



**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL**  
**ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**

**ARTUR CIELLO BERNARDI**

**A EFICÁCIA DA AUTO CICATRIZAÇÃO DE UMA ARGAMASSA COM  
SILICATO DE SÓDIO INSERIDO NA ARGILA EXPANDIDA**

**BENTO GONÇALVES**

**2021**

**ARTUR CIELLO BERNARDI**

**A EFICÁCIA DA AUTO CICATRIZAÇÃO DE UMA ARGAMASSA COM  
SILICATO DE SÓDIO INSERIDO NA ARGILA EXPANDIDA**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia  
Civil da Universidade de Caxias do Sul,  
como requisito parcial para a obtenção  
do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Me. Maurício Schäfer

**BENTO GONÇALVES**

**2021**

ARTUR CIELLO BERNARDI

**A EFICÁCIA DA AUTO CICATRIZAÇÃO DE UMA ARGAMASSA COM  
SILICATO DE SÓDIO INSERIDO NA ARGILA EXPANDIDA**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia  
Civil da Universidade de Caxias do Sul,  
como requisito parcial para a obtenção  
do título de Engenheiro Civil.

**Aprovado em** \_\_\_ / \_\_\_ / \_\_\_

**Banca Examinadora**

---

Prof. Me. Maurício Schäfer  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

---

Prof. Me. Givanildo Garlet  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

---

Prof. Me. Vinício Ceconello  
Universidade de Caxias do Sul - UCS

## RESUMO

BERNARDI, A. C. **A Eficácia da Auto Cicatrização de uma Argamassa com Silicato de Sódio Inserido na Argila Expandida.** 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade de Caxias do Sul, Área do Conhecimento de Ciências Exatas e Engenharias, Caxias do Sul, 2021.

O concreto auto cicatrizante é um assunto de extrema relevância para o futuro. Por se tratar de uma tecnologia em ascensão, está cada vez mais sendo estudado pelo meio técnico-científico em função de sua evidente efetividade e baixo custo de manutenção. O concreto por si só já possui a capacidade de se auto cicatrizar, com uma baixa taxa de cura. Por conta disso, é possível inserir aditivos que possibilitam uma auto cicatrização mais eficaz. Possui três bases de estudos: aditivos minerais, bactérias e agentes adesivos. Sua inserção pode ser feita através de um sistema vascular ou capsular. Esta pesquisa teve como objetivo avaliar o efeito do silicato de sódio, que é um aditivo mineral cristalino, através do sistema de encapsulamento. Conhecido como vidro líquido, tem uma reação poderosa de cura quando em contato com a água. Para começar, foi feito o encapsulamento do silicato de sódio na argila expandida, utilizando um sistema que consiste em uma bomba de vácuo e um dessecador de vidro. Foi confeccionada uma argamassa com traço 1:2,36 e relação água/cimento = 0,50, com três teores de substituição da areia pela argila expandida, 10%, 30% e 50%. Foram realizados – no estado fresco – o ensaio de trabalhabilidade e de massa específica. Para o estado endurecido, os seguintes ensaios: resistência à compressão, módulo de elasticidade e absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica. Para a avaliação da auto cicatrização, foi necessário a realização do pré-carregamento de algumas amostras. As argamassas contendo argila expandida tiveram um aumento significativo de resistência à compressão, quando pré-carregados aos 7 dias, em comparação às sem pré-carregamento. Em função do pré-carregamento, também obtiveram resultados de rigidez maiores, no ensaio de módulo de elasticidade. Por conter um agregado leve, teve uma massa específica menor, em ambos os estados, uma absorção de água maior e um índice de vazios também maior. O teor de 10% de substituição obteve o resultado mais satisfatório, atingindo uma rigidez idêntica à argamassa referência, assim como uma resistência à compressão expressivamente boa, sem muita alteração das outras propriedades da argamassa no estado endurecido.

**Palavras-chave:** concreto auto cicatrizante, silicato de sódio, aditivo mineral cristalino, argila expandida, eficiência de cura.

## ABSTRACT

BERNARDI, A. C. **The Self-healing Effectiveness of a Mortar with Sodium Silicate Inserted in Expanded Clay.** 2021. Graduation work (Graduation in Civil Engineering) – Universidade de Caxias do Sul, Área do Conhecimento de Ciências Exatas e Engenharias, Caxias do Sul, 2021.

Self-healing concrete is an extremely relevant subject for the future. Because it is a technology on the rise, it is increasingly being studied by the technical and scientific community due to its obvious effectiveness and low maintenance cost. Concrete itself already has the ability to heal itself, with a low curing rate. Because of this, it is possible to insert additives that enable a more effective self-healing. It has three bases of studies: mineral additives, bacteria, and adhesive agents. Its insertion can be done through a vascular or capsular system. This research aimed to evaluate the effect of sodium silicate, which is a crystalline mineral additive, through the encapsulation system. Known as liquid glass, it has a powerful healing reaction when in contact with water. To begin with, the sodium silicate was encapsulated in the expanded clay using a system consisting of a vacuum pump and a glass desiccator. A mortar was made with a 1:2.36 ratio of water/cement = 0.50, with three levels of substitution of sand for the expanded clay, 10%, 30% and 50%. In the fresh state, workability and specific mass tests were performed. For the hardened state, the following tests were performed: compressive strength, modulus of elasticity and water absorption by immersion, void index and specific gravity. For the evaluation of self-healing, it was necessary to pre-load some samples. Mortars containing expanded clay had a significant increase in compressive strength when preloaded at 7 days compared to those without preloading. As a result of the pre-loading, they also obtained higher stiffness results, in the modulus of elasticity test. Because it contains a light aggregate, it had a lower specific mass, in both states, a higher water absorption and a higher void index. The 10% substitution content obtained the most satisfactory result, reaching a stiffness identical to the reference mortar, as well as a significantly good compressive strength, without much change in the other properties of the mortar in the hardened state.

**Keywords:** self-healing concrete, sodium silicate, crystalline mineral admixture, expanded clay, curing efficiency.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Conceito de auto cicatrização e da extensão da vida útil.....	10
Figura 2 – Abordagens intrínsecas de auto cicatrização.....	12
Figura 3 – Evidência experimental de auto cicatrização baseada em aditivo mineral. ....	14
Figura 4 – Auto cicatrização através de bactéria.....	16
Figura 5 – Transformação de ideias da rede porosa de concreto seguindo a abordagem de design avançado, selecionando o osso como modelo biológico de processo de cura.....	19
Figura 6 – O conceito de cura autônoma. ....	22
Figura 7 – Preparação de microcápsula de parede dupla.....	24
Figura 8 – Procedimento de preparação da microcápsula. ....	25
Figura 9 – Fotos do MEE das microcápsulas de parede dupla. ....	25
Figura 10 – Microcápsula preparada com base no procedimento ideal. ....	26
Figura 11 – Espécime de concreto com 2,50% de microcápsulas. ....	27
Figura 12 – Profundidade da fissura de cada amostra.....	28
Figura 13 – Eficiência de cura de cada amostra. ....	28
Figura 14 – Armadura do painel de parede.....	31
Figura 15 – Representação dos elementos do painel da parede e indicação da fissura de 500mm de largura que será formada.....	32
Figura 16 – Fluxograma para a realização da argamassa auto cicatrizante. ...	33
Figura 17 – Curva granulométrica do agregado miúdo natural. ....	36
Figura 18 – Curva granulométrica do agregado miúdo leve.....	37
Figura 19 – Agregado miúdo leve, argila expandida 0500, da Cinexpan. ....	38
Figura 20 – Silicato de sódio, da SimoQuímica.....	39
Figura 21 – Fluxograma para a realização da argamassa auto cicatrizante. ...	39
Figura 22 – Fluxograma para encapsulamento do silicato de sódio.....	41
Figura 23 – Câmara de vácuo, acoplada em um dessecador de vidro, para encapsulamento do silicato de sódio.....	41
Figura 24 – Misturador mecânico utilizado.....	42
Figura 25 – Moldagem das amostras em forma cilíndricas. ....	43
Figura 26 – Cura dos corpos de prova de forma submersa. ....	43
Figura 27 – Ensaio de determinação do índice de consistência.....	44

Figura 28 – Ensaio de resistência à compressão.....	46
Figura 29 – Ensaio do módulo de elasticidade.....	47
Figura 30 – Microfissura na amostra. ....	48
Figura 31 – Microfissura na amostra. ....	49
Figura 32 – Microfissura na amostra. ....	50
Figura 33 – Trabalhabilidade média por traço. ....	51
Figura 34 – Massa específica média por traço.....	52
Figura 35 – Resistência à compressão aos 7 e 28 dias. ....	53
Figura 36 – Resistência à compressão aos 28 dias sem pré-carregamento e com pré-carregamento.....	55
Figura 37 – Avaliação global da resistência à compressão.....	57
Figura 38 – Módulo de elasticidade aos 28 dias sem pré-carregamento e com pré-carregamento.....	59
Figura 39 – Absorção de água por imersão aos 28 dias sem e com pré-carregamento. ....	61
Figura 40 – Índice de vazios aos 28 dias sem e com pré-carregamento. ....	62
Figura 41 – Massa específica da amostra saturada aos 28 dias sem e com pré-carregamento. ....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de auto cicatrização, suas vantagens e desvantagens.....	11
Tabela 2 – Aditivos minerais para auto cicatrização relatadas na literatura.....	14
Tabela 3 – Composição por % de peso da mistura pronta de concreto C40/50 e as microcápsulas utilizadas no ensaio. ....	30
Tabela 4 – Planejamento de ensaios da argamassa.....	34
Tabela 5 – Especificações químicas do cimento CP II F40.....	35
Tabela 6 – Especificações físicas e mecânicas do cimento CP II F40.....	35
Tabela 7 – Propriedades do agregado miúdo natural. ....	35
Tabela 8 – Propriedades químicas do agregado miúdo leve. ....	36
Tabela 9 – Propriedades físicas do agregado miúdo leve.....	37
Tabela 10 – Propriedades do agregado miúdo leve.....	37
Tabela 11 – Composição do silicato de sódio neutro.....	38
Tabela 12 – Quantidade usada por material para cada traço. ....	40
Tabela 13 – Resistência à compressão média aos 7 e 28 dias.....	54
Tabela 14 – Análise de variância (ANOVA) da resistência à compressão. ....	55
Tabela 15 – Resistência à compressão aos 28 dias sem pré-carregamento e com pré-carregamento.....	56
Tabela 16 – Avaliação global da resistência à compressão.....	57
Tabela 17 – Módulo de elasticidade médio aos 7 e 28 dias.....	58
Tabela 18 – Absorção de água por imersão aos 28 dias sem e com pré-carregamento. ....	60
Tabela 19 – Índice de vazios aos 28 dias sem e com pré-carregamento.....	62
Tabela 20 – Massa específica da amostra saturada aos 28 dias sem e com pré-carregamento. ....	63

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>5</b>
1.1 OBJETIVOS .....	6
<b>1.1.1 Objetivo geral .....</b>	<b>6</b>
<b>1.1.2 Objetivos específicos.....</b>	<b>6</b>
1.2 DELIMITAÇÕES.....	7
1.3 JUSTIFICATIVA .....	7
1.4 DELINEAMENTO .....	7
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>9</b>
2.1 CONCRETO AUTO CICATRIZANTE .....	9
<b>2.1.1 Tipos de auto cicatrização.....</b>	<b>10</b>
<b>2.1.2 Mecanismos de auto cicatrização.....</b>	<b>11</b>
2.1.2.1 Auto cicatrização autógena .....	11
2.1.2.2 Auto cicatrização com base em aditivos minerais .....	13
2.1.2.3 Auto cicatrização com base em bactérias .....	15
2.1.2.4 Auto cicatrização com base em agentes adesivos .....	17
2.2 AGENTES QUÍMICOS QUE POTENCIALIZAM A CICATRIZAÇÃO.....	18
<b>2.2.1 Como inserir o agente químico no concreto .....</b>	<b>18</b>
2.2.1.1 Sistema vascular .....	19
2.2.1.2 Sistema capsular .....	20
2.3 RESULTADOS DE OUTROS EXPERIMENTOS .....	23
<b>2.3.1 Avaliação de Mecanismos de Auto Cicatrização em Concreto com Microcápsulas de Silicato de Sódio de Parede Dupla .....</b>	<b>23</b>
<b>2.3.2 Primeira aplicação e desempenho no Reino Unido de concreto auto cicatrizante baseado em microcápsulas .....</b>	<b>29</b>
<b>2.3.3 Avaliação das pesquisas .....</b>	<b>32</b>

<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>33</b>
3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....	33
3.2 MATERIAIS .....	34
<b>3.2.1 Aglomerante</b> .....	<b>34</b>
<b>3.2.2 Agregado miúdo</b> .....	<b>35</b>
<b>3.2.3 Agregado miúdo leve</b> .....	<b>36</b>
<b>3.2.4 Água</b> .....	<b>38</b>
<b>3.2.5 Silicato de sódio</b> .....	<b>38</b>
3.3 MÉTODOS .....	39
<b>3.3.1 Encapsulamento do silicato de sódio na argila expandida</b> .....	<b>40</b>
<b>3.3.2 Moldagem e cura</b> .....	<b>42</b>
<b>3.3.3 Estado fresco</b> .....	<b>44</b>
3.3.3.1 Trabalhabilidade .....	44
3.3.3.2 Determinação da massa específica .....	45
<b>3.3.4 Estado endurecido</b> .....	<b>45</b>
3.3.4.1 Resistência à compressão .....	45
3.3.4.2 Módulo de elasticidade .....	46
3.3.4.3 Absorção de água por imersão, massa específica e índice de vazios .	48
3.3.4.4 Pré-carregamento .....	48
<b>4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>51</b>
4.1 ESTADO FRESCO .....	51
<b>4.1.1 Trabalhabilidade</b> .....	<b>51</b>
<b>4.1.2 Determinação da massa específica</b> .....	<b>52</b>
4.2 ESTADO ENDURECIDO .....	53
<b>4.2.1 Resistência à compressão</b> .....	<b>53</b>
4.2.1.1 Sem pré-carregamento .....	53

4.2.1.2 Pré-carregamento aos 7 dias .....	55
4.2.1.3 Avaliação global .....	57
<b>4.2.2 Módulo de elasticidade .....</b>	<b>58</b>
<b>4.2.3 Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica .....</b>	<b>60</b>
4.2.3.1 Absorção de água por imersão .....	60
4.2.3.2 Índice de vazios.....	62
4.2.3.3 Massa específica.....	63
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>65</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>67</b>
<b>APÊNDICE A – FOTOS DA AMOSTRA COM MICROFISSURAS VISÍVEIS..</b>	<b>72</b>
<b>APÊNDICE B – CÁLCULOS DOS ENSAIOS DE TRABALHABILIDADE MÉDIA E DE MASSA ESPECÍFICA MÉDIA NO ESTADO FRESCO .....</b>	<b>74</b>
<b>APÊNDICE C – RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....</b>	<b>75</b>
<b>APÊNDICE D – RESULTADOS DO ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE .....</b>	<b>77</b>
<b>APÊNDICE E – RESULTADOS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO, MASSA ESPECÍFICA E ÍNDICE DE VAZIOS.....</b>	<b>78</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material de construção mais utilizado por causa de sua alta resistência à compressão e custo relativamente baixo. Uma propriedade adversa do concreto é sua sensibilidade à formação de fissuras como consequência de sua limitada resistência à tração. Por essa razão, o concreto é principalmente combinado com armaduras de aço para suportar as cargas de tração. Embora estas armaduras restrinjam a largura da fissura, na maioria das vezes não são projetadas para evitar completamente a formação delas (VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013).

As fissuras, trincas e rachaduras põem em risco a durabilidade das estruturas de concreto, pois líquidos e gases agressivos podem penetrar no concreto ao longo dessas e causar danos. Consequentemente, elas podem se ampliar e o reforço pode ficar exposto ao meio ambiente. Uma vez que o reforço começa a corroer, pode ocorrer o colapso total da estrutura. Portanto, parece óbvio que a inspeção, manutenção e reparo das rachaduras de concreto são todos indispensáveis (VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013).

Vários tipos de auto cicatrização tem sido pesquisados recentemente. A utilização de agentes expansivos e aditivos minerais em vários métodos pode ser apropriada devido à sua boa eficiência de cura, compatibilidade com a matriz de cimento e baixo custo, mas a eficiência dos produtos de cura gerados por necessidade não é garantida (LEE; RYOU, 2014).

Os compósitos cimentícios auto cicatrizantes podem ser divididos em duas grandes categorias: autógena e autônoma. A autógena é o fenômeno em que o material cura fissuras usando os seus próprios componentes e constituintes genéricos. A autônoma, contudo, envolve o uso de adições de elementos que não são convencionalmente adicionados no concreto. Estas adições são especificamente para melhorar a capacidade de auto cicatrização. Dentro da segunda grande categoria, a autônoma, há outras três divisões, que são: com aditivos minerais, com bactérias ou com agentes adesivos (ALGHAMRI; KANELLOPOULOS; AL-TABBAA, 2016; HUANG *et al.*, 2016).

O concreto auto cicatrizante com base em aditivos minerais podem ser categorizados em dois grupos: aditivos expansivos e aditivos cristalinos (HUANG *et al.*, 2016; ROIG-FLORES *et al.*, 2015).

Os principais elementos químicos utilizados são o sulfoaluminato de cálcio (expansivo), a cal viva (expansivo), tipos de carbonatos (cristalino) e o silicato de sódio (cristalino). Com os aditivos expansivos, o volume dos produtos de reação é maior do que o do próprio aditivo e a razão de expansão depende da composição do aditivo. Com relação ao aditivo cristalino, seus componentes podem reagir com hidróxido de cálcio para formar produtos cristalinos (HUANG *et al.*, 2016; QURESHI; KANELLOPOULOS; AL-TABBAA, 2019).

A pesquisa está elaborada com o objetivo de analisar a auto cicatrização, sua eficiência e sua qualidade de cura. É utilizado o silicato de sódio como aditivo cristalizante, encapsulado, com a finalidade de identificar o seu desempenho na argamassa (AL-TABBAA *et al.*, 2019). Para avaliar o comportamento da eficiência de cura das microcápsulas de silicato de sódio, foram observadas suas propriedades aos 7 e 28 dias. O produto resultante da mistura a ser realizada é um compósito cimentício, ou seja, um concreto sem agregado graúdo. Sendo assim, o estudo foi desenvolvido com o objetivo de analisar o silicato de sódio como agente de cura para a auto cicatrização do concreto, através da avaliação da argamassa.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal descreverá o foco principal deste trabalho. Os objetivos específicos são mais pontuais, em busca de respostas práticas para a utilização do silicato de sódio.

### 1.1.1 Objetivo geral

Substituir, utilizando diferentes teores, a argila expandida com silicato de sódio pelo agregado natural, em um compósito cimentício do concreto, verificando a possibilidade de auto cicatrização.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são os seguintes:

a) Avaliar o efeito da utilização de diferentes teores do agregado leve pelo agregado natural, tanto no estado fresco quanto no endurecido;

b) Avaliar se a inserção do silicato de sódio por meio da argila expandida, com o efeito do pré-carregamento, possibilita a auto cicatrização dos compósitos cimentícios;

c) Identificar qual é o teor de substituição mais efetivo, para utilização em um compósito cimentício do concreto, frente a auto cicatrização.

## 1.2 DELIMITAÇÕES

Análise de laboratório, de uma argamassa de concreto, ou seja, foi empregada uma argamassa no traço 1:2,36, esse traço é obtido através de um traço de um concreto de referência 1:2,36:2,64, desconsiderando o agregado graúdo. Utilização da argila expandida em diferentes teores (10, 30 e 50%) em relação a areia, com o silicato de sódio encapsulado.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

Tornar o concreto auto cicatrizante uma opção viável para um futuro próximo, prologando a vida útil das edificações e rodovias e melhorando a qualidade da construção civil como um todo. Ainda é necessário muito estudo e desenvolvimento em cima desses novos produtos, para finalmente ser acessível pelo mercado comercial.

## 1.4 DELINEAMENTO

Esta pesquisa é constituída por cinco capítulos. O primeiro capítulo introduzirá o tema de auto cicatrização em compósitos cimentícios, com os objetivos da pesquisa e suas delimitações. O segundo, é composto pela revisão bibliográfica, em que irá abordar os principais conceitos especificados em artigos, teses e dissertações atuais sobre o tema. O terceiro, apresentará materiais e métodos, descrevendo todos os ensaios e análises que foram realizados. No quarto, foi efetuada a análise dos resultados frente aos ensaios realizados, esta parte foi dividida em duas etapas, onde na primeira foi realizada

a análise dos ensaios no estado fresco e na segunda os ensaios no estado endurecido das argamassas empregadas nesta pesquisa. Por fim, no quinto capítulo foi descrita as considerações finais da pesquisa, com a conclusão do realizado

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo irá descrever como funciona o concreto auto cicatrizante, os tipos e mecanismos da auto cicatrização. Também demonstra como é feito o encapsulamento de aditivos minerais para a criação do concreto auto cicatrizante autônomo e resultados obtidos de variados experimentos.

