

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

**DÉBORA FLORES**

**ANÁLISE DA AUTOCICATRIZAÇÃO DE FISSURAS POR INDUÇÃO EM  
CONCRETOS PRODUZIDOS COM ADITIVOS CRISTALIZANTES**

**BENTO GONÇALVES**  
**2021**

**DÉBORA FLORES**

**ANÁLISE DA AUTOCICATRIZAÇÃO DE FISSURAS POR INDUÇÃO EM  
CONCRETOS PRODUZIDOS COM ADITIVOS CRISTALIZANTES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao curso de Engenharia Civil da Universidade  
de Caxias do Sul como parte dos requisitos para  
obtenção do título de Engenheira Civil.

Orientador: Prof. Me. Maurício Schafer

**BENTO GONÇALVES**

**2021**

## RESUMO

FLORES, D. **Análise da autocicatrização de fissuras por indução em concretos produzidos com aditivos cristalizantes**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso da Engenharia Civil – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul/RS.

O concreto é um dos materiais mais utilizados no mundo, sendo seu uso diretamente relacionado a sua durabilidade. Entretanto, o concreto está sujeito a manifestações patológicas caracterizadas principalmente por fissuras, que servem como pontos de entrada de agentes agressivos, como os cloretos, os quais aceleraram os processos de corrosão das armaduras e causam a deterioração da estrutura e conseqüente a redução da sua vida útil. Um processo que contribui para o reparo da estrutura de concreto é a autocicatrização, que tem a capacidade de selar as fissuras e recuperar suas propriedades. A autocicatrização pode ocorrer de forma autônoma com a modificação do concreto por meio de uma adição, que induz o material a este processo ou autógena, como um processo natural, intrínseco às propriedades e à composição dos materiais cimentícios. Para aumentar a capacidade de autocicatrização do concreto, pode-se utilizar o aditivo cristalizante que é considerado um estimulador deste fenômeno. O aditivo cristalizante é misturado a matriz cimentícia durante a sua produção e é considerado um impermeabilizante por cristalização integral que reage com a água e com as partículas de cimento, formando cristais que selam os poros e as fissuras existentes e, desta forma, reduz a permeabilidade do concreto e impede a infiltração de água e demais agentes agressivos ao seu interior, garantindo à estrutura uma maior durabilidade. Desta forma, esta pesquisa tem o objetivo de avaliar a influência do aditivo cristalizante frente a autocicatrização do concreto. Para isso, foi confeccionado amostras de concreto com aditivo cristalizante e três diferente teores de aditivo, 1%, 2,5% e 4%. Foi avaliado o processo de autocicatrização e o desempenho do aditivo cristalizante através de ensaios físicos e mecânicos, analisando a capacidade de recuperação das propriedades do concreto, sendo que foi induzido fissuras através de um pré-carregamento aos 7 e 28 dias, para avaliar a capacidade de cicatrização dessas fissuras. Observou-se que as matrizes cimentícias com o aditivo cristalizante apresentaram maior capacidade de recuperação das propriedades físicas e mecânicas, provavelmente pelo efeito da autocicatrização, além de apresentarem menor permeabilidade e absorção de água em relação a amostra referência. Nas amostras com aditivo cristalizante, também foi verificado melhor efeito em fissuras jovens e com a utilização do teor de 2,5% de aditivo cristalizante.

**Palavras-chave:** concreto, durabilidade, fissuras, desempenho, autocicatrização, aditivo cristalizante.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Cicatrização autônoma:.....	21
Figura 2 – Processo da cicatrização autógena.....	25
Figura 3– Processo de formação dos cristais em concreto com aditivo cristalizante	31
Figura 4 – Fluxograma do programa experimental.....	37
Figura 5 – Curva granulométrica do agregado miúdo .....	40
Figura 6 – Curva granulométrica do agregado graúdo.....	42
Figura 7– Abatimento do tronco de cone .....	46
Figura 8 – Ensaio de resistência a compressão.....	48
Figura 9 – Ensaio de módulo de elasticidade.....	49
Figura 10– Gráfico do abatimento por traço.....	50
Figura 11 – Gráfico de massa específica .....	51
Figura 12 –Resistência a compressão .....	53
Figura 13 – Módulo de elasticidade.....	56
Figura 14 – Absorção de água por imersão .....	58
Figura 15 – Índice de vazios.....	58
Figura 16 – Massa específica .....	60
Figura 17 –Resistência a compressão .....	62
Figura 18 – Módulo de elasticidade.....	63
Figura 19 – Absorção de água por imersão .....	64
Figura 20 – Índice de vazios.....	65
Figura 21 – Massa específica.....	66
Figura 22 –Resistência a compressão .....	67
Figura 23 – Módulo de elasticidade.....	68
Figura 24– Absorção de água por imersão .....	69
Figura 25 – Índice de vazios.....	69
Figura 26 – Massa específica.....	71
Figura 27 –Resistência a compressão .....	72
Figura 28 – Módulo de elasticidade.....	73
Figura 29 – Absorção de água por imersão .....	75
Figura 30 – Índice de vazios.....	75
Figura 31 – Massa específica.....	76

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental .....	19
Quadro 2 – Planejamento de ensaios do concreto.....	36
Quadro 3 – Especificações químicas do cimento.....	39
Quadro 4 – Especificações físicas e mecânicas do cimento .....	39
Quadro 5 – Características físicas do agregado miúdo natural.....	40
Quadro 6 – Características físicas do agregado graúdo natural .....	41
Quadro 7 – Composição do aditivo cristalizante .....	42
Quadro 8 – Composição dos traços utilizados .....	43
Quadro 9 – Ensaios de Resistência a compressão.....	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quantitativo de material utilizado.....	44
Tabela 2 – Análise de variância (ANOVA) da resistência à compressão .....	55
Tabela 3– Análise de variância (ANOVA) do módulo de elasticidade .....	57
Tabela 4 – Análise de variância (ANOVA) da absorção de água e índice de vazios	60
Tabela 5 – Análise de variância (ANOVA) da massa específica .....	61

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>8</b>
1.1 QUESTÃO DA PESQUISA .....	9
1.2 OBJETIVOS.....	10
<b>1.2.1 Objetivo Principal:</b> .....	<b>10</b>
<b>1.2.2 Objetivo específicos:</b> .....	<b>10</b>
1.3 DELIMITAÇÕES .....	10
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>11</b>
2.1 CONCRETO .....	11
<b>2.1.1 Durabilidade</b> .....	<b>12</b>
<b>2.1.2 Fissuração</b> .....	<b>15</b>
2.1.2.1 Fissuração por assentamento e retração plástica do concreto .....	16
2.1.2.2 Fissuração por retração autógena do concreto .....	16
2.1.2.3 Fissuração por expansão do concreto.....	17
2.1.2.4 Fissuração por retração de secagem .....	17
2.1.2.5 Fissuração por movimentação térmica.....	18
2.1.2.6 Limites para abertura de fissuras .....	19
2.2 AUTOCICATRIZAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO.....	20
<b>2.2.1 Cicatrização autônoma</b> .....	<b>20</b>
<b>2.2.2 Cicatrização autógena</b> .....	<b>24</b>
2.3 ADITIVO CRISTALIZANTE.....	30
2.4 INFLUÊNCIA DO ADITIVO CRISTALIZANTE NO CONCRETO .....	31
<b>3. MATERIAIS E METÓDOS</b> .....	<b>36</b>
3.2 MATERIAIS .....	38
<b>3.2.1 Aglomerante</b> .....	<b>38</b>
<b>3.2.2 Agregado miúdo</b> .....	<b>39</b>
<b>3.2.3 Agregado graúdo</b> .....	<b>41</b>
<b>3.2.4 Água</b> .....	<b>42</b>
<b>3.2.5 Aditivo cristalizante</b> .....	<b>42</b>
3.3 MÉTODOS .....	43
<b>3.3.1 Dosagem, moldagem dos corpos de prova e cura</b> .....	<b>44</b>
<b>3.3.2 Indução de fissuras</b> .....	<b>45</b>

<b>3.3.3 Ensaio no estado fresco</b> .....	46
3.3.3.1 Trabalhabilidade .....	46
3.3.3.2 Determinação da massa específica .....	47
<b>3.3.4 Ensaio estado endurecido</b> .....	47
3.3.4.1 Resistência à compressão .....	47
3.3.4.2 Módulo de elasticidade .....	48
3.3.4.3 Absorção de água por imersão, massa específica e índice de vazio .....	49
<b>4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	50
4.1 ESTADO FRESCO .....	50
<b>4.1.1 Trabalhabilidade</b> .....	50
<b>4.1.2 Massa específica</b> .....	51
4.2 ESTADO ENDURECIDO .....	52
<b>4.2.1 Análise dos resultados em amostras sem pré-carga</b> .....	52
4.2.1.1 Resistência à compressão .....	53
4.2.1.2 Módulo de elasticidade .....	55
4.2.1.3 Absorção de água por imersão, massa específica e índice de vazio .....	57
<b>4.2.2 Análise dos resultados em amostras com pré-carga aos 7 dias</b> .....	61
4.2.2.1 Resistência à compressão .....	61
4.2.2.2 Módulo de elasticidade .....	63
4.2.2.3 Absorção de água por imersão, massa específica e índice de vazio .....	64
<b>4.2.3 Análise dos resultados em amostras com pré-carga aos 28 dias</b> .....	66
4.2.3.1 Resistência à compressão .....	66
4.2.3.2 Módulo de elasticidade .....	68
4.2.3.3 Absorção de água por imersão, massa específica e índice de vazio .....	68
<b>4.2.4 Análise dos resultados global</b> .....	71
4.2.4.1 Resistência à compressão .....	71
4.2.4.2 Módulo de elasticidade .....	73
4.2.4.3 Absorção de água por imersão, massa específica e índice de vazio .....	74
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	78
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	80
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	81

## 1. INTRODUÇÃO

O concreto é um material que vem sendo utilizado de maneira intensa na construção civil, sendo um dos materiais mais consumidos pelo ser humano. Este elevado consumo está diretamente ligado a durabilidade deste material. Desta forma, é essencial que a estrutura de concreto, desempenhe suas funções previstas, durante um tempo específico ou uma vida útil esperada. Portanto, para o concreto ser considerado durável, ele deve ter a capacidade de suportar aos processos de deterioração que será exposto (MEHTA E MONTEIRO 2014; NEVILLE, 2016).

Utilizado em diversos ambientes, o concreto está sujeito a diversas situações, sendo que em ambientes agressivos, as interações com o meio, podem comprometer seu desempenho pelo aparecimento de manifestações patológicas, que conseqüentemente afetam a durabilidade e a vida útil das estruturas (CAPPELLESSO, 2018). Sendo assim, os efeitos físicos e químicos podem influenciar na redução da durabilidade e comprometer a estabilidade e funcionalidade das estruturas de concreto (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

A durabilidade inadequada se manifesta pela deterioração, sendo que um dos principais fatores de degradação do concreto é o surgimento de fissuras, pois servem como caminho preferencial para a entrada de agentes agressivos (NEVILLE, 2016). Desta forma, Takagi, Júnior e Oliveira (2004) afirmam que visto a permanente preocupação com a durabilidade e a qualidade das estruturas, torna essencial a adoção de medidas que visem aumentar sua vida útil, buscando alternativas que auxiliem na recuperação e reabilitação das estruturas diante das manifestações patológicas.

Diante disso, a capacidade de autocicatrização do concreto, pode executar a função de recuperação das propriedades da estrutura sem a necessidade de reparo humano. A autocicatrização, é um fenômeno no qual o concreto fecha suas fissuras, contribuindo para recuperação mecânica e a restauração das suas propriedades. Com isso, prolonga a vida útil e evita reparos sucessivos das estruturas de concreto, promovendo o aumento da durabilidade e redução de custos com manutenções (CAPPELLESSO, 2018; DE ROOIJ et al., 2013). Van Tittelboom e De Belie (2013), afirmam em sua pesquisa que a autocicatrização ocorre de duas formas, autônoma e

autógena. Sendo que a cicatrização autônoma ocorre com a modificação do concreto através de uma adição, que induz o material a este processo. Já a cicatrização autógena caracteriza-se como um processo natural, intrínseco às propriedades e à composição dos materiais cimentícios.

A capacidade de autorreparo do concreto pode ser estimulada por meio do uso de aditivos cristalizante, que são introduzidos na matriz cimentícia no momento de sua produção. Este aditivo é um impermeabilizante por cristalização integral que utiliza a água para catalisar e reagir com as partículas de cimento, formando depósitos cristalinos no sistema de poros e fissuras existentes (FERRARA et al., 2014; JIANG et al., 2015).

O aditivo cristalizante tem grande influência na matriz cimentícia. Além de reduzir a permeabilidade do concreto selando dos poros, o aditivo também tem a capacidade de colmatação de fissuras (cicatrização) por meio da cristalização. O cristalizante também auxilia na recuperação das propriedades e da resistência do concreto. Como o aditivo cristalizante reage com a água, à medida que ocorre a formação de fissuras com o passar do tempo, os aditivos cristalizantes continuam reagindo e sendo ativados na presença de água (TAKAGI, JUNIOR E OLIVEIRA, 2004).

