniciais do concreto, a taxa de sobrevivência das bactérias biomineralizadoras se torna pequena. A partir da necessidade de proteção dessas bactérias em um ambiente tão inóspito surgem os estudos e trabalhos sobre encapsulamento, criando uma barreira protetora no qual as bactérias ficam em estado de hibernação até que haja o rompimento da cápsula, fazendo com que ela reaja com o meio externo (JONKERS, 2007; KHALIC; EHSAN, 2016; VAN TITTELBOOM *et al.*, 2011; WANG; DE BELIE; VERSTRAETE, 2012; WANG *et al.*, 2012, 2014a, 2014b, 2015).

Os estudos voltados à biomineralização são recentes; ainda existem poucas informações sobre a capacidade de regeneração das fissuras e percentual de atuação da mineralização que se pode atingir do concreto; tampouco o quão eficiente é esta tecnologia em maiores espaços de tempo e qual o nível de resistência do material usado para a cápsula. Assim, esta pesquisa objetivou ampliar as informações referentes à temática, desde uma melhor compreensão das variáveis que afetam o processamento e utilização das cápsulas usadas para encapsulamento das bactérias, bem como sua influência nas propriedades dos concretos.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 CONCRETOS

Não existe uma grande resistência a tração no concreto, uma vez que para um concreto de 35 MPa em relação a compressão, a sua resistência a tração varia de 1 a 5 MPa, conforme cálculos da ABNT NBR 12142 (2010); ele também não é um material tão duro quanto o aço, mas ainda assim é o material mais utilizado na construção civil, e isso é devido a pelo menos três razões principais. A primeira, ligada à sua excelente resistência à água. Comparado à madeira ou ao aço comum, a capacidade do concreto de suportar a ação da água sem ocorrência de graves deteriorações o torna um material excelente para construção de estruturas de controle, transporte e armazenamento de água, como em barragens, revestimentos de canais e pavimentos de aquedutos. A segunda razão de uso é pela facilidade de modelagem do material, já que pode assumir elementos estruturais de várias formas e tamanhos, isso porque o concreto em seu estado fresco é de consistência plástica, o que favorece o fluxo do material para dentro das fôrmas. E a terceira razão é o baixo custo financeiro para sua utilização, aliada à elevada disponibilidade do material para a obra (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

O concreto é um material compósito formado por cimento, água, além de agregados graúdos e miúdos, e em muitos casos também com aditivos que conferem características quando solicitados. A pasta cimentícia é formada pela mistura da água com o cimento, pós adição do agregado miúdo, como a areia ou pó de brita, obtém-se a argamassa, e adicionando o agregado graúdo como os seixos rolados ou brita, forma-se o concreto simples (FUSCO, 2008; NEVILLE; BROOKS, 2010).

A caracterização do concreto simples é dada por sua razoável resistência a compressão, geralmente entre 20 e 40 MPa, e por sua pequena resistência a tração, geralmente sendo dez vezes menor que o valor de sua compressão. Atualmente, por meio de cálculos e adição de materiais consegue-se chegar a concretos de 50 MPa (FUSCO, 2008).

Os concretos podem ser classificados em três categorias, sendo elas; concretos de densidade leve (possuem a massa específica de até 1800kg/m^3), os concretos de densidade normal (possuem a massa específica de 2400kg/m^3) e os

concretos de densidade pesada (possuem a massa específica superior a 3200 kg/m³). Aqui também, enquadra-se a classificação referente a resistência à compressão, sendo concretos de alta resistência (com mais de 40 MPa), resistência moderada (entre 20 e 40 MPa) e os concretos de baixa resistência (até 20 MPa). Pode também haver outras classificações do mesmo, com variações dadas pela dosagem dos integrantes principais, ou de adição de mais materiais, resultando em um elemento de alto desempenho (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A tabela 1 indica formulações comumente encontradas no mercado para alcançar resistências desejadas para os tipos de uso requeridos do concreto.

Tabela 1 - Proporções de materiais em dosagens de diferentes resistências.

	Baixa resistência (kg/m²)	Resistência moderada (kg/m²)	Alta resistência (kg/m²)
Cimento	255	356	510
Água	178	178	178
Agregado miúdo	801	848	890
Agregado graúdo	1169	1032	872
Proporção de pasta de cimento:
percentual em massa	18	22,1	28,1
percentual em volume	26	29,3	34,3
Água/cimento em massa	0,7	0,5	0,35
Resistência	18	30	60

Fonte: Adaptado de MEHTA; MONTEIRO (2008).

Quando as combinações entre quantidades de agregados e aglomerante são feitas de forma correta, o concreto formado tem suas propriedades definidas tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido. Em estado fresco, o interessante é atingir condições para a trabalhabilidade e coesão, ou seja, para que o concreto seja moldado as formas e bombeado da melhor forma. Já no estado endurecido a resistência mecânica é a principal característica pois se faz necessária para entender sobre as cargas que o concreto irá receber quando seu serviço for solicitado (REIS, 2008).

Por ser muito utilizado de forma mundial, as pesquisas com este material são justificadas, com o intuito de desenvolver sempre novas tecnologias e metodologias de uso para aperfeiçoar suas propriedades mecânicas e também ampliar seu campo de utilização.

4.1.1 Componentes do concreto

4.1.1.1 Cimento

O cimento é considerado um aglomerante, com a função de ligar os outros materiais adicionados a massa, aglomerando as partículas e realizando sua ligação por meio de produtos hidratados, aumentando a resistência (FREITAS, 2021). Ele é encontrado no mercado em diferentes tipos para atender da melhor forma as necessidades usuais ou específicas da aplicação, assim seus componentes básicos na sua maioria são sempre os mesmos, mudando suas proporções. Dentro do processo de produção, são usados como matéria prima componentes como a cal (CaO), a sílica (SiO₂), a alumina (Al₂O₃) e o óxido de ferro (Fe₂O₃), passando por um processo de aglutinação por sinterização, um aquecimento da mistura, até a fusão incipiente, para depois serem moídos para chegar na finura desejada (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

O cimento Portland é constituído de um pó fino que possui propriedades aglomerantes, aglutinantes ou mesmo ligantes, utilizando a finura Blaine (medida de ensaio de permeabilidade ao ar, devendo ser no mínimo de 2.600 cm²/g), e que ao entrarem em contato com a água, ficam endurecidos, e mesmo que este contato seja refeito, o cimento Portland não amolece mais, ou seja é uma reação irreversível (GONÇALVES, 2015; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Muitos dos estudos são voltados ao cimento Portland, formado por calcário, sílica e alumina, os quais são moídos para serem misturados de forma específica conforme as exigências de propriedades. Posteriormente a isto, ocorre a queima do material em temperaturas de até 1450°C, onde ocorre a fusão parcial dos componentes, promovendo as reações entres os três materiais e gerando esferas de 3 a 25 mm conhecidas como clínqueres. O material obtido é moído e adicionado a ele

o sulfato de cálcio, que evita a pega instantânea, resultando no cimento Portland (NEVILLE; BROOKS, 2010; NEVILLE, 2016).

No comércio, ao ver os sacos de cimentos, além das siglas e algarismos romanos que estão impressos e caracterizam o tipo de cimento presente ali, eles também devem apresentar um algarismo arábico: 25, 32 ou 40. Estes números indicam a mínima resistência a compressão, em MPa, que o material possui aos 28 dias de idade em argamassa normal. Exceto para os cimentos de alta resistência, onde a resistência é medida aos 7 dias de idade, todos estes dados são determinados pela norma NBR 8953. Os cimentos existentes no Brasil são diferentes em função de sua composição (GONÇALVES, 2015). Estes tipos de cimentos estão listados na Tabela 2.

Tabela 2 – Tipos de cimentos fabricados no Brasil.

Nome Técnico		Identificação do tipo e classe
Cimento Portland Comum	Cimento Portland Comum	CP I-25 CP I-32 CP I-40
	Cimento Portland com adição	CP I-S-25 CP I-S-32 CP I-40
Cimento Portland Composto	Cimento Portland com escória	CP II-E-25 CP II-E-32 CP II-E-40
	Cimento Portland com pozolana	CP-II-25 CP-II-32 CP-II-40
Cimento Portland de Alto Forno	Cimento Portland com <i>filler</i>	CP II-F-25 CP II-F-32 CP II-F-40
		CP III-25 CP III-32 CP III-40
Cimento Portland Pozolânico		CP IV-25 CP-IV-32
Cimento Portland da Alta Resistência Inicial		CP V-ARI
Cimento Portland resistente a sulfatos		Sigla e classe dos tipos originais acrescidos do sufixo RS. Exemplo: CP I-32RS, CP II-F-32RS, CP II-40RS etc.
Cimento Portland de baixo calor de hidratação		Sigla e classe dos tipos originais acrescidos do sufixo BC. Exemplo: CP I-32BC, CP II-F-32BC, CP II-40BC etc.
Cimento Portland Branco	Cimento Portland Branco Estrutural	CPB-25 CPB-32 CPB-40
	Cimento Portland não Estrutural	CPB
Cimento para poços petrolíferos		CPP - classe G

Fonte: Adaptado de GONÇALVES (2015).

A Tabela 3 descreve os principais componentes (fases) do cimento. As abreviaturas discriminadas na Tabela 2, usualmente utilizadas na química de cimento, e descreve o óxido por uma letra. A formação de produtos hidratados ocorre da combinação da água com os silicatos e aluminatos descritos anteriormente que, com tempo, resulta em um elemento resistente e firme, a pasta de cimento hidratada. (NEVILLE, BROOKS, 2010; NEVILLE, 2016).

Tabela 3 - Constituintes (fases) do cimento.

Nome do Composto	Composição em Óxidos	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Fonte: Adaptado de NEVILLE (2016).

A gipsita (sulfato de cálcio) é adicionada para que a velocidade da reação seja diminuída. É necessário o uso desse elemento para que na reação entre a C_3S com a água não ocorra a pega instantânea, o que pode dificultar o concreto em sua trabalhabilidade. Na reação de hidratação dos silicatos, C_3S e C_2S geram o composto $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ hidratado e microcristalino, conhecido como C-S-H juntamente com a liberação da $\text{Ca}(\text{OH})_2$, tendo uma maior liberação na reação do silicato C_3S (MEHTA; MONTEIRO, 2008; NEVILLE, BROOKS, 2010; NEVILLE, 2016).

4.1.1.2 Agregados

Quanto aos agregados, estes são partículas minerais que ao serem adicionados à massa do cimento aumentam seu volume e conseqüentemente reduzindo seu custo. Sua classificação é feita por granulometria, sendo dividido em dois grupos, os agregados graúdos, com granulometria maior que 4,75 mm (segundo a ABNT na peneira de malha Mesh nº4) e os agregados miúdos, com granulometria inferior a este tamanho (FREITAS, 2021).

Para entender melhor a respeito da granulometria dos agregados miúdos (areia), é comum fazer o ensaio de peneiramento, conforme a Especificação Brasileira EB-4. Neste ensaio utiliza-se 7 peneiras de malha quadrada, aonde as percentagens acumuladas, em peso, são dadas como explicitado na Tabela 4. Assim também, divididas em valores, de modo que o melhor resultado seja atingido quando se usa a zona ótima, contudo a partir da zona utilizável, já pode ser utilizado, demonstrando assim a quantidade de material com aquela granulometria.

Tabela 4 – Ensaio de peneiramento normal das areias

Peneiras aberturas nominais em mm (série normal ABNT)	Percentagens acumuladas	
	Zona Ótima	Zona Utilizável
9,5	0	0
4,8	0 - 5	0 - 3
2,4	29 - 43	13 - 29
1,2	49 - 64	23 - 49
0,6	68 - 83	42 - 68
0,3	83 - 94	73 - 83
0,15	93 - 98	88 - 93

Fonte: Adaptado de FUSCO (2008).

No comércio, hoje são encontrados vários dos agregados graúdos como a brita e seus diferentes tamanhos mostrados na Tabela 5 (FREITAS, 2021).

Tabela 5 - Denominação dos agregados graúdos e suas dimensões.

Denominação	Dimensões (mm)
Brita 0	4,8 – 9,5
Brita 1	9,5 – 19
Brita 2	19 – 25
Brita 3	25 – 50
Brita 4	50 – 76
Brita 5	76 – 100

Fonte: Adaptado de FREITAS (2021).

Para uma escolha certa do agregado a ser usado, é de extrema importância saber qual o impacto que ele irá gerar em todo o processamento do concreto, desde o valor, custo, até a trabalhabilidade dele fresco, sabendo que essa escolha pode interferir também em suas propriedades mecânicas, durabilidade e também em suas proporções em relação a dimensão (FUSCO, 2008).

Além das propriedades mecânicas, são avaliados nos concretos a sua porosidade, composição, granulometria, o índice de absorção de água e fluidez. Os

agregados mais usados têm sua origem vinda da britagem de rochas, assim dependendo delas para definir suas características intrínsecas. A trabalhabilidade do material em seu estado fresco pode ser afetada de forma negativa muitas vezes pela porosidade e o índice de água que o agregado pode absorver, acarretando numa resistência menor que a esperada nas idades avançadas do concreto (FUSCO, 2008).

Os minerais mais encontrados dentro da classificação de agregados são os micáceos, carbonáticos, argilosos, ferromagnesianos, sulfáticos e zeolíticos. Ao conhecer melhor cada um desses componentes, existe a compreensão de como suas partículas irão influenciar no empacotamento, como o uso de agregados que possuem partículas mais arredondadas resulta na diminuição de água dentro do concreto, porém, quando se trata de partículas irregulares, com ângulos diferentes, agregam uma ancoragem maior e aumentam a resistência mecânica ao final do processo. Assim, tais propriedades influenciam o concreto em seu estado fresco em maior porcentagem do que em seu estado enrijecido (MEHTA; MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 2016; OLIVEIRA et al., 2000).

4.1.1.3 Água

Não menos importante, a água possui algumas funções essenciais ao concreto: ela é a responsável pela hidratação do cimento e por boa parte das características reológicas no estado fresco do concreto, juntamente com o fato de participar das reações químicas na massa assim como o cimento, ocasionando no endurecimento do concreto. Para que melhores propriedades sejam atribuídas ao final do processo, é necessário que dentro da água não haja impurezas, tais como elementos orgânicos ou inorgânicos que venha a prejudicar a formulação ou alterar o pH do meio (FREITAS, 2021).

Dentro da ABNT NBR 6118 (2014), é dito que águas potáveis são satisfatórias para o processo de mistura dos elementos que formam o concreto. Já em caso de águas não potáveis, torna-se primordial o controle de materiais orgânicos contidos em sua composição, resíduos sólidos, como também teores de sulfatos e de cloretos em forma de íons. Vale ressaltar que agentes agressivos que estão dentro da água utilizada no amassamento, quando sob controle dentro de certos limites, não é tão prejudicial quanto a água que age sobre o concreto em seu estado endurecido. O fato

de ocorrer as reações de hidratação do cimento durante o amassamento dos materiais faz com que a maioria dos agentes agressivos sejam neutralizados durante este processo (FUSCO, 2008).

A quantidade de água é definida durante o processo em que se ressalta as características finais que o concreto precisa ter, pois ela influenciará na resistência mecânica do cimento, levando em conta que em excesso pode prejudicar todas as propriedades do concreto. Em seu estado fresco, problemas como a retração superficial, exsudação, segregação, perda de trabalhabilidade e perda de coesão, enquanto que em idade avançada e já enrijecido pode haver um aumento de porosidade, devido à grande evaporação da água, acarretando na diminuição de sua resistência e criando assim algumas patologias, como a que será trabalhada na pesquisa, as fissuras (MEHTA; MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 2016).

Na pasta de cimento hidratada existem três principais fases sólidas. O cálcio hidratado, C-S-H, que está presente em cerca de 50 a 60% do volume de sólidos no cimento hidratado, determina as propriedades da pasta. Em seguida, o hidróxido de cálcio, que compõe cerca de 20 a 25% do mesmo e são responsáveis por possuírem um potencial limitado de contribuição com a resistência por ter uma área superficial relativamente baixa. O terceiro são os sulfoaluminatos de cálcio que constituem em 15 a 20% do volume sólido, possuindo papel secundário em termos de microestrutura-propriedade (FILHO et al, 2017).

4.1.1.4 Aditivos

Com a mistura dos elementos do concreto, a floculação do cimento tende a ocorrer após a adição de água, que por sua vez aprisiona parte do líquido em flocos no seu interior. Para evitar tal reação, aditivos são usados de modo a favorecer a defloculação do meio. Estes aditivos podem ser definidos, como um material diferente de cimento, água ou agregados e que, quando adicionados na formulação do concreto, melhora suas propriedades físicas e mecânicas, promovendo uma redução da exsudação, uma melhor plasticidade, e até mesmo uma aceleração em seu tempo de secagem e pega. Existe uma influência positiva nas taxas de hidratação do cimento e desenvolvimento da resistência inicial devido a presença de aditivos redutores de água na relação água/cimento. Os aditivos com poder de atrasar ou adiantar a

hidratação do cimento irão ter uma grande influência nas características mecânicas do concreto. (MEHTA; MONTEIRO, 2008; OLIVEIRA et al., 2000).

No que diz respeito aos aditivos, existe uma classificação da ASTM C 494-10, no qual tem-se algumas descrições que regem suas classes, tais como aceleradores, retardadores, redutores de água, e até mesmo algumas classes que fazem mais que uma dessas descrições, como um aditivo que ao mesmo tempo em que reduz a água, pode retardar o processo. Nesse contexto, existem os superplastificantes, os quais podem reduzir o teor de água necessário no concreto, elevando o seu desempenho ou retardar o processo de hidratação juntamente com sua redução de água (NEVILLE, 2016).

Aditivos que reduzem a água funcionam de forma a criar uma distância entre as partículas, fazendo com que não ocorra a aglomeração, com isso diminuindo a viscosidade. Os superplastificantes têm a mesma função de forma mais efetiva, podendo chegar a uma redução de até 4 vezes a quantidade de água na mistura. Esses super aditivos são compostos de surfactantes aniônicos com uma cadeia de alta massa molecular e longa, que quando é absorvido na mistura das partículas do cimento, adicionam a elas cargas negativas mais fortes, o que proporciona a redução da tensão superficial fazendo uma elevação em sua fluidez (MEHTA; MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 2016).

4.2 FORMULAÇÃO EM CONCRETOS

Quando se pensa em formulação, leva-se em conta principalmente o fator de empacotamento que irá conferir ao concreto propriedades desejáveis em seu processo de fabricação, afetando diretamente suas propriedades.