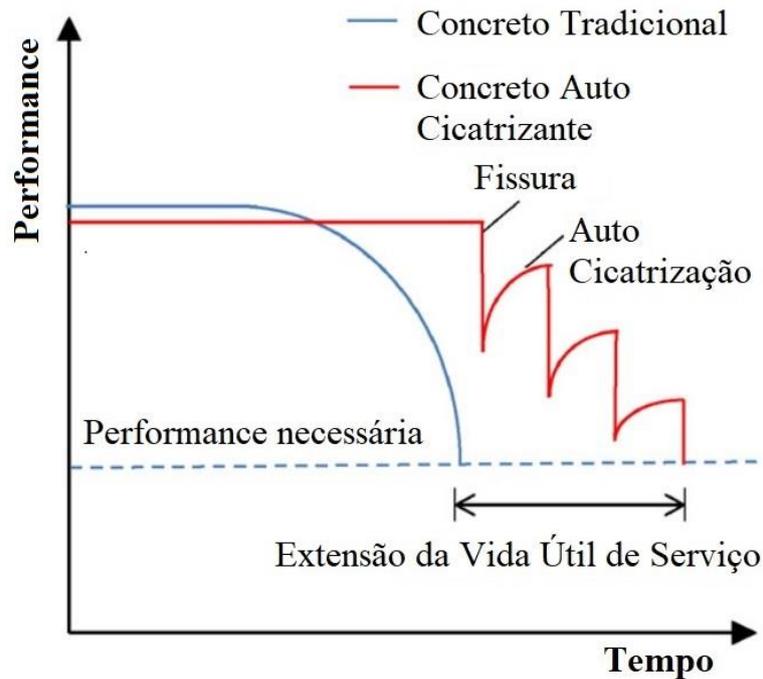
### 2.1 CONCRETO AUTO CICATRIZANTE

O concreto de fato é um material de construção favorável devido a seu processo de produção, disponibilidade de matéria-prima e características de resistência à compressão. Divergentemente, a característica de tração do concreto pode causar a probabilidade de fissuração. A fissuração pode ocorrer em qualquer fase da vida útil do concreto; isto pode ocorrer quando o concreto está em estado plástico ou endurecido devido a tensões térmicas, retração plástica, assentamento, retração por secagem, condições climáticas e várias condições de carga ou uma combinação de vários fatores (ARAÚJO *et al.*, 2016; MINNEBO *et al.*, 2017; SIDIQ; GRAVINA; GIUSTOZZI, 2019).

As fissuras permitem que gases e líquidos perigosos penetrem no concreto, causando a degradação do concreto e da armadura de aço. A degradação dessas armaduras de aço implica em problemas estruturais, uma vez que a armadura é responsável por absorver as tensões de tração. O concreto auto cicatrizante fornece uma resposta conceitual para evitar problemas de degradação do concreto armado, implementando sistemas projetados com a capacidade de curar as fissuras (MINNEBO *et al.*, 2017).

A capacidade de auto cicatrização do concreto abre perspectivas desafiadoras para o uso de materiais de construção capazes de recuperar seus níveis de durabilidade originais, garantindo assim uma vida útil mais longa das aplicações projetadas e um desempenho menos sensível à degradação induzida pelo ambiente, conforme Figura 1 (KRELANI, 2015).

Figura 1 – Conceito de auto cicatrização e da extensão da vida útil.



Fonte: adaptado de Huang et al. (2016).

Nas últimas décadas, várias pesquisas e estudos tiveram como objetivo investigar o comportamento físico, químico e mecânico de materiais cimentícios contendo componentes de auto cicatrização projetados (CAGGIANO *et al.*, 2017).

### 2.1.1 Tipos de auto cicatrização

Os processos de auto cicatrização dentro de materiais à base de cimento podem ser divididos em duas grandes categorias: autógena e autônoma. A auto cicatrização autógena é o fenômeno em que o material cura fendas usando os seus próprios componentes e constituintes genéricos. A auto cicatrização autônoma, contudo, envolve o uso de adições de elementos que não são convencionalmente adicionados a materiais cimentícios. Estas adições são adicionadas especificamente para melhorar a capacidade de auto cicatrização. Dentro da segunda grande categoria, a autônoma, há outras três divisões (ALGHAMRI; KANELLOPOULOS; AL-TABBAA, 2016).

Com base no Huang *et al.* (2016), a auto regeneração de fissuras em materiais cimentícios pode ser agrupada em quatro categorias. Assim, são classificadas de acordo com os mecanismos:

- 1) auto cicatrização autógena;
- 2) auto cicatrização com base em aditivos minerais;
- 3) auto cicatrização com base em bactérias;
- 4) auto cicatrização com base em agentes adesivos.

O processo de cura físico-química, os fatores que influenciam, as vantagens e as desvantagens dessas categorias de auto cicatrização são descritos na Tabela 1. Para melhor entendimento, será adotada a classificação do Huang *et al.* (2016).

Tabela 1 – Tipos de auto cicatrização, suas vantagens e desvantagens

<b>Categoria</b>	<b>Tamanho da fissura</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Autógena	Cura fissuras menores que 50 µm	Acontece naturalmente	Precisa de hidratação contínua
Com base em aditivos minerais	Cura fissuras menores que 200 µm	Regenera mais rapidamente, aumenta a impermeabilidade	Necessita de hidratação e de proteção para não reagir durante a mistura, podendo causar fissuração na cura
Com base em bactérias	Cura fissuras menores que 450 µm	Mais sustentável e mais eficiente a longo prazo	Precisa das mesmas condições dos aditivos minerais e seu custo é mais caro
Com base em agentes adesivos	Pode curar fissuras largas, dependendo de quantidade de agente liberado	É muito eficaz em ambientes abertos e internos pois não precisa de hidratação para reagir	Precisa apenas de proteção, igual aos aditivos minerais ou bactérias

Fonte: adaptado de Huang et al. (2016).

## 2.1.2 Mecanismos de auto cicatrização

Cada tópico abordará, individualmente, os tipos citados anteriormente de auto cicatrização do concreto. Sendo explanado brevemente o funcionamento, vantagens e desvantagens de cada um (HUANG *et al.*, 2016).

### 2.1.2.1 Auto cicatrização autógena

Os principais mecanismos de auto cicatrização autógena são a hidratação contínua dos grãos de cimento que não reagiram devido à falta de água e a precipitação do carbonato de cálcio, que é o resultado de uma reação entre os íons de cálcio no concreto e o dióxido de carbono dissolvido na água. A hidratação contínua é a maior causa de cura no concreto jovem devido ao seu

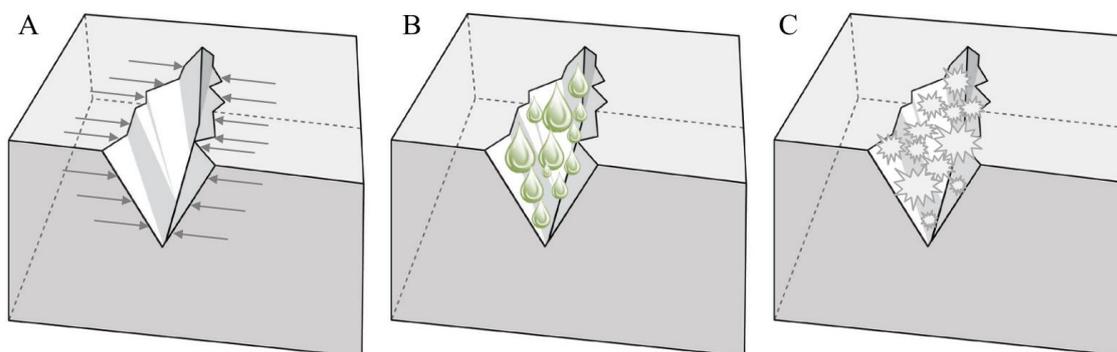
teor relativamente elevado de partículas de cimento não hidratadas, enquanto a formação de carbonato de cálcio é a causa mais provável de auto cicatrização em idades posteriores (ALGHAMRI; KANELLOPOULOS; AL-TABBAA, 2016; DU *et al.*, 2019; GARCÍA CALVO *et al.*, 2017).

Para se conseguir uma auto cicatrização eficaz, a água é essencial e a largura das fissuras é limitada a menos de 100  $\mu\text{m}$  e de preferência a menos de 50  $\mu\text{m}$ . Alguns estudos têm sido realizados para promover a cura autógena por restrição da largura da fenda ou com fornecimento contínuo de água (ALGHAMRI; KANELLOPOULOS; AL-TABBAA, 2016). Segundo García Calvo *et al.* (2017), é bem conhecido que os concretos de alto desempenho têm certa capacidade de autocura, para fissuras menores que 30  $\mu\text{m}$ , devido à presença de partículas de cimento não hidratadas com reatividade latente que são ativadas em presença de umidade na fissura.

A cura autógena é mais eficaz quando a largura da fissura é restrita ou quando é possível conseguir fechar a fissura (Figura 2A). Como a água é sempre necessária para que ocorra a cura autógena, o fornecimento de água é outro fator de melhoria (Figura 2B). Para concluir, melhorando a possibilidade de hidratação ou cristalização contínua também promove a cura autógena (Figura 2C) (VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013).

Figura 2 – Abordagens intrínsecas de auto cicatrização.

Melhor cura autógena pela restrição da largura da fenda (A); fornecimento de água (B); melhor hidratação e cristalização (C).



Fonte: Van Tittelboom; De Belie (2013).

A auto cicatrização é na verdade um fenômeno antigo e bem conhecido para o concreto, pois possui algumas propriedades naturais de cura autógena. Devido à hidratação contínua de minerais clínquer ou carbonatação do hidróxido

de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), as fissuras podem cicatrizar após algum tempo. Entretanto, a cura autógena é limitada a pequenas fissuras, só é eficaz quando há água disponível e é difícil de controlar. Ainda assim, o concreto pode ser modificado para construir uma cura autônoma das fissuras (DU *et al.*, 2019; VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013).

#### 2.1.2.2 Auto cicatrização com base em aditivos minerais

A auto cicatrização dessa classe pode ser atribuída a reações de aditivos minerais em materiais cimentícios. Esses minerais são adicionados no concreto durante a mistura. Depois que o concreto fissura, parte desses aditivos minerais que não reagiram estão presentes nas superfícies das fissuras. Quando a água penetra nas rachaduras, esses aditivos minerais começam a reagir com a água. Espera-se que as rachaduras sejam preenchidas com produtos de reação. Atualmente, a auto cicatrização com base em aditivos minerais pode ser categorizada em dois grupos: aditivo expansivo e aditivo cristalino (HUANG *et al.*, 2016; ROIG-FLORES *et al.*, 2015).

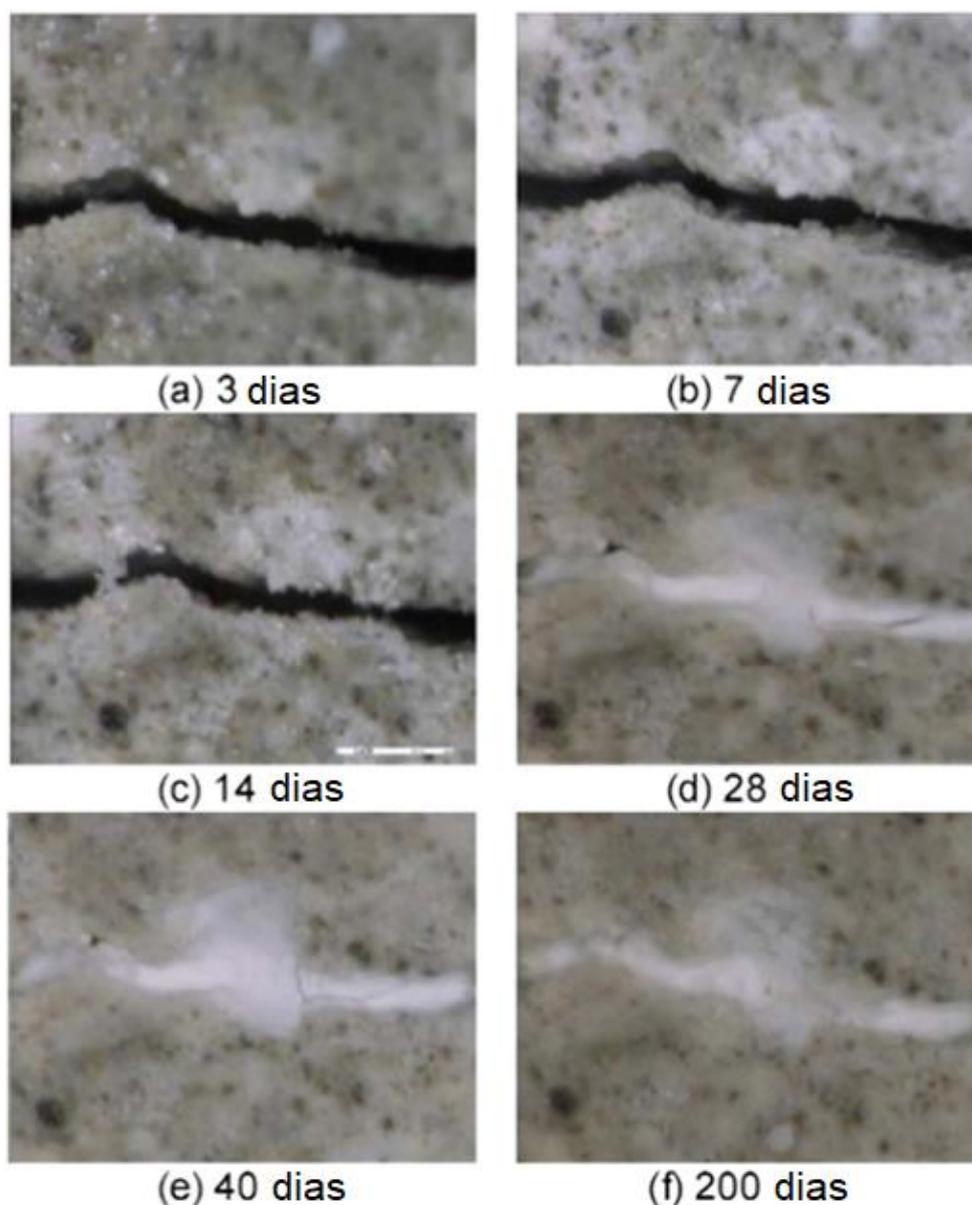
Com o aditivo expansivo, o volume dos produtos de reação é maior do que o do próprio aditivo e a razão de expansão depende da composição do aditivo. Com relação ao aditivo cristalino, seus componentes podem reagir com hidróxido de cálcio para formar produtos cristalinos. Dentre esses, um material cimentício sintético, que contém sílica reativa e alguns catalisadores cristalinos, teve destaque. Foi relatado que esse aditivo mineral leva a uma melhora notável da impermeabilidade das fissuras devido à auto cicatrização (Figura 3). Os materiais de cada categoria estão listados na Tabela 2 (HUANG *et al.*, 2016; QURESHI; KANELLOPOULOS; AL-TABBAA, 2019).

Tabela 2 – Aditivos minerais para auto cicatrização relatadas na literatura

<b>Categoria</b>	<b>Materiais</b>
Expansivo	Sulfoaluminato de cálcio ( $4\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_3$ )
	Cal viva ( $\text{CaO}$ )
	Anidrita ( $\text{CaSO}_4$ )
	Agentes expansores unidos
	Bentonita
Cristalino	Compostos de dióxido de silício, hidróxido de silicato de alumínio e sódio e argila montmorilonita
	Tipos de carbonatos, ou seja, $\text{NaHCO}_3$ , $\text{Na}_2\text{CO}_3$
	Talco em pó Silicato de sódio

Fonte: adaptado de Huang et al. (2016).

Figura 3 – Evidência experimental de auto cicatrização baseada em aditivo mineral.



Fonte: adaptado de Huang et al. (2016).

O uso de aditivos minerais como agentes de auto cicatrização tem algumas vantagens. Por exemplo, como alguns minerais são capazes de reagir intensamente com água, a auto cicatrização de fissuras acontece rapidamente. Além disso, devido ao seu caráter expansivo, o aditivo expansivo pode definitivamente melhorar a eficiência da auto cicatrização (HUANG *et al.*, 2016; QURESHI; KANELLOPOULOS; AL-TABBAA, 2019).

No entanto, existem alguns problemas técnicos nesse método. Se os minerais são adicionados diretamente nas misturas de concreto sem qualquer proteção, uma vez que entram em contato com a água durante a mistura de concreto, eles começam a reagir mediatamente. Como resultado, estes minerais adicionados são consumidos antes de fissurar. Além disso, quando um aditivo expansivo é usado, a expansão sempre ocorre no interior da matriz de concreto, o que pode causar danos. Portanto, quando o aditivo mineral é usado para realizar a auto cicatrização, o encapsulamento do aditivo é necessário (HUANG *et al.*, 2016; MINNEBO, P; HEMELRIJCK, 2015; WHITE *et al.*, 2001).

O encapsulamento é uma das técnicas mais comuns para introduzir agentes de cura no concreto. As microcápsulas são micropartículas que consistem em uma embalagem que envolve uma carga (AL-TABBAA *et al.*, 2019; SIDIQ; GRAVINA; GIUSTOZZI, 2019).

### 2.1.2.3 Auto cicatrização com base em bactérias

A ideia de auto cicatrização baseada em bactérias é utilizar as mesmas para promover a precipitação de carbonato de cálcio nas fissuras. A precipitação do carbonato de cálcio pode ser causada por várias vias metabólicas, como a hidrólise da ureia e a oxidação de ácidos orgânicos (HUANG *et al.*, 2016; WIKTOR; JONKERS, 2015).

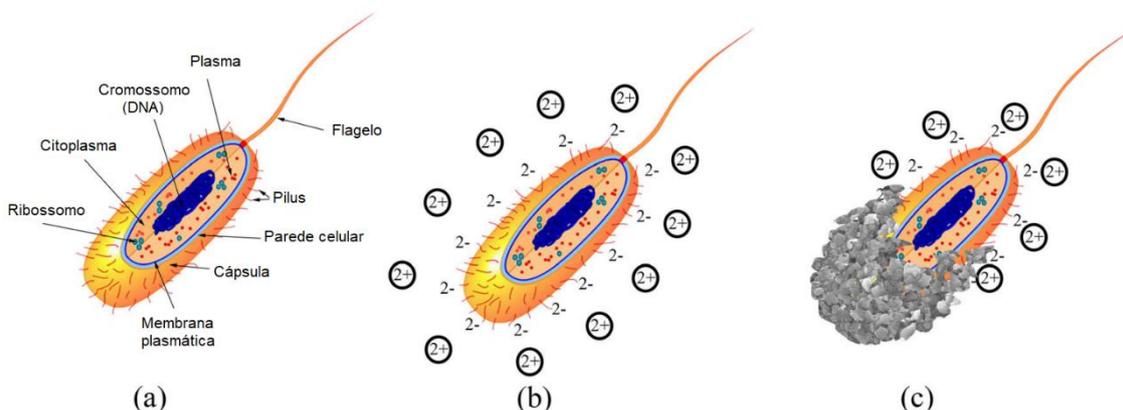
Em comparação com as outras vias de geração de carbonato, a hidrólise da ureia apresenta várias vantagens: pode ser facilmente controlada e tem potencial para produzir grandes quantidades de carbonato em um curto espaço de tempo. Catalisada por meio da urease, a ureia é degradada em carbonato e amônio e, conseqüentemente, aumenta o valor do pH, bem como a concentração de carbonato no ambiente bacteriano. Um mol de ureia é hidrolisado intracelularmente em 1 mol de amônia e 1 mol de carbonato, que hidrolisa

espontaneamente para 1 mol de amônia e ácido carbônico. Esses produtos atingem posteriormente o equilíbrio na água para formar bicarbonato e 2 mol de amônio e íons de hidróxido (ALAZHARI *et al.*, 2018; HUANG *et al.*, 2016).

Na presença de íons de cálcio, o carbonato de cálcio é precipitado, uma vez que um certo nível de supersaturação é atingido. Por causa da carga negativa da parede celular, os íons de cálcio são atraídos (Figura 4). Como resultado, os cristais precipitam na célula bacteriana. Além disso, a precipitação também ocorre na fase líquida (HUANG *et al.*, 2016; ZHANG *et al.*, 2017).

Figura 4 – Auto cicatrização através de bactéria.

(a) estrutura bacteriana; (b) parede celular com carga negativa e presença de íons com carga positiva; (c) produção biomineral por meio de íons de ligação à parede celular.



Fonte: adaptado de Seifan; Samani; Berenjian (2016).

Outra via metabólica para a produção de carbonato de cálcio é a oxidação de ácidos orgânicos. Em comparação com a hidrólise da ureia, que produz amônio excessivo, a oxidação de ácidos orgânicos tem menor impacto ambiental. Além disso, durante a precipitação do carbonato de cálcio por essa via metabólica, também é produzido dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). O dióxido de carbono produzido também pode reagir com a portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), que é quantitativamente um importante produto da hidratação do cimento Portland, para formar mais carbonato de cálcio (GUPTA; PANG; KUA, 2017; HUANG *et al.*, 2016).

#### 2.1.2.4 Auto cicatrização com base em agentes adesivos

O endurecimento dos agentes adesivos nas fissuras tem o potencial de selar as rachaduras e conectar ambas as superfícies de rachaduras. Estes agentes adesivos podem ser um agente com um, dois ou mais componentes. Os processos de endurecimento variam de acordo com as propriedades do agente (HUANG *et al.*, 2016; VAN TITTELBOOM *et al.*, 2011).

O epóxi é um dos agentes adesivos frequentemente utilizados. Em alguns ensaios, um epóxi de dois componentes foi encapsulado e pré-ensado no concreto. Quando as cápsulas foram quebradas pelas rachaduras, ambos os componentes do epóxi foram liberados e misturados. Estes dois componentes então reagiram e endureceram, curando as fissuras. Porém, a reação pode não dar certo, porque a proporção destes dois componentes não pode ser controlada. Também foi relatado que o epóxi de um componente, utilizando tubos de vidro selados, é mais eficaz para a auto cicatrização. Depois que os tubos de vidro foram quebrados pelas rachaduras, o epóxi foi liberado e exposto ao ar, ele começou a endurecer e finalmente reparou as rachaduras de forma eficaz (HUANG *et al.*, 2016; JOSEPH *et al.*, 2010; WHITE *et al.*, 2001).

O metilmetacrilato (MMA) é outro agente adesivo com dois ou mais componentes que pode ser utilizado. Em comparação com o epóxi de dois componentes, o MMA tem uma viscosidade menor e, portanto, a mistura dos componentes é melhor. No entanto, como a viscosidade do MMA é baixa, ele pode facilmente vazar para fora das fissuras. Este vazamento pode diminuir a eficiência de auto cicatrização. Para superar este problema, foi aplicado poli metilmetacrilato (PMMA) com maior viscosidade, realocando o MMA como um agente de cura (HUANG *et al.*, 2016; VAN TITTELBOOM *et al.*, 2011).

O ciano acrilato também tem sido empregado como agente adesivo. Por causa de sua viscosidade baixa, é capaz de penetrar na matriz. Como resultado, ele pode conectar fortemente as superfícies da fenda. Além disso, pode endurecer em pouco tempo após a exposição ao ar (HUANG *et al.*, 2016; JOSEPH *et al.*, 2010; LI; LIM; CHAN, 1998).