Desta forma, esta pesquisa visa avaliar a influência do uso de aditivos cristalizantes em concretos, principalmente no processo de autocicatrização de fissuras, além do seu desempenho no que se refere a capacidade de reestabelecer as propriedades mecânicas do concreto após a fissuração. Para isso, foi testado um tipo de aditivo cristalizante, em diferentes teores, buscando identificar o índice ideal de aditivo no processo de cicatrização e avaliar sua eficácia diante este fenômeno.

## 1.1 QUESTÃO DA PESQUISA

Esta pesquisa visa responder à questão da capacidade do aditivo cristalizante de reestabelecer o desempenho do concreto através da autocicatrização de fissuras. Pressupondo que os aditivos cristalizantes favorecem o fechamento total ou parcial de fissuras, aprimorando o fenômeno de cicatrização do concreto, recuperando o seu desempenho. Isso ocorre através das reações de hidratação destes aditivos que se propagam pela matriz porosa do concreto, formando uma estrutura cristalina que

repele a entrada da água. Desta forma, acontece o fechamento das fissuras, recuperando o desempenho da estrutura de concreto.

## 1.2 OBJETIVOS

Os objetivos desta pesquisa estão divididos em objetivo principal e nos objetivos específicos.

### 1.2.1 Objetivo Principal:

O objetivo desta pesquisa é avaliar a influência do uso de aditivos cristalizantes em concretos frente ao processo de autocicatrização, em função do fechamento dos poros e das fissuras geradas.

### 1.2.2 Objetivo específicos:

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- a) Avaliar o efeito da utilização do aditivo cristalizantes frente as propriedades do concreto no estado fresco.
- b) Avaliar o efeito da utilização do aditivo cristalizantes frente as propriedades do concreto no estado endurecido.
- c) Identificar se o aditivo cristalizante promove um processo de autocicatrização em amostras com fissuras induzidas.
- d) Identificar o teor de aditivo cristalizante mais eficaz na autocicatrização e recuperação das propriedades mecânicas.

## 1.3 DELIMITAÇÕES

Alguns critérios foram delimitados para conduzir o trabalho:

- Utilização do cimento Portland do tipo CP II F-40;
- Utilização de concreto com traço 1:2,36:2,64;
- Avaliação de um aditivo cristalizantes;
- Avaliação por meio de ensaios de laboratório;

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico foram abordados temas referentes ao concreto, durabilidade, degradação, os mecanismos de fissuração e autocicatrização das estruturas. Além disso, será abordado o aditivo cristalizante e seus efeitos nas propriedades do concreto e na autocicatrização.

### 2.1 CONCRETO

O concreto é um material de grande importância para o desenvolvimento e qualidade da vida humana, sendo utilizado em diferentes técnicas construtivas. É o material mais usado na construção civil e o segundo material mais consumido pelo ser humano, perdendo apenas para água (METHA E MONTEIRO, 2014). A grande utilização do concreto ocorre devido a fatores como a resistência à água, facilidade de se obter elementos estruturais de várias formas e tamanhos, pouca manutenção, baixo custo e rápida disponibilidade do material (METHA E MONTEIRO, 2014).

A NBR 12655 (ABNT, 2015) define o concreto como um material formado pela mistura homogênea de cimento, agregados miúdo e graúdo e água, com ou sem a incorporação de componentes minoritários (aditivos químicos, metacaulim ou sílica ativa), que desenvolve suas propriedades pelo endurecimento da pasta de cimento (cimento e água). O concreto tem a finalidade de suportar, dentre outros, predominantemente os esforços de compressão atuantes nas estruturas de concreto armado, e de proteger a armadura frente ao ataque de agentes agressivos do ambiente. Por isso, o concreto tem grande responsabilidade sobre a vida útil das estruturas (ZIEGLER, 2020).

Muitos fatores podem comprometer o desempenho das estruturas de concreto, como o intemperismo, a deterioração, procedimentos inadequados, mão de obra desqualificada e o uso inadequado da estrutura. Esses fatores reduzem a vida útil da estrutura e podem comprometer a durabilidade da mesma (OURIVES, BILESKY E YOKOYAMA, 2009). Por isso, é de extrema importância estudar a durabilidade das estruturas de concreto, sendo que este fator é o principal responsável pela preferência deste material no setor construtivo (SALES ET AL., 2018).

### 2.1.1 Durabilidade

A durabilidade das estruturas de concreto é uma das principais causas para este material ser tão utilizado na construção civil. Neville (2016) afirma que para o concreto ser considerado durável, deve possuir a capacidade de suportar os processos de deterioração que será exposto, conservando uma resistência mecânica adequada e uma condição de serviço pelo período que foi especificado em projeto.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) define que durabilidade consiste na capacidade da estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e pelo contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto. Conforme Neville (2013), a durabilidade do concreto é uma de suas propriedades mais importantes, pois é essencial que ele seja capaz de suportar as condições para as quais foi projetado durante a vida da estrutura. Neste sentido, devido as interações com o ambiente no qual as estruturas de concreto ficam expostas, elas sofrem alterações que podem comprometer a estabilidade e a funcionalidade da estrutura no decorrer da sua vida útil (SALES et al., 2018).

Existem diversos fatores que podem causar danos ou destruir uma estrutura de concreto, normalmente, em decorrência de uma ou mais manifestações patológicas. Esses agentes podem ser classificados em agentes mecânicos (como sobrecarga), físicos (como variação da temperatura), químicos (como reações internas do concreto) e biológicos (como raízes de plantas), ou ainda sob outra interpretação, também é possível classificar como agentes intrínsecos (inerentes à própria estrutura, que agem “de dentro pra fora”) e extrínsecos (independem da estrutura, agem “de fora para dentro”). Em virtude disto, os mecanismos de degradação ou até mesmo o envelhecimento da estrutura comprometem o seu desempenho, reduzindo ou anulando sua condição de uso (SALES et al., 2018, WEIMER et al., 2018).

Existem diversos mecanismos de deterioração do concreto. Helene (1997), destaca 4 mecanismos mais importante e preponderantes na deterioração do concreto, sendo ele:

- a) lixiviação, ocorre quando a estrutura de concreto entra em contato com água, normalmente através de infiltrações. Quando o concreto é hidratado um composto chamado hidróxido de cálcio é formado e na ocorrência de infiltração, este composto é dissolvido e levado pra superfície do concreto.

Como consequência, o concreto pode apresentar uma superfície arenosa ou com agregados expostos sem a pasta superficial, com eflorescências de carbonato e redução do pH do extrato aquoso dos poros superficiais do concreto;

- b) expansão por ação de águas e solos que contenham sulfatos. Podem originar reações expansivas e deletérias com a pasta de cimento hidratado. Estas ocorrem formando na superfície do concreto fissuras aleatórias, esfoliação e redução da dureza e resistência do concreto, causando a redução do pH do extrato aquoso dos poros superficiais e colocando em risco a passivação das armaduras.
- c) expansão decorrente das reações entre os álcalis do cimento agregados reativos e presença de elevada umidade. Alguns agregados reativos e alguns compostos da pasta de cimento podem reagir com os álcalis, sendo significativa quando há presença de elevada umidade. Ocorre expansão da pasta de concreto, causando fissuras superficiais ou profundas.
- d) reações deletérias superficiais de alguns agregados pela transformação de produtos ferruginosos presentes na sua composição mineralógica. Destaca-se a ocorrência deste tipo de reação quando o agregado contém pirita, podem ocasionar o aparecimento de manchas de ferrugem, cavidades e protuberâncias na superfície do concreto.

Neville (2013) afirma que o ataque desses agentes é favorecido pelo transporte interno dos agentes agressivos. Segundo Souza e Ripper (1998), quanto mais permissivo um concreto for ao transporte interno de água, gases e de outros agentes agressivos, maior será a probabilidade da sua degradação. Logo, para estrutura atender o desempenho e a durabilidade, a permeabilidade é uma propriedade de grande relevância.

Para Mehta e Monteiro (2008), uma estrutura com vida útil longa é sinônimo de durabilidade. Desta forma, um material atinge o fim de sua vida útil quando suas propriedades, sob as condições de uso projetadas, se deterioraram de forma que não é mais seguro e econômico o seu uso. A NBR 6118 (ABNT, 2014) define vida útil de projeto como o período no qual as estruturas de concreto mantêm suas características, sem intervenções significativas, desde que atendidos as determinações de uso e manutenção.

Atualmente, para se definir a durabilidade de forma adequada é necessário definir o desempenho mínimo para o material, em um intervalo de tempo desejado, em função de um meio ambiente específico. Sendo assim, a durabilidade depende de parâmetros como as características da construção, agressividade ambiental, critérios de desempenho desejados e do tempo, ou seja, da vida útil requerida para estrutura. A vida útil depende do desempenho dos elementos estruturais e não estruturais, que podem apresentar diferentes tempo de vida útil, levando à necessidade de um programa adequado de manutenção, a fim de que não prejudiquem toda a estrutura (SALES et al., 2018).

Baseado nessas definições, a NBR 15575 (ABNT, 2013) estabelece exigências mínimas de vida útil para os sistemas estruturais de edifícios residenciais. Esses fatores devem ser estabelecidos em projeto, o que significa que a estrutura projetada, executada e mantida conforme as normas técnicas específicas, produzirá durabilidade efetiva aos critérios estabelecidos no projeto. Esses critérios são determinados dentro de três níveis de desempenho: mínimo, intermediário e superior com valores de vida útil de 50, 63 e 75 anos respectivamente. Desta forma, a norma apresenta um parâmetro quantitativo, estabelecendo uma meta de durabilidade, e assim, a expressão vida útil, impõe maior responsabilidade as partes técnicas envolvidas promovendo também mudanças positivas em termos de qualidade e conformidade do concreto e em relação ao desempenho estrutural (SALES et al., 2018).

Conforme Medeiros, Andrade e Helene (2011) é de extrema importância que exista um conhecimento apurado a respeito da durabilidade das estruturas de concreto quando se busca uma previsão no comportamento do concreto em longo prazo e na prevenção das manifestações patológicas precoces. Para Weimer et. al., (2018), as manifestações patológicas são consequência de agentes de deterioração e muitas vezes poderiam ser evitadas por meio de um bom projeto, execução e materiais adequados e manutenção apropriada. As fissuras representam a manifestação patológica mais característica, com maior ocorrência nas estruturas de concreto armado.

### 2.1.2 Fissuração

A fissuração em uma estrutura de concreto pode acontecer desde pequenos defeitos estéticos até grandes fissuras. Desta forma, nem sempre as fissuras são ameaças a ponto de desencadear graves mecanismos de degradação. Porém existe muita preocupação com o surgimento destas, pois elas podem causar danos estruturais e fazem com que a estrutura perca sua finalidade, sendo também um indicativo de anomalias impostas ao concreto e, muitas vezes o ponto de partida no diagnóstico de uma patologia (LISBOA, ALVES E MELO 2017).

As fissuras são resultado de fatores como variação volumétrica devido a mudanças de temperatura e umidade, bem como das condições de carregamento e utilização da estrutura ao longo da sua vida útil, que podem contribuir com o agravamento das causas químicas (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Neville (2013) afirma que basicamente existem quatro tipos de fissuras: fissuras plásticas; fissuras térmicas nas primeiras idades; fissuras de retração por secagem e fissuras por sobrecarga. Porém, também existem outros tipos de fissuras não estruturais, como as causadas por reação álcali-agregado e corrosão de armadura.

Para Lisboa, Alves e Melo (2017), as fissuras ocorrem quando as deformações sofridas pelo concreto superam as deformações críticas. As fissuras podem surgir antes ou após o endurecimento da massa de concreto, as ocorridas durante o estado plástico da massa de concreto, isto é, anteriores ao endurecimento, são causadas por: assentamento do concreto, movimentação de fôrma, assentamento de fundação, concretagens em rampa; retração plástica; erros no acabamento do concreto e podem ocorrer pela soma de mais de um fator. Ainda existem as fissuras originadas por fenômenos físicos, como a cura do concreto, fenômenos químicos, como a corrosão e a reação álcali agregado, fenômenos térmicos, através das variações de temperatura e fenômenos estruturais como sobrecargas e deformações na estrutura (PACHECO, 2020; LISBOA, ALVES E MELO 2017).

As fissuras tendem a ser mais graves quanto maior for o seu tamanho, sendo caracterizado pela extensão, abertura e profundidade. Desta forma, ocorre um aumento da superfície exposta e com isso, a possibilidade de entrada de água e agentes agressivos para o interior do concreto. A ocorrência de fissuras em uma estrutura não pode ser ignorada, deve ser evitada, ou controlada e minimizada pela

reparação, pois afetam a durabilidade estrutural, tendo em vista, que um concreto não fissurado apresenta uma maior durabilidade (ZIGLER, 2020; LISBOA, ALVES E MELO 2017).