Para um fator de empacotamento mais efetivo são adicionados sempre elementos de menor diâmetro a fim de preencher os espaços vazios entre as partículas que o compõe, tornando o produto mais denso. O sistema de empacotamento é dividido em duas categorias conforme seus tamanhos: monodisperso, que possui apenas componentes de um único tamanho, que podem ser esféricos ou não, e sistema polidisperso, que tem em sua composição dois ou mais elementos de diferentes tamanhos, a fim de se ter um grau de empacotamento maior. Deve também ser controlado a distribuição para que não ocorra a introdução

de partículas maiores do que as já pertencentes à mistura, pois pode levar à aparição de novos vazios e com isso o material se tornara mais poroso (OLIVEIRA, 2000).

Por sua vez, o concreto é um material de essência porosa e a sua durabilidade por ser influenciada devido a este fator, sendo que no emprego de estruturas utilizando este material, leva-se em conta o quão agressivo pode ser o meio externo, podendo ocasionar o ataque do meio ambiente ao interior da estrutura, particularmente pelo CO₂ que produz o efeito de carbonatação, podendo haver a corrosão das armaduras. Os poros formados na massa do concreto são decorrentes de diversas causas, como indicado na Tabela 6 (FUSCO, 2008).

Tabela 6 – Causas dos Poros na Massa do Concreto

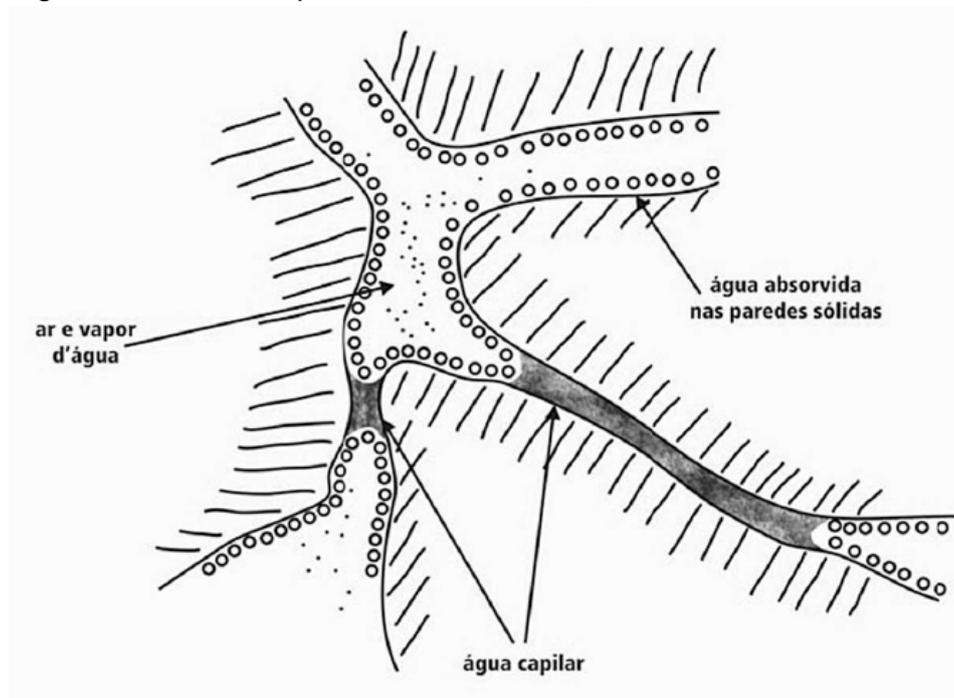
Tipos de Poros	Dimensões(mm)
Poros de Compactação	0,5 a 5
Poros devidos à incorporação de ar	0,05 a 0,5
Poros Capilares	0,5 x 10 a 0,05
Poros de Gel de Cimento	0,5 x 10 a 0,5 x 10

Fonte: Adaptado de FUSCO (2008).

Os fatores que levam a formação de poros por compactação variam desde o atrito entre os grãos de agregados até as fôrmas par a concretagem. Os poros por incorporação de ar, são decorrência do próprio processo de mistura da massa na betoneira, que em formas de minúsculas bolhas, o ar é disperso na massa, e em algumas circunstâncias admite se o uso de aditivos para que aumente significativamente todo ar a ser incorporado procurando melhorar a lubrificação entre os agregados, permitindo uma diminuição do fator água/cimento, sem perder a característica de trabalhabilidade do concreto (FUSCO, 2008).

No processo de evaporação do excesso de água de amassamento, forma-se uma rede de canais intercomunicantes ao longo de todo o concreto (Figura 1), dando origem aos poros capilares. Neste caso, após o tempo de endurecimento do concreto, parte da água que evapora forma uma rede com poros menores saturados de água e os maiores contendo ar e vapor no seu interior com uma película de água adsorvida ao longo de suas paredes (FUSCO, 2008).

Figura 1 – Poros Capilares do concreto



Fonte: FUSCO (2008, p.38).

Os poros do gel do cimento são uma decorrência da ação de retração química ocorrente na água no processo de hidratação do cimento, tendo suas dimensões minúsculas, e sendo isolados uns dos outros, portanto, não participando do processo de ataque do meio externo ao concreto (FUSCO, 2008).

Muitos outros fatores afetam o empacotamento, tais como a morfologia, densidade, dispersão e modelos e técnicas para compactar as partículas. Com tantos fatores, a existência de vários modelos, práticos e teóricos, começam a ser estudados e utilizados na determinação da melhor distribuição de partículas durante o processo da formulação do concreto. Dentre eles, destaca-se no setor ceramista o modelo de Andreassen (OLIVEIRA et al., 2000).

A distribuição de partículas de forma contínua é o ponto de partida da criação do modelo de Andreassen. De acordo com esse modelo, para criar um empacotamento ideal, as partículas devem por sua vez se encaixarem da melhor forma possível a fim de ocupar o máximo de espaços disponíveis por tamanhos, de acordo com a lei das potências, conforme indicado na equação 1 (OLIVEIRA et al., 2000). Dentro do modelo de Andreassen, o melhor empacotamento possível, teoricamente, é a que utiliza $q=0,37$ (OLIVEIRA et al., 2000).

$$CPFT = \left(\frac{D_p}{D_L}\right)^q \times 100 \quad (1)$$

em que o CPFT é a porcentagem de partículas menores que D_p acumuladas, sendo D_p o valor do diâmetro da partícula, D_L o valor de diâmetro da partícula maior, e q é o coeficiente dessa distribuição.

Nesta pesquisa será utilizado o método de Andreassen para a formulação dos concretos a serem produzidos.

4.2.1 Reologia do Concreto

Do ponto de vista reológico, o concreto pode ser descrito como sendo uma concentração de partículas sólidas em suspensão (agregados) em um líquido de consistência viscosa (ou seja, pasta de cimento) (CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2011).

O comportamento do concreto em seu estado fresco vem sendo descrito em termos da sua trabalhabilidade, sua consistência, capacidade de bombeamento ou o escoamento. Essas propriedades reológicas podem ser determinadas em qualquer momento durante o período de hidratação do cimento e estão diretamente relacionadas à sua durabilidade, consolidação e resistência mecânica final (CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2011).

Atualmente, a reologia do concreto é descrita e estudada por algumas determinações que variam entre métodos simples e plásticos, como o próprio ensaio de abatimento de tronco de cone, até em equipamentos de maior tecnologia capazes de determinar as curvas de cisalhamento (CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2011).

Quanto a sua classificação reológica, a maioria dos métodos de ensaios normalizados como também qualquer outro método empírico, se propõe a avaliar as propriedades do concreto enquanto fresco de uma forma única, abrangendo todas as propriedades do concreto tentando considerar que ele se comporta da maneira mais simples, como um fluido newtoniano. Contudo ao se observar o seu comportamento, prova-se que essa suposição não é correta, já que o concreto exige uma imposição de tensão para que ocorra o início do escoamento, caracterizando o seu comportamento como não podendo utilizar uma constante única. Grande parte das equações utilizadas para suspensões, assim como o concreto, propõe a relacionar a

concentração de uma suspensão com a sua viscosidade, ou ainda, a taxa de cisalhamento com a tensão de cisalhamento, tomando como base que existe apenas um valor de viscosidade para o sistema todo (CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2011).

A Tabela 7 demonstra equações utilizadas para relacionar a tensão e a taxa de cisalhamento, muitas vezes utilizada para descrever o método de escoamento do concreto fresco.

Tabela 7 - Equações relacionando tensão e taxa de cisalhamento

Modelo Reológico	Equação do Modelo
Newton	$\tau = \mu\gamma$
Bingham	$\tau = \tau_0 + \mu\gamma$
Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_0 + K\gamma^n$
Lei das Potências	$\tau = A\gamma^n$
	n=1 para fluido newtoniano n>1 para fluido dilatante n<1 para fluido pseudoplástico
Vom Berg, Ostwald-de-Waele	$\tau = \tau_0 + Bsen^{-1}\left(\frac{\gamma}{C}\right)$ $\tau = a(\gamma + C)^b$
Robertson-Stiff	$\tau = a\gamma + Bsen^{-1}\left(\frac{\gamma}{C}\right)$
Eyring	$\gamma = \alpha\tau^2 + \beta\tau + \delta$
Atzeni <i>et al.</i>	

Obs.: τ = tensão de cisalhamento; τ_0 = tensão de escoamento; μ = viscosidade;

γ = taxa de cisalhamento; A, a, B, b, C, K, α, β, δ = constantes.

Fonte: CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI (2011, p.64).

Os fatores que influenciam na reologia do concreto, uma vez que é considerado um tipo de suspensão concentrada, são a concentração volumétrica dos sólidos, características do meio líquido, temperatura de cura, e as propriedades físicas das partículas de cada elemento e a interação entre elas. Ao adicionar agentes dispersantes, o comportamento se toma ainda mais complexo, pois outros fatores devem ser considerados, como a concentração de moléculas dispersas no meio líquido, o peso molecular, a conformação espacial de molécula do dispersante, inclusive a espessura da camada da molécula de dispersante adsorvida ao redor das

partículas. Assim, dependendo de cada particularidade envolvida no processo de mistura dos elementos para gerar o concreto fresco, um ou mais fatores podem prevalecer, comandando o comportamento reológico do fluido final (CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2011).

Quando lidamos com o empacotamento de partículas, a maximização pode ser alcançada através da correta seleção dos diâmetros das partículas e de suas quantidades, contemplando assim o preenchimento dos espaços vazios por partículas de tamanho adequado. Um dos modelos mais aceitos é o de Alfred que considera o tamanho mínimo de partícula para a distribuição, sendo mais próximo da realidade, este modelo foi criado a partir do modelo de Andreassen (OLIVEIRA *et al.*, 2000). Um dos principais fatores que podem alterar a condição de empacotamento é a morfologia apresentada pelas partículas a serem usadas, como o pó de brita ou areia de rio, com suas morfologias mais esféricas, ou até mesmo a brita, possuindo uma morfologia mais irregular. Quanto menor for a quantidade de partículas esféricas menor será a densidade de empacotamento do concreto ao final do processo, já no processamento a técnica de compactação (prensagem, vibração) provoca uma grande influência no empacotamento (OLIVEIRA *et al.*, 2000; PILEGGI, 2001).

4.3 FISSURAS

Apesar da elevada resistência mecânica à compressão e flexão e baixo custo de produção, alguns pontos negativos que envolve a fabricação e uso do concreto devem ser levados em consideração, com destaque para baixa resistência à tração, acarretando o surgimento de fissuras. Com a fissura expondo o material interno, a deterioração começa a ocorrer por vários motivos, como as reações químicas de oxidação, tensões por temperaturas e corrosões por efeito da carbonatação (TRENSON, 2017; VAN TITTELBOOM *et al.*, 2010).

Os surgimentos das fissuras podem acontecer por diversos motivos, desde origens de atividades humanas, como fenômenos naturais ou até pelo envelhecimento das construções. Todos estes processos podem facilitar a entrada de agentes agressivos que causem diretamente a deterioração das edificações (GATO, 2021).

Os rompimentos podem ser classificados como: trinca, fissura, rachadura, fenda e brecha de acordo com a espessura da abertura (Tabela 8).

Tabela 8 – Classificação dos tipos de rompimentos de concretos

Classificação	Espessura da abertura (mm)
Fissura	Até 0,5
Trinca	Maior que 0,5 até 1,5
Rachadura	Maior que 1,5 até 5,0
Fenda	Maior que 5,0 até 10
Brecha	Maior que 10

Fonte: Adaptado de GATO (2021).

Várias alterações volumétricas no concreto em suas idades iniciais ocorrem devido à hidratação do cimento, que por sua vez causam reações internas enquanto a resistência está baixa, formando pequenas fissuras que podem influenciar na estrutura do concreto. Contudo tem-se também a exposição do material a vários agentes externos ao decorrer do tempo, como diferentes tipos de esforços solicitados, ou até mesmo alterações climáticas. Com essas variáveis em ação, ocorre também a fissura póstuma ao tempo de secagem do concreto (aonde ele assume sua maior resistência). Por meio dessas fissuras, existe o contato da armadura interna da estrutura de concreto, que por ser feita de aço, em contato com o oxigênio, leva à oxidação. A corrosão do aço que ocorre é um dos maiores problemas causados no surgimento das fissuras, e acarreta a deterioração do concreto (BISSONNETTE; PIERRE; CABRERA, 1996; PIGEON, 1999).

As fissuras podem ser classificadas pelas atividades que elas exercem na estrutura (Tabela 9), assim pode-se saber qual tipo de material aplicar para correção do problema. Existem as fissuras ativas que apresentam movimentos que variam em sua abertura e comprimento e são características de problemas estruturais. E as fissuras passivas ou também conhecidas como fissura morta, pois estas estão estabilizadas não apresentando mudança de tamanho ou abertura conforme o tempo, essas são causadas pela retração plástica (FILHO *et al.*, 2017).

Para uma melhor exemplificação destas fissuras pode-se citar dentre a ativas as que são causadas pela variação térmica, por retração causada pela secagem ou hidráulica, pela carga dinâmica e também pela corrosão da armadura. Já se tratando das fissuras passivas estas são provenientes de assentamento plástico, dessecação superficial, retração química ou intrínseca, movimentação das formas, e também variação térmica juntamente com sobrecargas (FILHO *et al.*, 2017).

Tabela 9 – Classificação dos tipos de fissuras em concretos

Tipo de fissura	Letra indicativa (ver Figura 10-16)	Subdivisão	Localização usual	Causa primária (excluindo restrição)	Causas/fatores secundários	Correção (aceitando-se que refazer o projeto é impossível); em todos os casos inclui redução da restrição	Período de surgimento
Assentamento plástico	A	Sobre a armadura	Seções profundas	Exsudação excessiva	Secagem rápida nas primeiras idades	Reduzir exsudação (incorporação de ar) ou revibrar	10 minutos a 3 horas
Retração plástica	B	Em arco	Topo de pilares	Secagem inicial rápida	Baixa taxa de exsudação	Melhoria da cura inicial	30 minutos a 6 horas
	C	Mudança de profundidade	Lajes tipo caixão perdido				
	D	Diagonal	Pisos e lajes				
Contração térmica inicial (calor de hidratação)	E	Aleatória	Lajes de concreto armado	Idem mais aço próximo à superfície	Resfriamento rápido	Reduzir calor de hidratação e/ou isolar termicamente	1 dia a 2 ou 3 semanas
	F	Sobre a armadura	Lajes de concreto armado				
Retração hidráulica ou por secagem de longo prazo	G	Restrição externa	Paredes grossas	Geração excessiva de calor de hidratação	Retração excessiva Cura ineficaz	Reduzir o consumo de água Melhorar a cura	Várias semanas ou meses
	H	Restrição interna	Lajes espessas	Gradientes excessivos de temperatura			
Fissura mapeada	I		Lajes finas (e paredes)	Juntas ineficazes	Misturas ricas	Melhorar a cura e acabamento (postergar acabamento quando possível)	1 a 7 dias
Corrosão da armadura	J	Contra a fôrma	Concreto aparente	Fôrma impermeável			
	K	Nata porosa	Lajes	Excesso de desmoldamento	Cura inadequada	Eliminar causas listadas	Mais do que 2 anos
	L	Natural	Pilares e vigas	Cobrimento insuficiente			
	M	Cloreto de Cálcio	Concreto Pré-moldado	Excesso de cloreto de cálcio			

Fonte: MEHTA; MONTEIRO (2008, p.390).

As fissuras diminuem a resistência mecânica do concreto e também a sua durabilidade, pois elas permitem a penetração de elementos prejudiciais tais como oxigênio e carbono. Danos em sua estrutura de concreto são acarretados por uma combinação, muitas vezes, de vários mecanismos (TRENSEN, 2017).

4.3.1 Tratamento de fissuras

As fissuras devem ser tratadas o mais rapidamente de modo a evitar o aparecimento de outras patologias. Com o conhecimento em como as fissuras aparecem e como elas interferem a curto e longo prazo na estrutura são elaborados alguns mecanismos para tratar estes problemas.

O cuidado póstumo no reparo das fissuras geradas em um concreto é complicado; além de custoso e de grande dificuldade, uma vez que na maior parte das vezes a estrutura já está gravemente comprometida devido ao tempo de exposição das fissuras no ambiente, tornando necessária a prevenção dessas

patologias. Os tratamentos do concreto podem ser divididos, em função do fator de cura que cada um promove, em dois tipos: o passivo e o ativo (WANG; DE BELIE; VERSTRAETE, 2012a).

Quando se trata dos meios passivos, são aplicados à superfície uma cobertura de produtos poliméricos ou químicos, desde borrachas cloradas, ceras, até acrílicos e resinas epóxi. Confere-se a este meio uma grande vantagem de poder ser usada em muitas estruturas de concreto. Em contrapartida, suas limitações estão ligadas à resistência baixa com o tempo, desgaste com a umidade e uma aderência nem sempre satisfatória (SEIFAN; SAMANI; BERENJIAN, 2016).

Os meios ativos selam as fissuras quase no mesmo momento em que estas são formadas, conhecidas como técnicas de autocura. Dentro deste tratamento existem dois mecanismos de funcionamento, a abordagem autônoma e a autógena. A cura acontece de forma autógena, sendo natural; ela se baseia em uma reação onde acontece a hidratação de partículas do cimento ou pela carbonatação, reação de hidróxido de cálcio. A adição de água ao cimento forma o $Ca(OH)_2$, que após entrar em contato com o meio externo e mais agressivo, por exemplo o CO_2 , faz ocorrer a carbonatação dos álcalis formados, e como consequência disto ocorrendo o fechamento da abertura na fissura (SEIFAN; SAMANI; BERENJIAN, 2016; TRENSON, 2017; VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013; WU; JOHANNESON; GEIKER, 2012).