Além dos agentes acima mencionados, foram utilizados outros agentes de cura como o silício e o óleo de tungstênio. Em geral, a eficiência da auto cicatrização depende principalmente do tipo de agente adesivo utilizado. Os

agentes de um único componente são mais fáceis de operar e sua eficiência é maior do que a de dois ou múltiplos componentes. Normalmente, os agentes adesivos fazem com que ambas as superfícies de fissuras se unam fortemente e, portanto, levam a uma boa recuperação das propriedades mecânicas do concreto (HUANG *et al.*, 2016).

## 2.2 AGENTES QUÍMICOS QUE POTENCIALIZAM A CICATRIZAÇÃO

Os principais agentes químicos foram citados na Tabela 2 e neste item estão descritas as técnicas comuns para inserção de agentes químicos no concreto. Também serão apresentadas as vantagens e desvantagens de cada sistema (HUANG *et al.*, 2016).

### 2.2.1 Como inserir o agente químico no concreto

O princípio é armazenar pequenas quantidades de um agente de cura no concreto. Assim, quando uma fissura atravessa o recipiente do agente de cura, ele é capaz de ficar exposto, permitindo a interação entre o ambiente e ocasionando o fechamento da fissura. Baseado neste princípio, dois sistemas autônomos podem ser utilizados para a inserção desse agente químico: o vascular ou o capsular (MINNEBO *et al.*, 2017; VAN TITTELBOOM *et al.*, 2016).

Tanto o sistema de auto cicatrização baseado em cápsulas quanto o vascular têm suas próprias vantagens. Um sistema vascular, uma rede de tubos embutidos no concreto, é mais adequado para estruturas sujeitas a cargas cíclicas, onde podem aparecer mais e maiores rachaduras. Como esta técnica pode permitir o fechamento de múltiplas fissuras. No sistema de cápsulas são introduzidas no concreto uma série de pequenas cápsulas contendo agente de cura. Isto é mais adequado para integrar com estruturas onde se formam numerosas rachaduras pequenas devido ao aumento lento das cargas (MINNEBO *et al.*, 2017).

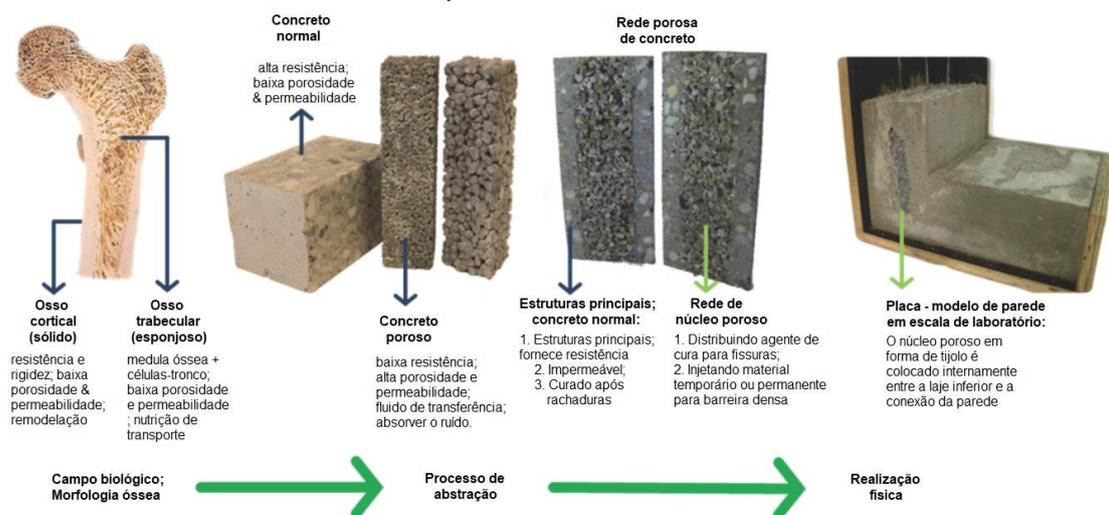
A pesquisa mais moderna utiliza cápsulas de vidro no concreto, mas o vidro tem certas desvantagens, tais como um alto custo de produção, as cápsulas se rompem quando introduzidas durante o processo de mistura ou fundição e a longo prazo ocorrem reações álcalis-sílica indesejadas entre o

concreto e o vidro, degradando as propriedades das cápsulas de vidro e do concreto circundante. Especialmente por causa deste último, o vidro não é o material ideal a ser usado para o concreto auto cicatrizante e materiais alternativos devem ser investigados (MINNEBO *et al.*, 2017).

### 2.2.1.1 Sistema vascular

A auto cicatrização vascular é inspirada pelo sistema de vasos sanguíneos. As vantagens são que volumes maiores de agente de cura estão disponíveis e que tal sistema pode ser conectado ao exterior, permitindo (re) encher ou substituir o agente de cura e assim tirar a vida útil do agente de cura da equação (SANGADJI, 2015). Joseph *et al.* (2010) investigaram uma abordagem vascular para o concreto através da incorporação de tubos de vidro boro silicato dentro de vigas de concreto com um suprimento curvo aberto saindo da estrutura em um dos lados. Sangadji (2015) abordou este assunto incorporando uma rede porosa no interior do concreto (Figura 5). Para permitir que o agente de cura flua através da rede vascular, bombas e/ou pressão atmosférica podem ser usadas.

Figura 5 – Transformação de ideias da rede porosa de concreto seguindo a abordagem de design avançado, selecionando o osso como modelo biológico de processo de cura.



Fonte: adaptado de Sangadji (2015).

Um sistema vascular, uma rede de tubos embutidos no concreto, é mais adequado para estruturas sujeitas a cargas cíclicas, onde podem aparecer mais e maiores rachaduras. Como esta técnica pode permitir a auto cicatrização de múltiplas fissuras (MINNEBO *et al.*, 2017).

#### 2.2.1.2 Sistema capsular

O encapsulamento é uma das técnicas mais comuns para introduzir agentes de cura no concreto. Diversos materiais estão disponíveis para fabricar cápsulas e agentes de cura, obtendo assim diferentes eficiências auto cicatrizantes. Para o encapsulamento, o requisito fundamental é ter resistência mecânica suficiente para suportar as forças internas no concreto e o agente de cura dentro da cápsula tem que ser de baixa viscosidade para ser liberado eficientemente dentro da fenda. O desempenho do processo de cura do encapsulamento é também uma função do diâmetro da cápsula, da espessura da casca e da textura da face (SIDIQ; GRAVINA; GIUSTOZZI, 2019).

As microcápsulas são micropartículas que consistem em uma embalagem que envolve uma carga, que pode ser sólida, líquida ou gasosa, e serve para uma ampla gama de aplicações em diferentes setores. Desde que White *et al.* (2001) introduziram o uso de micro encapsulados para auto cicatrização de polímeros em 2001, a auto cicatrização autônoma têm atraído muita atenção. Microcápsulas incorporadas em materiais imbuem a capacidade de uma resposta localizada aos danos após a ruptura, e posterior liberação e ativação do agente de cura (AL-TABBAA *et al.*, 2019).

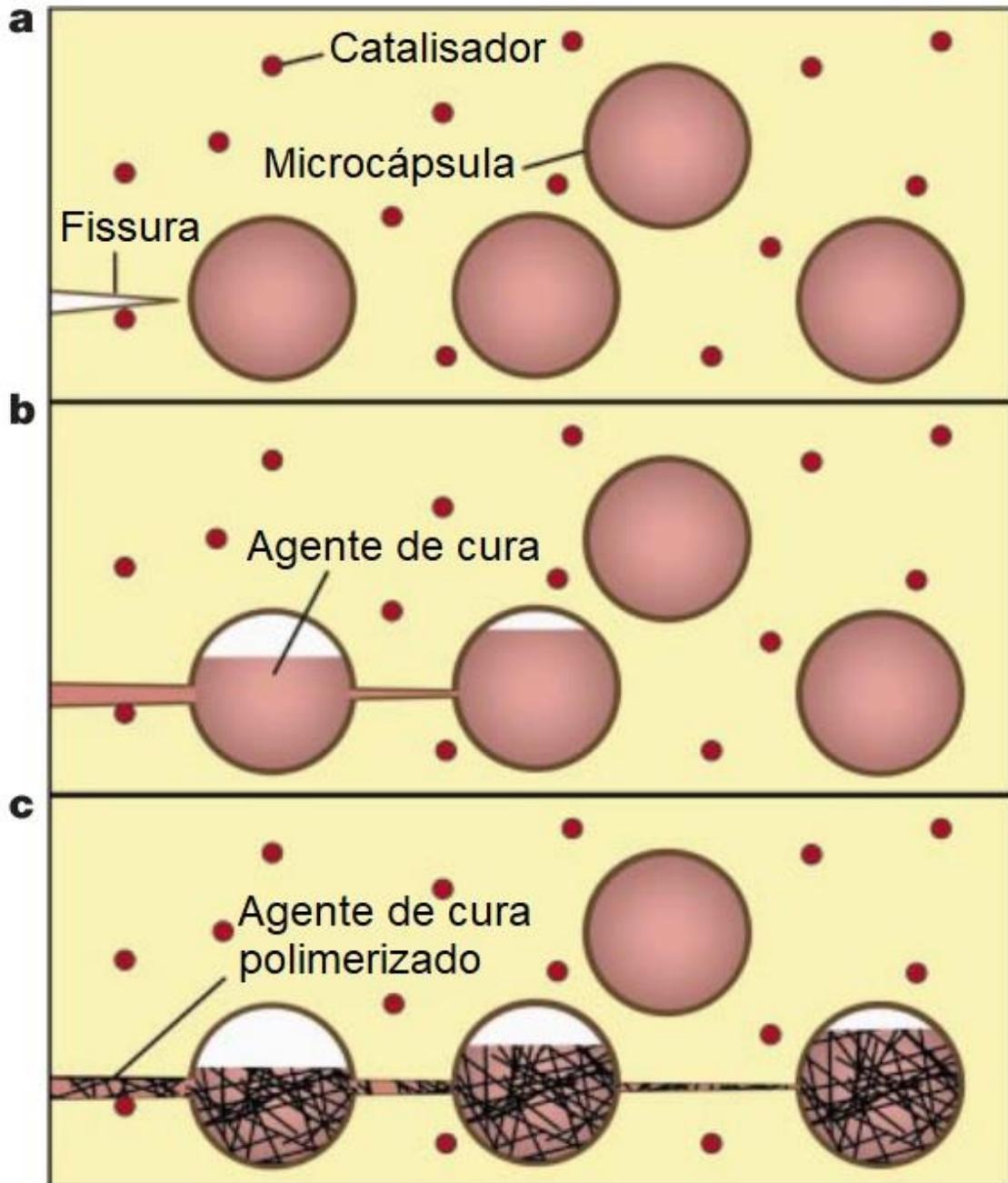
O sistema capsular é considerado mais prático e econômico, e sua eficiência de cicatrização pode ser personalizada por meio da introdução do tamanho e dosagem adequados das cápsulas. A taxa de agitação durante o processo de síntese é um dos principais fatores que controlam o diâmetro das cápsulas. Uma taxa de agitação mais alta fornece uma força de cisalhamento maior que facilita a dispersão das gotas do agente de cura na emulsão, o que resulta em menor diâmetro das cápsulas e distribuição de tamanho mais estreita (ARAÚJO *et al.*, 2018).

A auto cicatrização autônoma via microencapsulação ocorre quando as fissuras se propagam no concreto, rompendo as microcápsulas dispersas

aleatoriamente e liberando o agente de cura, como é demonstrado na Figura 6. Certos critérios, como proteção do agente de cura por um longo tempo (até vários anos) e a capacidade de liberar o conteúdo na formação de rachaduras, devem ser atendidos pelo material da cápsula. Similar ao encapsulamento, o mecanismo de auto cicatrização dependerá da natureza do agente de cura; ou seja, ele pode reagir com um ativador (fornecido como um sistema de duas partes, por exemplo, sistema epóxi de duas partes), o concreto (incluindo produtos de hidratação e carbonatação, por exemplo, cal) ou o meio ambiente (ar, umidade, ciano acrilatos). Assim, a reação ocorre, resultando nos produtos que preenchem, selam ou curam a trinca (AL-TABBAA *et al.*, 2019); ARAÚJO *et al.*, 2018).

Figura 6 – O conceito de cura autônoma.

Um agente de cura micro encapsulado é incorporado a uma matriz estrutural composta contendo um catalisador capaz de polimerizar o agente de cura. (a) formam-se fissuras na matriz onde quer que ocorra dano; (b) a fenda rompe as microcápsulas, liberando o agente de cura no plano da fenda através da ação capilar; (c) o agente de cura entra em contato com o catalisador, desencadeando a polimerização que liga as faces da fenda fechadas.



Fonte: adaptado de White *et al.* (2001).

## 2.3 RESULTADOS DE OUTROS EXPERIMENTOS

Neste tópico, estão demonstrados resultados de experimentos similares aos que serão propostos por esta pesquisa. Cada título representa um experimento de um artigo diferente, sua metodologia e seus resultados.

### **2.3.1 Avaliação de Mecanismos de Auto Cicatrização em Concreto com Microcápsulas de Silicato de Sódio de Parede Dupla**

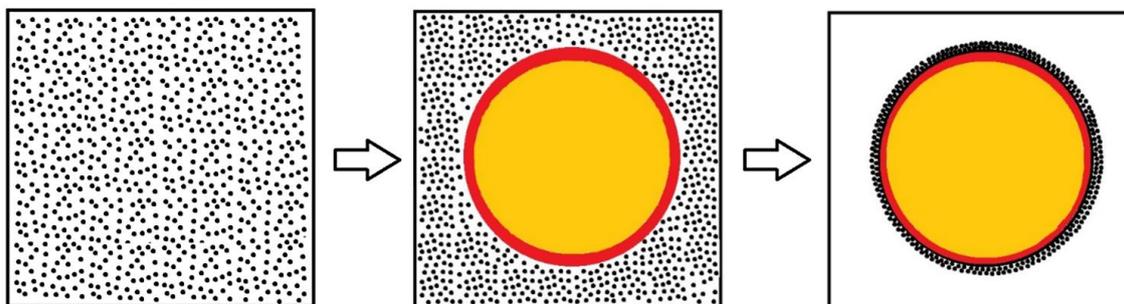
O objetivo do estudo foi avaliar as microcápsulas de parede dupla contendo agente de cura, que têm maior durabilidade a altas temperaturas em comparação com as microcápsulas de parede simples. Estas microcápsulas foram preparadas em um processo de lote único contendo silicato de sódio como agente de cura e poliuretano e formaldeído de ureia como casca. As microcápsulas foram incorporadas em vigas de concreto auto cicatrizante. O processo de cicatrização em amostras de concreto foi monitorado e quantificado usando um testador digital de indicação não destrutivo ultrassônico portátil com um gerador com uma amplitude de 500 V e produzindo ondas de 54 kHz (MOSTAVI *et al.*, 2015).

Os seguintes ingredientes foram usados para preparar microcápsulas: silicato de sódio líquido como material principal, Zemac-400 em pó (material usado para encapsulamento de micropartículas), ureia, cloreto de amônio e resorcinol foram entregues como pó e usados como recebidos. Solução de formaldeído, pré-polímero comercial de poliuretano e Desmodur L 75 também foram utilizados. Todos os materiais foram armazenados e utilizados a 25°C (MOSTAVI *et al.*, 2015).

O processo de preparação da microcápsula inclui três etapas principais, como visto na Figura 7. A primeira etapa de preparação foi colocar o material da camada externa (ureia), que irá cobrir a superfície da camada interna. A segunda etapa foi a microencapsulação interfacial do agente de cura usando poliuretano disponível comercialmente. Durante esta etapa, uma mistura de silicato de sódio e PU foi dividida em gotículas de micro diâmetro nas quais o PU sobe até a superfície da gota e forma a camada interna. A terceira etapa foi cobrir a camada interna com a segunda casca aglomerando o material da casca (ureia). Este

aglomerante é acionado pela adição de formaldeído à solução (MOSTAVI *et al.*, 2015).

Figura 7 – Preparação de microcápsula de parede dupla.



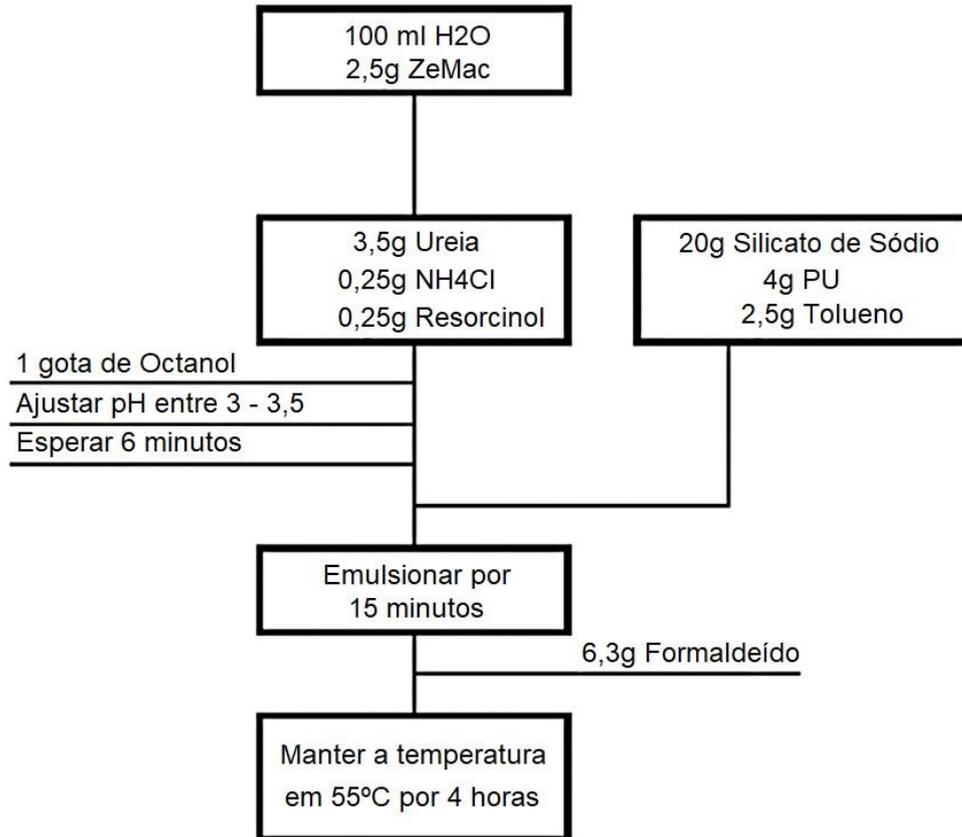
Fonte: adaptado de Mostavi *et al.* (2015).

A Figura 8 mostra o procedimento de preparação de microcápsulas de parede dupla. Na primeira etapa, foi adicionado silicato de sódio ao PU, que já estava dissolvido em tolueno. Simultaneamente, Zemac-400 foi adicionado à água deionizada em um copo no qual o medidor de pH foi fixado para medir continuamente o pH. O misturador foi ajustado para 800 rpm para misturar o Zemac-400 com água e ureia, que é um dos componentes da camada externa do material; resorcinol e cloreto de amônio foram então adicionados à mistura de água e Zemac-400. O pH foi ajustado entre 3 e 3,5 pela adição de gotas de HCl e solução de NaOH. Uma gota de Octanol foi acrescentada para remover bolhas de ar. A solução foi misturada por 6 minutos. Na segunda etapa, o misturador foi ajustado para 1.000 rpm e foi adicionado lentamente à solução e o pH foi ajustado para variar entre 3 e 3,5 pela adição de HCl ou NaOH. Após 15 minutos de agitação, a formação da segunda camada das microcápsulas foi acionada pela adição lenta de formaldeído à solução. Para completar a formação das duas camadas, a taxa de agitação foi reduzida para 250 rpm e a temperatura da solução foi aumentada para 55°C durante 4 h. Finalmente, a solução foi resfriada até a temperatura ambiente e filtrada com um peneira de 0,22  $\mu\text{m}$  (MOSTAVI *et al.*, 2015).

O tamanho, morfologia e forma das microcápsulas são influenciados por vários fatores, incluindo a taxa de cisalhamento/agitação, temperatura, pH, etc. Estes parâmetros podem afetar o diâmetro e a espessura da casca das microcápsulas preparadas. Essas características foram examinadas pelo microscópio eletrônico de varredura (MEV). Como mostrado na Figura 9, as

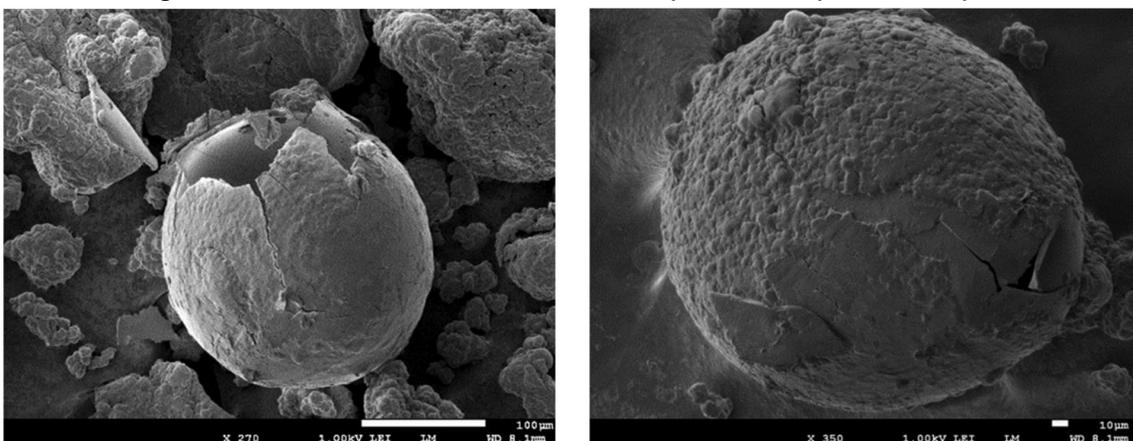
microcápsulas têm forma esférica e superfície relativamente áspera, que é a morfologia típica das camadas. A morfologia da superfície das microcápsulas é uma função das propriedades do material do núcleo e do processo de microencapsulação da casca. A superfície rugosa das microcápsulas aumenta suas áreas de superfície e aumenta a adesão (MOSTAVI *et al.*, 2015).