#### 2.1.2.1 Fissuração por assentamento e retração plástica do concreto

Nas primeiras horas após o lançamento do concreto, os materiais que compõem o concreto começam a assentar, e isto provoca a expulsão de água e ar, fazendo com que a água venha à superfície como exsudação. Desta forma, a fissuração ocorre porque os agregados maiores e a armadura restringem o deslocamento da massa. A utilização de concretos muito plásticos provoca uma maior exsudação, dando origem à fissuração (LISBOA, ALVES E MELO 2017). Neville (2013), afirma que as fissuras causadas por assentamento plástico, podem ser evitadas com o uso de um aditivo incorporador de ar para reduzir a exsudação e pode-se aumentar o cobrimento da armadura superior, desta forma, evitando a presença de obstáculos na superfície superior do concreto.

Segundo Lisboa, Alves e Melo (2017) o concreto em estado plástico, está propício a fissuras por retração plástica que são provocadas pela perda rápida da água na superfície do concreto, seja por evaporação, por absorção do agregado, da fôrma ou fundação. Sendo assim, a alta temperatura ambiente e baixa umidade relativa do ar provocam perda rápida de água e, conseqüentemente, fissuração na superfície do concreto. As fissuras de retração plástica são profundas e geralmente paralelas e com espaço de 0,3 a 1,0 m.

Para Neville (2013) uma forma de prevenir a retração plástica é controlar a velocidade de evaporação da água na superfície exposta do concreto. O autor afirma que a velocidade de evaporação não deve ser maior que 0,25 kg/h/m<sup>2</sup>. Lisboa, Alves e Melo (2017) recomendam nesse caso, proteger a superfície do concreto para impedir a perda da água, que não deve ser superior a 1kg/m<sup>2</sup>/hora, tendo em vista que ela é motivada pela umidade relativa, temperatura e velocidade do vento.

#### 2.1.2.2 Fissuração por retração autógena do concreto

A retração autógena é provocada pela perda da água dos poros do concreto, podendo ser maior, com a temperatura, finura do cimento e alto teor de C<sub>3</sub>A (LISBOA,

ALVES E MELO 2017). Hasparyk et al. (2005) define que a retração autógena representa, de forma isolada, uma redução macroscópica dos componentes do cimento após o início da pega, sem redução da temperatura ou aplicação de cargas externas.

Fatores como a relação água/cimento (a/c), a composição e finura do cimento, o teor de agregado e a temperatura de exposição, influenciam diretamente na retração autógena. Em um concreto de resistência normal, essa retração ocorre de forma muito pequena, tipicamente entre 50 e 100  $\times 10^{-6}$ , mas pode ser grande em concreto de alto desempenho (NEVILLE, 2013). Desta forma, Onghero (2017) também afirma que esse tipo de retração é mais relevante em concretos que utilizam em sua composição, um baixo consumo de água e adições minerais, sendo o caso de concreto de alto desempenho.

#### 2.1.2.3 Fissuração por expansão do concreto

As fissuras no concreto também podem aparecer quando o concreto sofre o processo de expansão. Para Neville (2013) isso ocorre caso exista um fornecimento contínuo de água ao concreto durante a hidratação, promovendo a absorção da água pelo gel de cimento. Essa expansão é de 10 a 20 vezes menor que a retração em um concreto produzido com agregado normal, porém, em um concreto leve pode chegar à faixa de 80% da retração do concreto endurecido após 10 anos.

Segundo Lisboa, Alves e Melo (2017), existem algumas alterações químicas do cimento que podem facilitar a expansão da pasta do concreto, sendo conhecidas como expansão química. Essa expansão pode ser causada por: reação química, atividade com calcário dolomítico e presença de CaO e MgO no clínquer.

#### 2.1.2.4 Fissuração por retração de secagem

A retração por secagem é provocada pela evaporação da água livre ou capilar que geram tensões nos poros do concreto que ainda possuem água (HELENE; ANDRADE, 2007). Neste tipo de retração, a fissuração depende da extensibilidade do concreto, de sua resistência e do grau de restrição à deformação. Desta forma, embora cause a retração, o uso de cimento reduz o risco de abrir uma fissura além de aumentar a resistência do concreto. Já o uso de aditivos aceleradores de pega tende

a aumentar o risco de fissuração, enquanto aditivos retardadores acomodam a retração por secagem na retração plástica (LISBOA, ALVES E MELO 2017).

Segundo Onghero (2017), fatores como a umidade do ar, a temperatura, a geometria da estrutura e algumas características da pasta do concreto influenciam na retração por secagem, que também é conhecida em algumas literaturas como retração hidráulica. Conforme Neville (2013), algumas fissuras por retração de secagem podem levar semanas ou meses para surgir, isso acontece devido à restrição externa ao movimento promovida pelo subleito ou por outra parte da estrutura. Pode-se eliminar essas restrições através de juntas de movimentação na estrutura.

Existem formas de controlar a fissuração por retração de secagem, como a redução da retração com a utilização de aditivos redutores de retração, além do processo de cura do concreto ocorrer da forma adequada. A abertura das fissuras de retração também pode ser controlada com o uso de uma armadura posicionada próximo à superfície do concreto, atendo o cobrimento exigido (NEVILLE 2013).

#### 2.1.2.5 Fissuração por movimentação térmica

As fissuras por movimentação térmica são decorrentes da interação de materiais com diferentes coeficientes de dilatação térmica e da exposição a variadas condições ambientais. O concreto tem um coeficiente de dilatação térmica positivo, sendo que o seu valor depende da composição do concreto e da condição de umidade no momento da variação de temperatura (NEVILLE 2013). Conforme Lisboa, Alves e Melo (2017), os sólidos existentes no concreto se expandem com aquecimento e se contraem no resfriamento, desta forma, na massa de concreto ocorre uma elevação de temperatura na hidratação do cimento, seguida de um arrefecimento para equilibrar com a temperatura externa, e devido à esta variação pode ocorrer o aparecimento de fissuras por retração térmica.

Nas primeiras idades do concreto as variações térmicas estão associadas à hidratação do cimento, não sendo diretamente ligadas as condições ambientais. Neste período, as fissuras por deformação térmica, são determinadas pelo gradiente de temperatura gerado nas reações de hidratação. Assim, as camadas externas na estrutura de concreto tenderão a fissurar, na medida em que a temperatura diminui

promovendo a retração dessa parte do material, que não é acompanhada pelas camadas mais internas do mesmo (BALTHAR, 2004; SENISSE, 2010).

#### 2.1.2.6 Limites para abertura de fissuras

A espessura da abertura das fissuras no concreto deve ser controlada para evitar a entrada de agentes agressivos, sendo que a fissuração é uma das principais causas da deterioração das estruturas de concreto. Desta forma, a NBR 6118 (ABNT, 2014), descreve os limites para fissuração do concreto simples, armado e protendido, O Quadro 1, apresenta o valor desses limites de acordo com a norma NBR 6118 (ABNT, 2014), considerando as diferentes classes de agressividade ambiental.

Quadro 1 – Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental

Tipo de concreto estrutural	Classe de agressividade ambiental (CAA) e tipo de protensão	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações em serviço a utilizar
Concreto simples	CAA I a CAA IV	Não há	--
Concreto armado	CAA I	ELS-W $w_k \leq 0,4$ mm	Combinação freqüente
	CAA II e CAA III	ELS-W $w_k \leq 0,3$ mm	
	CAA IV	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	
Concreto protendido nível 1 (protensão parcial)	Pré-tração com CAA I ou Pós-tração com CAA I e II	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	Combinação freqüente
Concreto protendido nível 2 (protensão limitada)	Pré-tração com CAA II ou Pós-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação freqüente
		ELS-D <sup>1)</sup>	Combinação quase permanente
Concreto protendido nível 3 (protensão completa)	Pré-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação rara
		ELS-D <sup>1)</sup>	Combinação freqüente
<sup>1)</sup> A critério do projetista, o ELS-D pode ser substituído pelo ELS-DP com $a_p = 25$ mm (figura 3.1). NOTAS 1 As definições de ELS-W, ELS-F e ELS-D encontram-se em 3.2. 2 Para as classes de agressividade ambiental CAA-III e IV exige-se que as cordoalhas não aderentes tenham proteção especial na região de suas ancoragens.			

Fonte: ABNT NBR 6118, 2014

Conforme verificado no quadro acima, o limite de abertura de uma fissura é de no máximo 0,4 mm, sendo estabelecido um limite ainda menor quando a classe de agressividade ambiental aumenta, dependendo então, do ambiente em que a

estrutura será inserida. Esses limites são estabelecidos visando uma maior durabilidade da estrutura de concreto e um bom desempenho relacionado a proteção das armaduras (NBR 6118, ABNT 2014).

## 2.2 AUTOCICATRIZAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO

As fissuras formadas no concreto, desde que não ultrapassem o limite máximo permitido em norma, não são consideradas uma falha de alto grau, a ponto de inviabilizar uma estrutura (HUANG et al., 2016). No entanto, quanto mais tempo o concreto fissurado ficar em exposição, mais fácil e acelerado será o processo de penetração de água e agentes agressivos, expondo a estrutura aos riscos de corrosão da armadura que conseqüentemente, afetam o seu desempenho e durabilidade (GJØRV, 2015).

Neste contexto, com a finalidade de diminuir as conseqüências dessas manifestações patológicas, e garantir a melhoria do desempenho e da durabilidade das estruturas, surge o conceito de autocicatrização, fenômeno no qual o concreto fecha suas fissuras e recupera suas propriedades (DE ROOIJ et al., 2013; KAN et al., 2010). De acordo com Pacheco (2020), autocicatrizante é o nome que se dá ao concreto que tem a capacidade de selar suas fissuras. O comitê Técnico da RILEM 221-SHC: *Self-healing Phenomena in Cement-Based Materials* (DE ROOIJ et al., 2013), define a autocicatrização como o fenômeno que envolve a recuperação mecânica e a restauração das propriedades do material após o fechamento das fissuras.

O mecanismo de autocicatrização do concreto pode ser dividido em autocicatrização autônoma e autógena. A autocicatrização autógena é um processo natural de recuperação do próprio concreto. Já a autocicatrização autônoma ocorre com a modificação do concreto com componentes produzidos com finalidade autocicatrizante (ROOIJ et al., 2013, VAN TITTELBOOM E DE BELIE, 2013).

### 2.2.1 Cicatrização autônoma

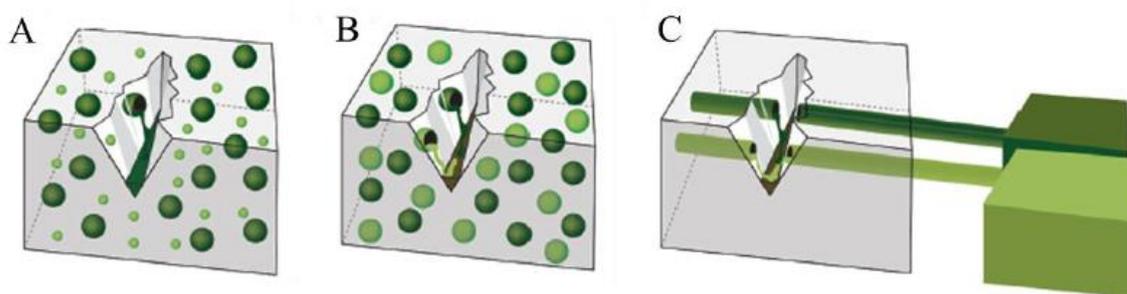
O fenômeno da autocicatrização é considerado autônomo quando utiliza para sua recuperação componentes de materiais que não são encontrados em sua matriz principal e sim através de adições de engenharia (RILEM 221 - SHC, 2013). A

autocicatrização autônoma, também conhecida como projetada, refere-se a matriz cimentícia, induzida a desenvolver propriedades autocicatrizante, pela adição de elementos químicos que reagem com a matriz ou por elementos reativos após a ocorrência do dano pela liberação de um material específico para este fim, sendo ambos introduzidos na matriz cimentícia em sua produção (CAPPELLESSO, 2018). Por meio de adições como cinzas volantes ou agentes expansivos específicos no concreto, ocorre a cicatrização involuntária da fissura, sendo que estes produtos são incorporados a matriz do concreto com o propósito de preencher as fissuras e acelerar o fenômeno da cicatrização (JCI - TC075B, 2009).

Para Tang et al. (2015), este fenômeno ocorre a partir do desenvolvimento de fissuras que conseqüentemente rompem as cápsulas que contém os agentes cicatrizantes que quando liberados reagem com a água, ar ou calor. Diversas pesquisas surgiram com o foco na abordagem da cicatrização autônoma baseada em microcápsulas, sendo considerada a perspectiva mais interessante para este tipo de cicatrização. As capsulas contêm agente cicatrizante que são dispersados na ocorrência de fissuras, reagindo com um segundo componente disperso na matriz cimentícia ou nos sistemas vasculares inseridos no concreto (VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013). A figura 1 mostra esse processo.

Figura 1– Cicatrização autônoma:

a) incorporação de cápsulas, compostas por agentes cicatrizantes (esferas em verde escuro); b) um segundo componente químico inserido na matriz do concreto, por meio de cápsulas adicionais (esferas em verde claro) e c) sistemas vasculares como



agentes cicatrizantes.