De um modo geral, quanto maior o tamanho da fissura, maior a dificuldade para o seu fechamento pois é necessário o fornecimento contínuo de água para a realização da hidratação; assim este modelo de cura tende a ser mais usada em concretos frescos e de idades menores. E essa autocura acaba por diminuir ao decorrer do aumento da idade do concreto (TRENSON, 2017).

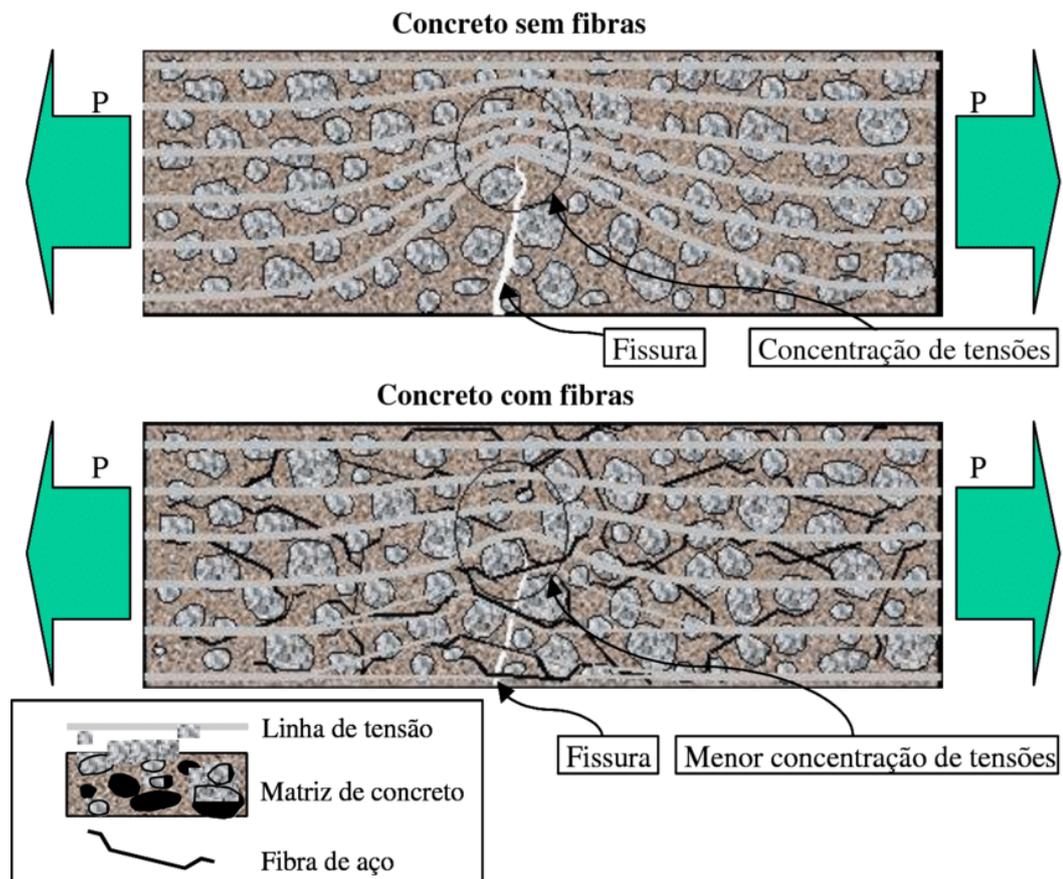
Na cura autônoma todos os mecanismos envolvidos são projetados para melhorar as propriedades do concreto em sua autocura. Foram sugeridos seis modelos de critérios para avaliação das vantagens e desvantagens de cada método de autocura propostos por Li e Hebert (2012), sendo eles: qualidade, confiabilidade, versatilidade, vida útil, repetibilidade e penetração. O maior desafio dessa cura é a proteção dos componentes, que irão agir, durante a cura do concreto e também o como serão ativados apenas quando forem necessários. (TRENSON, 2017).

Em concretos convencionais, esta autocura se limita a fissuras com até 0,2 mm e com pré-requisito de que existam uma condição favorável para a formação dos

produtos para o preenchimento ou então de que elas consigam reparar a si próprias, levando em consideração os concretos com alta capacidade cicatrizante, e esta capacidade está diretamente ligada com a quantidade de partícula não hidratadas no concreto (FILHO *et al.*, 2017).

Uma forma de aumentar a capacidade auto cicatrizante dos concretos é a adição de fibras de acetato de polivinila, de carbono, ou metálicas (Figura 2). Neste caso, a cicatrização ocorre da mesma forma que o convencional, através da hidratação dos compostos no concreto e que depois são carbonatados dentro das fissuras (FILHO *et al.*, 2017).

Figura 2 – Comportamento de fissura em concreto convencional sem e com fibras.



Fonte: ROCHA *et al.* (2019, p. 268).

As fibras também servem como superfície para que ocorra a nucleação dos cristais de carbonato de cálcio, resultando numa cicatrização mais rápida (FILHO *et al.*, 2017).

O uso de um material polimérico no encapsulamento de um, dois ou mais componentes nos agentes químicos usados que vão gerar uma espuma quando em contato com a umidade apresenta desvantagens; quando se pensa que os materiais poliméricos se comportam de forma diferente ao concreto, que pode levar a maiores quantidades de trincas quando não trabalhados de forma correta. Assim, vários estudos recentes buscam investigar uma produção microbiana por meio de uma reação, gerando o carbonato de cálcio através de mecânicas de biomineralização (SEIFAN; SAMANI; BERENJIAN, 2016).

O concreto, quando recuperado por aditivos, apresenta uma diminuição de resistência após o processo. Jonkers e Schlangem (2007) sugerem a auto cicatrização por meio de um mecanismo baseado em bactérias incorporadas a formulação do concreto, no qual não existe a modificação das suas características mecânicas finais.

4.4 BIOMINERALIZAÇÃO E BACTÉRIAS BIOMINERALIZADORAS

A biomineralização, também conhecida como precipitação de carbonato de cálcio por microrganismos (MICP, do inglês *Microbially induced calcium carbonate precipitation*), é um processo através do qual ocorre a formação de minerais por organismos vivos em função da sua atividade microbiana em locais abertos. Ao entrar em contato com o meio externo, o metabolismo da estrutura bacteriana forma os minerais que serão usados no reparo do concreto (SEIFAN; SAMANI; BERENJIAN, 2016; TEBO *et al.*, 2015).

Na biomineralização os microrganismos secretam alguns produtos metabólicos e este reagem com íons ou até mesmo compostos que estão presentes no meio físico, resultando na deposição subsequente de partículas minerais como um subproduto do metabolismo realizado. Este processo é altamente dependente do meio envolvente (CARMONA, 2016).

Algumas espécies de bactérias possuem a capacidade, mesmo que em menores quantidades, de precipitar vários tipos de cristais de cálcio, como por exemplo: calcita, aragonita, dolomita, entre outros (GATO, 2021). Esta remediação é feita por organismos não patogênicos e não nocivos ao meio ambiente. Isso faz com que estes micro-organismos possam infiltrar e se reproduzir no solo sem causar nenhum problema a este ou outros ambientes.

A utilização de concretos com adições desses micro-organismos tem se tornado cada vez mais usual devido a aplicações com aprimoramento na durabilidade dos materiais (FILHO *et al.*, 2017). A Tabela 10 indica as principais bactérias biomineralizadoras utilizadas em função dos materiais e/ou ocorrências nos materiais de construção civil.

Tabela 10 - Aplicação de bactérias na área de construção civil.

Aplicação	Organismo	Referência
Argamassa de cimento e concreto	Bacillus cereus	Le Metayer-Leverel et al (1999)
	Bacillus sp. CT – 5	Achal et al (2011)
	Bacillus pasteurii	Ramachandram et al (2001)
	Shewanella	Ghosh et al (2005)
	Sporosarcina parteurii	Achal et al (2011)
Remediação de Fissuras em concreto	Sporosarcina parteurii	Bang et al (2001)
	Bacillus pasteurii	Ramachandram et al (2001)
	Bacillus pasteurii	Ramakrishnan et al 2001
	Bacillus sphaericus	De Belie et al (2008)
	Bacillus sphaericus	D Muynck et al (2008)
Autocicatrização	Bacillus pseudofirmus	Jonkers et al (2007)
	Bacillus cohnii	Jonkers et al (2007)

Fonte: FILHO *et al.*, (2017, p.31).

A descoberta a respeito de que determinadas bactérias são capazes de precipitar carbonato de cálcio, contribuiu fortemente para o uso das mesmas em restituição de calcinas degradadas pelo meio ambiente. Boquet *et al.* (1973) foram os primeiros que, em condições de laboratório, demonstraram que as bactérias são mesmo capazes de precipitar carbonato de cálcio, pois as pesquisas anteriores tratavam apenas sobre as bactérias marinhas em meio líquido (SHINAMO, 1972).

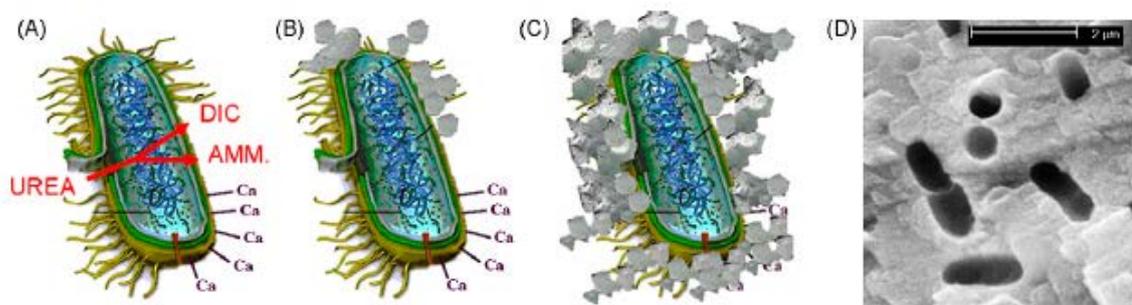
Existem na natureza diversas espécies de bactérias, todavia, aquelas que mostraram melhores resultados no que se refere à precipitação de carbonato de cálcio são as do tipo Bacillus, por conta de sua boa capacidade de realizar a biomineralização, visto que possuem um metabolismo que consiste na uréase, no qual é uma enzima que transforma a ureia em gás carbônico e água (GATO, 2021).

A cepa de bactérias mais utilizada neste ramo de autocura de concreto é a das bactérias ureolíticas, por conta da sua alta produção de precipitação de carbonato de cálcio, contudo, cepas que fazem a redução de nitrato, também são consideradas eficazes neste processo (ZHU *et al.*, 2021).

O processo de biomineralização é afetado por muitos fatores, desde o pH, concentração de carbono dissolvido no ambiente, até a quantidade de íons de cálcio e sítios de temperaturas e de nucleação (no caso o primeiro passo na formação de uma nova fase ou nova estrutura através e uma nova reorganização que ocorre no concreto) presentes no ambiente (LEE; PARK, 2018; SEIFAN; SAMANI; BERENJIAN, 2016).

Conforme observado na Figura 3, a formação dos minerais decorre dos produtos metabólicos juntamente a elementos presentes no ambiente. As bactérias citadas são capazes de produzir muitos minerais através de seus mecanismos microbióticos; todavia, o carbonato de cálcio acaba sendo um dos melhores *fillers*, por conta da sua compatibilidade elevada com o concreto (SEIFAN; SAMANI; BERENJIAN, 2016).

Figura 3 - Processo de biomineralização



Fonte: MUYNCK; BELIE; VERSTRAETE (2010, p. 126).

Legenda:(a) estrutura bacteriana

(b) parede celular carregada negativamente e presença de íons positivos e

(c) produção biomineral pela junção dos íons à parede celular

(d) células envolvidas em carbonato

Segundo a Figura 3, os íons de cálcio que estão presentes no meio, são atraídos para a parede de célula, por conta da carga negativa da parede celular, em seguida, com a adição da ureia (UREA), são liberados o carbono dissolvido (DIC) e a amônia (AMM) no microambiente da bactéria. Assim com a presença de muitos íons de cálcio, acontece uma supersaturação no local e então o carbonato de cálcio

começa a precipitar na parede celular, e com o passar do tempo, a célula fica encapsulada de precipitado, por completo, limitando a transferência de nutriente e se tornando inativa novamente (MUYNCK; BELIE; VERSTRAETE, 2010).

Existe uma gama de mecanismos metabólicos que pode ser usado para a indução do material desejado, precipitando assim o carbonato de cálcio; como a fotossíntese, a ureólise, denitrificação, amonificação e a redução de sulfato, sendo mais estudada a ureólise com bactérias que precipitam o carbonato de cálcio a partir de seus metabolismos. Neste processo é provocado o aumento do pH gerando nitrogênio, bicarbonato e hidróxidos, tendo atenção na quantidade de amônia para que não seja excessiva no sistema, o que pode ser prejudicial para as estruturas cimentícias (ACHAL; MUKERJEE; SUDHAKARA, 2013; LEE; PARK, 2018; VAN TITTELBOOM *et al.*, 2010; WANG *et al.*; 2012b; WANG *et al.*; 2014a).

A ureólise, ou também conhecida como hidrólise enzimática da ureia, é o processo mais eficiente quando se trata de termos energéticos para a geração de carbonato de cálcio (CARMONA, 2016).

Sendo descrito pela reação básica de precipitação do carbonato (equação 2) (FILHO *et al.*, 2017):



Já na equação 3, S é o nível de saturação, fator principal na precipitação do $CaCO_3$, dado pela taxa do produto iônico.

$$S = \frac{(Ca^{2+})x(CO_3^{2-})}{K_{sp}} \quad (3)$$

A hidrólise da ureia durante a atividade microbial ocorre segundo as equações 4 e 5.



Então eles são dissociados e colocados em água formando 2 mols de íons amônio e íons hidroxila (equações 6 e 7)

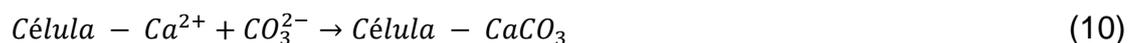




As reações indicadas pelas equações 6 e 7 fazem com que haja um aumento no pH, deslocando o equilíbrio do bicarbonato e formando íons carbonato. Essa variação, começa no entorno da célula e se propaga para a solução, como na equação (8) (FILHO et al, 2017)



Ocorre então um aumento na concentração de carbonato, induzindo um acréscimo no fator S, causando precipitação de $CaCO_3$ ao redor da célula (equações 9 e 10).



Com isso, há uma atração eletrostática e os íons de cálcio são atraídos para a parede celular da célula. A adição da ureia, faz com que haja liberação no entorno da célula de carbono inorgânico dissolvido juntamente com NH_4 , resultando numa supersaturação local e causando a precipitação heterogênea de carbonato de cálcio na parede celular (FILHO et al., 2017).

Este é um processo um tanto quanto simples, mas que é gerido por 4 principais fatores, a saber: a concentração de cálcio, a concentração de carbono inorgânico dissolvido, o pH do meio e por último a disponibilidade de locais de nucleação (CARMONA, 2016).

O uso direto das bactérias ao corpo do concreto para a deposição do carbonato de cálcio nas fissuras foi proposto por Jonkers (2007); porém, a sobrevivência dos micro-organismos é relativamente baixa por conta do meio agressivo em que eram inseridas. Assim, a ideia de uma proteção para a bactéria foi pensada de forma a garantir sua sobrevivência.

4.4.1 Encapsulamento das bactérias

A microencapsulação é definida como um recobrimento de um material, dando origem a cápsulas em miniatura que podem propiciar o controle para a liberação do

conteúdo, de modo que seus propósitos buscam a possibilidade de um líquido ter o comportamento de um sólido, ou separar os materiais que são reativos entre si, a redução de material ativo tóxico, controlar o material a ser liberado, ou até mesmo a volatilidade de líquidos, como também a proteção contra água, calor ou luz (MENEZES *et al.*, 2013).

Com o uso da cápsula começa-se a ter uma proteção mecânica para a bactéria, liberando-a apenas quando surgir a fissura em questão no concreto, umidade, ou a mudança do pH. Tal técnica aumenta a vida útil do agente biológico responsável pela cura do concreto. Embora seja satisfatória sua qualidade de reparo em fissuras, ela está limitada à quantidade de vezes que ela pode repetir o processo de cura, que por sua vez, ocorre de forma única (SOURADEEP; KUA, 2016).

Vários tipos de proteções foram desenvolvidos, tais como tubos, materiais porosos, hidrogel e microcápsulas. Segundo Lee (2018), as cápsulas devem satisfazer alguns requisitos para que funcionem na autocura com os micro-organismos:

- Serem biocompatíveis;
- Manterem as propriedades mecânicas do concreto;
- Suportarem mecanicamente o processo da mistura;
- Liberarem o agente de cura quando requisitado.

Deve-se levar em consideração a distribuição de forma igualitária no concreto, para que as fissuras atinjam as cápsulas, independentemente do local da patologia (LEE; PARK, 2018).

Wang (2014) propõe que na utilização de cápsulas de hidrogel como a quitosana ou o alginato de sódio, que a cápsula funcionaria como um reservatório de água para ocorrer o metabolismo em períodos de seca, garantindo a sobrevivência da bactéria.

As microcápsulas podem ter seu tamanho variado de frações de micron até alguns milímetros, como sua forma também pode mudar de acordo com a metodologia de criação e o material usado no processo. Assim temos a denominação do material externo como agente encapsulante e em muitas vezes são constituídos por polímeros, e os mais utilizados são materiais como o alginato, a quitosana ou a gelatina, com a existência de várias técnicas para o encapsulamento (MENEZES *et al.*, 2013).

O alginato é amplamente estudado por ter propriedades para a formação de nanocápsulas entre 2 e 100 nm. E para justificar seu amplo uso como agente encapsulante ele possui certas características interessantes como a solubilidade à temperaturas ambiente, tendo a habilidade de ser um gel permeável com o cloreto de cálcio, uma excelente propriedade gelificante, em termos financeiros apresentam um baixo custo, como também possuem uma boa facilidade de uso e a característica de ausência de toxicidade (PEREIRA *et al.*, 2008).

O sistema cálcio-alginato forma uma proteção mais efetiva para as culturas celulares visto que as bactérias encapsuladas conseguem sobreviver por um período de tempo maior (MENEZES *et al.*, 2013).