Figura 8 – Procedimento de preparação da microcápsula.



Fonte: adaptado de Mostavi *et al.* (2015).

Figura 9 – Fotos do MEE das microcápsulas de parede dupla.



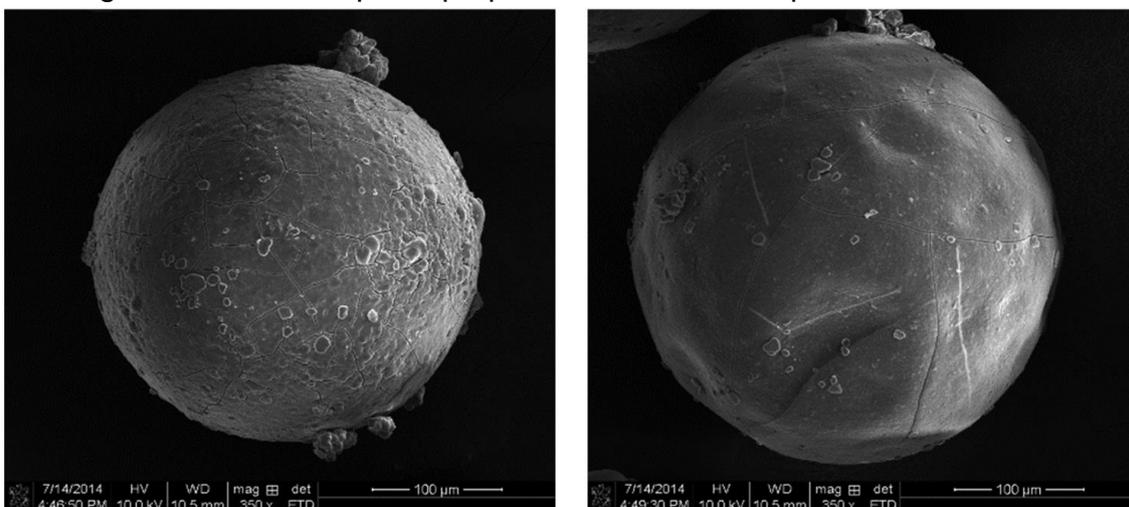
Fonte: adaptado de Mostavi *et al.* (2015).

A variação dos valores de pH teve um efeito significativo sobre a qualidade da casca das microcápsulas preparadas. O nível de pH da solução é o fator chave de formação da casca externa, uma vez que a ureia e o formaldeído não reagem em ambientes de alta alcalinidade. A investigação das imagens do MEE mostrou que as microcápsulas preparadas com valores de pH mais baixos têm menos rachaduras em suas conchas. O aumento no valor de pH na preparação das microcápsulas de formaldeído de ureia diminui a espessura da casca das microcápsulas (MOSTAVI *et al.*, 2015).

A formação completa de microcápsulas foi significativamente afetada pela temperatura de cura. As imagens do MEE indicavam que o número de microcápsulas com formação completa de conchas aumenta significativamente a temperaturas mais altas. Além disso, a casca das microcápsulas preparadas a temperaturas mais baixas parecia não estar consolidada o suficiente para proteger durante o escoamento (MOSTAVI *et al.*, 2015).

Considerando o efeito de cada parâmetro sobre a morfologia das microcápsulas preparadas, o procedimento ideal de preparação consiste em um valor de pH de 3,1, taxa de agitação de 1.000 rpm, e temperatura de cura de 57°C. A Figura 10 mostra as microcápsulas preparadas com base no procedimento ideal. As microcápsulas preparadas com o procedimento proposto foram incorporadas nos espécimes de concreto auto cicatrizante, a fim de quantificar a taxa de cura (MOSTAVI *et al.*, 2015).

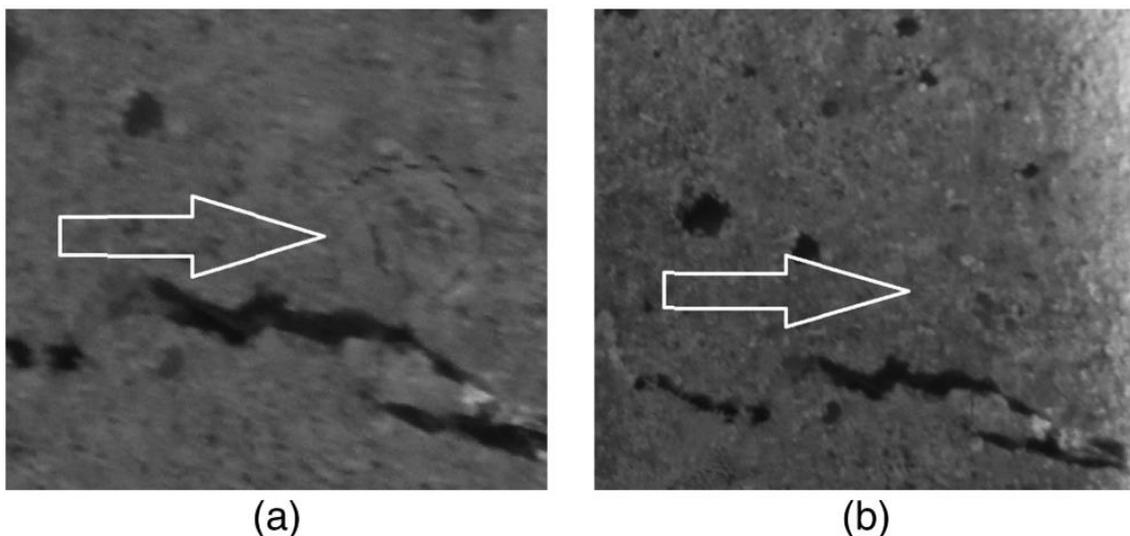
Figura 10 – Microcápsula preparada com base no procedimento ideal.



Fonte: adaptado de Mostavi *et al.* (2015).

Algumas amostras foram separadas durante os testes para observação visual da cura das fissuras. A Figura 11 mostra fotos da inspeção visual de uma amostra, tiradas antes e depois de 9 dias de cura para o concreto preparado com microcápsulas de 2,5% (MOSTAVI *et al.*, 2015).

Figura 11 – Espécime de concreto com 2,50% de microcápsulas.  
(a) rachadura fina pode ser vista no dia 2; (b) rachadura foi completamente curada no dia 9.



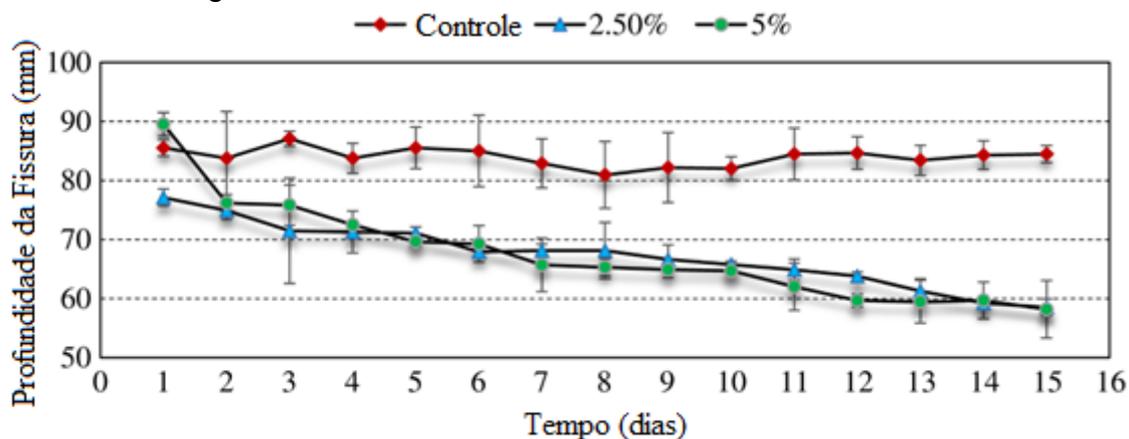
Fonte: adaptado de Mostavi *et al.* (2015).

Como esperado, a ocorrência do processo de cicatrização só pôde ser vista nas fissuras finas. Embora estas observações visuais possam fornecer evidências do processo de cura, elas não quantificam a taxa de cura das rachaduras internas (MOSTAVI *et al.*, 2015).

As amostras produzidas para o experimento em si foram de 0 (controle), 2,5 e 5,0% de microcápsulas, em relação ao peso do cimento usado. A Figura 12 indica que a profundidade inicial da fissura de cada amostra era de 85, 77, e 90 mm, respectivamente. A inclinação negativa das amostras de 2,5 e 5% é um indicador do processo de cura durante o período de duas semanas. O tamanho da fissura na amostra com 2,5% de microcápsulas era de 77 mm de profundidade e após duas semanas de cicatrização, seu tamanho foi reduzido para 58 mm de profundidade (19 mm de cicatrização). Em uma tendência semelhante, o tamanho das fissuras nas amostras contendo 5,0% de microcápsulas foi inicialmente de 90 mm de profundidade e após duas semanas

de cicatrização, seu tamanho foi reduzido para 58 mm de profundidade (cicatrização de 35 mm) (MOSTAVI *et al.*, 2015).

Figura 12 – Profundidade da fissura de cada amostra.

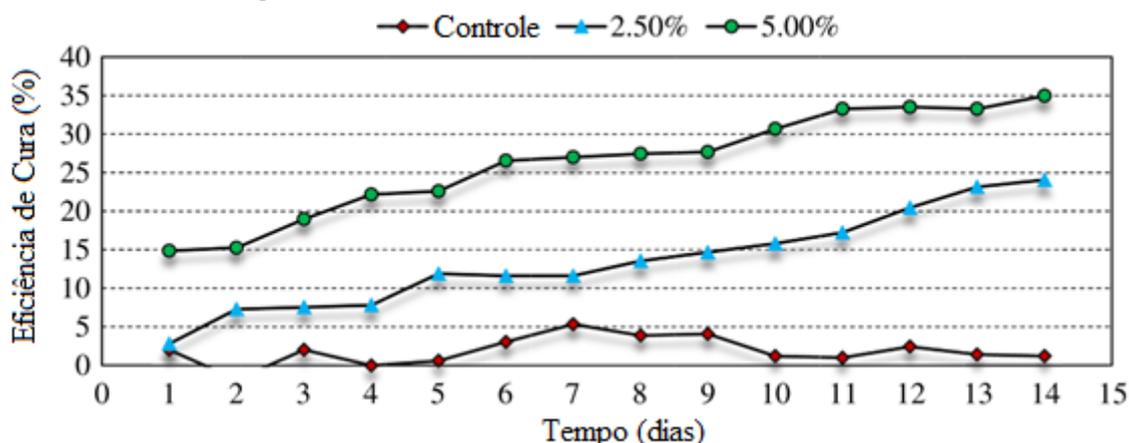


Fonte: adaptado de Mostavi *et al.* (2015).

A Figura 13 indica a eficiência do processo de cicatrização com base no comprimento das fissuras curadas durante as duas semanas observadas (MOSTAVI *et al.*, 2015). A eficiência da cura foi calculada para cada dia conforme a Equação (1):

$$EC (\%) = \frac{\text{prof. da fissura inicial} - \text{prof. da fissura no dia } n}{\text{prof. da fissura inicial}} \times 100 \quad (1)$$

Figura 13 – Eficiência de cura de cada amostra.



Fonte: adaptado de Mostavi *et al.* (2015).

A comparação dos resultados de 2,5 e 5,0% de amostras demonstra que a utilização de 5,0% de microcápsulas aumentará a taxa de cura. Também pode

ser observado que a inclinação mais acentuada dos espécimes contendo 5,0% de microcápsulas durante a primeira semana é um indicador de maior taxa de cicatrização (MOSTAVI *et al.*, 2015).

### **2.3.2 Primeira aplicação e desempenho no Reino Unido de concreto auto cicatrizante baseado em microcápsulas**

As microcápsulas utilizadas possuíam concha arábica de gelatina/goma contendo silicato de sódio como núcleo. O silicato de sódio estava em uma emulsão com óleo mineral e emulsificante e formava 42% da cápsula. As microcápsulas tinham um diâmetro médio de 290  $\mu\text{m}$  com um desvio padrão de 120  $\mu\text{m}$  e eram fornecidas em uma solução conservante. Possuíam propriedades mecânicas que inicialmente tinham um comportamento "emborrachado" dúctil, garantindo sua capacidade de sobrevivência durante a mistura do concreto, e depois se tornaram quebradiças e fáceis de fraturar, à medida que a água era removida da casca. Com base nos resultados de estudos laboratoriais relacionados sobre o efeito das microcápsulas nas propriedades do material fresco e endurecido e no potencial de cura das argamassas e do concreto, 8% de conteúdo de microcápsulas por volume de cimento foi selecionado para aplicação nos ensaios. Esta dosagem foi considerada um nível ótimo de cura, mostrou alta compatibilidade com a matriz da argamassa e teve efeitos negligenciáveis sobre a trabalhabilidade, tempo de fixação e desenvolvimento de força (AL-TABBAA *et al.*, 2019).

A composição da mistura de concreto está detalhada na Tabela 3. As microcápsulas foram primeiro lavadas com água e filtrado de sua solução conservante antes de ser adicionado diretamente na mistura pronta de concreto C40/50 usando uma betoneira de 120L. As microcápsulas foram adicionadas a 8% em volume do cimento, correspondendo a 2,67% em peso do cimento e 0,47% do total da mistura de concreto. Uma pequena quantidade de água foi utilizada para lavar as microcápsulas do recipiente e, como resultado, a relação efetiva água/cimento da mistura de concreto aumentou de 0,43 para 0,45 (AL-TABBAA *et al.*, 2019).

Tabela 3 – Composição por % de peso da mistura pronta de concreto C40/50 e as microcápsulas utilizadas no ensaio.

Material	Quantidade para amostras
Cimento	415 kg/m <sup>3</sup>
10mm de agregados de calcário	944 kg/m <sup>3</sup>
Finos de calcário (0-2mm)	396 kg/m <sup>3</sup>
Areia fina	393 kg/m <sup>3</sup>
Água	179 kg/m <sup>3</sup> (proporção de 0,43)
Aditivo plastificante	0,35 L / 100 kg de cimento
Aditivo retardador	0,1 L / 100 kg de cimento
Microcápsulas (chorume)	11,1 kg/m <sup>3</sup>

Fonte: adaptado de Al-Tabbaa *et al.* (2019).

O concreto auto cicatrizante usando silicato de sódio micro encapsulado foi utilizado em um painel de parede de contenção juntamente com um painel de concreto convencional para fins de comparação, conforme as Figuras 14 e 15. As paredes foram trincadas mecanicamente após 35 dias de cura e depois recarregadas e monitoradas para auto cicatrizante durante um período de 6 meses, usando permeabilidade ao ar, profundidade da trinca e medidas microscópicas de largura da trinca. Embora a adição de 8% de microcápsulas, por volume de cimento, tenha reduzido ligeiramente a resistência mecânica, a parede da microcápsula mostrou melhor redução da largura da trinca, redução da profundidade da trinca e recuperação da permeabilidade, confirmando a viabilidade em tempo real da cura baseada em microcápsulas (AL-TABBAA *et al.*, 2019). As conclusões do experimento foram:

1) A cura acelerada ao longo da fissura principal de 49% e 63% foi evidente já em 14 dias e 28 dias para a parede de concreto auto cicatrizante, em comparação com 14% e 36% respectivamente para o convencional.

2) A profundidade média da fenda também foi reduzida em 8% e 39% após 14 dias nas paredes de concreto convencional e auto cicatrizante, respectivamente, atingindo 20% e 58% no final do período de monitoramento.

3) Estes resultados foram ainda confirmados pela significativa recuperação da permeabilidade (quase superior a 2,5 ordens de magnitude) da parede de concreto auto cicatrizante.

4) Uma recuperação da força de 25% foi alcançada na parede de concreto auto cicatrizante, alcançando uma melhoria de 10% sobre o convencional.

5) Uma variação temporal da progressão da cura foi identificada em ambos os concretos, influenciando as observações finais. Observações

macroscópicas mostraram alguma abertura de fenda para ambas as paredes, acompanhando a redução inicial da largura da fenda. No entanto, a cicatrização ao final do período de monitoramento da parede de auto cicatrizante permaneceu significativamente maior em comparação com o convencional.

6) Imagens microscópicas e investigações microestruturais de amostras extraídas dos planos de fissuras sugeriram um mecanismo de auto cicatrização semelhante ao que foi observado em amostras de laboratório.

7) Os resultados do material extraído das fissuras nas faces da fenda mostraram produtos de carbonatação em ambos os casos e o aumento das quantidades de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) na parede de concreto auto cicatrizante, apoiando ainda mais as descobertas anteriores sobre a contribuição benéfica do silicato de sódio micro encapsulado.

Figura 14 – Armadura do painel de parede.



Fonte: adaptado de Al-Tabbaa *et al.* (2019).

Figura 15 – Representação dos elementos do painel da parede e indicação da fissura de 500mm de largura que será formada.



Fonte: adaptado de Al-Tabbaa *et al.* (2019).

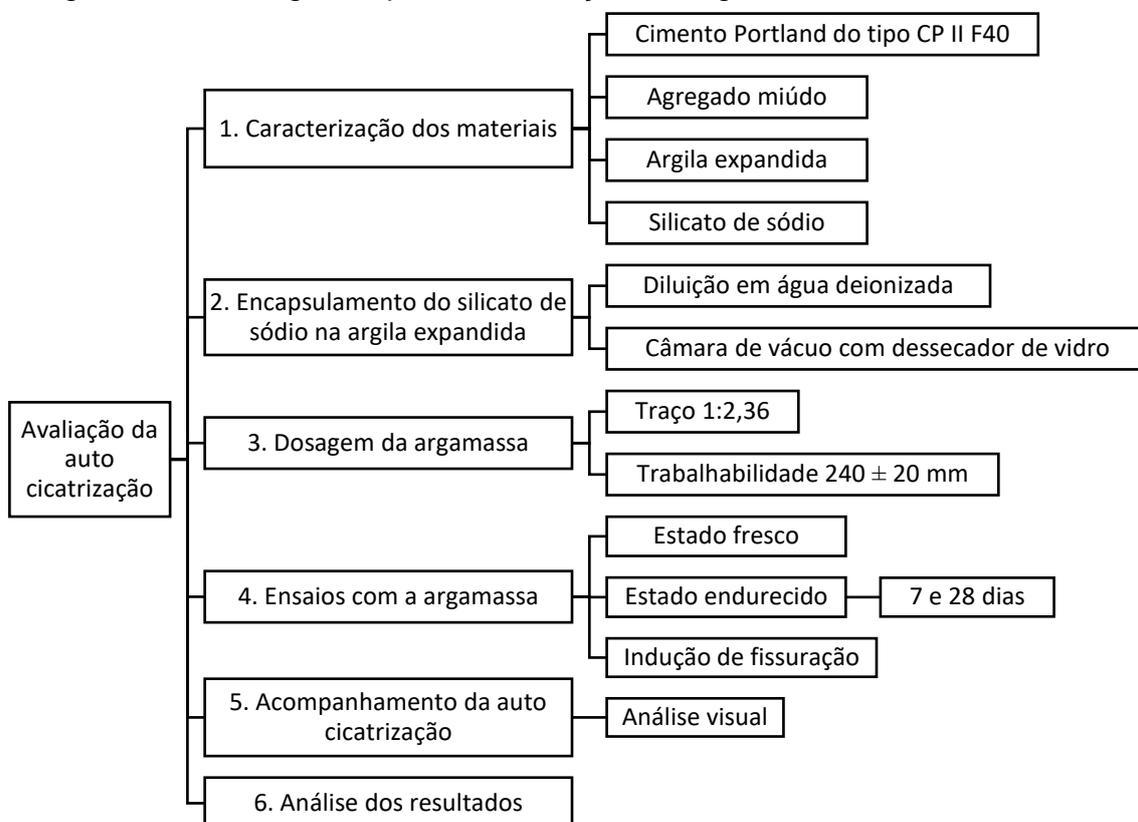
### 2.3.3 Avaliação das pesquisas

Conforme a pesquisa de Mostavi *et al.* (2015), é possível obter uma maior cicatrização do concreto com um aumento de microcápsulas de silicato de sódio. Já Al-Tabbaa *et al.* (2019) demonstrou que o concreto auto cicatrizante recuperou a resistência em 25%, teve uma cura acelerada ao longo de 14 dias, recuperando 49% da fissura e redução da permeabilidade.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental foi elaborado com o objetivo de analisar a auto cicatrização, sua eficiência e sua qualidade de cura. Foi utilizado o silicato de sódio como aditivo cristalizante, encapsulado, com a finalidade de identificar o seu desempenho na argamassa. Neste capítulo, estão apresentados os materiais e métodos que foram utilizados, sendo, primeiramente, apresentados os materiais necessários e, posteriormente, descritos os métodos de ensaios. A Figura 16 apresenta o fluxograma geral desta pesquisa.

Figura 16 – Fluxograma para a realização da argamassa auto cicatrizante.



Fonte: autor (2021).

#### 3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A pesquisa visa avaliar o comportamento da eficiência de cura das microcápsulas de silicato de sódio, analisando suas propriedades no estado fresco e no estado endurecido aos 7 e 28 dias. O produto resultante da mistura

foram corpos de prova de argamassa. A Tabela 4 mostra um planejamento dos ensaios realizados. Assim, foram empregados os seguintes materiais:

- 1) agregado miúdo natural: de rio;
- 2) agregado miúdo leve: argila expandida;
- 3) aglomerante: cimento Portland do tipo CP II F40;
- 4) aditivo para auto cicatrização: silicato de sódio.

Tabela 4 – Planejamento de ensaios da argamassa.

	<b>Ensaio</b>	<b>Métodos</b>
Estado Fresco	Determinação do índice de consistência	NBR 13276 (ABNT, 2016)
	Determinação de massa específica	NBR 9833 (ABNT, 2014)
Estado Endurecido	Resistência à compressão	NBR 5739 (ABNT, 2018b)
	Modulo de elasticidade	NBR 8522 (ABNT, 2017)
	Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica	NBR 9778 (ABNT, 2008)

Fonte: autor (2021).