Fonte: Takagi (2013)

De acordo com Oliveira (2019), a cicatrização através de cápsulas necessita da adição de um agente cicatrizante em seu interior, sendo o seu mecanismo ativado

a partir de sua liberação ou reação na fissura, quando ocorrer a ruptura da cápsula. Desta forma, a autora destaca que diversos fatores podem interagir com o agente de cicatrização, como a umidade, o ar, o calor, materiais reativos existentes na matriz cimentícia ou um segundo componente presente em cápsulas.

O processo de autocicatrização autônoma pode ser influenciado diretamente através largura da fissura e o tipo de cimento (MOREIRA, 2016). Edvardsen (1999) realizou ensaios a fim que comprovar essas influências, concluindo que cimentos do tipo CP-III, apresentam um melhor resultado quanto a estanqueidade se comparado ao cimento CP-I e fissuras de menor porte obtiveram maior redução do fluxo de água, em relação a fissuras maiores.

Conceitos mais recentes se referem à incorporação de adições projetadas com materiais tecnológicos e sofisticados na matriz cimentícia buscando a autocicatrização, sendo que possuem a capacidade de selar as fissuras com abertura de 0,3 mm até 1 mm (OLIVEIRA, 2019). Para ocorrer a autocicatrização autônoma diversos materiais podem ser adicionados ao concreto, como por exemplo, os polímeros superabsorventes (PSA), os aditivos redutores de permeabilidade ou as bactérias calcinogênicas. Além de concretos contendo aditivos expansivos e cinzas volantes também serem considerados exemplos típicos de cicatrização autônoma (MOREIRA, 2016).

O potencial de autocicatrização do concreto pode ser aprimorado, substituindo parte do cimento por cinzas volantes ou por escória de alto forno. As cinzas volantes continuam a hidratar após 28 dias e desta forma é possível que os produtos desta hidratação modifiquem a microestrutura podendo ocorrer o selamento das fissuras (EDVARDSEN, 1996).

Van Tittelboom e De Belie (2009), testaram o potencial de autocura do concreto estimulado pela variação da composição da mistura e do tipo de cimento. Durante o teste foi verificado que o fluxo de água nas amostras decresceu nos primeiros dias de teste. Deste modo, concluíram que, a causa desta redução foi devido ao desaparecimento de bolhas de ar presentes nas amostras. Também foi possível verificar que a mudança do coeficiente de permeabilidade da água é proporcional ao tamanho da fissura. Além das misturas com substituição de cinza volante e de escória de alto forno apresentaram uma maior redução no coeficiente de permeabilidade e na largura da fissura, com o tempo, sendo que esta redução foi mais evidente nas

amostras com substituição de cimento por escória de alto forno, e o grau de autocicatrização foi proporcional a quantidade de escória utilizada (VAN TITTELBOOM E DE BELIE, 2009; MOREIRA, 2016)

A autocicatrização pode ser autônoma através do método que utiliza os polímeros superabsorventes (PSA), que são polímeros reticulados que têm a capacidade de absorver uma quantidade relevante de líquido e retê-lo na sua estrutura. Ao entrarem em contato com água ou com uma solução aquosa, formam um hidrogel macio e insolúvel. Esses materiais possuem elevada capacidade de absorção, permitindo a infiltração de líquido de seu ambiente de inserção (SNOECK et al., 2016; MOREIRA, 2016)

Conforme Snoeck et al., (2016), quando ocorre a fissura e os polímeros entram em contato com ambiente externo, eles absorvem a umidade e aumentam seu volume, selando as fissuras. Em seu trabalho, Snoeck et al., (2016), fizeram o uso de fibras de PVA (acetato de polivinila) como PSA, sendo substituído em 1% em massa pelo cimento total da mistura, concluindo que as amostras com esse material apresentaram menor permeabilidade e menor absorção de água por capilaridade.

Lee, Wong e Buenfeld (2016), também estudaram a utilização do PSA e verificaram que o uso do polímero de poliacrilato-co-acrilamida apresentou resultados melhores do que o polímero poliacrilato em fissuras padrão. Os autores também observaram que a maior granulometria dos polímeros conduziu um melhor desempenho na matriz cimentícia. Porém, Gruyaert et al., (2014) apresentaram uma desvantagem em relação ao uso do PSA para autocicatrização, pois ocorre uma elevada absorção de água ainda quando o concreto está sendo misturado e como consequência ocorre um aumento no volume dos macroporos após o concreto endurecido, sendo que fissuras ou macroporos de maiores dimensões reduzem a eficácia da cicatrização.

Outro método de desenvolvimento da cicatrização autônoma é com a utilização de bactérias extremofílicas capazes de resistirem por longos períodos em ambientes alcalinos. Quando essas bactérias são inseridas ao concreto, elas permanecem inativas até que ocorra a primeira fissura do material expondo-as à água e ao oxigênio. Após ativadas, as bactérias começam a produzir carbonato de cálcio que com o tempo acabam selando a fissura (JONKERS, 2010).

O concreto com a adição de bactérias pode ser denominado de bioconcreto, e a cicatrização neste material, ocorre por meio de um agente de autocura, que biologicamente produz calcário, selando as fissuras que surgirem na superfície das estruturas de concreto. Este agente é formado por bactérias do gênero *Bacillus*, e nutrientes à base de cálcio, conhecido como lactato de cálcio, além de fósforo e de nitrogênio, sendo que estes agentes são adicionados no concreto durante sua mistura (JONKERS, 2011; MOREIRA, 2016).

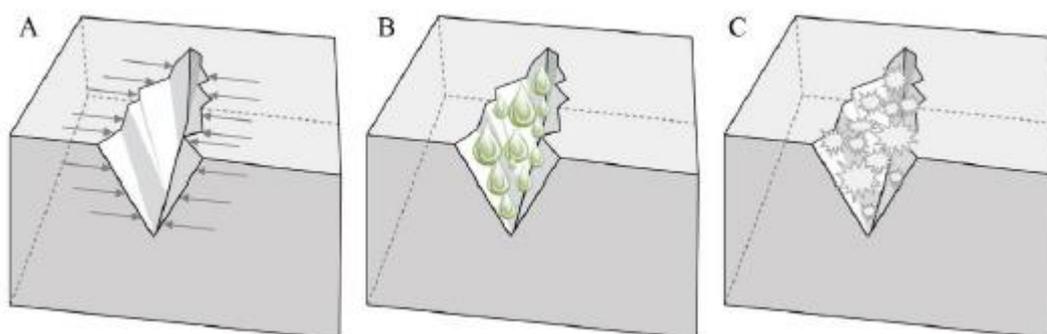
A cicatrização do bioconcreto pode ser comparada ao processo de cura natural das fraturas ósseas no corpo humano, curadas por osteoblastos que mineralizam para reconstituir o osso. Além disso, tem uma vantagem adicional neste método, sendo que ocorre o consumo de oxigênio durante a conversão bacteriana do lactato de cálcio em calcário e como o oxigênio é um elemento essencial no processo de corrosão da armadura, isso contribui para o aumento da durabilidade das estruturas de concreto (JONKERS, 2011; MOREIRA, 2016).

### **2.2.2 Cicatrização autógena**

Segundo Rooij et al. (2013), a autocicatrização autógena, é definida como a recuperação do desempenho de um material após uma ação de redução desse desempenho. Os principais mecanismos para ocorrência deste tipo de autocicatrização, de acordo com Van Tittelboom e De Belie (2013), são a hidratação de partículas de cimento não hidratadas e a formação de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) devido à lixiviação do hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). A autocicatrização autógena também pode ser desenvolvida com a utilização de diferentes cimentos, adições minerais e os aditivos cristalizantes.

Para Oliveira (2019), a autocicatrização autógena é promovida pelos componentes adotados na mistura original do concreto, com a presença de água, sendo que este fenômeno proporciona o selamento total ou parcial das fissuras, podendo desta forma também recuperar a capacidade de carga da estrutura. Conforme Zingler (2020), esta autocicatrização se desenvolve baseada nas propriedades do concreto, tendo diversos fatores que influenciam este fenômeno, variando desde as características do cimento, relação água/aglomerante, até as condições ambientais de exposição e a espessura das fissuras.

Figura 2 – Processo da cicatrização autógena  
(a) restrição da abertura da fissura (b) presença de água (c) cristalização



Fonte: VAN TITTELBOOM e DE BELIE (2013).

O cimento é um dos principais influenciadores deste fenômeno, sendo que suas características atuam de forma acentuada nas propriedades de hidratação de uma matriz cimentícia, sendo constituído por silicato tricálcio (C3S) e dicálcio (C2S), aluminato tricálcio (C3A) e ferroaluminato tetracálcio (C4AF), principais elementos das reações que promovem autocicatrização (ZINGLER, 2020).

Os processos e reações que ocorrem para promover o fenômeno de autocicatrização autógena é exatamente os mesmo que ocorrem no processo normal de hidratação do cimento, onde ocorre a formação do C-S-H (silicato de cálcio hidratado) e CH (hidróxido de cálcio), pela reação do silicato tricálcio (alita) e o silicato dicálcico (belita) com a água. A diferença é que na autocicatrização autógena, essas reações ocorrem apenas nas partículas que ainda não foram consumidas, uma vez que o concreto forma depósitos naturais dos minerais reativos e desta forma, o gatilho para a ocorrência das reações é a fissuração do concreto, que promove a interação destes materiais com a umidade (LI et al., 2013). Para Takagi (2013), este fenômeno é referente à hidratação contínua de materiais anidros com a nucleação de carbonato de cálcio e formação de cristais.

De acordo com De Rooij et al. (2013), a autocicatrização autógena pode ocorrer devido a dois processos químicos. Primeiro é a hidratação de cimento anidro mantido em depósito até o momento de hidratação e assim na presença de água, forma novos produtos que se instalam no interior da fissura, promovendo a autocicatrização. Já o segundo processo, é a formação de  $\text{CaCO}_3$  recorrente da junção dos íons de cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) presentes nos poros com água do concreto com os

íons de carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) presentes na água da fissura, este processo é o que tem maior contribuição para o selamento das fissuras (DE ROOIJ et al., 2013).

De acordo com Neville (2016), a relação água/aglomerante é um parâmetro que também influencia no processo de autocicatrização da matriz cimentícia, sendo que esta relação mínima para hidratação da matriz é de aproximadamente 0,36 quando curada em água e deve ser maior quando a cura acontecer sem o contato com água externa.

Para Mehta e Monteiro (2014), o aparecimento de fissuras, sem maiores deformações plásticas é facilitado em misturas cimentícias de alta resistência à compressão, pois são caracterizadas por menores relações água/aglomerante. Nestes casos, devido à baixa disponibilidade de água para hidratação completa da matriz cimentícia, ocorre a maior probabilidade de restarem partículas de cimento anidro. Assim, quando expostos a água através hidratação tardia e da formação de fissuras, as partículas que restaram podem contribuir na capacidade autocicatrizante da matriz (OLIVEIRA, 2019; ZINGLER 2020).

Em concretos com menor relação água/cimento ocorre menor hidratação das partículas de cimento e conseqüentemente, maiores quantidades de aglomerante anidro na matriz, sendo essas partículas hidratadas posteriormente favorecendo a autocicatrização. Já em matrizes cimentícias com maior relação água/cimento, a hidratação contínua e tardia é prejudicada, pois a grande disponibilidade de água na mistura favorece a hidratação de praticamente todas as partículas anidro, reduzindo a capacidade de autocicatrização (LI et al., 2018; CUENCA et al., 2018; ZINGLER, 2020;).

Entretanto, nestes casos, a maior porosidade da matriz cimentícia em decorrência da maior relação água/cimento, pode favorecer a autocicatrização em consequência da maior facilidade de lixiviação de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Outro fator decorrente da maior porosidade da matriz cimentícia é a contribuição para formação e crescimento de cristais de C-S-H, quando utilizado aditivos cristalizantes (NEVILLE, 2016; ELSALAMAWI et al., 2020)

A colmatação autógena das fissuras no concreto pode variar de acordo com a idade dessas fissuras, sendo que as fissuras encontradas em concretos jovens apresentam como principal mecanismo de cicatrização a hidratação contínua dos grãos anidros, enquanto fissuras em concretos com idade mais avançadas a

probabilidade de ocorrer essa hidratação é menor, em consequência das reações de hidratação da matriz cimentícia estarem em maior avanço (FERRARA et al., 2014). Contribuindo para esta informação, Huang et al. (2013), encontraram em seus estudos, maiores quantidades de produtos de hidratação junto à fissura em pastas de cimento jovens, em comparação com às quantidades verificadas em pastas com maiores idades. Porém, para De Belie et al. (2018), a cicatrização em idades mais avançadas ocorre por meio das reações de hidratação tardias e pela precipitação do  $\text{CaCO}_3$ .

Diversos fatores influenciam na capacidade autocicatrizante, sendo que o controle da abertura das fissuras no concreto é um dos fatores relacionados a sua eficiência. Porém, como outros parâmetros relacionados a diversas configurações de fissuras também podem influenciar na cicatrização, é difícil estipular um consenso sobre a largura máxima que uma fissura pode apresentar para que ocorra o fenômeno de autocicatrização (DE ROOIJ et al., 2013; ZINGLER 2020;). De acordo com De Belie et al. (2018) a capacidade de autocicatrização pode promover o fechamento de fissuras de até 0,3 mm, na presença de água, em uma matriz cimentícia sem adições de pozolanas ou aditivos cristalizantes.