A bactéria mais utilizada recentemente nos trabalhos com concreto e biomineralização é a *Lysinibacillus sphaericus*. Tal micro-organismo tem se provado bem eficiente em testes realizados em laboratório. Estudos mais recentes têm avaliado a adição de bactérias dentro de cápsulas de alginato de sódio, utilizando-se da técnica de polimerização. Para que possa ser aplicado em concretos e para se conseguir uma rede de alginato de sódio que não seja solúvel em água é necessário combiná-lo com cátions multivalentes, como por exemplo o cálcio, pois assim obtém-se uma rede reticulada que é insolúvel em água (AHMED *et al.*, 2007; WANG *et al.*, 2014a, 2014b, 2015, 2018).

4.4.2 Alginato de sódio

Na indústria alimentícia, e mais recente na culinária moderna, a esferificação é uma técnica amplamente utilizada, a qual consiste na produção de um revestimento sob a forma de gel, formando assim uma parede ou membrana (FARIAS; NOREÑA, 2019).

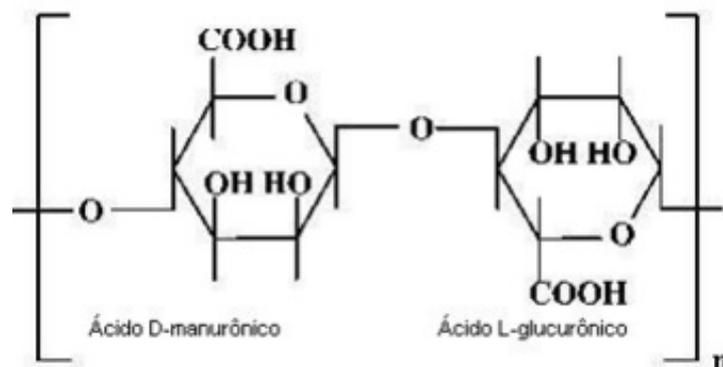
O polissacarídeo alginato de sódio, sob a forma de esferas ou cápsulas, permite a inserção de vários componentes dentro de seu núcleo. Os alginatos formam géis com relativa facilidade, apresentando boas propriedades mecânicas. Pesquisas relacionadas ao alginato de sódio revelam que, devido à sua biocompatibilidade e custo relativamente baixo, este composto se torna viável para aplicações em diferentes áreas, abrangendo desde a área médica até a construção civil. O tratamento da alga marrom com uma solução aquosa alcalina (NaOH) é um dos meios

de extração do alginato para sua produção. Essa extração decorre por conta da adição de cloreto de sódio ao filtrado, para realizar a precipitação ácida, ou então cloreto de cálcio pelo método de precipitação de cálcio (FARIAS; NOREÑA, 2019; LEE; MOONEY, 2012; SCOTT, 1968; TRENSON, 2017).

Assim, o alginato possui crescentes aplicações na indústria de biotecnologia possuindo capacidades únicas que o tornam viável como matriz em sistema de liberação, sendo estas, a formação de ambiente matricial em condições relativamente inertes, processos de encapsulação em temperatura ambiente sem a utilização de solventes orgânicos, grande porosidade do gel, permitindo alta velocidade de liberação de macromoléculas e até mesmo a capacidade de controlar a porosidade do mesmo através de simples revestimentos (VELLOSO, 2008).

O alginato é um polissacarídeo linear composto por resíduos dos ácidos β -D-manurônico e α -L-galurônico em forma de sal de sódio (Figura 4), formados por ligações glicosídicas e com diversas proporções ao longo da cadeia (VELLOSO, 2008).

Figura 4 - Unidade estrutural de repetição (mero) do alginato.



Fonte: VELLOSO (2008, p.11).

O alginato de sódio pode ser produzido em pequenas partículas chegando na escala de milímetros de diâmetro através de 3 técnicas como a atomização, emulsificação e coacervação, entre outras. Nesta pesquisa as esferas de alginato de sódio serão obtidas através da esferificação, técnica que consiste em moldar um líquido através da gelificação reversa, onde gotejando-se dispersões contendo alginato em uma dispersão de íons de cálcio para formação de esferas (FARIAS; NOREÑA, 2019).

5 MATERIAIS E METODOLOGIA

5.1 MATERIAIS

- Alginato de sódio com teor pureza de 90% (Dinâmica): foi utilizado na produção das cápsulas.
- Cloreto de cálcio (Vetec) com grau analítico apresentando teor de pureza de 99,99%: foi utilizado na produção das cápsulas
- Pó de Brita: da região de Poços de Caldas-MG utilizado como agregado miúdo na formulação, foi realizado o estudo granulométrico em cima do pó de brita para estar de acordo com a formulação de Cruz (2017), na qual foram utilizadas peneiras de aberturas entre 0,15mm e 9,5mm (na malha nº4 Mesh).
- Aditivo: foi utilizado o superplastificante de terceira geração, com nome comercial Glenium 51[®] do fabricante Basf S.A., classificado em relação à base química como éter poli carboxílico, com densidade variável de 1,067 a 1,107 g/cm³.
- Água: foi usada a água disponibilizada pela rede de abastecimento da cidade de Poços de Caldas-MG seguindo a norma NBR/159000-09, que a considera adequada para o uso no amassamento.
- Brita: a escolha do agregado graúdo foi embasada segundo pesquisas de Cruz (2017) na qual foi utilizado a brita 1, sendo classificado pela utilização de peneiras de abertura entre 9,5mm e 25mm e, utilizados assim o material com granulometria superior a 4,75 mm e inferior ao tamanho máximo de 19mm (na malha nº4 Mesh).
- Cimento: foi utilizado o cimento do tipo CP II-E 32 comercial do fabricante Votorantim da linha Itaú, composto por calcário, sílica, alumina e a gipsita (sulfato de cálcio). De acordo com o fabricante, este cimento atinge as exigências da norma NBR 11578, respeitando os teores dos componentes do cimento (Tabela 11), as exigências químicas, explicitadas na Tabela 12 e as exigências físicas e mecânicas (Tabela 13).

Tabela 11 – Composições de cimento

Sigla	Classe de Resistência	Componentes (% em massa)			
		Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória Granulada de alto forno	Material Pozolânico	Material Carbonático
CP II-E	25	94-56	6-34	----	0-10
	32				
CP II-Z	25	94-76	-----	6-14	0-10
	32				
CP II-F	25	94-90	-----	----	6-10
	32				

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 11578 (1991).

Tabela 12 – Exigências químicas do cimento

Determinações químicas	Limites (% da massa)		
	CP II-E	CP II-Z	CP II-F
Resíduo Insolúvel (RI)	≤ 2,5	≤ 16,0	≤ 2,5
Perda ao Fogo (PF)		≤ 6,5	
Óxido de Magnésio (MgO)		≤ 6,5	
Trióxido de Enxofre (SO ₃)		≤ 4,0	
Anidrido Carbônico (CO ₂)		≤ 5,0	

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 11578 (1991).

Tabela 13 – Exigências físicas e mecânicas

Características e Propriedades	Unidade	Limite de Classe		
		25	32	40
Resíduo na Peneira	%	≤ 12,0	≤ 12,0	≤ 10,0
Finura 75µm				
Área Específica	m ² /kg	≥ 240	≥ 260	≥ 280
Tempo de Início de Pega	h	≥ 1	≥ 1	≥ 1
Expansibilidade a quente	mm	≤ 5	≤ 5	≤ 5
Resistência 3 Dias de Idade	MPa	≥ 8,0	≥ 10,0	≥ 15,0
à 7 Dias de Idade	MPa	≥ 15,0	≥ 20,0	≥ 25,0
compressão 28 Dias de Idade	MPa	≥ 25,0	≥ 32,0	≥ 40,0

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 11578 (1991).

5.2 METODOLOGIA

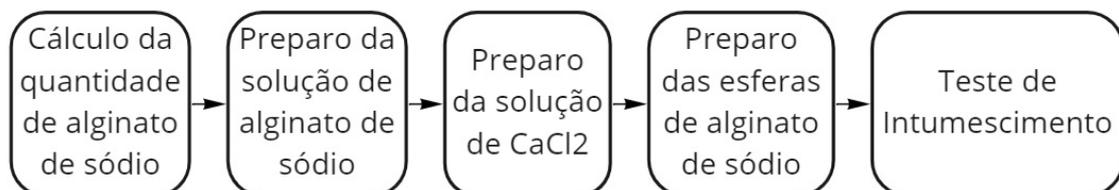
Esta pesquisa foi dividida em duas etapas para melhor compreensão, denominadas Etapa 1 e Etapa 2.

Na Etapa 1 foram obtidas e caracterizadas as cápsulas de alginato de sódio. A quantidade das cápsulas produzidas foi determinada a partir do cálculo da quantidade dos corpos de provas (e suas respectivas massas) a serem produzidos e ensaiados. A Etapa 2 consistiu na produção e avaliação de concretos produzidos a partir da variação do coeficiente de empacotamento (q) e do teor de cápsulas de alginato adicionadas à formulação. A partir da análise dos resultados, foi selecionada a formulação com adição de cápsulas de alginato de sódio e coeficiente de empacotamento que propiciaram melhores resultados reológicos, físicos e mecânicos nas peças produzidas.

5.2.1 Etapa 1

Nessa etapa da pesquisa foram produzidas as cápsulas de alginato de sódio para utilização no concreto avaliando suas características quanto ao intumescimento, processo no qual se define a quantidade de água absorvida pela cápsula. O fluxograma representado na Figura 5 descreve as etapas processo.

Figura 5 – Fluxograma da síntese das cápsulas de alginato de sódio



Fonte: Próprio autor.

5.2.1.1 Cálculo da quantidade de alginato de sódio

A partir da quantidade de corpos de prova a serem utilizados nos ensaios, foram desenvolvidos os cálculos para determinar a massa de cápsulas de alginato de sódio necessárias. Partiu-se de uma formulação desenvolvida pelo grupo de pesquisa,

obtida previamente por Cruz (2019), utilizando-se $q = 0,37$, como indicado na Tabela 14. Cabe salientar que a formulação utilizada a partir dos resultados obtidos por Cruz (2019) levou em consideração a coesão dos materiais constituintes, sem segregação no ensaio de abatimento, com uma boa conformação do material sem a necessidade de vibração. Assim, essa formulação apresentou uma proporção entre agregados adequada, gerando um concreto com bons valores de densidade aparente (entre 2000 kg/m³ e 2800 kg/m³) e resistência mecânica (acima de 35 MPa) segundo a norma ABNT NBR 8953:2015.

Tabela 14 – Formulação otimizada de concreto desenvolvida por Cruz, utilizando-se $q = 0,37$ (2019)

Formulação	Composição (Kg)
Cimento	27,69
Pó de Brita	35,11
Brita 1	40,38
Defloculante	0,11
Água	10,95
Total	114,26

Fonte: Adaptado de CRUZ (2019).

Para facilitar os cálculos da quantidade de cápsulas a serem utilizadas, a Tabela 14 foi recalculada para 1 kg de cimento (Tabela 15) e também o peso dos corpos de prova a serem produzidos.

Tabela 15 – Relação em massa, consumo e quantidade (em kg) de materiais necessários para a formulação dos corpos de prova.

Formulação baseada em Cruz (2019), utilizando-se $q=0,37$			
Material	Relação em Massa (kg)	Consumo (kg/m³)	Corpo de Prova (kg)
Cimento	1,0	316,01	23,81
Pó de Brita	1,27	400,63	30,19
Brita 1	1,46	460,77	34,72
Defloculante	0,004	1,27	0,10
Água	0,40	124,97	9,42

Fonte: Próprio autor.

Utilizando das massas específicas de cada material a ser usado (Tabela 16) obteve-se os volumes dos corpos de prova usados - 0,05m de raio e 0,2m de altura, totalizando 0,00157m³ por unidade.

Tabela 16 – Massa específica (kg/m³) utilizada na formulação de Cruz (2019), para $q = 0,37$.

Material	Massa Específica (kg/m³)
Cimento	3140
Pó de Brita	2570
Brita 1	1300
Defloculante	1070
Água	1000

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6474 (1984)

Para a segunda etapa serão utilizados 48 corpos de prova, totalizando a quantidade de 0,075m³ ou 75,36l de volume total. Embasado nessas informações, chega-se ao cálculo de Alginato de sódio a ser utilizado na segunda etapa (Tabela 17).

Tabela 17 – Cálculo do volume total dos corpos de prova e da massa total de alginato de sódio a ser usado na segunda etapa

Corpos de Prova Cilíndricos			
% de Alginato de sódio	Nº de corpos de prova	Volume dos corpos de prova	Alginato de sódio (kg)
1	24	0,038	0,119
1,5	24	0,038	0,179
Total de corpos de prova	48	0,075	0,298

Fonte: Próprio autor.

5.2.1.2 Preparo da solução do alginato de sódio

Ensaio prévios obtidos por Cruz (2019), indicaram que a melhor concentração da solução de alginato de sódio é de 2%($m_{\text{alginato}}/V_{\text{solução}}$), por apresentar viscosidade adequada para o processo de produção de cápsulas e devido ao custo/ benefício.

Desse modo, foram preparadas as soluções de alginato de sódio sob agitação constante até completa homogeneização.

Para o primeiro processo de produção, adicionou-se a um béquer, 100 ml de água destilada, mantida sob agitação vigorosa e constante por meio de agitador magnético. Em seguida, o alginato de sódio foi adicionado, aos poucos, para que não houvesse formação de grumos de gelatina. Manteve-se a agitação por cerca de 1h até solubilização por completo (Figura 6). O processo foi feito até atingir a quantidade a ser usada para a produção total das cápsulas para a pesquisa.

Figura 6 – Preparo de solução de alginato de sódio



Fonte: Próprio autor.

Legenda: a) Massa de alginato para 100 ml de solução
b) Agitação do alginato em água destilada

5.2.1.3 Preparo da solução de cloreto de cálcio

Segundos estudos de Cruz (2019), a melhor concentração para o preparo desta solução foi de 5% ($m_{CaCl}/V_{solução}$), por apresentar uma boa estabilidade e principalmente um bom custo-benefício.

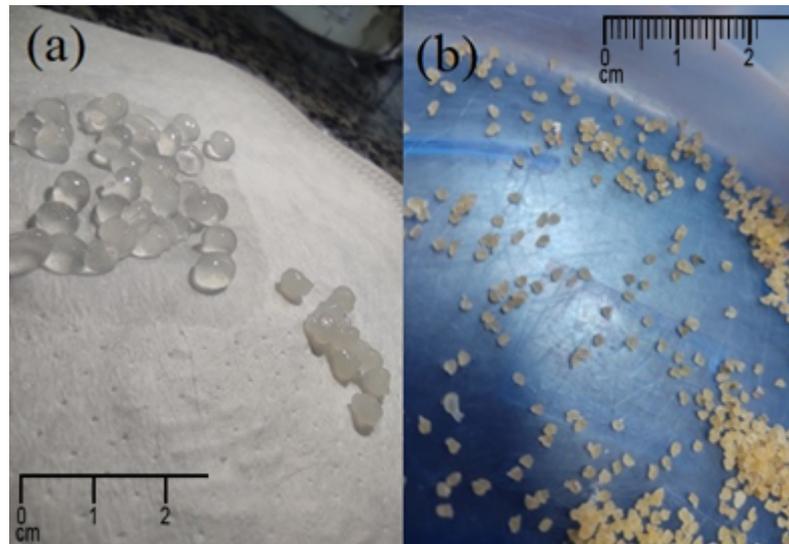
Para o preparo da solução, 500 ml de água destilada foi adicionada a um béquer sob agitação vigorosa com auxílio de um agitador magnético. O cloreto de cálcio (25 g), já pesado, foi adicionado ao béquer, mantendo-se agitação até completa solubilização e homogeneização (cerca de 10 minutos).

5.2.1.4 Preparo das esferas de alginato de sódio

Com uma bomba peristáltica em sua vazão ajustada entre 30 e 40 gotas por minuto, a solução de alginato foi gotejada na solução de CaCl_2 , em um *shaker* com agitação em 60 rpm. Em seguida, com o auxílio de um papel toalha, as esferas recém preparadas foram secas e colocadas em recipiente específico coberto com TNT (tecido não tecido). O material foi então seco na estufa com circulação de ar e temperatura de 30°C por 48 h.

A Figura 7 ilustra: a) uma amostra de esferas de alginato recém gotejadas na solução de cloreto de cálcio; em b) as esferas, já pós processo de secagem. Pode-se observar que a figura a) está inchada, visto que possui uma quantidade maior de água retida em seu interior, em comparação com a figura b) na qual, já perdeu esse líquido, ficando assim menor, mais amarelada, menos gelatinosa e mais rígida.

Figura 7 – Cápsulas de alginato de sódio



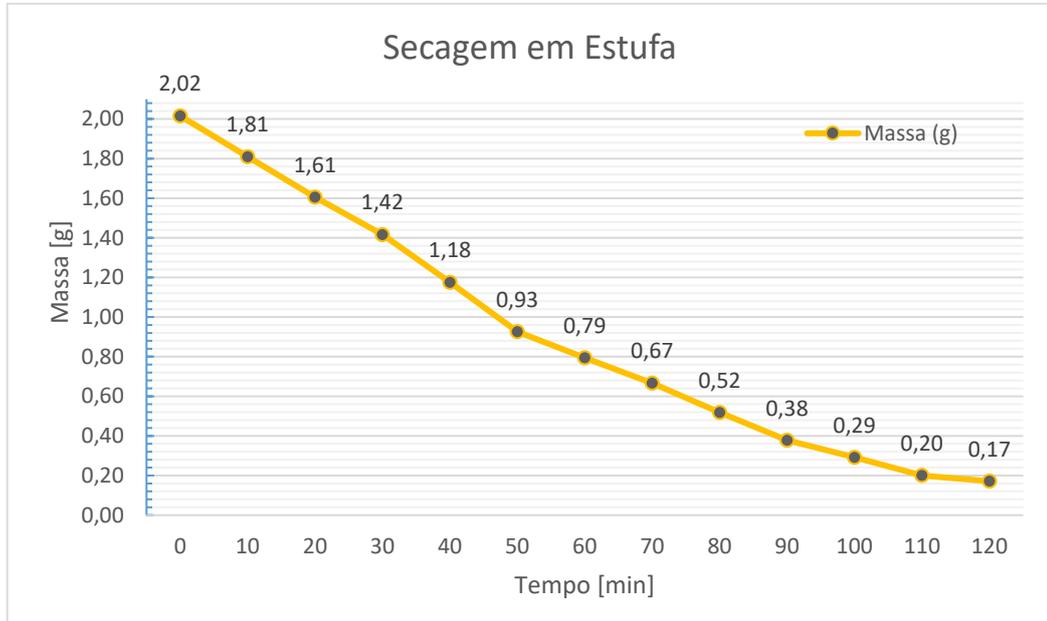
Fonte: Próprio autor.