Diante dos resultados dos ensaios, foram feitas análises comparativas da eficiência de cura do silicato de sódio nas argamassas realizadas. Para isso, as amostras obtidas foram submetidas a uma análise visual para verificar a significância dos resultados sobre a propriedade estudada.

## 3.2 MATERIAIS

Este tópico descreve os materiais que foram usados neste estudo e os métodos que foram aplicados para caracterizá-los. Cada material tem suas particularidades e passou por ensaios para uso posterior.

### 3.2.1 Aglomerante

No desenvolvimento deste estudo, para a execução da argamassa, foi usado o cimento Portland do tipo CP II F40 composto com filer. Este cimento não contém materiais pozolânicos que poderiam provocar alterações nos resultados da cristalização. Todas as características físico-químicas do aglomerante foram obtidas pelo fabricante do cimento atendendo os requisitos impostos pela NBR 16697 (ABNT, 2018), e estão apresentadas nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 – Especificações químicas do cimento CP II F40.

Ensaio	Resíduo insolúvel (%)	Perda ao fogo (%)	Óxido de magnésio (MgO) (%)	Trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> ) (%)
CP II F40	0,72	2,89	3,24	2,86
Requisitos Norma	≤ 7,5	≤ 12,5	-	≤ 4,5

Fonte: adaptado de Itambé (2020) e NBR 16697 (ABNT, 2018).

Tabela 6 – Especificações físicas e mecânicas do cimento CP II F40.

Ensaio	Expansão a quente (mm)	Tempo de pega (min)		Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Finura (resíduo na peneira 75 µm) (%)	Resistência à compressão (MPa)			
		Início	Fim			1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
CP II F40	0,54	172	230	3,04	0,02	23,6	38,2	44	52,8
Requisitos Norma	≤ 5,0	≥ 60	≤ 600	-	≤ 10,0	-	≥ 15	≥ 25	≥ 40

Fonte: adaptado de Itambé (2020) e NBR 16697 (ABNT, 2018).

### 3.2.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo natural utilizado foi adquirido em Bento Gonçalves (RS), com a Concesul. Suas propriedades físicas foram obtidas pelo fornecedor, determinadas através de ensaios específicos, como, ensaio de determinação da distribuição granulométrica de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), sendo determinado seu módulo de finura e sua dimensão máxima e ensaio de massa específica conforme a NBR NM 52 (ABNT, 2009).

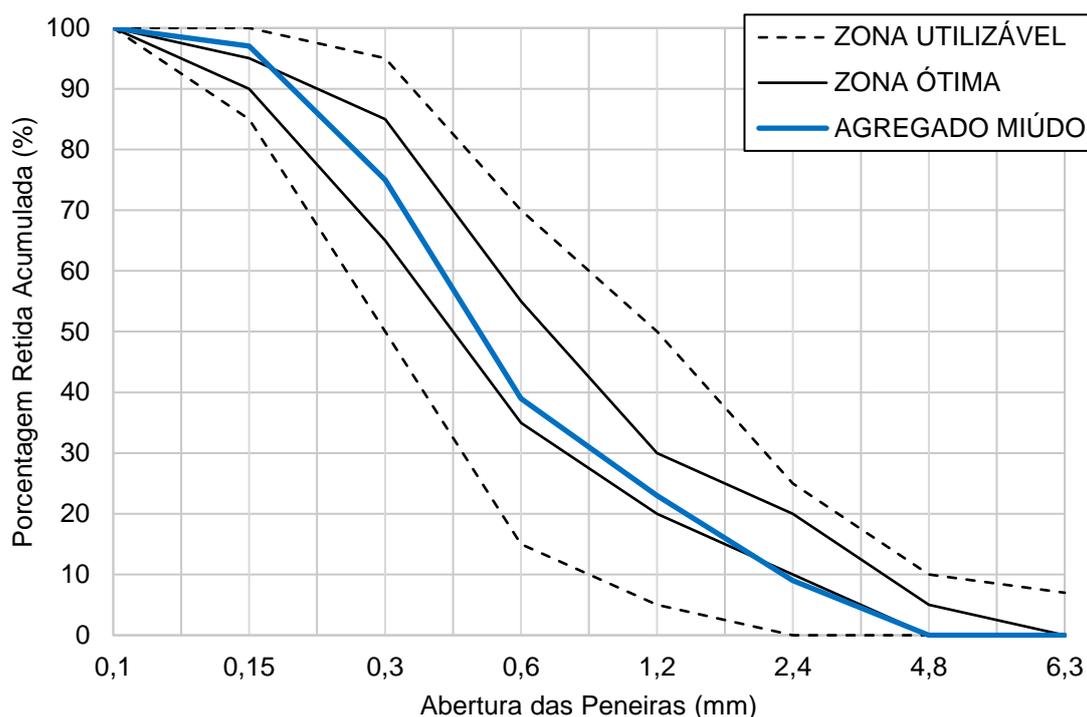
A Tabela 7 demonstra as propriedades do agregado miúdo natural obtidas dos ensaios. A Figura 17 apresenta a sua curva granulométrica.

Tabela 7 – Propriedades do agregado miúdo natural.

Característica	Resultado
Módulo de finura	2,42
Dimensão máxima característica (mm)	4,8
Pulverulento (< 0,075 mm) (%)	0,9
Material fino (< 0,30 mm) (%)	25
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,63

Fonte: Concesul (2021).

Figura 17 – Curva granulométrica do agregado miúdo natural.



Fonte: Concesul (2021).

### 3.2.3 Agregado miúdo leve

O agregado miúdo leve foi fornecido pela Cinexpan, de Várzea Paulista (SP). Suas propriedades físico-químicas foram dadas pelo fornecedor, conforme mostrado nas Tabelas 8 e 9.

Tabela 8 – Propriedades químicas do agregado miúdo leve.

Característica	Resultado
Silício (em SiO <sub>2</sub> )	63,19%
Alumínio (em Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	18,02%
Ferro (em Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	7,63%
Titânio (em TiO <sub>2</sub> )	0,92%
Cálcio (em CaO)	0,64%
Magnésio (em MgO)	3,26%
Sódio (em Na <sub>2</sub> O)	0,61%
Potássio (em K <sub>2</sub> O)	4,91%
Óxido de Fósforo (em P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,20%
Óxido de Manganês (em MnO)	0,08%
Óxido de Bário (em BaO)	0,09%
Perda ao fogo	0,20%

Fonte: Cinexpan (2021).

Tabela 9 – Propriedades físicas do agregado miúdo leve.

Característica	Resultado
Densidade aparente (kg/m <sup>3</sup> )	850 ± 10%
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,56
Classes granulométricas (mm)	0 - 5
Resistência mecânica	2,3 MPa ou 23,1 kgf/ cm <sup>2</sup>
Condutividade Térmica	0,10 a 0,16 W/(m.K)
Isolamento acústico	média 44 dB

Fonte: Cinexpan (2021).

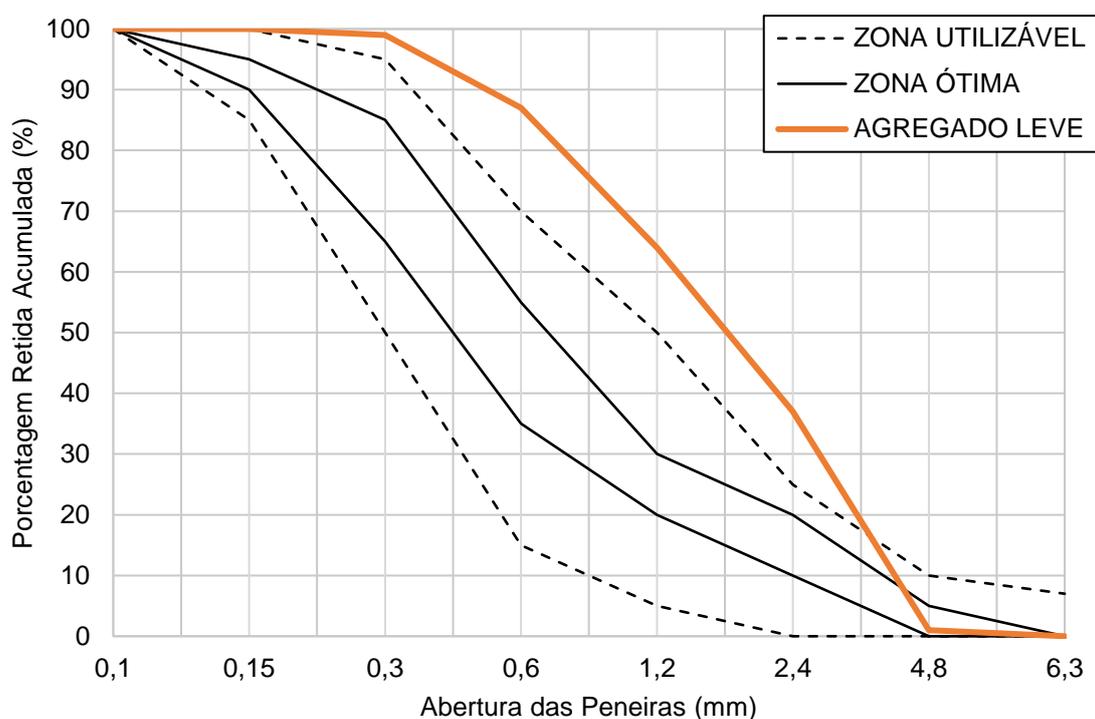
A determinação da distribuição granulométrica foi feito de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), sendo determinado seu módulo de finura e sua dimensão máxima. Foi realizada antes da inserção do silicato de sódio na argila expandida. A Tabela 10 demonstra as propriedades do agregado miúdo natural obtidas dos ensaios. A Figura 18 apresenta a sua curva granulométrica. O material da Cinexpan é demonstrado na Figura 19.

Tabela 10 – Propriedades do agregado miúdo leve.

Característica	Resultado
Módulo de finura	2,88
Dimensão máxima característica (mm)	6,3
Pulverulento (< 0,075 mm) (%)	0
Material fino (< 0,30 mm) (%)	1

Fonte: autor (2021).

Figura 18 – Curva granulométrica do agregado miúdo leve.



Fonte: autor (2021).

Figura 19 – Agregado miúdo leve, argila expandida 0500, da Cinexpan.



Fonte: autor (2021).

### 3.2.4 Água

A água que foi utilizada para a confecção dos corpos de provas é proveniente da concessionária CORSAN localizada em Bento Gonçalves (RS).

### 3.2.5 Silicato de sódio

Nesta pesquisa foi utilizado o silicato de sódio como adição em relação à massa do cimento. Ele foi inserido em um aditivo impermeabilizante, para produção das microcápsulas. A Tabela 11 apresenta a composição do silicato de sódio do fabricante SimoQuímica. A Figura 20 mostra o material.

Tabela 11 – Composição do silicato de sódio neutro.

Característica	Resultado	Especificação
Aspecto	Conforme	Líquido viscoso
Densidade °Bé	39,80	Entre 38,50 - 41,50
Massa específica	1,379	Entre 1,370 - 1,420 g/cm <sup>3</sup>
Viscosidade	496	Entre 250 - 500 cp
Óxido de Sódio	8,65	Entre 8,00 - 9,20
Óxido de Silício	27,53	Entre 26,00 - 29,50
R (SiO <sub>2</sub> ) / (Na <sub>2</sub> O)	3,18	Entre 3,00 - 3,35

Fonte: SimoQuímica (2021).

Figura 20 – Silicato de sódio, da SimoQuímica.

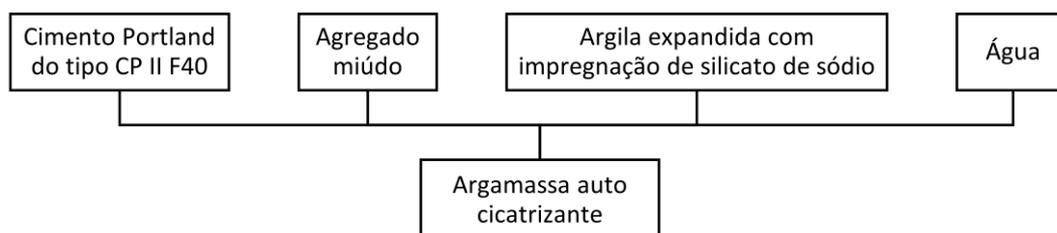


Fonte: autor (2021).

### 3.3 MÉTODOS

A produção da argamassa usou o traço de referência de 1:2,36. Foi obtido através de um traço de um concreto de referência da Pacheco (2020), 1:2,36:2,64, desconsiderando o agregado graúdo. O teor de argamassa não impactou na escolha do traço. Todos os corpos de prova foram submetidos a cura submersa. Para o desenvolvimento desta pesquisa foram propostos ensaios laboratoriais para avaliação das propriedades no estado fresco e endurecido. Os teores que foram utilizados para a argila expandida (com o silicato de sódio) são de 10, 30 e 50% em relação a areia em volume. A fabricação da argamassa é demonstrada na Figura 21.

Figura 21 – Fluxograma para a realização da argamassa auto cicatrizante.



Fonte: autor (2021).

A Tabela 12 apresenta as quantidades utilizadas de cada material, seguindo a proporção estabelecida pela NBR 7215 (ABNT, 2019). Para calcular a quantidade necessária de agregado miúdo leve, foi utilizada a determinação do volume de compensação de agregados, de acordo com a Equação (2) (NOGUEIRA, 2015).

Tabela 12 – Quantidade usada por material para cada traço.

	<b>Cimento (g)</b>	<b>Areia (g)</b>	<b>Argila expandida (g)</b>	<b>Água (g)</b>
Referência	892,86	2107,14	0,00	448,40
T10	892,86	1896,43	112,17	448,40
T30	892,86	1475,00	336,50	448,40
T50	892,86	1053,57	560,84	448,40

Fonte: autor (2021).

$$M_{argila} = M_{areia} \cdot \frac{\gamma_{argila}}{\gamma_{areia}} \quad (2)$$

onde:

$M_{argila}$  = massa da argila expandida [g];

$M_{areia}$  = massa da areia [g];

$\gamma_{argila}$  = massa específica da argila [g/cm<sup>3</sup>];

$\gamma_{areia}$  = massa específica da areia [g/cm<sup>3</sup>].

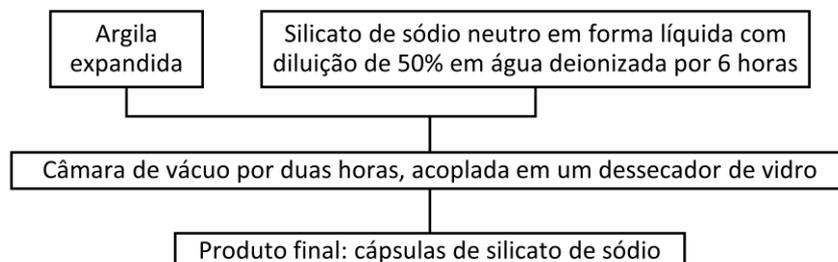
O método de encapsulamento está descrito em seguida, assim como o processo de moldagem e cura. Para avaliar o processo de auto cicatrização, foram induzidas fissuras nas amostras de argamassa de forma mecânica. Para isso, optou-se por trabalhar com a abertura das fissuras por meio do ensaio de pré-carregamento de 90% da carga de ruptura, conforme está explanado na sequência.

### 3.3.1 Encapsulamento do silicato de sódio na argila expandida

O processo de encapsulamento foi conduzido após a separação dos grãos de argila expandida por faixa granulométrica. O silicato de sódio foi diluído com água deionizada em 50% mantendo a solução parada por 6 horas, a fim de prover uma pré-saturação. Por fim, o recipiente contendo a argila expandida e a

solução de silicato de sódio foram encaminhadas para a câmara de vácuo por duas horas, acopladas em um dessecador de vidro. Todo esse processo é demonstrado na Figura 22. O sistema utilizado é apresentado na Figura 23 (ALGHAMRI; KANELLOPOULOS; AL-TABBAA, 2016; PACHECO, 2020).

Figura 22 – Fluxograma para encapsulamento do silicato de sódio.



Fonte: autor (2021).

Figura 23 – Câmara de vácuo, acoplada em um dessecador de vidro, para encapsulamento do silicato de sódio.



Fonte: autor (2021).

### 3.3.2 Moldagem e cura

O misturador mecânico que foi usado está apresentado na Figura 24, de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 2019). A moldagem das amostras foi realizada em formas cilíndricas (5 x 10 cm), vista na Figura 25. As amostras foram curadas de forma submersa, em recipientes separados, para não haver interferência entre os traços dispostos, conforme a Figura 26.

Figura 24 – Misturador mecânico utilizado.



Fonte: autor (2021).

Figura 25 – Moldagem das amostras em forma cilíndricas.



Fonte: autor (2021).

Figura 26 – Cura dos corpos de prova de forma submersa.



Fonte: autor (2021).

### 3.3.3 Estado fresco

No estado fresco foram realizados ensaios para a determinação da trabalhabilidade através da determinação do índice de consistência e da massa específica. Os métodos de ensaio são explicados a seguir.

#### 3.3.3.1 Trabalhabilidade

No estado fresco da argamassa foi realizada a determinação do índice de consistência, de acordo com os procedimentos especificados pela NBR 13276 (ABNT, 2016). Para cada traço de concreto com os diferentes teores de argila expandida foi realizado um ensaio de determinação do índice de consistência a fim de verificar a trabalhabilidade da argamassa. O ensaio é demonstrado na Figura 27.

Figura 27 – Ensaio de determinação do índice de consistência.



Fonte: autor (2021).

### 3.3.3.2 Determinação da massa específica

O ensaio de determinação da massa específica foi feito seguindo as instruções da normativa NBR 9833 (ABNT, 2014). Para determinar a massa específica, deve-se utilizar a Equação (3).

$$\gamma = \frac{M - M_{rec}}{V} \quad (3)$$

onde:

$\gamma$  = massa específica da argamassa [g/cm<sup>3</sup>];

$M$  = massa do recipiente e da argamassa [g];

$M_{rec}$  = massa do recipiente [g];

$V$  = volume do recipiente [cm<sup>3</sup>].

### 3.3.4 Estado endurecido

No estado endurecido foram executados ensaios para a determinação da resistência à compressão, módulo de elasticidade e absorção de água por imersão, massa específica e índice de vazios. Também é explicado como foi feito o pré-carregamento para análise posterior da auto cicatrização. Todas as amostras tiveram seus testes praticados separadamente.

#### 3.3.4.1 Resistência à compressão

O ensaio para determinação da resistência a compressão dos corpos de prova cilíndricos foi executado de acordo com as especificações da NBR 5739 (ABNT, 2018b). Primeiramente, foram feitos dois ensaios de resistência à compressão aos 7 dias. Em seguida, aos 28 dias. Por último, aos 28 dias, com o ensaio de pré-carregamento das amostras realizado aos 7 dias. A Figura 28 demonstra o ensaio.

Figura 28 – Ensaio de resistência à compressão.



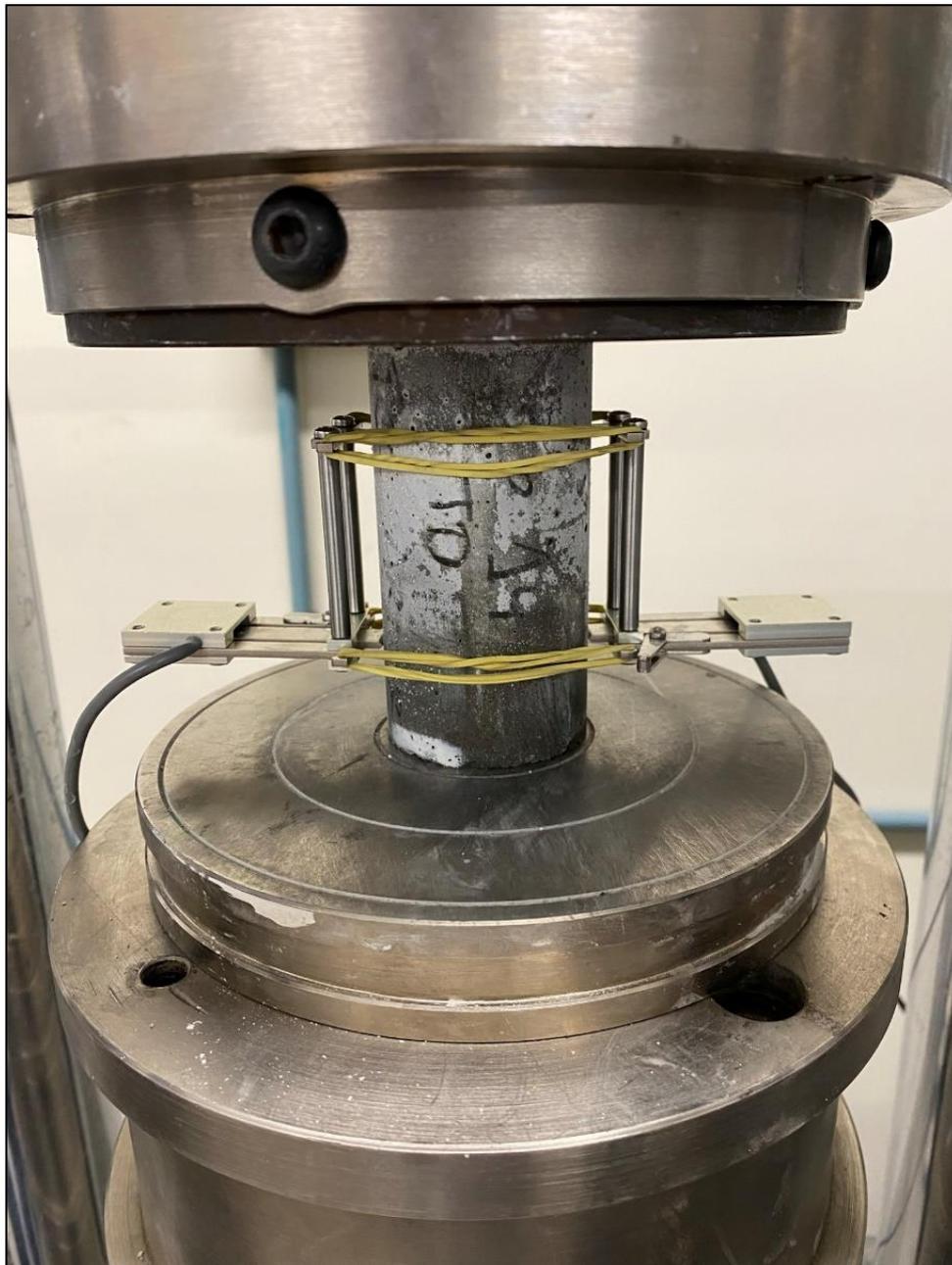
Fonte: autor (2021).