O ambiente de exposição do concreto também tem grande influência sobre a autocicatrização autógena, em virtude deste fenômeno ser ativado pela água para iniciar as reações físico-químicas de cristalização e selamento das fissuras (ZINGLER, 2020). Neville (2016), destaca que é essencial a presença de água na região da fissura, pois acelera as reações de hidratação das partículas de anidro e promove a lixiviação do hidróxido de cálcio do interior da fissura até a superfície, estimulando a produção de carbonato de cálcio.

Ferrara et al. (2014) avaliaram a cura de concretos expostos ao ar e a ciclos controlados com variações de temperatura, e, também, concretos imersos em água, concluindo que as amostras condição de imersão obtiveram reparação mais efetiva das fissuras. Buscando intensificar o processo da autocicatrização de fissuras, muitos estudos têm aplicado ciclos de molhagem/secagem às amostras de concreto, resultando em maior efetividade do processo nesta condição de exposição (ZINGLER, 2020).

Sisomphon et al. (2013), avaliaram a recuperação de propriedades mecânicas de amostras de concreto com aditivos cristalizantes quando expostos a diferentes

ambientes e concluíram que com ciclos com de molhagem e de secagem se mostrou mais favorável à situação avaliada. Esses autores estabeleceram este método como o mais eficaz para autocicatrização. Guzlena e Sakale (2019) também analisaram que a autocicatrização com aditivos cristalizantes apresenta melhores resultados quando as amostras ficam imersas em água ou quando são sujeitas a ciclos sucessivos de secagem e molhagem.

Nesse sentido, o fenômeno de autocicatrização no concreto pode ser verificado tanto nos ciclos de molhagem quanto nos períodos de secagem. No período de imersão ocorre a hidratação tardia dos grãos anidros após o período normal de cura, bem como a ativação dos aditivos cristalizantes quando presentes na matriz cimentícia, enquanto no ciclo de secagem a formação do  $\text{CaCO}_3$  é verificada junto à fissura. Assim, a alternância entre as condições de cura (ciclos de molhagem e secagem) tende a intensificar este fenômeno (VAN TITTELBOOM et al., 2014; JIANG et al., 2015; SNOECK e DE BELIE, 2015; ZINGLER, 2020).

Diante deste contexto, a autocicatrização autógena pode ser aprimorada com a utilização de aditivos cristalizantes, sendo que estes produtos são incorporados a matriz cimentícia em sua produção. Os aditivos cristalizantes foram classificados recentemente como estimuladores deste fenômeno, sendo que diversos estudos comprovam os benefícios com a sua utilização (SISOMPHON et al., 2012; FERRARA et al., 2014; DE BELIE et al., 2018).

A utilização do aditivo cristalizante diminui a porosidade do concreto, promovendo o preenchimento dos poros e das capilaridades. Os cristais provenientes deste aditivo, se formam no interior dos poros e das fissuras, selando totalmente a infiltração de água, estimulando a autocicatrização autógena e reduzindo também a permeabilidade do concreto (TAKAGI, JUNIOR E OLIVEIRA, 2004; OURIVES, BILESKY E YOKOYAMA, 2009).

Segundo Li et al. (2013), o uso de pozolanas no cimento também é interessante neste contexto, pois pode promover a autocicatrização em estruturas expostas a danos repetidos ou provocados a longo prazo. Para os autores, as reações pozolânicas são capazes de induzir a cicatrização, mesmo após o consumo das partículas de cimento anidro, pois dependem do pH e da síntese do hidróxido de cálcio, sendo esta reação mais lenta do que as reações de hidratação. Conforme Neville (2016), cimentos com adição de pozolana como CPIV e CPII-Z, geram uma

maior quantidade de C-S-H, ocorrendo a reação pozolânica tardia entre a pozolana e o  $\text{Ca(OH)}_2$  proveniente da hidratação dos silicatos, podendo estas quantidades de C-S-H auxiliar na autocicatrização autógena.

Apesar dos concretos com a utilização de adições pozolânicas apresentarem menor formação de  $\text{Ca(OH)}_2$ , devido ao seu consumo nas reações pozolâmicas, e desta forma ocorrer pouca contribuição de carbonatação no processo de autocicatrização, a utilização destas adições resulta em uma matriz cimentícia com maior durabilidade, proporcionando também, maior resistência a penetração de agentes agressivos na estrutura, pois apresenta menor porosidade devido ao reparo das fissuras existente (GJØRV, 2015).

Desta forma, o incremento das propriedades de uma matriz cimentícia está relacionada ao efeito químico pozolânico, tendo como principal mecanismo a reação pozolânica, desenvolvendo o preenchimento dos poros do concreto e contribuindo assim para redução da permeabilidade e aumento da resistência do material, bem como ao efeito físico filer das partículas, podendo ser citados a redução do volume de vazios e tamanho dos poros, diminuição da exsudação, e aumento da resistência, contribuindo para uma melhora da estrutura de concreto (NEVILLE, 2016; ZINGLER 2020).

Zingler (2020), analisou em seu trabalho a autocicatrização de fissuras em concretos com a utilização de sílica ativa e diferentes aditivos cristalizantes, sendo observada uma eficácia maior com o uso de aditivos cristalizantes. A autora verificou que concretos com sílica ativa, apresentaram uma menor resistência quanto a passagem de cloretos, ao contrário do concreto com aditivo cristalizante que dificultou a passagem destes cloretos ao longo do tempo, sendo que este comportamento é de grande relevância para as estruturas de concreto, pois retarda a chegada dos cloretos na armadura, prolongando sua vida útil. Oliveira (2019), também conclui em seu trabalho que o aditivo cristalizante é um produto adequado para ser utilizado como promotor da cicatrização autógena de fissuras.

A cicatrização autógena pode desempenhar um importante papel proporcionando o fechamento de fissuras, e dificultando ou impossibilitando a entrada de agentes agressivos para o interior da estrutura. Deste modo, concretos com aditivos cristalizantes podem se apresentar como uma solução promissora em solucionar esse problema (ZINGLER, 2020).

### 2.3 ADITIVO CRISTALIZANTE

Os aditivos cristalizantes são compostos cimentícios adicionados ao concreto para reduzir sua permeabilidade. Esse aditivo é um impermeabilizante por cristalização integral, dosado ao concreto no momento da sua produção, sendo utilizado em um teor que varia de acordo com o fabricante, entre 0,8% e 2,5% em relação a massa do cimento. Sua composição consiste em cimento Portland, compostos químicos ativos e rastreador químico. As unidades de hidratação cristalinas presentes neste aditivo, reduzem entorno de 40% a permeabilidade do concreto e 47% a absorção capilar, conseqüentemente, reduzindo também a penetração de água e a de outros líquidos (PENETRON, 2018<sup>a</sup>; BASF, 2016).

O processo de cristalização realizado pelo aditivo cristalizante é considerado um sistema de fechamento e proteção dos poros, pois reage com a água formando cristais dentro dos poros que impedem a penetração de água (ZIGLER, 2020). O aditivo cristalizante funciona de forma efetiva quando há umidade suficiente na estrutura, sendo a água presente no interior do concreto a principal fonte de ativação das reações de cristalização. As reações também ocorrem pelo transporte de água através das fissuras. O fornecimento de água é essencial para a ativação dos aditivos cristalizantes, pois estes, utilizam a água para catalisar e reagir com as partículas de cimento, e formar depósitos cristalinos no sistema de poros e fissuras presentes. (OLIVEIRA, 2019; ZIGLER, 2020).

Ourives, Bilesky e Yokoyama (2009) destacam que os cristais permanecem dormentes quando a estrutura não está em contato com a umidade, mas, assim que a água reaparecer, os cristais voltam a crescer protegendo o concreto permanentemente. Por ocorrer de forma gradual ao longo do tempo, o processo de cristalização adquire um melhor comportamento em relação à durabilidade da estrutura de concreto.

Conforme o Comitê do ACI 212.3R (2016), os aditivos cristalizantes pertencem a categoria designada PRAs (*Permeability-reducing Admixtures*), composta por aditivos redutores de permeabilidade, sendo indicados para reduzir a permeabilidade do concreto e autocicatrizam fissuras em condições hidrostáticas. Oliveira (2019), afirma que o emprego dos cristalizantes reforça a vedação das fissuras sem intervenção, sendo que suas características físico-químicas possibilitam sua atuação como inertes ou como aditivos químicos.

A profundidade da penetração e o tempo envolvido para a cristalização, dependem de alguns fatores como: presença de umidade, ingredientes do concreto e propriedades físicas como consumo de cimento, densidade e compactação. Por isso, concretos com maior porosidade possuem maiores velocidades de penetração e nos concretos com menos poros a atuação se concentra mais nas microfissurações (TAKAGI, JUNIOR E OLIVEIRA, 2004).

## 2.4 INFLUÊNCIA DO ADITIVO CRISTALIZANTE NO CONCRETO

De acordo com Takagi, Junior e Oliveira (2004), a utilização do aditivo cristalizante define-se como sendo um processo físico-químico com a pretensão de preencher os poros e as capilaridades da microestrutura de concreto através da formação de estruturas cristalinas. Ourives, Bilesky e Yokoyama (2009) destacam que os cristais se formam no interior dos poros e fissuras, reagindo com a água hidróxido de cálcio e alumínio, além de outros óxidos e sais presentes no concreto. Essa formação cristalina impede a passagem de água reduzindo a permeabilidade do concreto, além de ocorrer a catalização das fissuras selando totalmente a infiltração de água, sendo esta capacidade de selamento das fissuras também chamada de autocatrização. O Processo de cristalização nas estruturas de concreto pode ser verificado na Figura 3, que mostra a formação de cristais em fotos de microscopia eletrônica de varredura em concretos seccionados a 50mm da superfície.

Figura 3– Processo de formação dos cristais em concreto com aditivo cristalizante



Fonte: Takagi, Junior e Oliveira (2004)

O aditivo cristalizante atua no concreto como hidrofílico, consumindo o  $\text{Ca(OH)}_2$  para formar os cristais que preenchem os poros e as fissuras no concreto (ZIGLER, 2020). Conforme Li et al. (2004), também se adquire um acréscimo da resistência à compressão com o uso desse tipo de produto decorrente a fatores como o efeito fíler, que contribui para o fechamento dos vazios e a ação ativadora da hidratação do cimento, que possibilita a melhoria da microestrutura da pasta de cimento. Nasim *et al.* (2020) em seu estudo, verificou a capacidade do aditivo cristalizante de recuperar a resistência, apontando um ganho na resistência à compressão de 36,6%, após 42 dias, do concreto com aditivo cristalizante comparado ao concreto referência, induzindo fissuras nos concretos aos 3 dias de idade. A BASF (2016), na ficha técnica de seu produto, propõe um ganho de resistência a compressão de 7% devido a utilização do aditivo cristalizante no concreto.

Os aditivos cristalizantes estimulam um acréscimo da densidade de C-S-H na matriz cimentícia, sendo depositados junto as fissuras e aos poros capilares existentes na estrutura, ativando o processo de autorreparo. Devido a este aditivo ser introduzido no momento da produção do concreto, ocorre a formação de depósitos de cristais interligados a pasta de cimento hidratada que contribui para um aumento de resistência à entrada de agentes agressivos na matriz (FERRARA ET AL., 2016; ZINGLER, 2020).

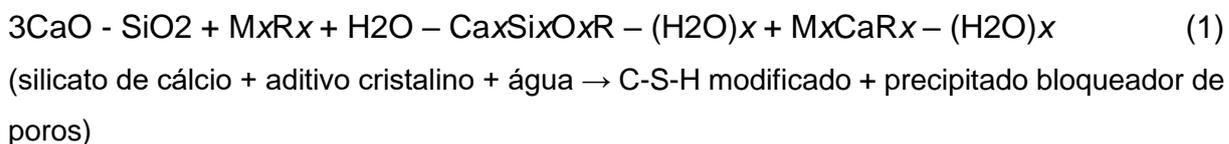
Em virtude da natureza hidrofílica e reativa do aditivo cristalizante é essencial o suprimento de água para estimular a precipitação dos cristais nas fissuras (OLIVEIRA, 2019). Roig Flores et al. (2015), também afirma que o contato prolongado dos aditivos cristalizantes com a umidade é crucial para atingir maiores taxas de autocicatrização de fissuras. O processo de autocicatrização é ativado somente quando a matriz porosa do concreto estiver em contato com a umidade, sendo que na falta de umidade, os componentes da mistura cristalina permanecem inativos (PAZDERKA E HÁJKOVÁ, 2016).

A atuação dos aditivos cristalizantes pode depender de diversas reações, em função destes aditivos possuírem vários tipos de aglomerante e produtos químicos ativos, podendo estes reagirem com água, hidróxido de cálcio, grãos de cimento anidro e íons carbonatos. Desta forma, os agentes autocicatrizante podem produzir o C-S-H, devido a interação do hidróxido de sódio com a sílica do cristalizante e podem

permitir um aumento na precipitação de  $\text{CaCO}_3$ , devido ao aumento da dissolução dos íons carbonato ( $\text{Ca}^{2+}$ ) (BOHUS e DROCHYTKA, 2012; ZINGLER, 2020).