Legenda: a) Esferas recém gotejadas de alginato
b) Esferas secas

Para uma melhor compreensão sobre o processo de secagem das cápsulas, foi realizado um estudo em estufa com uma amostra no período de 2 h e 30 min, na temperatura de 60°C . O Gráfico 1 mostra a evolução da secagem das esferas de alginato dentro de uma estufa, sendo pesados de 10 em 10 min. Observa-se que nos primeiros 50 minutos a evaporação é maior, ocorrendo uma grande diminuição de sua

massa, já nos períodos seguintes a curva de secagem se torna mais estável, havendo uma pequena diferenciação da massa das esferas.

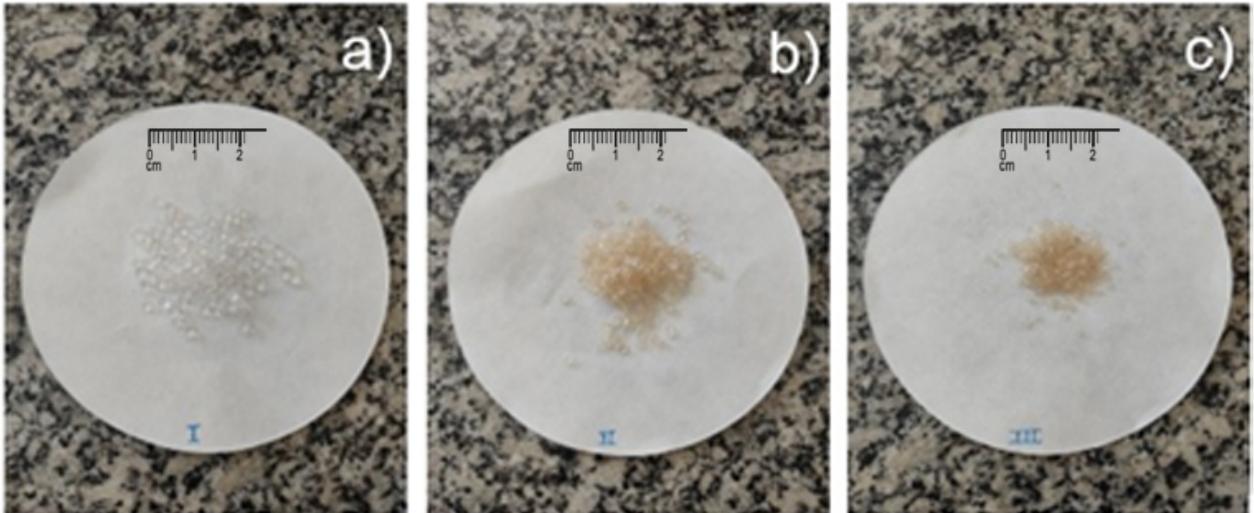
Gráfico 1 – Comportamento de secagem das cápsulas em estufa



Fonte: Próprio autor.

A Figura 8 mostra a mudança de tamanho e coloração das esferas de alginato no processo de secagem na estufa após 40, 80 e 120 min. Foi possível notar a diminuição de volume, visto que ocorre perda de água com o passar do tempo. Constatou-se ainda, através de toque manual, um aumento na rigidez da cápsula.

Figura 8 – Esferas de alginato de sódio com diferença de tempo



Fonte: Próprio autor.

Legenda: a) 40min

b) 80min

c) 120min

5.2.1.5 Testes de intumescimento

Foram realizados três testes (metodologias) distintos para avaliação do intumescimento do alginato de sódio: o primeiro teste foi baseado em trabalho desenvolvido pela Dra. Eliana Cristina da Silva Rigo na Universidade de São Paulo - *Campus* de Pirassununga - SP. O segundo e terceiro teste foram realizados de acordo com SNOECK (2018), que descreve duas metodologias distintas para caracterização das cápsulas em materiais de base cimentícia, gerando uma compreensão maior de como as cápsulas reagem quando misturadas à formulação do concreto em seu estado fresco.

Na primeira metodologia (denominado teste simples) foi acrescentado 0,2 g de esferas secas de alginato de sódio em um béquer com 30 g de água destilada. Em seguida, o béquer foi tampado com um filme plástico de PVC de forma que houvesse uma barreira para evitar a evaporação da água. As esferas ficaram imersas em água destilada durante 24 horas. Após este período de tempo, saturou-se um filtro de papel com água destilada, filtrando-se a amostra, de modo que a água escorresse em um recipiente com massa conhecida. O teste foi realizado em triplicata.

Assim, a capacidade de inchaço (intumescimento) do alginato de sódio (I) foi calculada a partir da equação (11):

$$I(\%) = \frac{m_0 - m_f}{m_{gel}} \cdot 100\% \quad (11)$$

Em que:

m_0 é a massa de água que foi adicionada ao recipiente

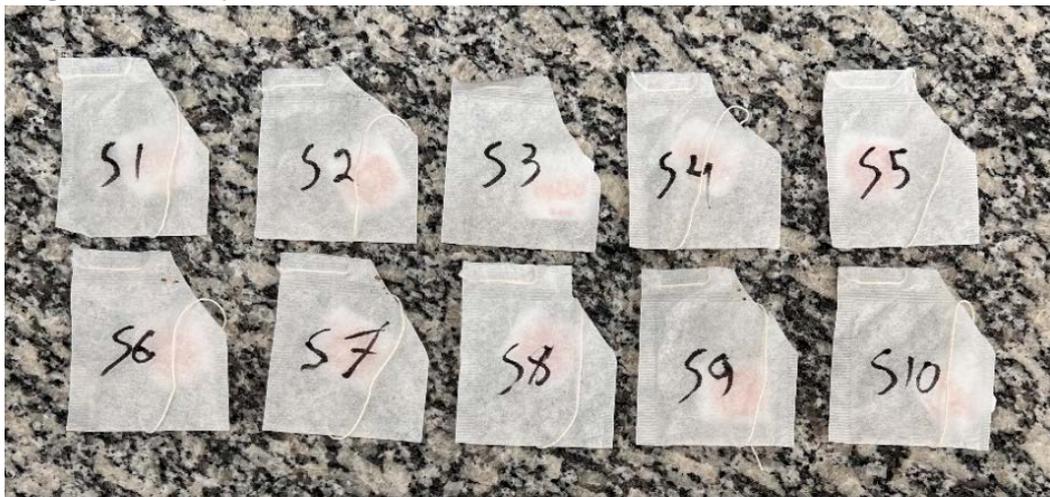
m_f é a massa de água pesada após a filtração

m_{gel} é a massa de esferas de alginato adicionadas ao recipiente

A segunda metodologia - desenvolvida por SNOECK (2018) - foi aqui nomeada método do “saquinho de chá” (do inglês *tea-bag method*).

Inicialmente foram numerados e pesados 10 saquinhos de chá vazios (sem o chá) em balança semi analítica, determinando-se as massas (m_a), conforme Figura 9.

Figura 9 – Saquinhos de chá secos



Fonte: Próprio autor.

Os saquinhos foram então imersos em água destilada e ali permaneceram por aproximadamente 10s. A seguir, foram colocados em cima de um pano seco, e rapidamente foram secos com outro pano por cima e novamente pesados para a obtenção da massa m_b . A Tabela 18 mostra os resultados obtidos para os sachês seco e úmido a partir das pesagens.

Tabela 18 – Massa dos saquinhos de chá a seco e úmido.

Sachê	Massa seca - m_a (kg)	Massa úmida - m_b (kg)
S1	0,1876	0,4908
S2	0,1891	0,4869
S3	0,1847	0,4863
S4	0,1855	0,4915
S5	0,1881	0,4935
S6	0,1920	0,4977
S7	0,1884	0,4897
S8	0,1918	0,4918
S9	0,1877	0,4937
S10	0,1903	0,4903

Fonte: Próprio autor.

As equações (12) a (14) indicam a fórmula utilizada e o cálculo efetuado para a obtenção do valor de líquido absorvido (pela diferença entre m_b e m_a).

$$m_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (m_{bi} - m_{ai}) \quad (12)$$

$$m_0 = \frac{1}{10} * 3,027 \quad (13)$$

$$m_0 = 0,3027g \quad (14)$$

Após a determinação do valor médio do líquido absorvido (0,3027 g), os saquinhos foram novamente secos (até o ponto em que suas massas se tornaram constantes).

De acordo com Snoeck (2018), deve-se então escolher aleatoriamente 1 dos 10 saquinhos e repesá-lo vazio (m_1). A seguir, é adicionado ao saquinho 0,2 g de esferas de alginato de sódio, pesando-se novamente o sistema (m_2). O saquinho contendo o alginato de sódio é então pendurado em um béquer contendo 200 ml de água destilada, de modo a ficar imerso (Figura 10). O béquer deve ser coberto com filme de PVC de modo a não haver evaporação do líquido. O tempo de imersão do saquinho na água destilada é de 1min, sendo então retirado, seco rapidamente em pano e pesado (m_3). Após pesagem, o saquinho contendo as esferas é novamente imerso,

seco, repesado e assim sucessivamente para os tempos: 5, 10, 30, 60, 180 e 1440 min. O procedimento anteriormente descrito foi realizado em triplicata.

Figura 10 – Sachês contendo as esferas de alginato de sódio pendurados nos béqueres



Fonte: Próprio autor.

As Tabelas 19 e 20 indicam, respectivamente, os valores obtidos para m1 e m2 (triplicata) e para m3, respectivamente.

Tabela 19 – Massa dos sachês sem e com esferas de alginato de sódio

Amostra	Sachê de Chá [g]	Sachê com esfera
1	0,193	0,403
2	0,192	0,402
3	0,193	0,403

Fonte: Próprio autor

Tabela 20 – Massa m3 nos tempos de pesagem.

Tempo (min)	m3 (g)						
	1	5	10	30	60	180	1440
Amostra 1	1,137	1,148	1,249	1,483	1,521	1,623	1,672
Amostra 2	1,242	1,252	1,268	1,470	1,531	1,634	1,685
Amostra 3	1,198	1,205	1,246	1,473	1,535	1,632	1,687

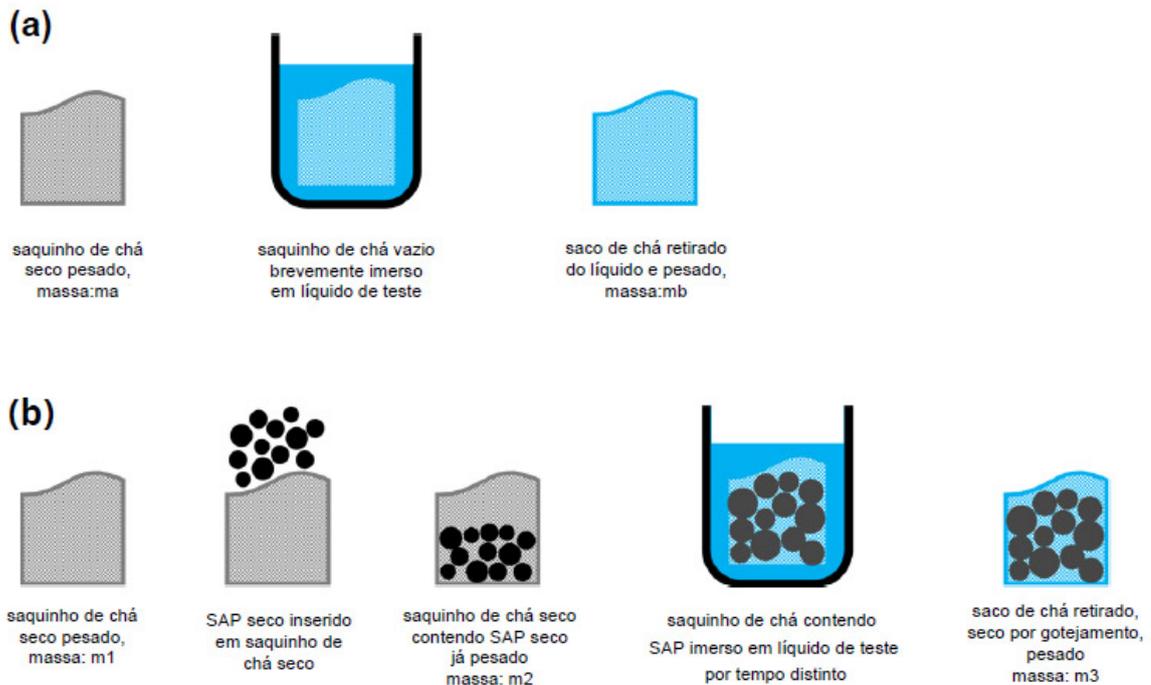
Fonte: Próprio autor

A equação (15) mostra como é realizado o cálculo para determinação da absorção de líquido das esferas de alginato (SC).

$$SC = \frac{m_3 - m_2 - m_0}{m_2 - m_1} \quad (15)$$

A Figura 11 ilustra, passo a passo, a metodologia envolvida para a obtenção do grau de absorção de líquido. Para efeito comparativo, o resultado obtido (SC) pelo método “saquinho de chá” será multiplicado por 100, de modo a se obter o percentual de intumescimento.

Figura 11 - Método do saquinho de chá



Fonte: Adaptado de Snoeck (2018, p. 5).

Legenda: a) Avaliação de molhado carga morta, a ser calculada de pelo menos dez indivíduos saquinhos de chá.

b) Avaliação de Sorção de SAP

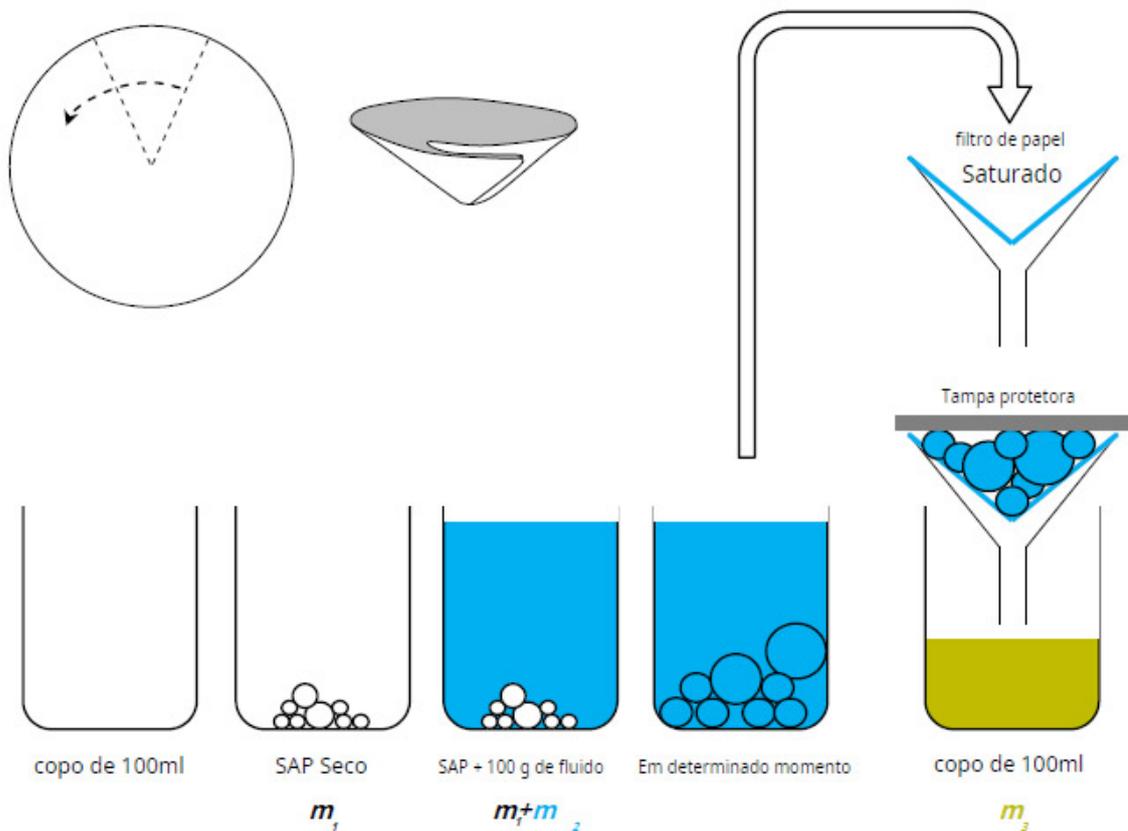
A terceira metodologia (também desenvolvida por Snoeck (2018)) foi aqui nomeada método de filtração. Pesou-se 0,2g de esferas de alginato de sódio secas (m_1) e também um béquer com 100 ml de água destilada (m_2). A seguir, as esferas foram inseridas no béquer contendo água destilada e o béquer foi vedado com filme

de PVC para evitar evaporação do líquido. Esse procedimento foi realizado para 7 sistemas idênticos. As amostras de alginato de sódio foram deixadas em água por diferentes tempos (1,5,10, 30, 60, 180 e 1440min).

Após os tempos determinados de contato com a água, as soluções foram filtradas, tomando-se a precaução de saturar o papel filtro previamente e dobrando-o.

A Figura 12 ilustra, passo a passo, a metodologia envolvida para a obtenção do grau de absorção de líquido.

Figura 12 – Esquema ilustrativo para ensaio de intumescimento (método de filtração)



Fonte: Adaptado de Snoeck (2018, p.6).

Durante a filtração, deve-se colocar uma tampa para que não haja evaporação. O tempo final de filtração é determinado quando as gotas caírem 1 min após a outra. A quantidade do fluido filtrado e pesado refere-se a m_3 . Após determinação de m_3 , todo o conjunto da amostra é descartado e então repete-se o procedimento para as amostras seguintes (com permanência variando de 5 a 1440 min).

O resultado de absorção de líquido das esferas de alginato é obtido por meio da equação (16):

$$SC = \frac{m_2 - m_3}{m_1} \quad (16)$$

Todo esse procedimento foi realizado em triplicata, como pode ser visto nas Figuras 13 e 14.

Figura 13 – Esferas pesadas



Fonte: Próprio autor

Figura 14 – Esferas nos béqueres com água



Fonte: Próprio autor

Para efeito comparativo, o resultado obtido (SC) pela técnica de filtração (Figura 15) será multiplicado por 100, de modo a se obter o percentual de intumescimento.