#### 3.3.4.2 Módulo de elasticidade

Para a realização deste ensaio foram utilizados os parâmetros da NBR 8522 (ABNT, 2017), sendo testadas duas amostras aos 28 dias após sua moldagem e duas aos 28 dias com pré-carregamento aos 7 dias. Para a realização deste ensaio, os corpos de provas foram preparados como no ensaio de resistência à compressão, sendo colocado da mesma maneira na prensa. Entretanto, para o ensaio de modulo de elasticidade foram posicionados

extensômetros nos corpos de prova. Depois do corpo de prova ser colocado em sua posição correta com os extensômetros, iniciou-se o ensaio, que consiste em carregar o corpo de prova até a força correspondente a tensão do limite superior, e mantê-la nesse carregamento por 60 segundos. Após isso, deve-se aplicar um carregamento de 0,5 MPa, e mantê-lo por 60 segundos. Este processo é repetido por 4 vezes. Para finalizar o ensaio, os extensômetros são retirados e o corpo de prova recebe um carregamento até ser rompido. É mostrado na Figura 29.

Figura 29 – Ensaio do módulo de elasticidade.



Fonte: autor (2021).

### 3.3.4.3 Absorção de água por imersão, massa específica e índice de vazios

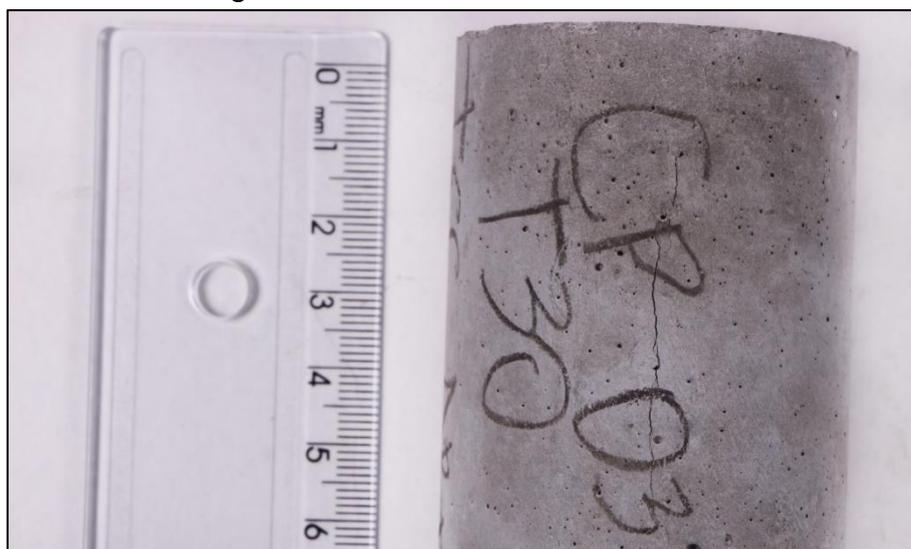
Os corpos de prova foram moldados conforme determinações da NBR 5739 (ABNT, 2018b) e para a determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica foram seguidos os procedimentos da NBR 9778 (ABNT, 2008). Foram realizados três ensaios de absorção aos 28 dias e três aos 28 dias com pré-carregamento aos 7 dias.

### 3.3.4.4 Pré-carregamento

O ensaio de pré-carregamento consiste em pré-fissurar as amostras, de forma a verificar a sua auto cicatrização posterior. A referência para execução foi sempre a menor resistência à compressão obtida aos 7 dias. Assim, submetem-se as amostras até 90% da carga de ruptura, mantendo esse carregamento por dois minutos (TAKAGI, 2013).

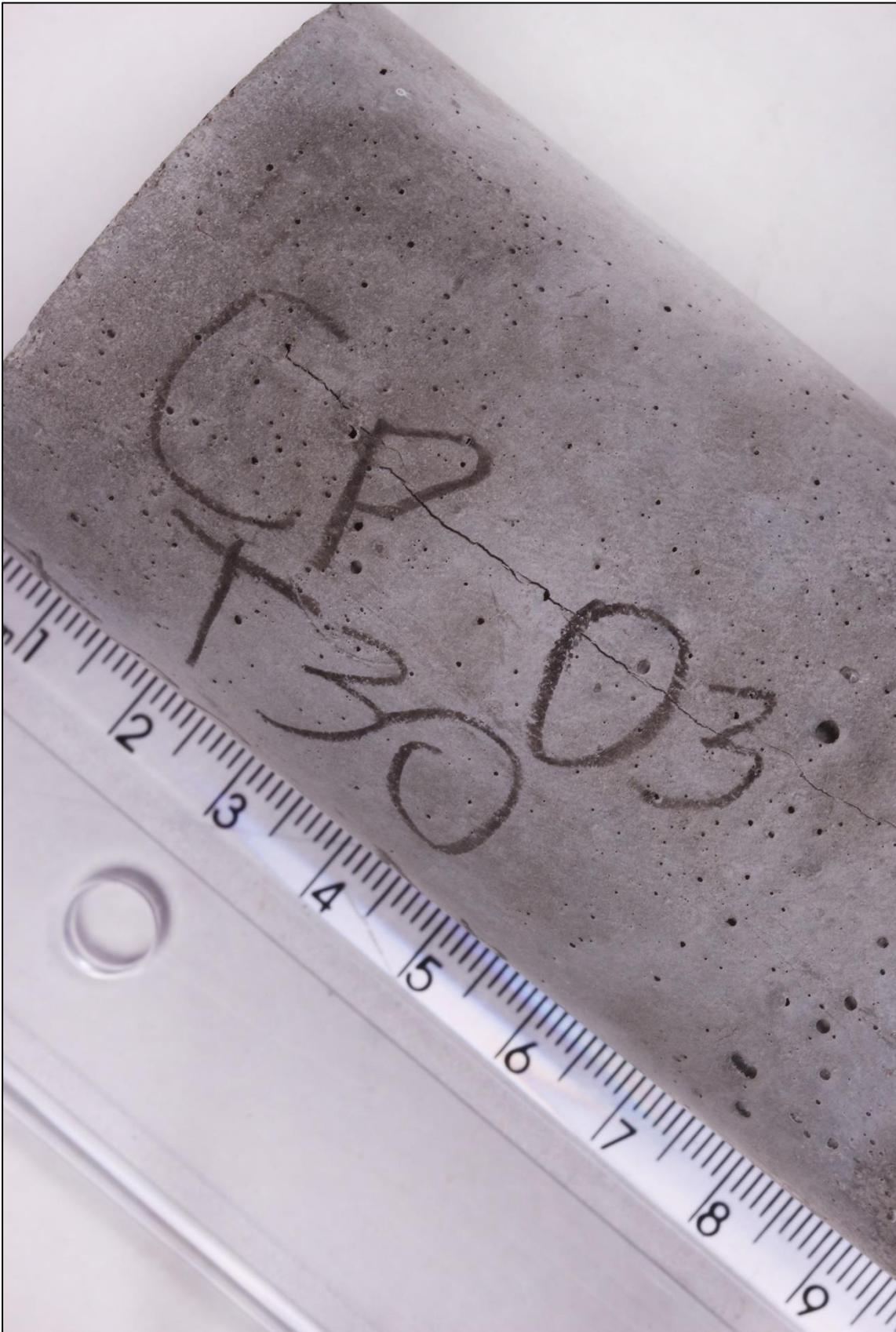
O pré-carregamento foi realizado com as amostras aos 7 dias, e, posteriormente, esses corpos de prova voltaram para a cura submersa. Aos 28 dias, foram realizados todos os ensaios no estado endurecido, com o intuito de comparar com as demais amostras sem pré-carregamento. O resultado foi a criação de microfissuras, quase imperceptíveis a olho nu, conforme as Figuras 30, 31 e 32. Todas as figuras relacionadas estão no Apêndice A.

Figura 30 – Microfissura na amostra.



Fonte: autor (2021).

Figura 31 – Microfissura na amostra.



Fonte: autor (2021).

Figura 32 – Microfissura na amostra.



Fonte: autor (2021).

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

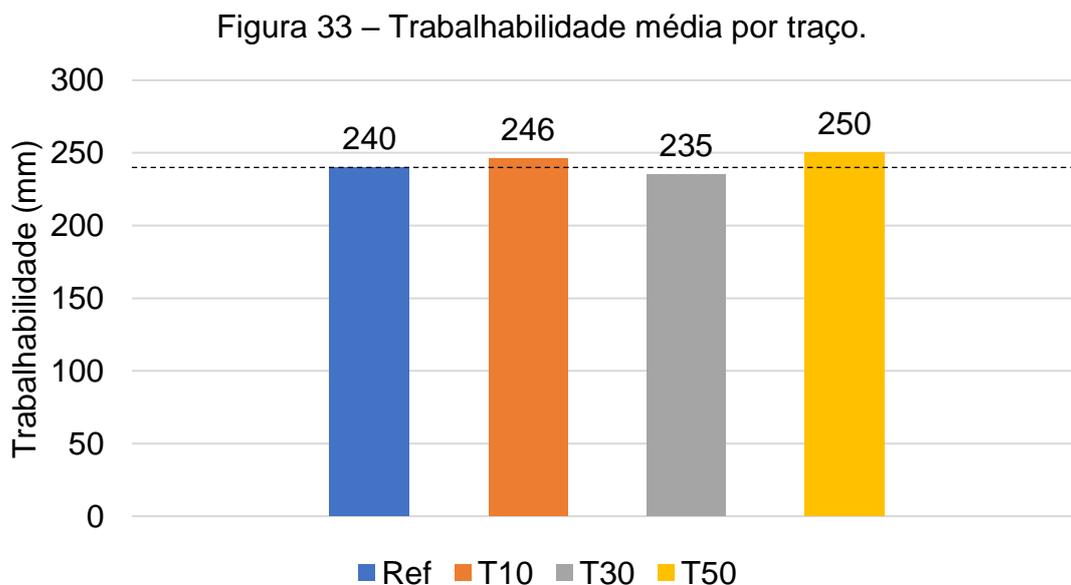
Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios realizados, e a comparações entre eles, esta análise foi feita através de tabelas e gráficos para facilitar o entendimento dos resultados. Foram analisados os ensaios no estado fresco e estado endurecido.

### 4.1 ESTADO FRESCO

Nesta primeira parte foram analisados os resultados dos ensaios no estado fresco. Foram realizados os ensaios de determinação do índice de consistência e determinação de massa específica.

#### 4.1.1 Trabalhabilidade

A partir do ensaio de determinação do índice de consistência realizado, foram verificadas a trabalhabilidade de cada traço. A trabalhabilidade média de cada traço está apresentada na Figura 33. Os resultados totais estão descritos no Apêndice B.



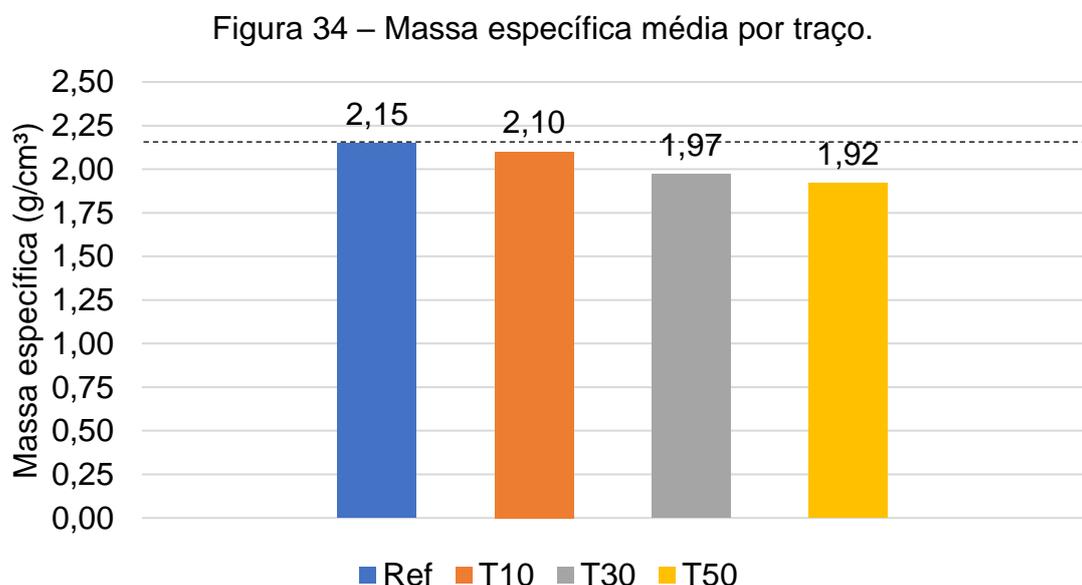
Fonte: autor (2021).

A trabalhabilidade média de todos os traços está dentro do esperado, sendo adotado de referência a trabalhabilidade de  $240 \pm 20$  mm. Não foi necessário a adição ou subtração de água de nenhum deles. Nenhum aditivo foi utilizado.

Apesar da argila expandida ter uma alta absorção de água em comparação com a areia, diminuindo a trabalhabilidade, ela também tem uma superfície arredondada, aumentando a trabalhabilidade. Assim, na maioria dos casos, a trabalhabilidade de uma argamassa contendo argila expandida é maior do que aquela contendo agregados comuns (RASHAD, 2018).

#### 4.1.2 Determinação da massa específica

A massa específica média no estado fresco foi calculada para cada traço. Na Figura 34 estão apresentados os resultados obtidos. Todos os cálculos estão apresentados no Apêndice C.



Fonte: autor (2021).

Comparando a massa específica média em relação ao traço referência, o traço T10 diminuiu 2,33%, o T30, 8,37% e o T50, 10,70%. A massa específica média de todos os traços está congruente, com resultados bem próximos do esperado, visto que a argila expandida é um agregado leve, diminuindo a densidade da argamassa. Assim, a massa específica é inversamente

proporcional a quantidade de agregado leve inserido (RASHAD, 2018; SHAFIGH *et al.*, 2018).

## 4.2 ESTADO ENDURECIDO

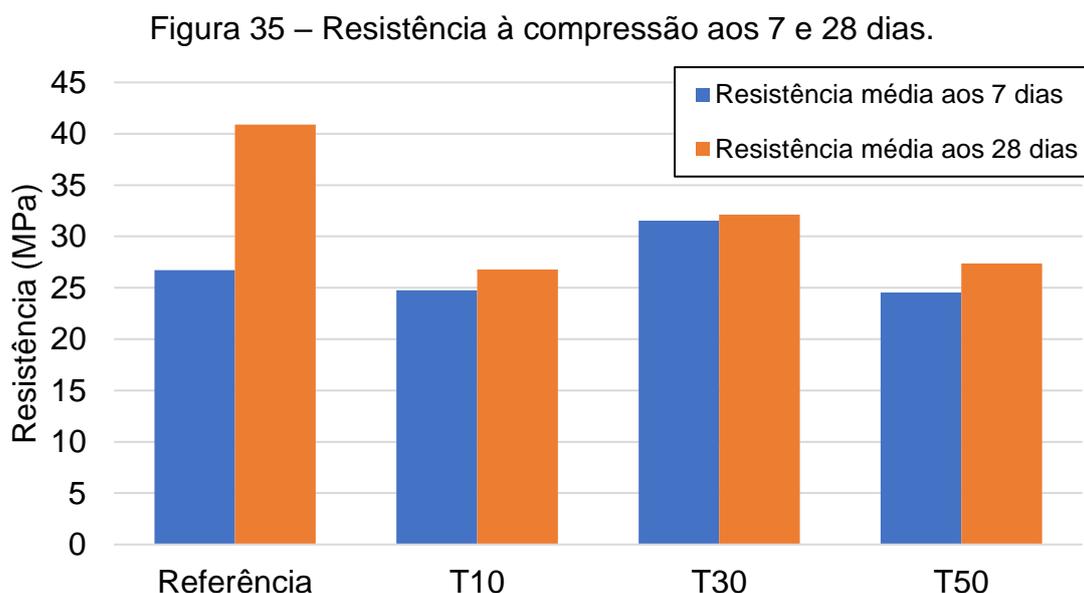
Nesta segunda parte foram analisados os resultados dos ensaios no estado endurecido. Foram feitos os ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade e absorção total de água total, índice de vazios e massa específica.

### 4.2.1 Resistência à compressão

A partir dos ensaios de resistência à compressão realizados nesta pesquisa, foi verificada a tensão de ruptura dos traços empregados. O ensaio foi feito aos 7 dias, 28 dias e 28 dias com pré-carregamento aos 7 dias. A totalidade dos resultados consta no Apêndice D.

#### 4.2.1.1 Sem pré-carregamento

O ensaio foi realizado aos 7 e 28 dias. Os resultados de ambos estão mostrados na Figura 35 e na Tabela 13.



Fonte: autor (2021).

Tabela 13 – Resistência à compressão média aos 7 e 28 dias.

<b>Traço</b>	<b>Resistência média aos 7 dias (MPa)</b>	<b>Resistência média aos 28 dias (MPa)</b>
Referência	26,72	40,88
T10	24,75	26,76
T30	31,54	32,12
T50	24,54	27,36

Fonte: autor (2021).

Em relação aos 7 dias, a resistência à compressão média aumentou relativamente pouco, para os traços T10, T30 e T50. O único que teve um aumento maior foi o traço de referência. Deve-se ao fato de a argila expandida não possuir tanta resistência como a areia, por ser um agregado miúdo leve (RASHAD, 2018; SHAFIGH *et al.*, 2018; VIJAYALAKSHMI; RAMANAGOPAL, 2018).

O traço referência aumentou em 53,03%, o T10, 8,15%, o T30, 1,83% e o T50, 11,49%. Todos os resultados estão descritos no Apêndice D. Vale ressaltar também que o T30 teve uma resistência acima do esperado, em comparação aos traços T10 e T50, possuindo uma resistência à compressão 27,46% e 28,52% maior para os 7 dias, respectivamente. Já para os 28 dias, 20,01% e 17,39%.

Os resultados obtidos por Pacheco (2020) no estudo piloto A, para os traços de 15% e 30% de argila expandida, foram menores, comparados ao referência. Por ter sido utilizado outro aglomerante, o CP V-ARI, os resultados foram ligeiramente maiores. Para o traço de 15%, obteve 29,4 MPa aos 7 dias e 35,7 MPa aos 28 dias e para o traço de 30%, de 33,6 MPa aos 7 dias e 37,2 MPa aos 28 dias.

A resistência mecânica diminui à medida que o conteúdo da argila expandida aumentava. Conforme pesquisas feitas anteriormente, a introdução da argila expandida pode reduzir a resistência à compressão de 34,4% a 38,8% (RASHAD, 2018).

Com o intuito de entender a utilização do agregado leve causou um efeito nos resultados, a Tabela 14 apresenta a análise de variância entre os valores de resistência à compressão aos 7 e 28 dias dos traços empregados nesta pesquisa.

Tabela 14 – Análise de variância (ANOVA) da resistência à compressão.

Fonte	GDL	SQ	MQ	F	F crítico	Valor de P	Efeito significativo
Entre os traços aos 7 dias	3	63,553	21,184	6,1916	6,5913	0,0552	NS
Entre os traços aos 28 dias	3	510,72	170,24	24,486	3,4902	0,00002	S

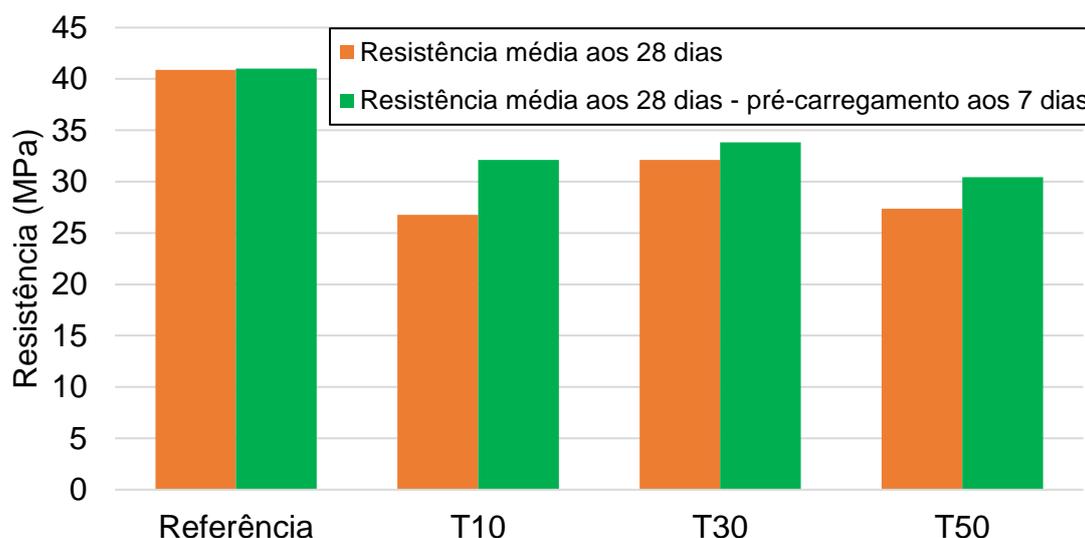
Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada.  
 Fonte: autor (2021).

Os resultados da análise de variância apresentaram, para um nível de confiança de 95%, efeito não significativo (valor de 'p' superior a 0,05), para o ensaio realizado aos 7 dias, ou seja, não há diferença entre os traços. Já para os ensaios aos 28 dias para esta propriedade, o efeito é significativo (valor de 'p' inferior a 0,05), demonstrando que há diferenças entre os teores de adição da argila expandida.

#### 4.2.1.2 Pré-carregamento aos 7 dias

O pré-carregamento realizado com 90% da menor resistência de cada traço, aos 7 dias, foi ensaiado frente a resistência à compressão aos 28 dias. Os resultados estão mostrados na Figura 36 e na Tabela 15, comparados com a resistência à compressão sem pré-carregamento aos 7 dias.