Cuenca et al. (2018) identificaram a presença de C-S-H, na superfície da fissura em amostra de concretos com aditivo cristalizante e curados sob imersão durante 3 meses. Ferrara et al. (2014) também verificaram na região interna da fissura, a incidência de cristais de C-S-H em amostras de concreto com 1% de aditivo cristalizante com 3 meses de cura sob imersão em água. Já Roig-Flores et al. (2016) identificaram na superfície da fissura, a presença de  $\text{CaCO}_3$  nas amostras com 4% de aditivo cristalizante e em amostras referência.

Conforme a ACI 212.3R-10 (2010), a reação dos compostos dos materiais cimentícios com os aditivos cristalizantes ocorre de acordo com a Equação 1. Desta forma, o promotor cristalino ( $\text{MxRx}$ ) reage com o C3S e água, produzindo C-S-H modificado e um precipitado bloqueador de poros ( $\text{MxCaRx}$ ) nas microfissuras e capilaridades existentes, sendo esta reação de hidratação também apresentada por outros autores (CUENCA e FERRARA, 2017; HASSANI et al., 2017; DE BELIE et al., 2018; LI et al., 2018; ZINGLER, 2020).



O aditivo cristalizante apresenta um grande apelo tecnológico e operacional relacionados a escolha deste produto como estimulador de autocicatrização, considerando a facilidade de aquisição e de aplicação na mistura cimentícia a ser cristalizada. Porém para a autora, não há estudos comprovados e conclusivos referente ao desempenho do aditivo cristalizante como promotor de cicatrização e restauração das propriedades originais, devendo estes assuntos ser mais explorado por pesquisadores, visando a identificação de parâmetros e entendimentos dos mecanismos que envolvem a ação deste aditivo (OLIVEIRA, 2019).

Takagi, Junior e Oliveira (2004) em seu trabalho, verificaram diversas propriedades de influência do aditivo cristalizante no concreto. Quanto a permeabilidade, foi possível avaliar o desempenho da cristalização obtendo resultados singulares, podendo observar que o aditivo cristalizante utiliza a água para entrar e penetrar nas capilaridades do concreto, reagindo com os produtos químicos

inertes presentes nos poros do concreto, formando uma estrutura cristalina que apresenta a redução de penetração de água no concreto, até o selamento total, não apresentando mais penetração de água. Esses autores, também identificaram em seus ensaios, a capacidade de colmatação de fissuras através da cristalização. Com a utilização de amostras fissuradas foi identificado uma infiltração de água inicial, porém as amostras apresentaram uma curva com tendência a um valor nulo, o que significa que cessou a infiltração de água, evidenciando que a água encontrou obstáculos devido aos cristais formados no interior das fissuras.

Alguns pesquisadores estudaram a recuperação das propriedades mecânicas do concreto com aditivo cristalizantes após a cicatrização. Ferrara et al. (2015) comprovam a eficiência do cristalizante na cicatrização da fissura com a recuperação da capacidade de carga mesmo em fissuras mais largas, identificando um melhor desempenho em amostras com curta idade de cicatrização (30 e 90 dias). No trabalho de Ferrara, Krelani e Corsana (2014), foi verificado a aceleração do processo de cicatrização com a presença de 1% de aditivo cristalizante, apresentando também a recuperação da rigidez e da capacidade de carga na flexão. Já Jiang et al. (2014), analisaram o acréscimo das propriedades mecânicas nas misturas de cristalizante à base de carbonato, quando comparadas com outros aditivos minerais ou com a amostra de referência, sendo mais considerável a recuperação da rigidez residual do que a recuperação da resistência a compressão após a aplicação do esforço de compressão.

A redução de permeabilidade causada pelo aditivo cristalizante também pode ter eficiência na mitigação da reação álcali-agrado (RAA), sendo que este processo reduz o ingresso de umidade e a difusão dos álcalis que reagiriam com os minerais formando a RAA. Entretanto, com a redução dos poros, pode ocorrer o aumento de fissuração, pois a reação álcali-agregado pode acontecer apenas com a umidade interna do concreto e desta forma, o gel formado pela reação, não terá onde se depositar, aumentando as tensões de tração, provocando a fissuração da estrutura. (COUTO, 2008; MUNHOZ, 2007). Os fabricantes informam que o aditivo cristalizante tem a capacidade de mitigar a reação álcali-agregado, porém, não foram identificados estudos e pesquisas que comprovem a eficiência da sua utilização.

O efeito da cristalização não é afetado por variados produtos químicos agressivos como ácidos médios, solventes, cloretos e materiais cáusticos, sendo

assim, o concreto com aditivo cristalizante suporta ataques de qualquer substância ácida e alcalina com pH de 3,0 a 11,0. Essa resistência química é proporcionada pelo selamento do concreto pelas reações de sais de silicatos à base de sódio e a base de flúor que provocam a formação na camada superficial do concreto de um gel de sílica hidratada, hidróxido de magnésio e cristais de fluoreto de cálcio ( $\text{CaF}_2$ ). Outra característica da cristalização é a potabilidade, que permite o uso do aditivo cristalizante em estruturas para armazenagem de água potável ou alimentos, pois não possuem características tóxicas e não contém solventes orgânicos voláteis (TAKAGI, JUNIOR E OLIVEIRA, 2004).

Ourives, Bilesky e Yokoyama (2009) obtiveram resultados eficientes em seu trabalho com corpos de prova moldados com cimento tipo CP-III e CP-II. As análises mostraram uma grande redução da permeabilidade do concreto com a adição do aditivo de cristalização e o efeito de autocicatrização, observando a redução do fluxo de água nas fissuras com o decorrer do tempo de exposição à água, comprovando que concretos com a adição de cristalizantes tem características impermeabilizantes e comportamentos de autocicatrização.

Zingler (2020) conclui em seu trabalho, que o aditivo cristalizante dificultou a passagem de cloretos ao longo do tempo, sendo que este comportamento tende a retardar a entrada dos cloretos junto a armadura e conseqüentemente prolongar a vida útil. A autora também afirma a capacidade do aditivo cristalizante em minimizar os efeitos causados pela presença de fissuras, pois propiciam a autocicatrização, promovendo o fechamento e selamento das fissuras, dificultando a entrada de agentes agressivos no interior na estrutura.

Ao longo da vida útil da estrutura de concreto, é desejado que o aditivo cristalizante mantenha o seu comportamento, desta forma, sempre que a estrutura voltar a ter contato com a água, ocorre a ativação retardada da cristalização. Por isso, mesmo que aconteça o surgimento de fissuras em idades avançadas, o aditivo será eficaz para a sua colmatação (FERRARA; KRELANI; CARSANA, 2014).

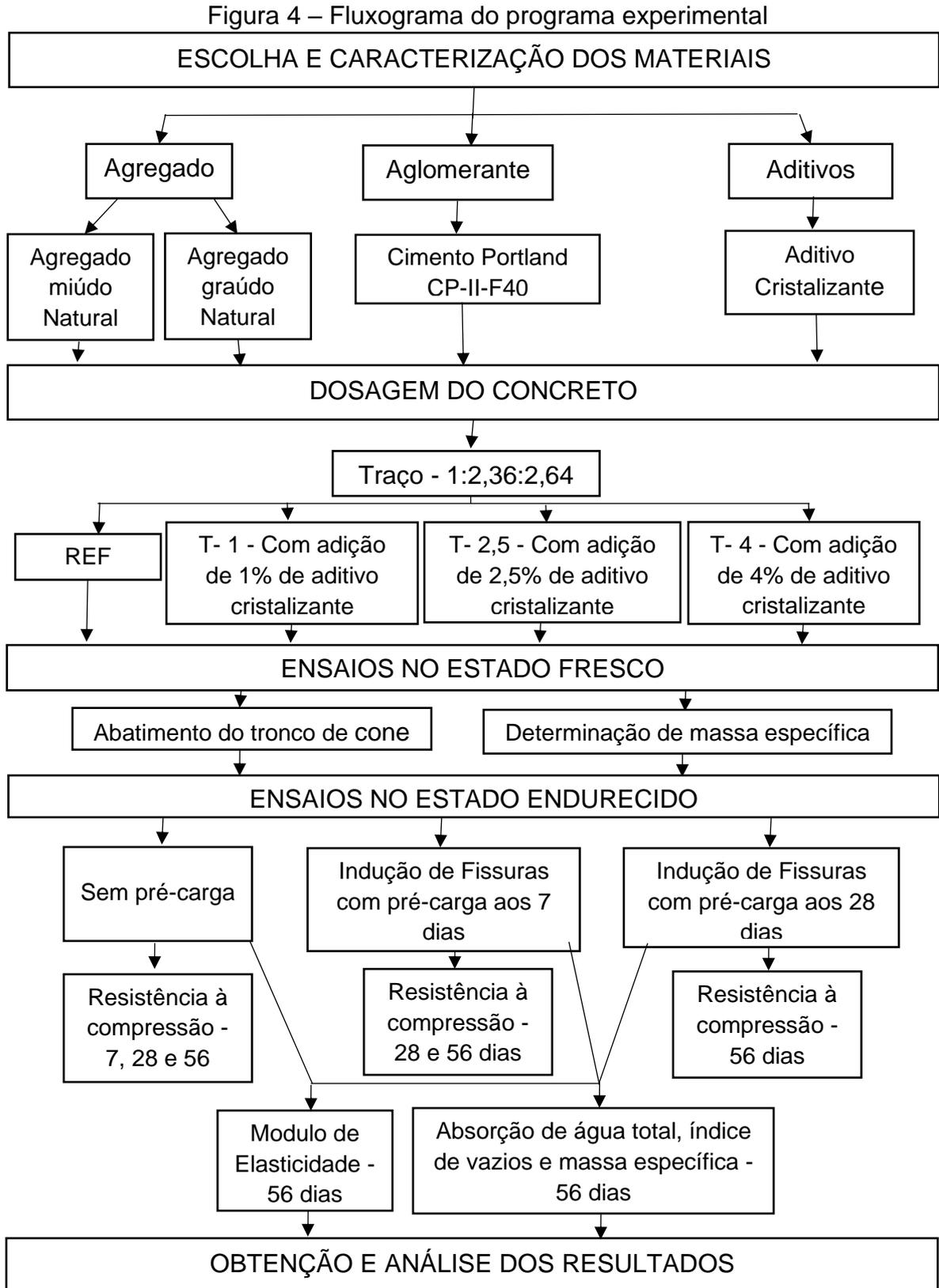
### 3 MATERIAIS E METÓDOS

Neste capítulo, está apresentado os materiais e métodos que foram utilizados, sendo primeiramente, apresentado os materiais necessários e posteriormente, estão descritos os métodos de ensaios. A pesquisa visou avaliar o comportamento do aditivo cristalizante com diferentes teores de adições com a finalidade de produzir um concreto com um bom desempenho de autocicatrização. Foram analisadas suas propriedades no estado fresco e no estado endurecido aos 7, 28 e 56 dias. A Figura 4 apresenta um fluxograma com as etapas do programa experimental desta pesquisa e o Quadro 2, mostra as normas seguidas nos ensaios realizados nas matrizes cimentícias, no estado fresco e endurecido.

Quadro 2 – Planejamento de ensaios do concreto

	<b>ENSAIOS</b>	<b>MÉTODOS</b>
<b>ESTADO FRESCO</b>	Abatimento do tronco de cone	NBR NM 67(ABNT, 1998)
	Determinação de massa específica	NBR 9833 (ABNT, 2009)
<b>ESTADO ENDURECIDO</b>	Resistência à compressão	NBR 5739 (ABNT, 2007)
	Modulo de Elasticidade	NBR 8522 (ABNT, 2017)
	Absorção de água total, índice de vazios e massa específica	NBR 9778 (ABNT, 2009)

Fonte: Autor (2021).



Fonte: Autor (2021).

### 3.1 PLANEJAMENTO DA PESQUISA

O programa experimental foi dividido em três etapas. Na primeira etapa, foi escolhido os materiais empregados na pesquisa. Na segunda etapa, foi realizado um estudo preliminar para definir qual o método mais adequado para executar a indução das fissuras de forma mecânica. Por fim, na terceira etapa, foram realizadas análises no estado fresco e no estado endurecido das matrizes cimentícias, para avaliar suas propriedades físicas e mecânicas e analisar a autocicatrização das fissuras. Posteriormente, foi realizado as análises dos resultados obtidos. Essas etapas estão detalhadas ao longo do trabalho.

Neste estudo, foram empregadas as seguintes variáveis:

- aglomerante: CP-II-F40;
- aditivo cristalizante: 1 tipo, adição de 1,0%, 2,5% e 4,0%.
- idade de indução das fissuras por um pré-carregamento: aos 7 e 28 dias;
- abatimento de tronco de cone definido em  $120\pm 20$ mm;
- cura submersa;

### 3.2 MATERIAIS

Neste tópico estão apresentados os materiais utilizados nesta pesquisa, bem como a sua caracterização.