Figura 15 – Esquema de filtração



Fonte: Próprio autor

5.2.2 Etapa 2

5.2.2.1 Secagem e pesagem das matérias primas utilizadas na formulação dos concretos

A partir da metodologia (formulação e matérias primas) desenvolvida por Cruz (2019), todos os materiais componentes da formulação foram previamente secos em um forno estufa com circulação e renovação de ar, modelo SL-102 -Solab, por um período de 24 h, para posterior separação granulométrica.

Ao término da secagem, os agregados (grãos: brita 1 e miúdos: pó de brita) foram passados pelas malhas mesh (mantendo a granulometria para agregados miúdos entre 0,15 mm e 9,5 mm e para agregados grãos de 9,5 mm a 25 mm) até chegar na granulometria adequada como ilustra a Figura 16, onde se utilizou um peneirador granulométrico mecânico suspenso da marca Solotest. Realizada a separação granulométrica, foi feita a pesagem dos materiais de acordo com as 4 formulações de concreto a serem investigadas na pesquisa.

Figura 16 – Peneirador Granulométrico



Fonte: Próprio Autor.

5.2.2.2 *Slump test*

O ensaio denominado *Slump Test* (ABNT NBR NM 67 (1998)) foi realizado para determinar a consistência do concreto fresco através da medida do seu assentamento em laboratório ou obra. A classificação da consistência do concreto foi feita a partir da Tabela 21.

Tabela 21 - Classificação da consistência do concreto.

Consistência	Abatimento (cm)
Seca	0 - 2
Firme	2 - 5
Média	5 - 12
Mole	12 - 18
Fluída	18 - 25

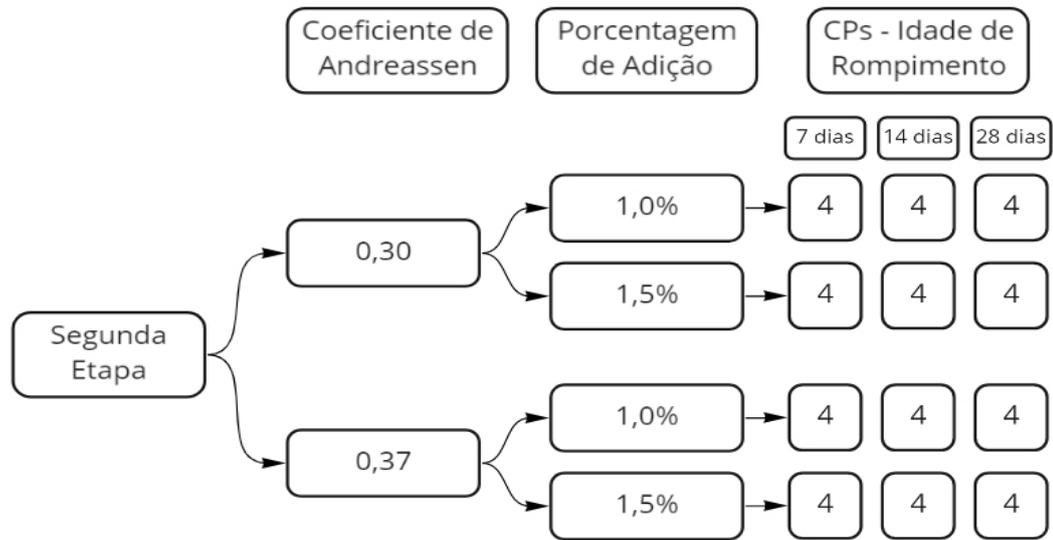
Fonte: Adaptado de ABNT NBR NM 67 (1998).

Ensaio de consistência foram realizados por meio de abatimento do tronco de cone (norma ABNT NBR NM 67 (1998)) para as composições investigadas; ou seja, variando-se o coeficiente de empacotamento de Andreassen em $q=0,30$ e $q=0,37$ e os teores de alginato de sódio em 1 e 1,5% em peso em relação à massa de cimento. As massas utilizadas neste ensaio foram usadas posteriormente na conformação dos corpos de prova.

5.2.2.3 Produção e caracterização dos corpos de prova

Foram produzidos 48 corpos de prova, sendo 24 corpos de prova formulados utilizando-se $q = 0,30$. Destes, 12 corpos tiveram a adição de 1% em peso de alginato de sódio e os 12 restantes, 1,5% em peso. A produção dos 24 corpos de prova restantes foi formulada com $q = 0,37$, divididos em duas porcentagens de adição de cápsulas também (sendo 1,0% e 1,5%), como demonstrado pelo fluxograma (Figura 17). A escolha dos valores de q e do teor de alginato de sódio foi feita com base em estudos prévios.

Figura 17 - Fluxograma da execução da Etapa 2



Fonte: Próprio autor.

A moldagem e cura dos concretos foi realizada em concordância à norma NBR 5738. Para o processo de moldagem dos corpos de prova que foram ensaiados em compressão, foi utilizado um molde cilíndrico de 10 x 20 (cm), “untado” com óleo vegetal para facilitar a desforma. O preenchimento foi feito em duas camadas, sendo cada camada adensada com 12 golpes. A última camada foi moldada com excesso de concreto, de forma que, ao ser adensada, complete todo o volume do molde, para ter feito o rasamento do molde, eliminando todo o excesso de concreto como demonstrado na Figura 18.

Figura 18 – Corpos de prova moldados em molde cilíndrico



Fonte: Próprio Autor.

Transcorrida 24 horas de moldagem, foi iniciada a cura, sendo os corpos de prova desmoldados (como indicado na Figura 19) e submersos em tanque com água saturada com hidróxido de cálcio visando a contínua hidratação do cimento, com o intuito de evitar a perda prematura da água a uma temperatura em torno de 21°C, assim evitando o surgimento de futuras fissuras, como indicado na Figura 20.

Figura 19 – Corpos de prova desmoldados



Fonte: Próprio autor.

Figura 20 - Corpos de prova em imersão



Fonte: Próprio autor.

5.2.2.4 Determinação das propriedades físicas

Após a idade de 28 dias, foram determinados, de acordo com a norma ABNT NBR 9778 (2005), a absorção da água, o índice de vazios e a massa específica a seco e real dos corpos de prova. Os resultados obtidos foram analisados levando-se em consideração os diferentes valores de q e dos teores de alginato de sódio investigados.

5.2.2.5 Ensaio mecânicos de compressão

Medidas de resistência mecânica à compressão foram realizadas em consonância às normas ABNT NBR 5739 (2007), a qual estabelece o método de preparo e de ensaio de compressão para os corpos de prova cilíndricos de concreto e ABNT NBR 5738 (2015), que determina as idades em que os corpos deverão ser ensaiados.

Para os ensaios mecânicos de compressão, existe a necessidade de um processo de retificação, conforme ABNT NBR 5738 (2015) “Moldagem e cura dos corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto”, o qual foi feito em uma máquina de corte com atuador pneumático Bel Air (Figura 21) , tendo sua pressão máxima de 1,03 MPa, em velocidade de 400 rpm, com resfriamento do disco de corte e da lâmina com água.

Após o processo de retificação (Figura 22), os corpos de prova encontram-se com ambas as faces paralelas lisas, evitando se concentrações de tensões locais durante o ensaio.

Figura 21 - Atuador pneumático Bel Air



Fonte: Próprio autor.

Figura 22 – Corpos de Prova antes (esquerda) e após retificação (direita)



Fonte: Próprio Autor.

Para o ensaio de compressão foi utilizada uma prensa de concreto eletro hidráulica digital marca A.M.C (equipamento para ensaios mecânicos destrutivos)

modelo 10014, capacidade máxima de 980,6 kN e controle manual de velocidade de aplicação de carga, com a precisão de 0,098kN (Figura 23). Os ensaios foram realizados na empresa Polimix Concreto Ltda, localizada na cidade de Poços de Caldas-MG.

Figura 23 – Prensa eletro hidráulica A.M.C



Fonte: Próprio Autor.

Os corpos de prova foram rompidos (4 para cada formulação e idade) em suas respectivas datas: 7, 14 e 28 dias contados após sua moldagem. Neste ensaio o objetivo era identificar os valores de segurança para a resistência mecânica máxima em cada idade levando em conta a formulação com a variação de q na fórmula de Andreassen e a porcentagem de adição de capsulas de alginato de sódio no concreto.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Um dos maiores problemas na construção civil no que diz respeito à estrutura é lidar com agentes do meio externo que, ao entrar em contato com as armaduras internas do concreto, provoca a perda de suas propriedades mecânicas. Um dos principais fatores que permitem essa infiltração é a geração de fissuras. Portanto, ao final das pesquisas e do trabalho como um todo, buscou-se uma melhor formulação de concreto que permita um melhor empacotamento dos elementos que o compõe, otimizando suas propriedades e concomitantemente a presença de cápsulas de alginato de sódio inseridas na formulação.

Os resultados são aqui divididos em duas Etapas, em consonância ao item materiais e métodos anteriormente descrito.

6.1 ETAPA 1

6.1.1 Testes de intumescimento

As Tabelas 22, 23 e 24 indicam os resultados obtidos para o teste de intumescimento utilizando, respectivamente, os métodos denominados teste simples, de saquinhos de chá e de filtração.

Tabela 22 - Medidas de intumescimento obtidas pelo teste simples.

Amostra	I (%)
1	204,4
2	201,9
3	203,6
Média	203,3
Desvio Padrão	1,3

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 23 – Resultados de intumescimento obtidos pelo método de “saquinhos de chá” em função do tempo

SC							
Tempo (min)	1	5	10	30	60	180	1440
Amostra 1 (g)	3,97	4,03	4,51	5,62	5,80	6,29	6,52
Amostra 2 (g)	4,48	4,53	4,59	5,56	5,86	6,35	6,59
Amostra 3 (g)	4,26	4,29	4,49	5,56	5,86	6,32	6,58
Média	4,24	4,28	4,53	5,58	5,84	6,32	6,56
Desvio padrão	0,25	0,25	0,06	0,03	0,03	0,03	0,04
Média (%)	423,57	428,05	453,01	558,28	583,88	631,71	656,44

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 24 – Resultados de intumescimento obtidos pelo método de “filtração” em função do tempo

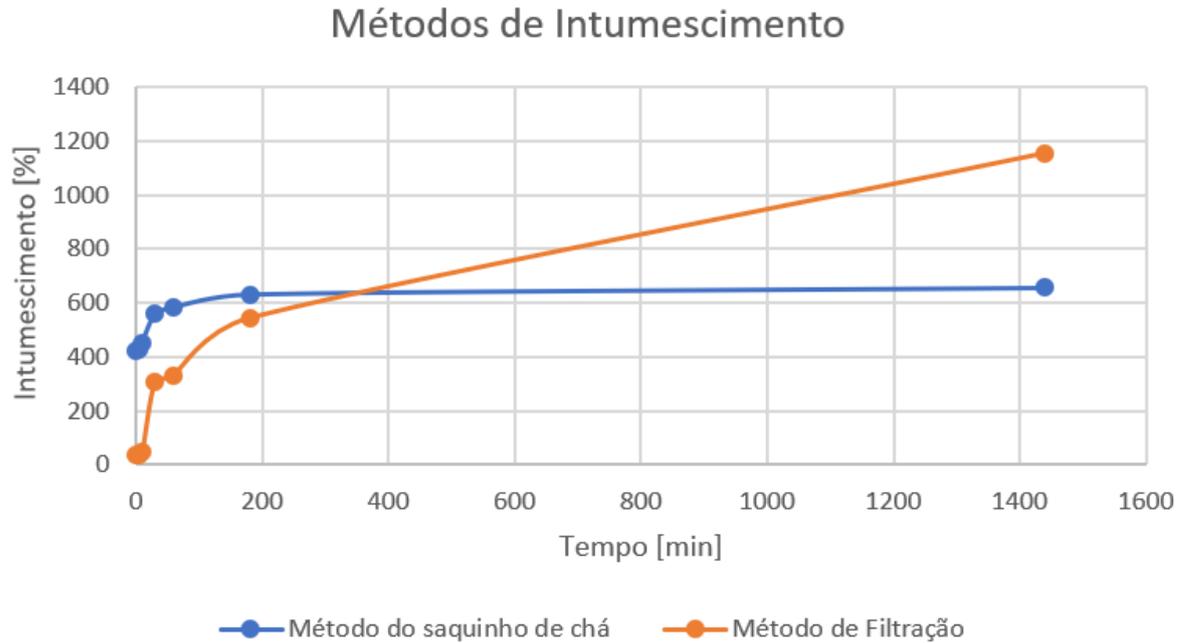
SC							
Tempo (min)	1	5	10	30	60	180	1440
Amostra 1 (ml)	0,31	0,36	0,39	3,19	4,09	5,45	10,28
Amostra 2 (ml)	0,47	0,54	0,61	2,87	3,79	5,56	14,41
Amostra 3 (ml)	0,30	0,38	0,45	2,07	3,09	5,33	9,89
Média	0,36	0,39	0,48	3,05	3,32	5,44	11,53
Desvio padrão	0,10	0,14	0,12	0,17	1,09	0,12	2,50
Média (%)	36,03	39,27	48,23	305,43	331,67	544,43	1153,03

Fonte: Próprio Autor.

Ao fazer a análise de intumescimento em respeito ao método do saquinho de chá observa-se uma constante após o período de tempo de 180 minutos, onde a curva exponencial atinge seu limiar para uma reta de crescimento como demonstrado no gráfico 2. O mesmo ocorre quando se observa o teste de intumescimento do método de filtração, essa constante aparece após 180 minutos; assim a diferença fica por conta da elevada mudança de intumescimento, quando ela está dentro de um saquinho de chá, uma vez que o formato do saquinho oferece uma certa resistência em relação ao seu crescimento.

Por conta da barreira física que existe neste método, ela cresce menos quando comparado ao método de filtração, no qual a cápsula está solta dentro do líquido.

Gráfico 2 – Médias de Intumescimento das cápsulas em função do tempo



Fonte: Próprio Autor

Estudos comprovam que quando a cápsula atinge um intumescimento muito elevado, seu material dissolve com maior facilidade, não sendo interessante para utilização em meios cimentícios por conta da mistura de agregados graúdos e miúdos que podem romper a cápsula com maior facilidade, assim como o a mistura alcalina pode influenciar no interior da mesma. Ao ser submetido a ensaios de intumescimento alguns materiais (como os géis de alginato ou quitosana) possuem uma menor resistência aparente, demonstrando uma fragilidade ao chegar em 10 minutos, pois é a partir deste tempo que ela começa a se dissolver, enquanto que a cápsula de alginato de sódio suporta um maior grau de intumescimento sem se dissolver no ensaio em triplicata de intumescimento (REIS, 2019).

6.2 ETAPA 2

6.2.1 *Slump test*

A Tabela 25 mostra os resultados do ensaio *Slump test* para as composições investigadas variando-se q (coeficiente de empacotamento de Andreassen) em 0,30 e 0,37 e o teor de alginato de sódio em 1 e 1,5% em relação à massa de cimento.

Tabela 25 - Valores de abatimento (*slump test*) das composições investigadas

Composição	Abatimento
$q=0,30$; alginato de sódio:1%	24,00
$q=0,30$; alginato de sódio:1,5%	23,70
$q=0,37$; alginato de sódio:1%	20,00
$q=0,37$; alginato de sódio:1,5%	21,00

Fonte: Próprio Autor.

Todas as formulações investigadas obtiveram valores de abatimento entre 18 e 25 cm, atingindo uma consistência fluida, de acordo com a norma NBR NM 67 (1998), como mostra a Figura 24; indicando que todas as formulações investigadas, em termos de fluidez, são bastante adequadas para a moldagem dos corpos de prova. Ainda, observa-se que a presença de alginato de sódio não interfere nos bons resultados de consistência obtidos.

Figura 24 – Ensaio de consistência (*slump test*)

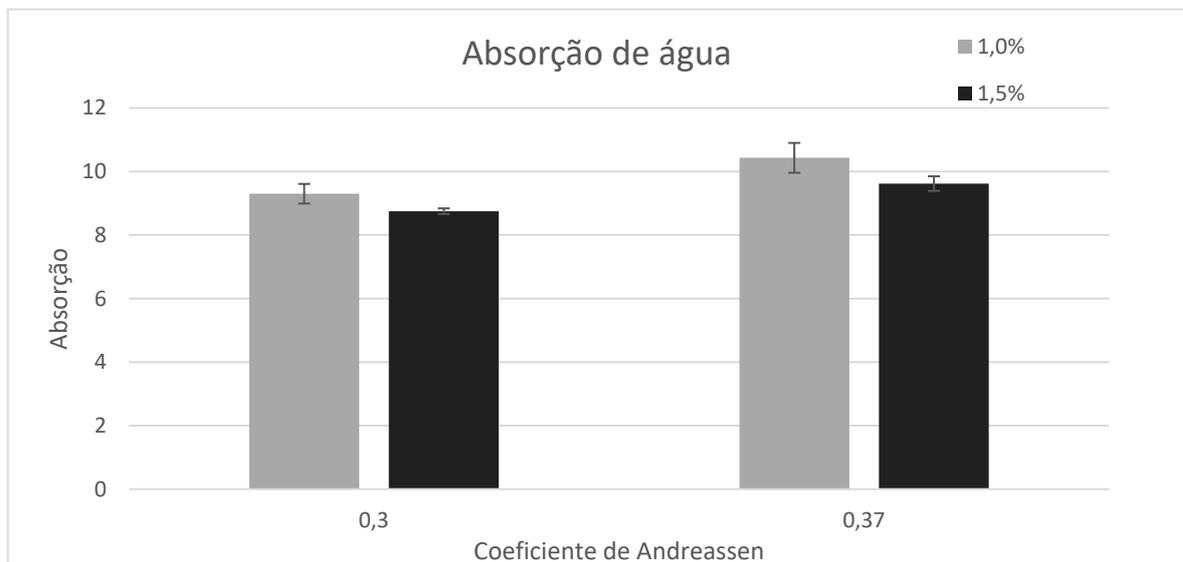
Fonte: Próprio Autor.

Legenda: a) $q = 0,30$ e teor de alginato de sódio igual a 1%;
 b) $q = 0,30$ e teor de alginato de sódio igual a 1,5%;
 c) $q = 0,37$ e teor de alginato de sódio igual a 1%;
 d) $q = 0,37$ e teor de alginato de sódio igual a 1,5%;

6.2.2 Determinação das propriedades físicas

O Gráfico 3 mostra os valores de absorção de água (média) para as diferentes formulações investigadas. Observa-se que a formulação utilizando o coeficiente de Andreassen igual a 0,37 propiciou uma absorção de água mais elevada e que amostras contendo maiores adições de cápsula de alginato de sódio apresentaram menores índices de absorção para ambos os coeficientes. Os resultados mostram ainda que as amostras apresentaram boa conformação, uma vez que o desvio das medidas obtidas é pequeno, indicativo de boa homogeneidade das peças.