Figura 36 – Resistência à compressão aos 28 dias sem pré-carregamento e com pré-carregamento.



Fonte: autor (2021).

Tabela 15 – Resistência à compressão aos 28 dias sem pré-carregamento e com pré-carregamento.

Traço	Resistência média aos 28 dias sem pré-carregamento (MPa)	Resistência média aos 28 dias com pré-carregamento (MPa)
Referência	40,88	41,00
T10	26,76	32,10
T30	32,12	33,83
T50	27,36	30,44

Fonte: autor (2021).

O traço de referência, por não possuir silicato de sódio, teve uma cura similar ao corpo de prova sem pré-carregamento. Ainda assim, manteve sua resistência, devido a própria cura autógena, através da hidratação do cimento (DU *et al.*, 2019; VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013). Todos os outros, tiveram uma melhora positiva na cura e no aumento de resistência, devido a ruptura dos agregados leves que possuíam o silicato de sódio encapsulado.

O traço referência cresceu em 0,28%, enquanto o T10 em 19,94%, o T30 em 5,32% e o T50 em 11,27%. O T10 possuiu o maior aumento de resistência, representando uma cura significativa pela taxa de argila substituída por areia. Como demonstrado anteriormente, o T30 teve uma resistência significativamente melhor, aos 28 dias sem pré-carregamento, comparado aos traços T10 e T50.

Conforme a pesquisa de Mostavi *et al.* (2015), a eficiência da cura é semelhante ao resultado deste ensaio, demonstrando congruência com o que foi realizado. Mostavi *et al.* (2015) faz a avaliação da eficiência da cura através da medição das fissuras ao longo de 14 dias. Com 14 dias de cura, a eficiência do traço de 5% de cápsulas em relação ao cimento foi de 35%. O ensaio de resistência à compressão não foi realizado, porém, demonstra-se claramente um valor muito significativo de cura. Também demonstra uma taxa de cicatrização mais rápida no traço de 5%, comparado ao traço de 2,5% feito no experimento. A Figura 13, referenciada anteriormente, apresenta todos esses valores (MOSTAVI *et al.*, 2015).

A auto cicatrização foi o fator determinante para o aumento de resistência à compressão dos corpos de prova com cápsulas de silicato de sódio. De acordo com Sidiq; Gravina; Giustozzi (2019), o encapsulamento aumenta em 17% a recuperação de carga, em consequência, aumentando a resistência. Já a pesquisa de Mohammed *et al.* (2021) demonstra que a resistência à compressão

acresceu de 15 a 20% com 5% de cápsulas de silicato de sódio. E nesta pesquisa os traços com 10% de inserção de argila expandida contendo silicato, percebemos uma melhora em torno de 20% para esta propriedade.

#### 4.2.1.3 Avaliação global

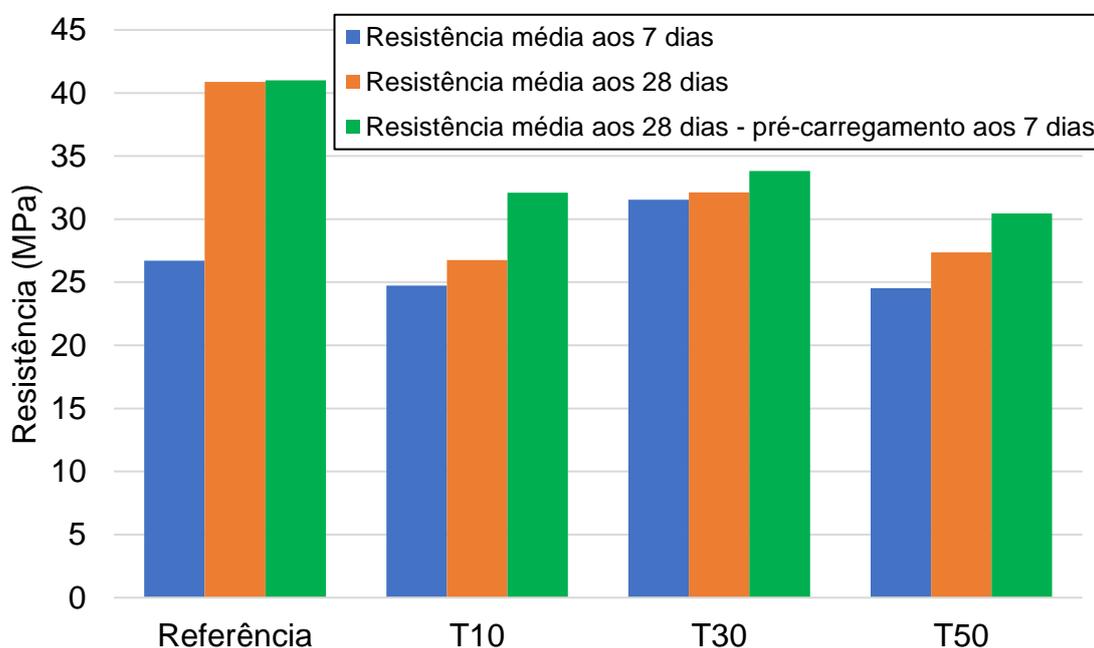
Conforme mostrado anteriormente, a eficiência da cura para os traços com cápsulas de silicato de sódio foi significativa. A totalidade de resultados obtidos são apresentados na Tabela 16 e na Figura 37.

Tabela 16 – Avaliação global da resistência à compressão.

Traço	Resistência média aos 7 dias (MPa)	Resistência média aos 28 dias (MPa)	Resistência média aos 28 dias com pré-carregamento (MPa)
Referência	26,72	40,88	41,00
T10	24,75	26,76	32,10
T30	31,54	32,12	33,83
T50	24,54	27,36	30,44

Fonte: autor (2021).

Figura 37 – Avaliação global da resistência à compressão.



Fonte: autor (2021).

Comparando diretamente a resistência à compressão alcançada aos 7 dias com a resistência aos 28 dias com o pré-carregamento aos 7 dias, o traço

T10 teve um aumento de 29,72%. O segundo maior diferencial foi para o T50, com 24,05%. E, por último, o T30, com 7,24%.

Houve uma evolução muito expressiva de aumento de resistência à compressão para as amostras pré-carregadas aos 7 dias. Está demonstrado que a eficiência na cura e propriedades mecânicas é obtida através da utilização de silicato de sódio, resultado esse encontrado em outras pesquisas (SIDIQ; GRAVINA; GIUSTOZZI, 2019).

O agregado miúdo leve tem menor resistência ao esmagamento, resistência a partículas e vazios abertos em relação ao agregado convencional. A forma da argila expandida, na maioria dos casos, é esférica. Esta forma possibilita menor força de ligação com a pasta ao redor do que a angular. Como é um material poroso, o agregado costuma ser mais frágil (RASHAD, 2018). Isso é identificado nesta pesquisa, em função do comportamento da queda de resistência de acordo com a adição do agregado leve.

#### 4.2.2 Módulo de elasticidade

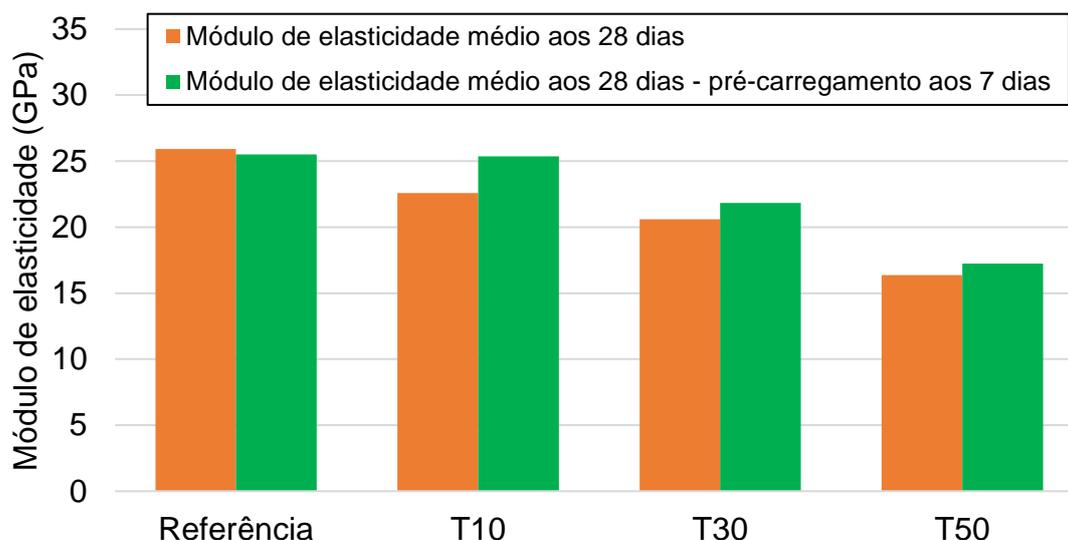
Para analisar os dados de módulo de elasticidade, foram utilizadas as médias dos corpos de provas ensaiados. O ensaio foi feito aos 28 dias e aos 28 dias com pré-fissuração aos 7 dias. Os resultados de ambos estão apresentados na Tabela 17 e na Figura 38.

Tabela 17 – Módulo de elasticidade médio aos 7 e 28 dias.

Traço	Módulo de elasticidade médio aos 28 dias (GPa)	Módulo de elasticidade médio aos 28 dias - pré-carregamento aos 7 dias (GPa)
Referência	25,91	25,52
T10	22,59	25,37
T30	20,59	21,82
T50	16,38	17,25

Fonte: autor (2021).

Figura 38 – Módulo de elasticidade aos 28 dias sem pré-carregamento e com pré-carregamento.



Fonte: autor (2021).

O módulo de elasticidade variou pouco para o traço de referência, assim como a resistência à compressão. Para os demais traços, o módulo de elasticidade aumentou proporcionalmente a resistência à compressão. Porém, quanto mais agregado miúdo leve utilizado, menor o módulo de elasticidade. Assim, o módulo de elasticidade do traço de referência possui os maiores valores.

O traço de referência, aos 28 dias sem pré-carregamento, comparado aos 28 dias com pré-carregamento, variou -1,51%. O traço T10 aumentou em 12,34%, sendo a maior variação dentre todos. O T30 cresceu 5,97% e o T50, 5,32%. Os dois últimos tiveram uma variação semelhante.

O traço T10, devido ao efeito de auto cicatrização, possui a mesma rigidez à referência, mesmo utilizando agregado miúdo leve. Isso é muito importante de se ressaltar, pois demonstra que uma argamassa mais leve e com um maior preenchimento de vazios alcançam o mesmo resultado de uma argamassa convencional.

À medida que se aumenta a quantidade de agregado miúdo leve, menor é a efetividade da auto cicatrização no módulo de elasticidade. Segundo Sidiq; Gravina; Giustozzi (2019), a auto cicatrização adiciona uma rigidez de 30%. Para Mohammed *et al.* (2021), a recuperação através da auto cicatrização aumentou

a resistência, ocasionando também acréscimo da rigidez, que, por sua vez, não teve os resultados medidos.

Há uma diminuição linear da resistência à compressão e módulo de elasticidade com a diminuição da densidade de concreto. A substituição da areia por argila expandida leva a uma diminuição de 2,3-3,8 MPa e 1,7-2,6 GPa por 100 kg/m<sup>3</sup> para resistência à compressão e módulo de elasticidade, respectivamente (NGUYEN *et al.*, 2014).

Conforme observado por Alghamri; Kanellopoulos; Al-Tabbaa (2016), houve um grande crescimento da rigidez no traço com cápsulas de silicato de sódio, visto que o mesmo reage com o hidróxido de cálcio, para produzir hidrato de silicato de cálcio, um gel que consegue facilmente preencher vazios. Assim, cria-se um fortalecimento grande das ligações internas do conglomerado, que aumenta sua rigidez e resistência.

#### 4.2.3 Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica

Nesta parte estão apresentados os resultados da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica. O ensaio foi feito aos 28 dias, com amostras sem e com pré-carregamento. Os resultados das amostras e os respectivos cálculos estão apresentados no Apêndice E.

##### 4.2.3.1 Absorção de água por imersão

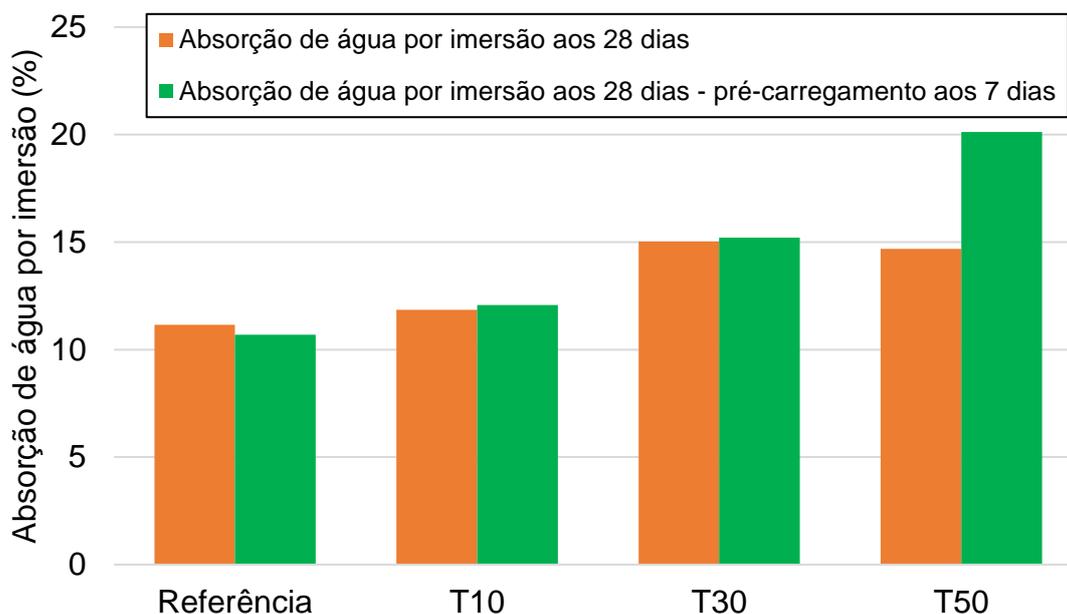
Para análise da absorção de água por imersão, foi necessário a coleta dos pesos das amostras saturadas e dos pesos depois de secas em estufa. A totalidade de resultados obtidos são apresentados na Tabela 18 e na Figura 39.

Tabela 18 – Absorção de água por imersão aos 28 dias sem e com pré-carregamento.

Traço	Absorção de água por imersão aos 28 dias (%)	Absorção de água por imersão aos 28 dias - pré-carregamento aos 7 dias (%)
Referência	11,15	10,70
T10	11,86	12,07
T30	15,03	15,21
T50	14,68	20,12

Fonte: autor (2021).

Figura 39 – Absorção de água por imersão aos 28 dias sem e com pré-carregamento.



Fonte: autor (2021).

A absorção de água aumenta proporcionalmente com a quantidade de agregado miúdo leve utilizado. Os resultados sem e com pré-carregamento foram semelhantes, com exceção do traço T50, que teve uma maior diferença, sendo de 37,06%.

Conforme Rashad (2018), a incorporação de argila expandida aumenta a absorção de água. Para Vijayalakshmi; Ramanagopal (2018), a absorção de água do agregado miúdo leve é significativamente maior do que para os agregados convencionais. Quando usada na argamassa em condições pré-saturadas, a água dentro do agregado leve é água interna adicional, que não faz parte da água utilizada inicialmente.

Como esperado, os agregados de menor densidade têm maior absorção. De acordo com Bogas; Mauricio; Pereira (2012), a absorção da argila expandida após 7 dias é de 23,8%. A absorção do agregado leve é da mesma ordem de grandeza observada em outros estudos sobre agregados de argila expandida (BOGAS; MAURICIO; PEREIRA, 2012).

#### 4.2.3.2 Índice de vazios

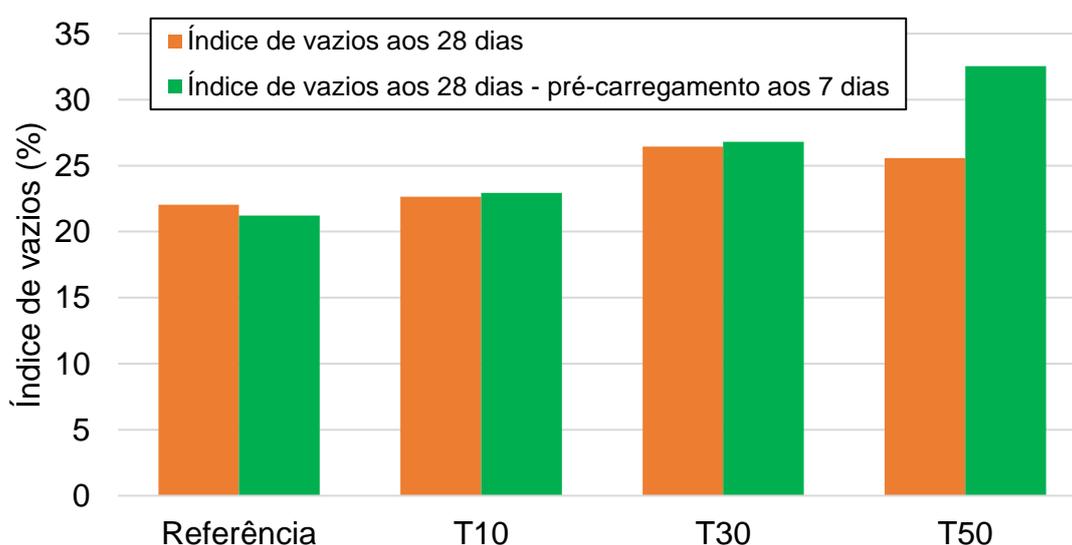
Para análise da absorção de água por imersão, foi necessário a coleta dos pesos das amostras imersas em água, saturadas e depois de secas em estufa. Os resultados adquiridos estão mostrados na Tabela 19 e na Figura 40.

Tabela 19 – Índice de vazios aos 28 dias sem e com pré-carregamento.

Traço	Índice de vazios aos 28 dias (%)	Índice de vazios aos 28 dias - pré-carregamento aos 7 dias (%)
Referência	22,05	21,22
T10	22,64	22,94
T30	26,44	26,80
T50	25,58	32,55

Fonte: autor (2021).

Figura 40 – Índice de vazios aos 28 dias sem e com pré-carregamento.



Fonte: autor (2021).

Assim como a absorção de água, o índice de vazios também cresce proporcionalmente com a quantidade de agregado miúdo leve usado. Os resultados sem e com pré-carregamento foram semelhantes, com exceção do traço T50, novamente, que teve uma diferença significativa, sendo de 21,41%.

Bogas; Mauricio; Pereira (2012) coletaram micrografias eletrônicas de varredura de diferentes amostras de argila expandida. Em geral, os agregados são caracterizados por uma complexa rede de poros formada por vazios de vários tamanhos e formas irregulares. A porosidade pode variar muito ao longo da partícula; isto está relacionado principalmente com a presença ou ausência de grandes vazios. A presença de grandes poros no agregado miúdo leve levam

a heterogeneidade que afetam suas propriedades físicas e mecânicas (BOGAS; MAURICIO; PEREIRA, 2012).

A argila expandida possui um índice de vazios maior em relação ao agregado convencional. Como é um material poroso, o agregado costuma ser mais frágil (RASHAD, 2018).

#### 4.2.3.3 Massa específica

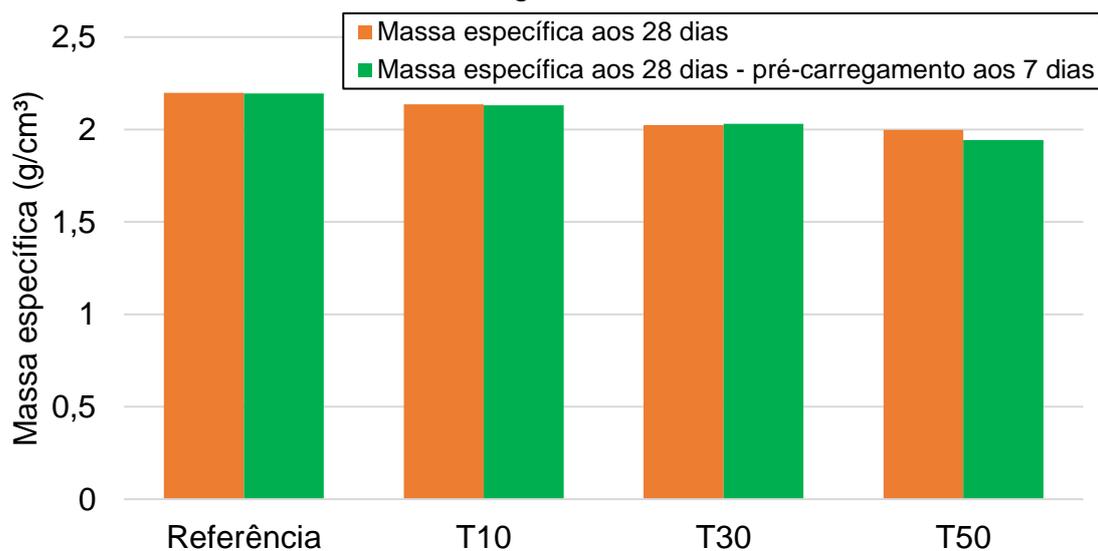
Para análise da absorção de água por imersão, foi necessário a coleta dos pesos das amostras imersas em água e saturadas. A Tabela 20 e a Figura 41 demonstram os resultados obtidos

Tabela 20 – Massa específica da amostra saturada aos 28 dias sem e com pré-carregamento.

Traço	Massa específica da amostra saturada aos 28 dias (g/cm <sup>3</sup> )	Massa específica da amostra saturada aos 28 dias - pré-carregamento aos 7 dias (g/cm <sup>3</sup> )
Referência	2,20	2,20
T10	2,14	2,13
T30	2,02	2,03
T50	2,00	1,94

Fonte: autor (2021).

Figura 41 – Massa específica da amostra saturada aos 28 dias sem e com pré-carregamento.



Fonte: autor (2021).

A massa específica das amostras está condizente, com uma variação nula para os traços referência, T10 e T30. O traço T50 possuiu uma diferença mínima, em relação as amostras com pré-carregamento, sendo de -3%.