#### 3.2.1 Aglomerante

No desenvolvimento desta pesquisa foi utilizado para a execução do concreto, o cimento Portland do tipo CP-II-F40 composto com filer. Este tipo de cimento é livre de materiais pozolânicos que poderiam provocar alterações nos resultados com os aditivos cristalizantes e tem adição de 11 a 25% de filer calcário. 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 nos Quadros 3 e 4.

Quadro 3 – Especificações químicas do cimento

Químicos				
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 (2015) e NBR 16697 (ABNT, 2018).

Quadro 4 – Especificações físicas e mecânicas do cimento

Físicos e mecânicos									
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	3	7	28
						dia	dias	dias	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		≥15,0	≥25,0	≥40,0

Fonte: Adaptado de Itambé (2015) e NBR 16697 (ABNT, 2018).

Por meio dos dados apresentados nos quadros acima, pode-se verificar que o cimento escolhido atende a todos os requisitos exigidos pela norma NBR 16697 (ABNT, 2018).

### 3.2.2 Agregado miúdo

Nesta pesquisa foi utilizado o agregado miúdo natural, adquirido em uma usina de concreto de Carlos Barbosa (RS). Suas propriedades físicas foram repassadas pela empresa de onde foi adquirido o material, sendo que as mesmas foram 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, ensaio para determinar a massa unitária de acordo com a NBR NM 45 (ABNT, 2006) e ensaio de massa específica conforme a NBR NM 52 (ABNT, 2009).

No Quadro 5 encontram-se os percentuais utilizados de cada fração granulométrica e, na Figura 5 está representada a curva granulométrica do agregado

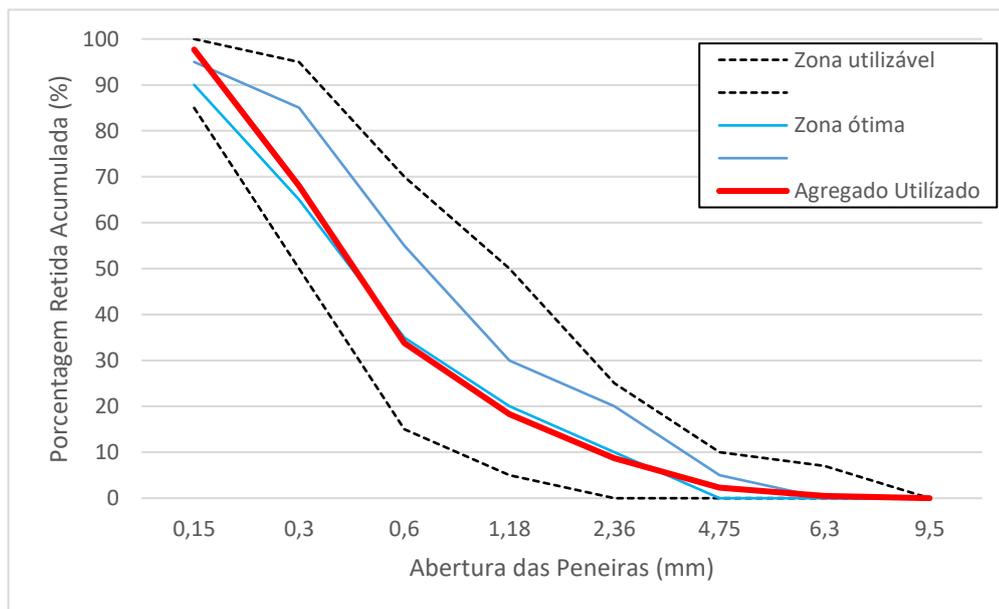
utilizado, juntamente com os limites superiores e inferiores da zona utilizável determinados pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

Quadro 5 – Características físicas do agregado miúdo natural

Peneiras	Retido (kg)	Retido (%)	Retido acumulado (%)
<b>9,5</b>	0,000	0,0%	0,0%
<b>6,3</b>	0,005	0,5%	0,5%
<b>4,75</b>	0,020	1,8%	2,3%
<b>2,36</b>	0,070	6,4%	8,7%
<b>1,18</b>	0,105	9,6%	18,3%
<b>0,6</b>	0,170	15,5%	33,8%
<b>0,3</b>	0,375	34,2%	68,0%
<b>0,15</b>	0,325	29,7%	97,7%
<b>0,075</b>	0,020	1,8%	99,5%
<b>Fundo</b>	0,005	0,5%	100,0%
<b>Total</b>	1,095	100%	
<b>Módulo de finura:</b>			<b>2,29</b>
<b>Dimensão máxima do agregado:</b>			<b>4,75</b>
<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>):</b>			<b>2,68</b>
<b>Massa unitária (g/cm<sup>3</sup>):</b>			<b>1,43</b>

Fonte: Autor (2021).

Figura 5 – Curva granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Autor (2021).

### 3.2.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo natural que foi utilizado, também foi adquirido por uma empresa da cidade de Carlos Barbosa. Suas características físicas, foram fornecidas pela empresa, sendo que para determinação das características, foram realizados ensaios para classificar sua granulometria seguindo a NBR NM 248 (ABNT, 2003), sendo classificado como brita 1, e ensaios de absorção e massa específica do agregado, conforme a NBR NM 53 (ABNT, 2009) e a determinação da massa unitária do agregado graúdo seguindo a NBR NM 45 (ABNT, 2006).

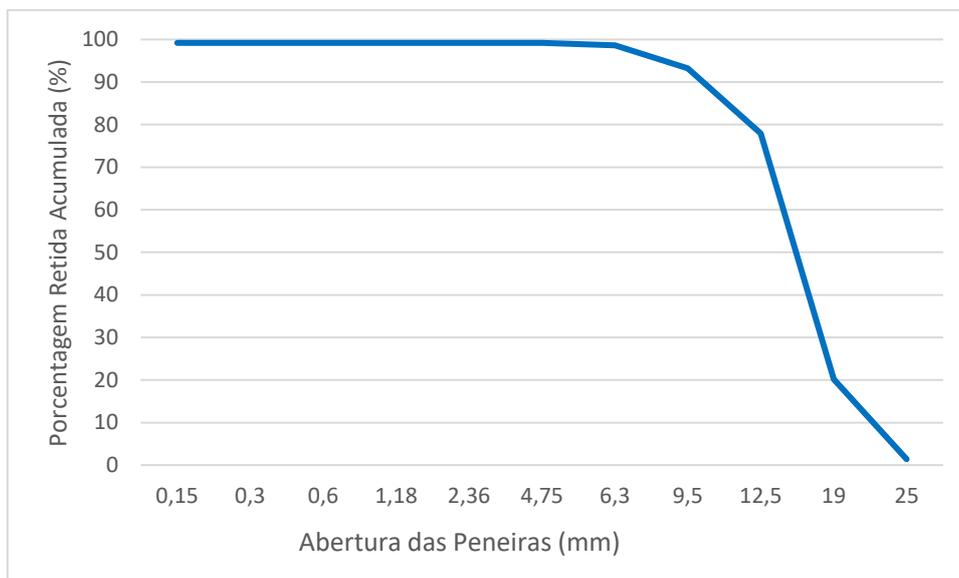
No Quadro 6 encontram-se as características físicas do agregado e, na Figura 6 está representada a sua curva granulométrica, juntamente com os limites superiores e inferiores da zona utilizável determinados pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

Quadro 6 – Características físicas do agregado graúdo natural

<b>Peneiras</b>	<b>Retido (kg)</b>	<b>Retido (%)</b>	<b>Retido acumulado (%)</b>
<b>25</b>	0,025	1,4%	1,4%
<b>19</b>	0,345	18,9%	20,2%
<b>12,5</b>	1,055	57,7%	77,9%
<b>9,5</b>	0,280	15,3%	93,2%
<b>6,3</b>	0,100	5,5%	98,6%
<b>4,75</b>	0,010	0,5%	99,2%
<b>2,36</b>	0,000	0,0%	99,2%
<b>1,18</b>	0,000	0,0%	99,2%
<b>0,6</b>	0,000	0,0%	99,2%
<b>0,3</b>	0,000	0,0%	99,2%
<b>0,15</b>	0,000	0,0%	99,2%
<b>0,075</b>	0,000	0,0%	99,2%
<b>Fundo</b>	0,015	0,8%	100,0%
<b>Total</b>	1,830	100%	
<b>Módulo de finura:</b>			<b>7,08</b>
<b>Dimensão máxima do agregado (mm):</b>			<b>25,00</b>
<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>):</b>			<b>2,71</b>
<b>Massa unitária (g/cm<sup>3</sup>):</b>			<b>1,49</b>
<b>Absorção (%):</b>			<b>1,05</b>

Fonte: Autor (2021).

Figura 6 – Curva granulométrica do agregado graúdo



Fonte: Autor (2021).

### 3.2.4 Água

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

### 3.2.5 Aditivo cristalizante

Nesta pesquisa utilizou-se aditivo cristalizante como adição em relação à massa do cimento. Este, é especificado como impermeabilizante integral por cristalização que penetra na rede capilar e microfissuras do concreto. Com base na prescrição do fabricante, a indicação para a utilização da adição é de 2% a 2,5% sobre o peso do cimento. O Quadro 7 mostra a composição do aditivo utilizado.

Quadro 7 – Composição do aditivo cristalizante

Nome Químico	%
Cimento Portland	50 a 75
Carbonato de sódio (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	7 a 15
Ácido tartárico	1 a 3
Quartzo (SiO <sub>2</sub> )	Não informado
Dióxido de titânio (TiO <sub>2</sub> )	Não informado
Gesso (Ca (SO <sub>4</sub> ) .2H <sub>2</sub> O)	Não informado

Fonte: Adaptado de Basf (2016).

### 3.3 MÉTODOS

Na produção do concreto foi utilizado o traço intermediário (1:5) de acordo com o método de dosagem IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1992), utilizando como parâmetro de controle a trabalhabilidade que foi de  $120 \pm 20$  mm, e o teor ideal de argamassa de 55%. Com isso o traço unitário de referência definido foi 1:2,36:2,64, onde os teores de cristalizante foram empregados sobre a massa do cimento. Para o desenvolvimento desta pesquisa foram realizados ensaios laboratoriais para avaliação das propriedades no estado fresco e endurecido, através do uso do aditivo cristalizante em diferentes teores. O aditivo cristalizante foi utilizado como adição em relação à massa do cimento, em teores iguais a 1%, 2,5% e 4%. Esses teores foram escolhidos com base na prescrição do fabricante, que indica a utilização de 2,5%, sendo empregado um teor abaixo (1%) e um acima (4%).

As técnicas para avaliação do fenômeno de autocicatrização podem ser divididas de três maneiras, segundo Van Tittelboom e De Belie (2013): recuperação das propriedades mecânicas, recuperação de estanqueidade, e visualização e determinação do fenômeno de autocicatrização. Nesta pesquisa, optou-se por avaliar a autocicatrização através de técnicas específicas que atendessem a recuperação das propriedades mecânicas. Assim, para a recuperação das propriedades mecânicas realizou-se o ensaio de resistência a compressão e módulo de elasticidade.

Optou-se por preparar os concretos somente com água, buscando o abatimento escolhido, dispensando a utilização de aditivo superplastificante, pois segundo Castro e Pandolfelli (2009), este aditivo, quando adicionado a mistura, pode reduzir a porosidade, o que poderia gerar interferência nos resultados, sendo que a pesquisa visou avaliar a capacidade do aditivo cristalizante de selar os poros existentes no concreto. Todos os corpos de prova foram submetidos a condição de cura submersa. O Quadro 8 apresenta a composição dos traços utilizados nesta pesquisa.

Quadro 8 – Composição dos traços utilizados

Abreviação	Composição
REF	Aglomerante, agregado graúdo, agregado miúdo, água
T - 1	Aglomerante, agregado graúdo, agregado miúdo, água, 1% de aditivo cristalizante

T - 2,5	Aglomerante, agregado graúdo, agregado miúdo, água, 2,5% de aditivo cristalizante
T - 4	Aglomerante, agregado graúdo, agregado miúdo, água, 4% de aditivo cristalizante

Fonte: Autor (2021).

A Tabela 1 apresenta as quantidades de material utilizado na produção dos quatro traços de concreto.

Tabela 1 – Quantitativo de material utilizado

TRAÇOS	CIMENTO (KG)	AGREGADO MIÚDO (KG)	AGREGADO GRAÚDO (KG)	ÁGUA (KG)	ADITIVO CRISTALIZANTE (KG)
REF	18	42,48	47,52	10,52	
T-1	18	42,48	47,52	10,52	0,18
T-2,5	18	42,48	47,52	10,52	0,45
T-4	18	42,48	47,52	10,52	0,72

Fonte: Autor (2021).

### 3.3.1 Dosagem, moldagem dos corpos de prova e cura

Após separar e pesar a quantidade exata de cada tipo de material foi iniciada a mistura. A operação de mistura dos materiais foi realizada com auxílio de uma betoneira previamente imprimada com argamassa de cimento de areia proveniente dos materiais utilizados neste trabalho.