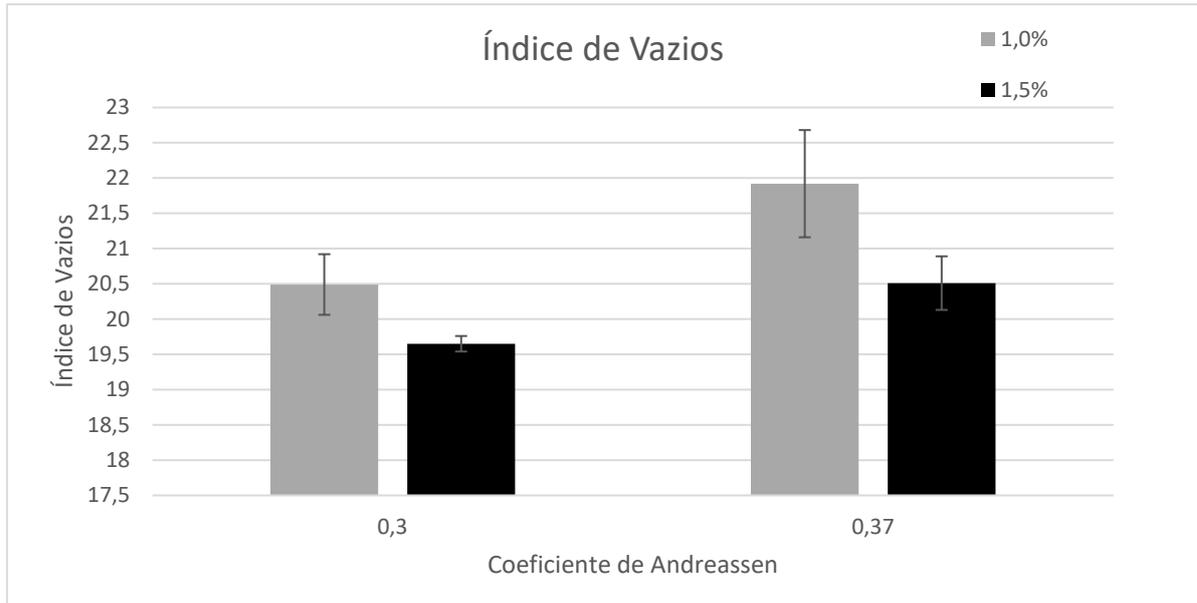
Gráfico 3 – Absorção de água (AA) médio obtido para as formulações investigadas



Fonte: Próprio Autor.

A maior utilização de agregados graúdos para a formulação de Andreassen com $q=0,37$, pode ter gerado maior número de vazios (espaços não preenchidos na massa por empacotamento), trazendo como consequência níveis maiores de absorção de água em relação à formulação onde $q=0,30$. A presença das cápsulas de alginato de sódio pode contribuir para a ocupação parcial dos pequenos vazios deixados em ambas as formulações, trazendo uma queda nos valores de absorção. Esses resultados são corroborados pelo comportamento observado no índice de vazios (Gráfico 4).

Gráfico 4 – Índice de vazios médio obtido para as formulações investigadas



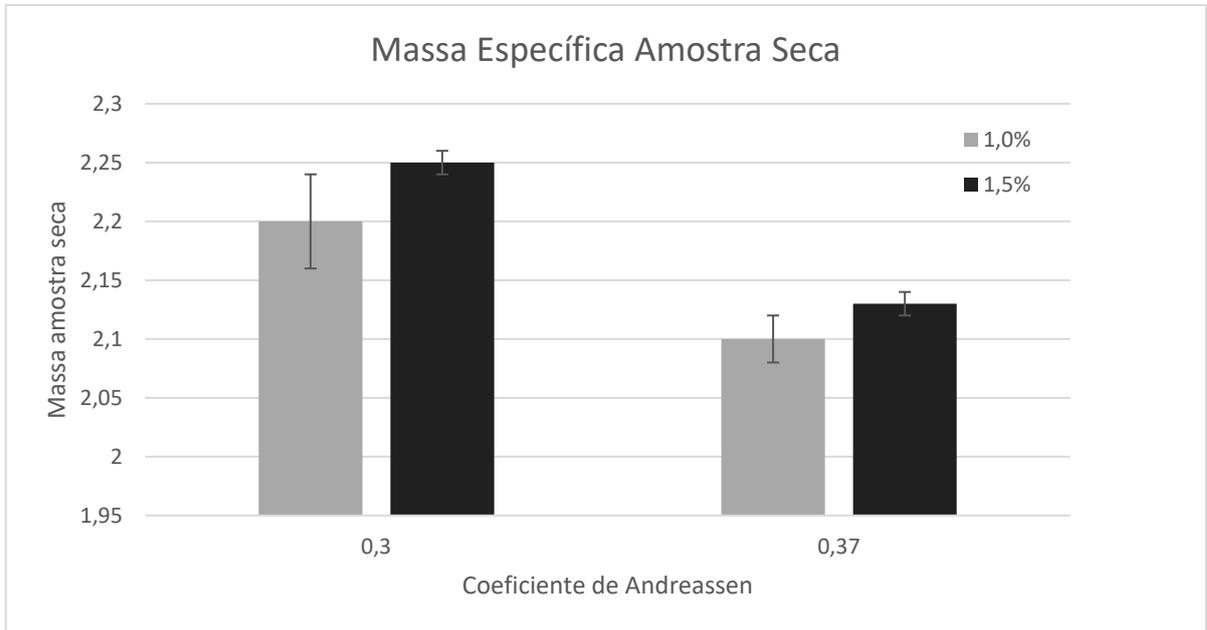
Fonte: Próprio Autor.

Os Gráficos 5 e 6 mostram os resultados da massa específica média das amostras secas e da massa específica real, respectivamente, para as formulações investigadas. Observou-se influência discreta do teor de alginato de sódio adicionado para as composições com $q = 0,30$ ou $q = 0,37$; a presença de maior teor de alginato de sódio parece provocar um ligeiro aumento nos valores de massa específica, o que está em concordância com os resultados anteriormente discutidos.

A maior influência entre as composições se deve à variação do valor de q ; ou seja, da distribuição granulométrica utilizada nas formulações investigadas. A formulação com $q = 0,30$ possuem uma maior quantidade de finos em comparação à de $q = 0,37$, o que afetou no grau de empacotamento final, propiciando maiores níveis de massa específica (ou densidade) tanto a seco - que considera a presença de poros permeáveis e impermeáveis – como também da massa específica real, onde, pela equação utilizada, exclui-se os poros permeáveis.

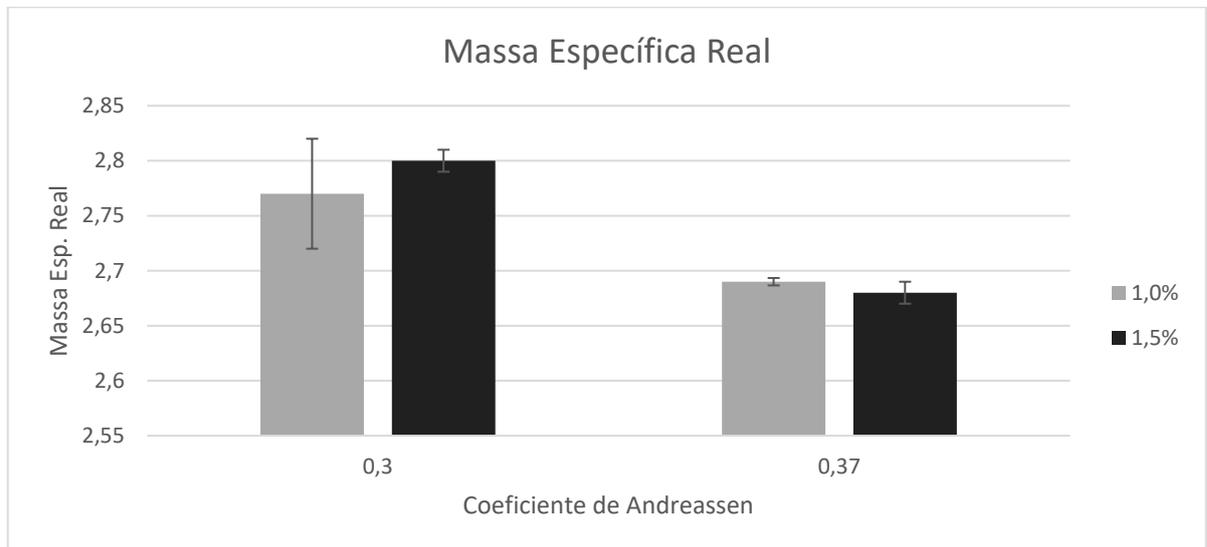
Salienta-se ainda a boa reprodutibilidade dos resultados, indicando que as amostras estão bastante homogêneas, trazendo baixos valores de desvio nas medidas obtidas.

Gráfico 5 – Massa específica média das amostras secas para as formulações investigadas



Fonte: Próprio Autor.

Gráfico 6 – Massa específica média real para as formulações investigadas

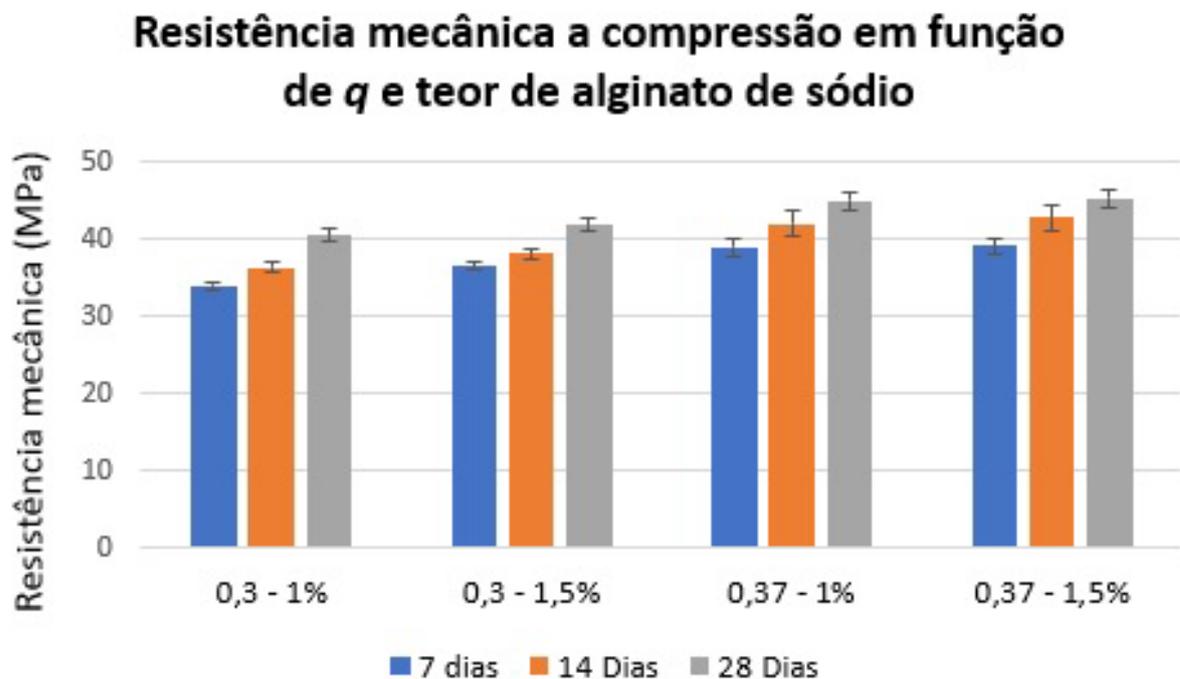


Fonte: Próprio Autor

6.2.3 Ensaio mecânicos de compressão

O Gráfico 7 indica os resultados obtidos a partir dos ensaios de compressão realizados para as diferentes composições. Como já esperado, em função do tipo de cimento utilizado, todos os corpos de prova atingiram valores mínimos próximos a 35MPa, ou superiores. Também foi observado um aumento progressivo da resistência mecânica em função da idade do concreto, o que se deve ao processo de hidratação e cura do concreto, com a formação das fases mais resistentes mecanicamente.

Gráfico 7 – Resistência mecânica a compressão média das composições investigadas



Fonte: Próprio Autor.

A influência do teor de alginato de sódio também é comprovada para todas as amostras investigadas, variando-se q e também a idade do concreto. Para todas as composições observou-se uma melhora nas propriedades mecânicas do concreto com maior presença de alginato de sódio, fato já discutido anteriormente. Esse resultado já era esperado uma vez que amostras com menores índices de vazios, menores níveis de absorção de água e maiores valores de massa específica a seco e real tendem a apresentar resistência mecânica mais elevada pois os defeitos críticos tendem a ser minimizados.

Ao comparar os resultados obtidos para as formulações com diferentes coeficientes de empacotamento, pôde ser visto que as propriedades mecânicas das composições com $q = 0,30$ foram inferiores àquelas onde utilizou-se $q = 0,37$, independente do teor de alginato de sódio adicionado.

Apesar das composições com $q = 0,30$ apresentarem maior grau de empacotamento devido à maior presença de finos, o que resulta num ganho de massa específica e menor índice de vazios, deve-se ressaltar que a maior presença de agregados graúdos (que ocorre nas formulações onde $q = 0,37$) permite maior ancoramento entre as partículas durante o processo de hidratação; além disso, a maior presença de agregados graúdos tende a aumentar a resistência à propagação catastrófica de trincas, uma vez que as trincas necessitam desviar desses agregados grosseiros, causando um aumento na resistência à compressão.

A Figura 25 comprova o efeito de ancoragem e do desvio da trinca no corpo de prova ao encontrar um agregado grosseiro por apresentar todos os rompimentos da estrutura ao redor de uma brita 1.

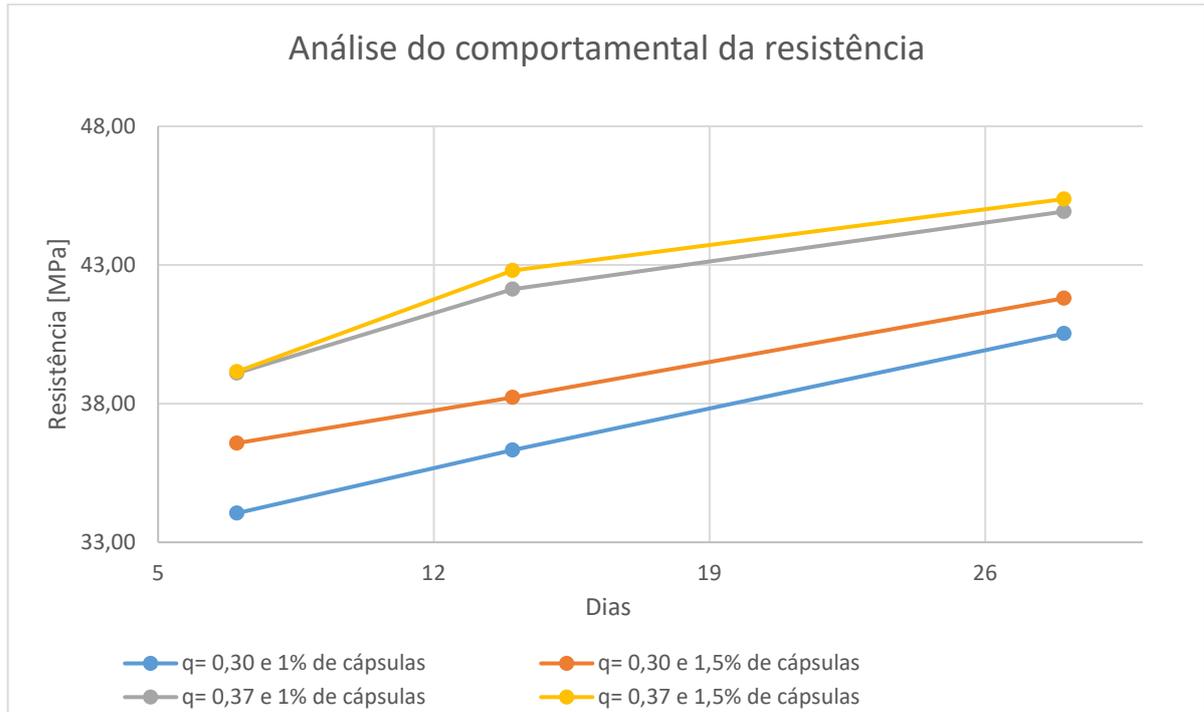
Figura 25 - Detalhe da fratura de um corpo de prova com coeficiente de Andreassen igual a 0,37, indicando o contorno da trinca pelo agregado grosseiro.



Fonte: Próprio Autor.

O Gráfico 8 mostra os resultados obtidos sob outra ótica, de modo que é visualmente mais nítida a influência do q e do teor de alginato de sódio na resistência mecânica a compressão.

Gráfico 8 – Análise comportamental da resistência em função do tempo



Fonte: Próprio Autor.

7 CONCLUSÕES

A metodologia adotada para a obtenção de cápsulas de alginato de sódio se mostrou adequada para o processo de inserção nos corpos de prova, o que a torna muito promissora para as etapas subsequentes desta linha de pesquisa, a qual consiste no encapsulamento das bactérias e adição no concreto. A produção em maior escala de amostras de laboratório, feita para os 48 corpos de prova, através do controle de parâmetros de processamento como velocidade de gotejamento da solução para formação do alginato e condições de agitação do sistema, entre outros também foi atingida, tornando a produção viável e futuramente para ampliar a produção em escala de construção, para uma grande quantidade de concreto.

A partir da análise de todos os resultados obtidos e dos teores investigados, conclui-se que a maior presença de alginato de sódio afeta positivamente nas propriedades físicas e mecânicas dos concretos.

No que diz respeito à variação do coeficiente de empacotamento (e no que essa variação implica na formulação), observou-se que, apesar de $q = 0,30$ proporcionar menor índice de vazios e maior massa específica, o menor ancoramento das matérias primas e a menor quantidade de agregados grosseiros parecem ser fatores de maior influência quando se trata da resistência mecânica. Assim, a utilização do coeficiente de Andreassen igual a 0,37 juntamente com a adição de 1,5% de cápsulas de alginato proporcionaram os melhores resultados quando avaliadas em conjunto as propriedades reológicas, físicas e mecânicas.