A massa específica de todos os traços está congruente, com resultados bem próximos do esperado, visto que a argila expandida é um agregado leve, diminuindo a densidade da argamassa. Em relação as amostras com pré-carregamento, não houve diferença, exceto para o traço T50, que teve uma diminuição de 7,41% da massa específica (AHMAD; CHEN; FARASAT ALI SHAH, 2019; NGUYEN *et al.*, 2014; RASHAD, 2018; VIJAYALAKSHMI; RAMANAGOPAL, 2018).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio deste estudo foi possível identificar a mudança nas amostras que foram realizadas um pré-carregamento. Foi identificado a auto cicatrização das amostras de argamassa, através do aumento considerável de resistência à compressão e do módulo de elasticidade das amostras pré-carregadas aos 7 dias em relação às amostras sem pré-carregamento, demonstrando potencialidade do uso do silicato de sódio. Ainda cabe ressaltar que esse efeito varia em função da substituição do agregado leve empregada, apresentando que o traço com maior teor de agregado leve e conseqüentemente maior emprego do silicato de sódio não apresentou as melhores evoluções. De forma mais detalhada é possível concluir que:

- **Com relação a utilização de diferentes teores do agregado leve no estado fresco e endurecido.**

No estado fresco a trabalhabilidade não foi impactada pelos diferentes teores de agregado leve empregados, por outro lado, na massa específica, demonstrou claramente a queda desta propriedade, pois quanto maior o teor de agregado leve inserido, menor é a densidade de massa.

No estado endurecido, na resistência a compressão aos 7 dias, não é possível identificar diferenças significativas entre os traços empregados, já aos 28 dias, o teor de substituição causa efeito significativo nas amostras. O módulo de elasticidade e massa específica, apresentaram uma diminuição destas propriedades em função do aumento dos teores inseridos, vinculado as características do físicas do agregado leve empregado. Dentro dessa antologia com um olhar de aumento da propriedade o índice de vazios e a absorção de água apresentaram maiores indicadores em função do teor empregado, também vinculado a característica do agregado leve.

- **Com relação a inserção do silicato de sódio por meio do agregado leve frente a auto cicatrização.**

A variação do teor de agregados leves inseridos na argamassa, compete a diferentes quantidades de silicato de sódio, pois o agregado leve está com o silicato de sódio impregnado. Assim, foi demonstrado que o aumento de agregado com o silicato de sódio não necessariamente aumentou sua efetividade de cura, pois, conforme visto no ensaio de resistência à compressão aos 28 dias, o maior aumento em relação às amostras sem pré-carregamento foi o traço T10.

A avaliação da efetividade do mecanismo de auto cicatrização foi de 100%, pois em todas as situações houve uma auto cicatrização interna dos corpos de prova. As espessuras das fissuras criadas nas amostras com pré-carregamento aos 7 dias foram na escala micro, não sendo possível dimensioná-las devido à falta de equipamento adequado. Por serem muito pequenas, e, muitas vezes, apenas internas, também não eram vistas em todos os corpos de prova.

- **Com relação ao teor de substituição mais efetivo frente a auto cicatrização.**

O traço com melhor resistência e maior efetividade de cura foi o T10. Teve um módulo de elasticidade idêntico ao traço referência e um aumento significativamente alto da resistência à compressão através do pré-carregamento aos 7 dias. A resistência à compressão ficou similar aos traços T30 e T50, porém, sem perder todas as outras propriedades. A absorção de água, índice de vazios e massa específica também foram muito próximos à referência, qualificando como ideal.

Através do traço T10, seria interessante o estudo posterior com uma amostragem maior, para acrescer a precisão dos dados coletados. Seria possível realizar análises MEV, um tempo de cura maior, diferentes granulometrias de argila expandida, outros traços de referência. A possibilidade de variáveis é enorme, sendo necessário muito mais tempo de estudo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. NBR-NM 248. **Agregados - Determinação da composição granulométrica**, [s. l.], p. 14, 2003.

ABNT. NBR 13276. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação do índice de consistência**, [s. l.], p. 1–6, 2016.

ABNT. NBR 16697. **Cimento Portland - Requisitos**, [s. l.], p. 16, 2018a.

ABNT. NBR 5739. **Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**, [s. l.], 2018b.

ABNT. NBR 7215. **Cimento Portland — Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**, [s. l.], p. 16, 2019.

ABNT. NBR 8522. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, [s. l.], p. 15–20, 2017.

ABNT. NBR 9778. **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica**, [s. l.], p. 3, 2008.

ABNT. NBR 9833. **Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico**, [s. l.], 2014.

ABNT. NBR NM 52. **Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente**, [s. l.], p. 12, 2009.

AHMAD, Muhammad Riaz; CHEN, Bing; FARASAT ALI SHAH, Syed. Investigate the influence of expanded clay aggregate and silica fume on the properties of lightweight concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 220, p. 253–266, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.171>

AL-TABBAA, Abir *et al.* First UK field application and performance of microcapsule-based self-healing concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 208, n. 2019, p. 669–685, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.178>

ALAZHARI, Mohamed *et al.* Application of expanded perlite encapsulated bacteria and growth media for self-healing concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 160, p. 610–619, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.086>

ALGHAMRI, R.; KANELLOPOULOS, A.; AL-TABBAA, A. Impregnation and encapsulation of lightweight aggregates for self-healing concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 124, p. 910–921, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.143>

ARAÚJO, Maria *et al.* Cross-linkable polyethers as healing/sealing agents for self-healing of cementitious materials. **Materials and Design**, [s. l.], v. 98, p. 215–222, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.005>

ARAÚJO, Maria *et al.* Poly(methyl methacrylate) capsules as an alternative to the proof-of-concept” glass capsules used in self-healing concrete. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 89, p. 260–271, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.02.015>

BOGAS, J. Alexandre; MAURICIO, António; PEREIRA, M. F.C. Microstructural analysis of iberian expanded clay aggregates. **Microscopy and Microanalysis**, [s. l.], v. 18, n. 5, p. 1190–1208, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/S1431927612000487>

CAGGIANO, Antonio *et al.* Zero-thickness interface constitutive theory for concrete self-healing effects. **Computers and Structures**, [s. l.], v. 186, p. 22–34, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2017.02.005>

DU, Wei *et al.* Preparation and application of microcapsules containing toluene-di-isocyanate for self-healing of concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 202, p. 762–769, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.007>

GARCÍA CALVO, J. L. *et al.* Development of ultra-high performance concretes with self-healing micro/nano-additions. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 138, p. 306–315, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.015>

GUPTA, Souradeep; PANG, Sze Dai; KUA, Harn Wei. Autonomous healing in concrete by bio-based healing agents – A review. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 146, p. 419–428, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.111>

HUANG, Haoliang *et al.* Self-healing in cementitious materials: Materials, methods and service conditions. **Materials and Design**, [s. l.], v. 92, p. 499–511, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.12.091>

JOSEPH, C. *et al.* Experimental investigation of adhesive-based self-healing of cementitious materials. **Magazine of Concrete Research**, [s. l.], v. 62, n. 11, p. 831–843, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1680/mac.2010.62.11.831>

KRELANI, Visar. Self Healing Capacity of Cementitious Composites.

**Politecnico Di Milano**, [s. l.], n. March, p. 102–118, 2015. Disponível em: [https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/107315/7/PhD\\_Thesis\\_Visar\\_Krelani.pdf](https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/107315/7/PhD_Thesis_Visar_Krelani.pdf)

LEE, Yong Soo; RYOU, Jae Suk. Self healing behavior for crack closing of expansive agent via granulation/film coating method. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 71, p. 188–193, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.045>

LI, Victor C.; LIM, Yun Mook; CHAN, Yin Wen. Feasibility study of a passive smart self-healing cementitious composite. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 29, n. 6, p. 819–827, 1998. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(98\)00034-1](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(98)00034-1)

MINNEBO, P; HEMELRIJCK, D Van. Ideal material properties for capsules or vascular system used in cementitious self-healing materials. **International conference on self-healing materials**, [s. l.], p. 1–4, 2015.

MINNEBO, Pieter *et al.* A novel design of autonomously healed concrete: Towards a vascular healing network. **Materials**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 1–23, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma10010049>

MOHAMMED, Abdulmohaimen Imad *et al.* Evaluation of the Compatibility of Modified Encapsulated Sodium Silicate for Self-Healing of Cementitious Composites. [s. l.], p. 21, 2021.

MOSTAVI, Ehsan *et al.* Evaluation of Self-Healing Mechanisms in Concrete with Double-Walled Sodium Silicate Microcapsules. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 27, n. 12, p. 04015035, 2015. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001314](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001314)

NGUYEN, L. H. *et al.* Influence of the volume fraction and the nature of fine lightweight aggregates on the thermal and mechanical properties of structural concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 51, p. 121–132, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.019>

NOGUEIRA, João Rafael Severo. Avaliação da influência do método de mistura nas propriedades de concretos produzidos com agregado graúdo reciclado de concreto. [s. l.], p. 122, 2015.

PACHECO, Fernanda. **Análise da Eficácia dos Mecanismos de Autocicatrização do Concreto**. 350 f. 2020. [s. l.], 2020.

QURESHI, Tanvir; KANELLOPOULOS, Antonios; AL-TABBAA, Abir. Autogenous self-healing of cement with expansive minerals-II: Impact of age and the role of optimised expansive minerals in healing performance. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 194, p. 266–275, 2019. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.027>

RASHAD, Alaa M. Lightweight expanded clay aggregate as a building material – An overview. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 170, p. 757–775, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.009>

ROIG-FLORES, M. *et al.* Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 86, p. 1–11, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.091>

SANGADJI, Senot. **Porous Network Concrete**. [S. l.: s. n.], 2015.

SEIFAN, Mostafa; SAMANI, Ali Khajeh; BERENJIAN, Aydin. Bioconcrete: next generation of self-healing concrete. **Applied Microbiology and Biotechnology**, [s. l.], v. 100, n. 6, p. 2591–2602, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7316-z>

SHAFIGH, Payam *et al.* A comparison study of the fresh and hardened properties of normal weight and lightweight aggregate concretes. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 15, n. November 2017, p. 252–260, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2017.11.025>

SIDIQ, Amir; GRAVINA, Rebecca; GIUSTOZZI, Filippo. Is concrete healing really efficient? A review. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 205, p. 257–273, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.002>

TAKAGI, Emílio Minoru. Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória de alto-forno ativados por catalisador cristalino. **Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória de alto-forno ativados por catalisador cristalino**, [s. l.], p. 130, 2013.

VAN TITTELBOOM, K. *et al.* Methyl methacrylate as a healing agent for self-healing cementitious materials. **Smart Materials and Structures**, [s. l.], v. 20, n. 12, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/20/12/125016>

VAN TITTELBOOM, Kim *et al.* Comparison of different approaches for self-healing concrete in a large-scale lab test. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 107, p. 125–137, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.186>

VAN TITTELBOOM, Kim; DE BELIE, Nele. **Self-healing in cementitious materials-a review**. [S. l.: s. n.], 2013. ISSN 19961944.v. 6 Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma6062182>

VIJAYALAKSHMI, R.; RAMANAGOPAL, S. Structural concrete using expanded clay aggregate: a review. **Indian Journal of Science and Technology**, [s. l.], v.

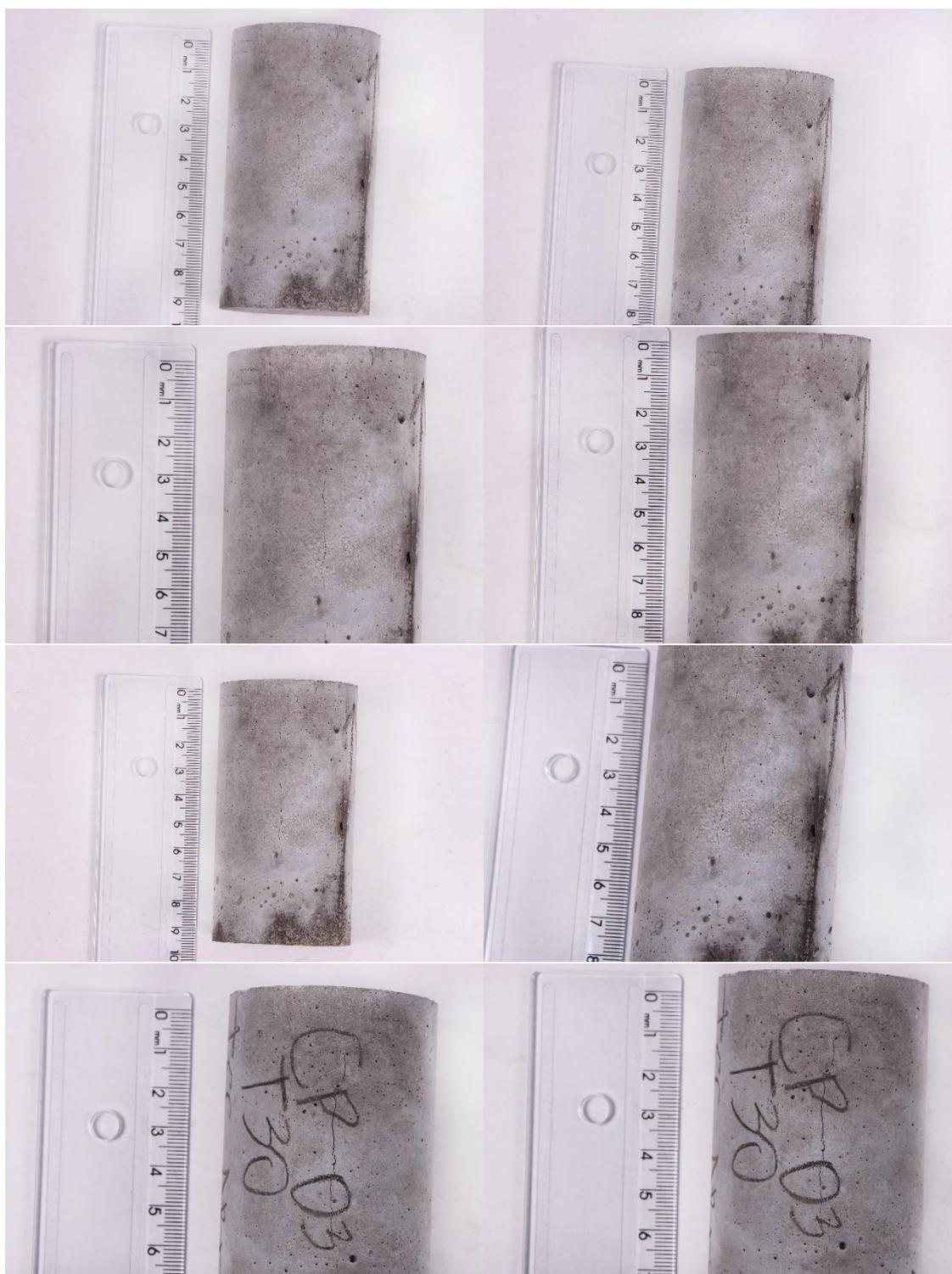
11, n. 16, p. 1–12, 2018. Disponível em:  
<https://doi.org/10.17485/ijst/2018/v11i16/121888>

WHITE, S. R. *et al.* Autonomic healing of polymer composites. **Nature**, [s. l.], v. 409, n. 6822, p. 794–797, 2001. Disponível em:  
<https://doi.org/10.1038/35057232>

WIKTOR, V.; JONKERS, H. M. Field performance of bacteria-based repair system: Pilot study in a parking garage. **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], v. 2, p. 11–17, 2015. Disponível em:  
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2014.12.004>

ZHANG, Jiaguang *et al.* Immobilizing bacteria in expanded perlite for the crack self-healing in concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 148, p. 610–617, 2017. Disponível em:  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.021>

## APÊNDICE A – FOTOS DA AMOSTRA COM MICROFISSURAS VISÍVEIS





**APÊNDICE B – CÁLCULOS DOS ENSAIOS DE TRABALHABILIDADE  
MÉDIA E DE MASSA ESPECÍFICA MÉDIA NO ESTADO FRESCO**

Cálculos da trabalhabilidade média

Todos os valores estão em mm

	<b>Amostra 1</b>	<b>Amostra 2</b>	<b>Amostra 3</b>	<b>Amostra 4</b>	<b>Média</b>
Ref	240	238	241	241	240
T10	245	246	247	246	246
T30	236	232	235	235	235
T50	250	249	250	251	250

Cálculos da massa específica média

	<b>Peso (g)</b>				<b>Volume do recipiente (cm³)</b>	<b>Massa específica (g/cm³)</b>
	<b>Amostra 1</b>	<b>Amostra 2</b>	<b>Amostra 3</b>	<b>Média</b>		
Ref	861,25	850,33	855,43	855,67	398,12	2,15
T10	839,03	833,12	831,68	834,61	398,12	2,10
T30	782,85	782,55	783,22	782,87	398,12	1,97
T50	762,07	766,24	765,55	764,62	398,12	1,92

## APÊNDICE C – RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Resistência à compressão aos 7 dias

Todos os valores estão em MPa

	<b>CP 01</b>	<b>CP 02</b>
Ref	26,76	26,67
T10	24,27	25,22
T30	33,60	29,48
T50	26,08	23,00

Resistência à compressão aos 28 dias

Todos os valores estão em MPa

	<b>CP 12</b>	<b>CP 13</b>	<b>CP 14</b>	<b>CP 15</b>
Ref	42,94	41,89	40,00	38,70
T10	26,94	30,61	25,00	24,50
T30	33,83	35,14	31,60	27,90
T50	28,39	26,85	30,10	24,10

Resistência à compressão aos 28 dias com pré-carregamento aos 7 dias

Todos os valores estão em MPa

	<b>CP 03</b>	<b>CP 04</b>	<b>CP 05</b>	<b>CP 06</b>
Ref	34,82	43,16	41,10	44,90
T10	30,79	34,91	31,50	31,20
T30	33,06	33,24	33,30	35,70
T50	30,02	27,75	32,90	31,10

Cálculos das resistências à compressão médias e diferença encontrada em MPa e %

Todos os valores estão em MPa

	<b>Resistência média aos 7 dias</b>	<b>Resistência média aos 28 dias</b>	<b>Resistência média aos 28 dias - pré-carregamento aos 7 dias</b>	<b>Diferença entre a resistência média aos 7 e 28 dias</b>	<b>Diferença entre a resistência média aos 7 e pf 28 dias</b>	<b>Diferença entre a resistência média aos 28 e pf 28 dias</b>	<b>% entre a resistência média aos 7 e 28 dias</b>	<b>% entre a resistência média aos 7 e pf 28 dias</b>	<b>% entre a resistência média aos 28 e pf 28 dias</b>
Ref	26,72	40,88	41,00	14,17	14,28	0,11	53,03%	53,45%	0,28%
T10	24,75	26,76	32,10	2,02	7,36	5,34	8,15%	29,72%	19,94%
T30	31,54	32,12	33,83	0,58	2,29	1,71	1,83%	7,24%	5,32%
T50	24,54	27,36	30,44	2,82	5,90	3,08	11,49%	24,05%	11,27%

## APÊNDICE D – RESULTADOS DO ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE

Resistência à compressão aos 28 dias

Todos os valores estão em MPa

	<b>CP 14</b>	<b>CP 15</b>
Ref	23262	28554
T10	21348	23825
T30	21262	19927
T50	16334	16420

Resistência à compressão aos 28 dias com pré-carregamento aos 7 dias

Todos os valores estão em MPa

	<b>CP 05</b>	<b>CP 06</b>
Ref	24412	26621
T10	27897	22851
T30	22156	21491
T50	16692	17806

**APÊNDICE E – RESULTADOS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO, MASSA ESPECÍFICA E ÍNDICE DE VAZIOS**

**Saturado imerso em água**

	<b>CP 16 - sem pf</b>	<b>CP 17 - sem pf</b>	<b>CP 10 - pf 7d</b>	<b>CP 11 - pf 7d</b>
Referência	233,36 g	235,32 g	221,85 g	221,05 g
T10	220,50 g	218,12 g	213,54 g	212,02 g
T30	200,45 g	202,72 g	193,82 g	189,95 g
T50	195,54 g	195,85 g	173,40 g	178,68 g

**Saturado com superfície seca**

	<b>CP 16 - sem pf</b>	<b>CP 17 - sem pf</b>	<b>CP 10 - pf 7d</b>	<b>CP 11 - pf 7d</b>
Referência	428,88 g	430,78 g	407,94 g	405,45 g
T10	413,38 g	411,46 g	403,38 g	398,55 g
T30	396,99 g	400,03 g	380,62 g	375,69 g
T50	390,50 g	392,79 g	359,28 g	366,21 g

**Seco em estufa**

	<b>CP 16 - sem pf</b>	<b>CP 17 - sem pf</b>	<b>CP 10 - pf 7d</b>	<b>CP 11 - pf 7d</b>
Referência	385,62 g	387,82 g	368,12 g	366,65 g
T10	370,03 g	367,38 g	360,00 g	355,58 g
T30	344,70 g	348,18 g	330,50 g	325,97 g
T50	341,33 g	341,69 g	298,54 g	305,42 g

**Absorção de água por imersão**

Referência	<b>Absorção de água por imersão aos 28 dias (%)</b>		<b>Absorção de água por imersão aos 28 dias - pré-carregamento aos 7 dias (%)</b>	
	11,22	11,08	10,82	10,58
T10	11,72	12,00	12,05	12,08
T30	15,17	14,89	15,16	15,25
T50	14,41	14,96	20,35	19,90

**Índice de vazios**

Referência	<b>Índice de vazios aos 28 dias (%)</b>		<b>Índice de vazios aos 28 dias - pré-carregamento aos 7 dias (%)</b>	
	22,13	21,98	21,40	21,04
T10	22,48	22,80	22,85	23,04
T30	26,61	26,28	26,83	26,77
T50	25,22	25,95	32,68	32,42

**Massa específica**

Referência	<b>Massa específica aos 28 dias (g/cm<sup>3</sup>)</b>		<b>Massa específica aos 28 dias - pré-carregamento aos 7 dias (g/cm<sup>3</sup>)</b>	
	2,19	2,20	2,19	2,20
T10	2,14	2,13	2,12	2,14
T30	2,02	2,03	2,04	2,02
T50	2,00	1,99	1,93	1,95