REFERÊNCIAS

AHMED, I. *et al.* Proposal of *Lysinibacillus boronitolerans* gen. nov. sp. nov., and transfer of *Bacillus fusiformis* to *Lysinibacillus fusiformis* comb. nov. and *Bacillus sphaericus* to *Lysinibacillus sphaericus* comb. nov. **International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology**, v. 57, n.5, p. 1117-1125, 1 maio 2007. Microbiology Society. <http://dx.doi.org/10.1099/ijs.0.63867-0>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142**: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2010. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto - Preparo, controle e recebimento. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1996. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 33**: Concreto - Amostragem de concreto fresco. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1998. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1998. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Moldagem e cura de Corpos de Prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1994. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de Compressão de Corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1994. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014. 256 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: Concreto – para fins estruturais. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação de absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578**: Cimento Portland Composto. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1991. 5 p.

BIASI, L. A. Adubação orgânica na produção, rendimento e composição do óleo essencial da *alfavaca quimio tipo eugenol*. **Horticultura Brasileira**, Curitiba, v. 1, n. 27, p. 35-39, jan. 2022. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/hb/v26n1/a18v26n1.pdf> . Acesso em: 10 jun. 2022.

BISSONNETTE, B.; PIERRE, P.; PIGEON, M. Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 10, p. 1655-1662, 1999. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846\(99\)00156-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846(99)00156-8). Acesso em: 09 jul. 2022.

BOQUET, E.; BORONAT, A.; RAMOS-CORMENZANA, A. Production of Calcite (calcium carbonate) Crystals by Soil Bacteria is a general Phenomenon, *Nature*, [S.L.], v. 246, n. 5434, p. 527-529, dez. 1973. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/246527a0>. Acesso em: 10 jun. 2022.

BRANCALHÃO, R.M.C.; CAVÉQUIA, M. C. **Microscópio Óptico - microscópio de luz**. 2012. Disponível em: https://projetos.unioeste.br/projetos/microscopio/index.php?option=com_phocagallery&view=category&id=76&Itemid=140. Acesso em: 14 jun. 2022.

BRUNAUER, S.; COPELAND, L. E. **The chemistry of concrete**. Scientific American: a division of Nature America, S.I., v. 4, n. 210, p. 80-93, mar. 1964. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/24936080> . Acesso em: 27 jun. 2022.

CABRERA, J. G. Deterioration of concrete due to reinforcement steel corrosion. **Cement and Concrete Composites**, v. 18, n. 1, p. 47-59, 1996. [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(95\)00043-7](https://doi.org/10.1016/0958-9465(95)00043-7) Acesso em: 07 abril 2022.

CARMONA, J. P. S. F. **Utilização da Biotecnologia para a estabilização de solos: Precipitação de CaCO₃ por via enzimática**. 2016. 78 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade de Coimbra, Coimbra, 2016. Disponível em: <https://estudogeral.uc.pt/handle/10316/98908> Acesso em: 14 de fev. 2022

CASTRO, A. L.; LIBORIO, J. B. L.; PANDOLFELLI, V. C. Reologia de concretos de alto desempenho aplicados na construção civil - Revisão. **Cerâmica**, São Carlos, n. 57, p. 63-75, 2011.

CRUZ, C. M. **Estudo da biomineralização aplicada a concretos de construção civil e sua viabilidade tecnológica**. 2019. 35 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciências de Materiais, Universidade de São Paulo Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Pirassununga, 2019.

FARIAS, Y. B.; NOREÑA, C. P. Z. Reverse encapsulation using double controlled gelification for the production of spheres with liquid light soy sauce-core. **International Journal of Gastronomy and Food Science**, [S.L.], v. 16, n.

100137, p. 1-7, jul. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijjgs.2019.100137>. Acesso em: 25 jun. 2022.

FARIA, G. C.; SILVA, D. S. **Análise da evolução da profundidade de carbonatação em estruturas de concreto ao longo do tempo**. 2019. 19 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Santa Catarina, Santa Catarina, 2019. Disponível em: <http://repositorio.unesc.net/handle/1/7132>. Acesso em: 19 jun. 2022.

FILHO, L. A. E.; ALVES, T. R.; FERNANDES, V. A. **Bioconcreto: Estudo exploratório de concreto com introdução de *Bacillus Subtilis*, *Bacillus Licheniformis*, acetato de cálcio e ureia**. 2017. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/140/o/ESTUDO_EXPLORAT%C3%93RIO_DE_CONCRETO_COM_INTRODU%C3%87%C3%83O_DE_BACILLUS_SUBTILIS_BACILLUS_LICHENIFORMIS_ACETATO_DE_C%C3%81LCIO_E_UREIA..pdf Acesso em: 07 jun. 2022.

FREITAS, A. Á.; ROMÃO, E. M.; ANÍCIO, S. O.; BARROS, A. J. Bioconcrete: A review of its application in civil construction. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 10, n. 4, p. e37210414270, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i4.14270. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/14270> Acesso em: 08 jul. 2022.

FUSCO, P.B. **Tecnologia do concreto estrutural: tópicos aplicados**. São Paulo: Editora PINI, 2008. 180 p.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos Materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2012. 365 p.

GATO, M. C. S.; MUNIZ, W.; SILVA, K. B.; SÁ, M. S. Self-regeneration of cracks in concrete from a bacteria culture. **Research, Society and Development**, [S.L.], v. 10, n. 6, p. 1-13, 2021. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i6.15734>. Acesso em: 17 março 2022.

GONÇALVES, E. A. B. **Estudo de patologias e suas causas nas estruturas de concreto armado de obras de edificações**. 2015. 174 f. TCC (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <http://repositorio.poli.ufri.br/monografias/monopoli10014879.pdf> Acesso em: 1 jun. 2022.

GLOBAL CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION. **Key Facts**. Londres: GCCA, 2019. Disponível em: < <https://gccassociation.org/> > . Acesso em: 30 março 2022.

HAMMES, F.; VERSTRAETE, W. Key roles of pH and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, v. 1, p. 3-7, 2002. <http://dx.doi.org/10.1023/a:1015135629155>. Acesso em: 12 jul. 2022.

JONKERS, H. M. Self-Healing Concrete: a biological approach. **Springer Series in Materials Science**, [S.L.], p. 195-204, 2007. Springer Netherlands.

http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4020-6250-6_9. Acesso em: 06 jun. 2022.

JONKERS, H. M., SCHLANGEN, E. **Self-healing of cracked concrete: A bacterial approach**. Fracture mechanics of concrete and concrete structures, Catania, Italy, v. 17, n. 22; p: 1821–1826, June 2007. Disponível em:

<http://framcos.org/FraMCoS-6/164.pdf> Acesso em 30 jun. 2022.

JONKERS, H. M. *et al.* Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. **Ecological Engineering**, v. 36, n. 2, p. 230-235, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.036>. Acesso em: 12 jun. 2022.

KHALIC, W. EHSAN, M. B. Crack healing in concrete using various bio influenced self-healing techniques. **Construction and Building Materials**, v. 102, part 1, p. 349-357, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.006>. Acesso em: 13 abril 2022.

LEE, K. Y.; MOONEY, D. J. Alginate: Properties and biomedical applications. **Progress in Polymer Science**, v. 37, n. 1, p. 106-126, 2012.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.06.003>. Acesso em: 11 fev. 2022.

LEE, Y. S.; PARK, W. Current challenges and future directions for bacterial self-healing concrete. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 102, n. 7, p. 3059-3070, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10295-008-0514-7>. Acesso em: 24 jun. 2022.

LI, C.V.; HERBERT, E. Robust self-healing concrete for sustainable infrastructure. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 10, n. 6, p. 207-218, 2012.

<http://dx.doi.org/10.3151/jact.10.207>. Acesso em: 20 maio 2022.

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

<https://doi.org/10.14359/51682499>. Acesso em: 21 jun. 2022.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. 2 ed., São Paulo: Ibracon, 674 p., 2008.

MENEZES, C. R. *et al.* Microencapsulação de probióticos: avanços e perspectivas. **Ciência Rural**, [S.L.], v. 43, n. 7, p. 1309-1316, 18 jun. 2013.

FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-84782013005000084>.

Acesso em: 14 jul. 2022.

MEYER, C. The greening of the concrete industry. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, p. 601-605, 2009.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.12.010> _ Acesso em: 07 jun. 2022.

MUYNCK, W.; BELIE, N.; VERSTRAETE, W. Microbial carbonate precipitation in construction materials: a review. **Ecological Engineering**, [S.L.], v. 36, n. 2, p. 118-136, fev. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.02.006> Acesso em: 03 jun. 2022.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2 ed. São Paulo: Bookman Editora Ltda., 2010. 468 p.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman Editora Ltda., 2016. 912 p.

OLIVEIRA, I. R. *et al.* **Dispersão e empacotamento de partículas**. São Paulo: Editora Fazendo Arte, 2000. 195 p.

PARK, S-J.; PARK, J-M.; KIM, W-J.; GHIM, S-Y. Application of Bacillus subtilis 168 as a multifunctional agent for improvement of the durability of cement mortar. **Journal of Microbiology and Biotechnology**, [S.L.], v. 22, n. 11, p. 1568-1574, 28, 2012. Journal of Microbiology and Biotechnology.
<http://dx.doi.org/10.4014/jmb.1202.02047>. Acesso em: 04 jul. 2022.

PERUZZI, A. P. **Comportamento das Fibras de Vidro Convencionais em matriz de cimento Portland modificada com látex e adição de sílica ativa**. 2002. 111 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Arquitetura, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002. Disponível em:
<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18131/tde-13112002-180613/publico/AntonioPPeruzzi.pdf>. Acesso em: 02 jun. 2022.

PRÓ LAB - MATERIAIS PARA LABORATÓRIO (São Paulo). **Entenda como funciona um microscópio óptico**. Disponível em:
<https://www.prolab.com.br/blog/equipamentos-aplicacoes/entenda-como-funciona-um-microscopio-optico/>. Acesso em: 21 jun. 2022.

REIS, J. F. A. **Determinação de parâmetros reológicos de concretos através do ensaio de abatimento de tronco de cone modificado: estudo de caso**. 177f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008. Disponível em:
https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/94495/reis_ifa_me_ilha.pdf?sequence=1. Acesso em: 14 jun. 2022.

REIS, T. **Síntese de hidrogéis de alginato reticulados com nanofibras de lactato de cálcio/poli(óxido de etileno) obtidas por eletrofiação**. 2019. 56 f. TCC (Graduação) - Curso de Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019. Disponível em:
<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/202624/TCC%20II%20-%20Tamara%20Reis.pdf?sequence=1>. Acesso em: 18 jul. 2022.

ROCHA, L. N. *et al.* Estudo comparativo de desempenho entre concreto convencional e o concreto com adições de fibra de aço. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, Ponta Grossa, v. 11, n. 4, p. 267-276, dez. 2019. Disponível em:
<https://revistas2.uepg.br/index.php/ret/article/view/14275>. Acesso em 14 de jun. 2022.

SCOTT, J. E. Periodate oxidation, pKa and conformation of hexuronic acids in polyuronides and mucopolysaccharides. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA) –**

General Subjects, v. 170, n. 2, p. 471-473, 1968. [https://doi.org/10.1016/0304-4165\(68\)90040-8](https://doi.org/10.1016/0304-4165(68)90040-8) Acesso em: 23 jun. 2022.

SEIFAN, M; SAMANI, A. K.; BERENJIAN, A. Bioconcrete: next generation of self-healing concrete. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 100, n. 6, p. 2591-2602, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7316-z> Acesso em: 17 março 2022.

SHINANO, H. Studies of Marine Microorganisms Taking Part in the Precipitation of Calcium Carbonate-II. **Nippon Suisan Gakkaishi**, [S.L.], v. 38, n. 7, p. 717-725, 1972. Japanese Society of Fisheries Science. <http://dx.doi.org/10.2331/suisan.38.717>. Acesso em: 07 jul. 2022.

SNOECK, D. *et al.* Recommendation of RILEM TC 260-RSC: testing sorption by superabsorbent polymers (sap) prior to implementation in cement-based materials. **Materials and Structures**, [S.L.], v. 51, n. 5, p. 1-7, 18 set. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-018-1242-8>. Acesso em: 08 jun. 2022.

SOURADEEP, G.; KUA, H. W. Encapsulation technology and techniques in self-healing concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n. 12, 2016. [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)jmt.1943-5533.0001687](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)jmt.1943-5533.0001687). Acesso em: 06 jul. 2022.

TEBO, B. M.; JOHNSON, H. A.; MCCARTHY, J. K.; TEMPLETON, Alexis S. Geomicrobiology of manganese(II) oxidation. **Trends In Microbiology**, [S.L.], v. 13, n. 9, p. 421-428, set. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tim.2005.07.009>. Acesso em: 22 jun. 2022.

TRENSON, G. **Application of pH responsive hydrogel encapsulated bacteria for self-healing concrete**. 2017. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Ghent University, Gante, 2017.

VAN TITTELBOOM, K. *et al.* Use of bacteria to repair cracks in concrete. **Cement Concrete Research**, v. 6, n. 1, p. 157-166, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.025>. Acesso em: 19 jun. 2022.

VAN TITTELBOOM, K. *et al.* Self-healing efficiency of cementitious materials containing tubular capsules filled with healing agent. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 4, p. 497-505, 2011. <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.01.004> Acesso em: 11 jul. 2022.

VAN TITTELBOOM, K.; *et al.* Self-Healing in Cementitious Materials—A Review. **Materials**, [S.L.], v. 6, n. 6, p. 2182-2217, 27 maio 2013. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma6062182>. Acesso em: 19 março 2022.

VELLOSO, F. T. **Desenvolvimento e caracterização de microcápsulas de alginato/quitosana contendo ácido retinóico e óleo de babaçu**. 2008. 107 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Ciências Farmacêuticas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/2946>. Acesso em: 14 jun. 2022.

WANG, J.Y.; DE BELIE, N.; VERSTRAETE, W. Diatomaceous earth as a protective vehicle for bacteria applied for self-healing concrete. **Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology**, v. 39, n. 4, p. 567-577, 2012.

<https://doi.org/10.1007/s10295-011-1037-1> Acesso em: 11 março 2022.

WANG, J.Y. *et al.* Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete. **Construction and Building Materials**, v. 26, n. 1, p. 532-540, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.054> Acesso em: 1 abril 2022.

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

<http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.018> Acesso em: 17 maio 2022.

WANG, J.Y. *et al.* Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores. **Cement and Concrete Research**, v. 56, p. 139-152, 2014b.

<http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.11.009> Acesso em: 05 abril 2022.

WANG, J. *et al.* Application of modified-alginate encapsulated carbonate producing bacteria in concrete: a promising strategy for crack self-healing. **Frontiers in Microbiology**, v. 6, 1088, p. 1-14, 2015. <http://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01088>

Acesso em: 09 maio 2022.

WANG, J. *et al.* A chitosan-based pH-responsive hydrogel for encapsulation of bacteria self-healing concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 93, p. 309-322, 2018. <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.08.007> Acesso em: 08 jul. 2022.

WU, M.; JOHANNESON, B.; GEIKER, M. A review: self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material. **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 571-583, 2012.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.086>. Acesso em: 23 jun. 2022.

WU, M.; HU, X.; ZHANG, Q.; XUE, D.; ZHAO, Y. Growth environment optimization for inducing bacterial mineralization and its application in concrete healing. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 209, p. 631-643, jun. 2019.

Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.181>. Acesso em: 04 jun. 2022.

ZHU, X. *et al.* Viability determination of *Bacillus sphaericus* after encapsulation in hydrogel for self-healing concrete via microcalorimetry and in situ oxygen concentration measurements. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 119, p. 104006-104015, 2021. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104006> Acesso em: 09 jun. 2022.

APÊNDICE A - Valores dos testes realizados

Tabela 26 – Medidas obtidas para as amostras investigadas

Composição	--	Amostra			Média e Desvio
		A 10	A11	A 12	
$q = 0,30$; alginato de sódio: 1%	Massa seca	3267,08	3363,83	3393,95	3341,62±66,29
	Massa saturada	3579,66	3665,33	3712,31	3652,43±67,26
	Massa imersa	2065,16	2158,78	2183,65	2135,86±62,48
	--	B10	B11	B12	Média e Desvio
$q = 0,30$; alginato de sódio: 1,5%	Massa seca	3421,24	3418,42	3446,98	3428,88±15,74
	Massa saturada	3718,64	3715,95	3752,30	3728,96±20,25
	Massa imersa	2199,74	2197,83	2208,97	2202,18±5,96
	--	C10	C11	C12	Média e Desvio
$q = 0,37$; alginato de sódio: 1%	Massa seca	3280,54	3201,87	3309,44	3263,95±55,67
	Massa saturada	3618,48	3552,73	3641,66	3604,29±46,13
	Massa imersa	2063,57	2011,11	2080,52	2051,73±36,19
	--	D10	D11	D12	Média e Desvio
$q = 0,37$; alginato de sódio: 1,5%	Massa seca	3264,31	3299,35	3349,33	3304,33±42,73
	Massa saturada	3586,06	3616,23	3663,82	3622,04±39,20
	Massa imersa	2046,32	2069,23	2102,38	2072,64±28,19

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 27 - Resultados do Ensaio de Compressão – Etapa 1

Andreassen 0,30				Andreassen 0,37			
Teor	Resistencia Mecânica (MPa)			Teor	Resistencia Mecânica (MPa)		
	7 Dias	14 Dias	28 Dias		7 Dias	14 Dias	28 Dias
Adição e	33,9	36,1	40,1	Adição e	37,9	40,2	43,5
1%	34,2	35,7	39,7	1%	39,7	42,3	45,2
de	33,5	36,3	40,8	de	40,3	44,1	46,4
cápsulas	34,6	37,2	41,5	cápsulas	38,5	41,9	44,6
Média	34,05	36,33	40,53	Média	39	42	45
Dv	0,47	0,63	0,79	Dv	1,10	1,60	1,21
Adição	35,9	37,7	40,9	Adição	38,1	41,8	44,7
1,5%	37,3	39,1	42,7	1,5%	40,5	43,9	46,8
de	36,4	37,8	41,3	de	39,4	42,3	44,1
cápsulas	36,7	38,3	42,3	cápsulas	38,6	43,2	45,9
Média	36,58	38,23	41,80	Média	39,15	42,8	45,38
Dv	0,59	0,64	0,84	Dv	1,05	0,93	1,21

Fonte: Próprio autor.