A ordem de colocação dos materiais foi mantida constante em todas as misturas, seguindo o procedimento: brita, um terço da água, cimento, um terço da água, areia e o restante da água. Nos traços com aditivo cristalizante, o mesmo foi colocado nos cinco minutos finais da mistura. Desde o início da colocação de água na brita decorreram quinze minutos até a realização dos ensaios de abatimento, logo após foi realizada a mistura durante 30 segundos e iniciava-se o processo de moldagem.

Após a mistura dos materiais para o concreto estabelecido, foram realizadas as moldagens dos corpos de provas cilíndricos, sendo moldados corpos de provas de 10x20 cm. Para podermos avaliar os resultados conforme as normativas, foram moldados um total de 108 corpos de prova, sendo 27 de cada traço. Todos os corpos de provas foram moldados seguindo as instruções da normativa NBR 5738 (ABNT,

2016). O adensamento foi realizado de forma manual utilizando uma haste de adensamento cilíndrica de aço com a superfície lisa, sendo que a moldagem consistiu em 2 camadas, aplicando 12 golpes em cada uma delas, após, foi realizado o rasamento com uma colher de pedreiro.

Para o processo de cura, os corpos de prova ficaram acondicionados em temperatura ambiente nas primeiras 24 horas. Posteriormente foram desmoldados e identificadas, a cura foi realizada de forma submersa, em um tanque de água, durante o período de 7, 28 e 56 dias.

### **3.3.2 Indução de fissuras**

Para avaliar o processo de autocicatrização em fissuras, foi induzido fissuras ao concreto de forma mecânica. Para isso, optou-se por trabalhar com a indução das fissuras por meio do ensaio de resistência a compressão, aplicando carga aos corpos de prova e mantendo-a por dois minutos. Esse processo, foi baseado nas pesquisas de Takagi (2013) e Sahmaran *et al.* (2008).

Na pesquisa de Takagi (2013), foi aplicado uma carga de 90% da carga de ruptura aos 28 dias, sendo mantida por dois minutos. Já no trabalho de Sahmaran *et al.* (2008), foi utilizado cargas de 70% e 90% da carga de ruptura aos 28 dias. Nas duas pesquisas, a carga foi aplicada apenas após 28 dias de cura. Nestes dois estudos, após o pré-carregamento, as amostras foram mantidas submersas em água com cal, e os ensaios para avaliação das propriedades mecânicas foram realizados aos 28, 56 e 84 dias, para análise da cicatrização das fissuras. Para esta pesquisa, optou-se por realizar a pré-carga em dois momentos, aos 7 e 28 dias de cura, visando analisar a diferença do processo de autocicatrização em fissuras de diferentes idades.

Inicialmente, aos 7 dias, foi aplicado uma carga de 90% da carga de ruptura aos 7 dias nas amostras, porém devido a propagação progressiva do micro fissuramento, em um concreto com pouco tempo de cura, essa carga foi excessiva e resultou na ruptura de alguns corpos de prova. Desta forma, foi realizado a pré-carga com 70% da carga de ruptura aos 7 dias e 80% aos 28 dias. Os ensaios para avaliação das propriedades mecânicas, foram realizados as 28 e 56 dias. Para facilitar a identificação das amostras fissuradas na análise dos resultados, os corpos de prova com pré-carga aos 7 dias estão identificados como CP-7 dias, e corpos de prova com pré-carga aos 28 dias estão identificados como CP-28 dias.

### 3.3.3 Ensaio no estado fresco

No estado fresco foram realizados ensaios para a determinação da trabalhabilidade através do abatimento do tronco cone e determinação da massa específica. Os métodos de ensaio serão explicados nos próximos tópicos.

#### 3.3.3.1 Trabalhabilidade

No estado fresco do concreto foi realizado o abatimento do concreto de acordo com os procedimentos especificados pela NBR NM 67 (ABNT, 1998). Para cada traço de concreto com os diferentes teores de aditivo cristalizante foi realizado um ensaio de abatimento de tronco de cone a fim de verificar a trabalhabilidade do concreto. Com finalidade de controlar a trabalhabilidade do concreto foi definido um abatimento de  $120 \pm 20$  mm, não sendo necessário a utilização de aditivo superplastificante.

Para a realização deste ensaio foi utilizado um molde, uma haste de compactação e uma placa base, todos conforme determinação da NBR NM 67 (ABNT, 1998), após umedecer os instrumentos, é colocado o molde sobre a placa base, e começa a preencher o molde com o concreto, sendo executada 3 camadas e em cada camada foi compactada com 25 golpes utilizando a haste de compactação. A Figura 7 mostra os instrumentos utilizados e a forma como as medições foram realizadas.

Figura 7– Abatimento do tronco de cone



Fonte: Autor (2021).

### 3.3.3.2 Determinação da massa específica

A realização do ensaio de determinação da massa específica seguiu as instruções da normativa NBR 9833 (ABNT, 2009), para cada traço de concreto realizado na pesquisa. Para determinar a massa específica, calcula-se a massa do concreto, subtraindo a massa do recipiente vazio onde se realizou o adensamento do concreto, após, realizar o cálculo da massa específica.

### 3.3.4 Ensaio estado endurecido

No estado endurecido foram realizados ensaios para a determinação da resistência à compressão, módulo de elasticidade e absorção de água por imersão, índice de vazios, massa específica, sendo que os próximos itens apresentarão as metodologias utilizadas.

#### 3.3.4.1 Resistência à compressão

O ensaio para determinação da resistência a compressão dos corpos de prova cilíndricos foi realizado de acordo com as especificações da NBR 5739 (ABNT, 2007). Para determinação da resistência a compressão foram moldados 12 corpos de prova por traço de concreto. O Quadro 8 apresenta a quantidade de corpos de prova e a idade dos ensaios realizados. A Figura 8 mostra um corpo de prova sendo ensaiado à resistência a compressão.

Quadro 9 – Ensaio de Resistência a compressão

<b>Realização do Ensaio</b>	<b>Sem pré-carga</b>	<b>Pré-carga aos 7 dias</b>	<b>Pré-carga aos 28 dias</b>
7 dias	2		
28 dias	2	2	
56 dias	2	2	2

Fonte: Autor (2021).

Figura 8 – Ensaio de resistência a compressão



Fonte: Autor (2021).

#### 3.3.4.2 Módulo de elasticidade

Para a realização deste ensaio foram utilizados os parâmetros da NBR 8522 (ANBT, 2017), sendo testados 9 amostras de cada traço aos 56 dias após sua moldagem, destas, 3 amostras eram sem pré-carga, 3 com pré-carga aos 7 dias e 3 com pré-carga aos 28 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, porém para o ensaio de modulo de elasticidade são posicionados extensômetros nos corpos de prova. Depois do corpo de prova ser colocado em sua posição correta com os extensômetros, iniciará 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 também 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. A Figura 9 mostra o ensaio sendo realizado.

Figura 9 – Ensaio de módulo de elasticidade



Fonte: Autor (2021).

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

Os corpos de prova utilizados neste ensaio foram moldados conforme determinações da NBR 5738 (ABNT, 2016) e para a determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica foram seguidos os procedimentos da NBR 9778 (ABNT, 2019). Foram ensaiados 6 corpos de prova por traço de concreto aos 56 dias, sendo 2 sem pré-carga, 2 com pré-carga aos 7 dias e 2 com pré-carga aos 28 dias. Neste ensaio, os corpos de prova são pesados em três momentos, submersos na água, saturados e secos e com os resultados é determinado a absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica.

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir do programa experimental do trabalho, através dos ensaios realizados e a comparações entre eles. Foram analisados os ensaios no estado fresco e estado endurecido.

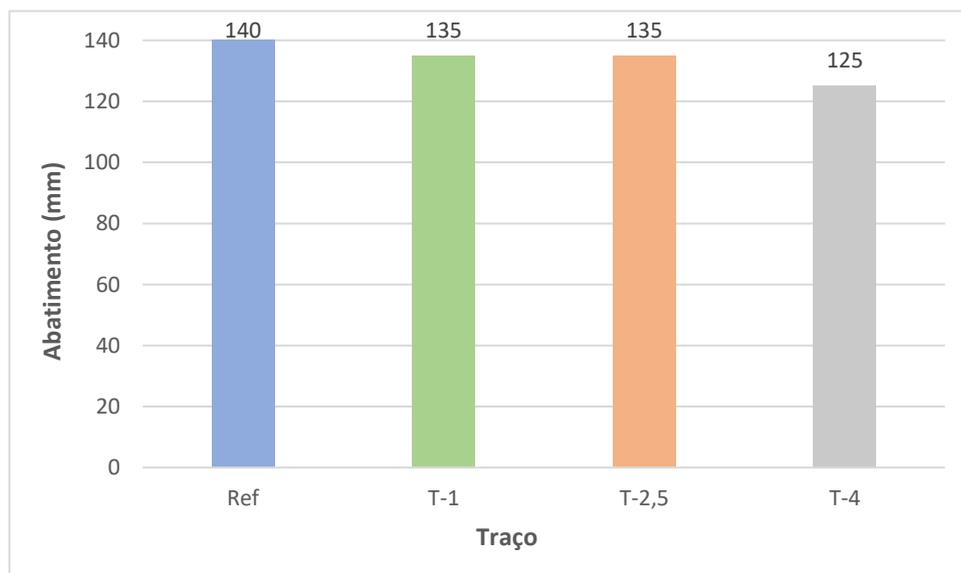
### 4.1 ESTADO FRESCO

Nesta parte foram analisados os resultados dos ensaios no estado fresco. Nesta pesquisa foram realizados os ensaios de abatimento de tronco cone e determinação de massa específica.

#### 4.1.1 Trabalhabilidade

O abatimento estabelecido neste trabalho é  $120 \pm 20$  mm, a partir do ensaio de abatimento de tronco cone realizado, foram verificadas a trabalhabilidade de cada traço de concreto. A Figura 10 apresenta o gráfico dos resultados obtidos neste ensaio em cada traço.

Figura 10– Gráfico do abatimento por traço



Fonte: Autor (2021).

É possível verificar que todos os traços alcançaram o abatimento estipulado, sem a necessidade do uso de aditivo superplastificante. Podemos analisar que o traço

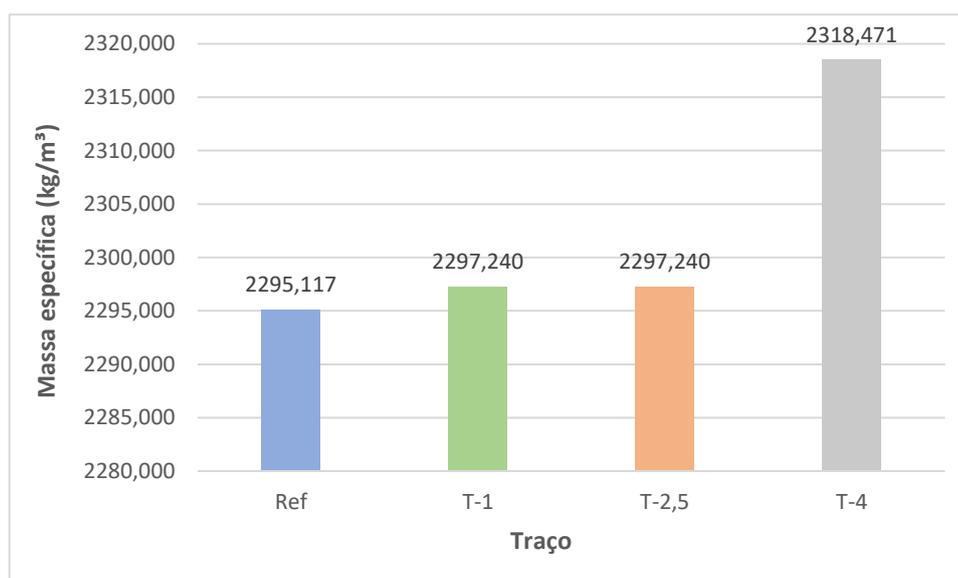
referência obteve o maior abatimento em relação aos traços com aditivo cristalizante. O traço T-1 e T-2,5, apresentaram o mesmo resultado, sendo entorno 3,5% menor que o traço referência e cerca de 8% maior em relação ao T-4. O traço T-4, obteve o menor abatimento, em comparação ao traço referência apresentou um resultado de 11% a menos.

Verifica-se neste ensaio, que a adição de aditivo cristalizante na matriz cimentícia, altera sua trabalhabilidade, sendo possível analisar, que quanto maior a quantidade de aditivo acrescentado ao concreto, menor a sua trabalhabilidade. Entretanto, os resultados dos ensaios ficaram dentro do estabelecido, o que mostra que praticamente não há diferença. Moreira (2016) em seu trabalho também verificou a influência do aditivo na trabalhabilidade, observando a necessidade de aumentar a quantidade de superplastificante nos traços com aditivo, em média 25% a mais, de modo a atingir o abatimento especificado.

#### 4.1.2 Massa específica

Nos ensaios de massa específica realizados nesta pesquisa, foram identificadas a massa por volume de cada traço de concreto. Na Figura 11 estão apresentados os resultados obtidos.

Figura 11 – Gráfico de massa específica



Fonte: Autor (2021).

Como podemos verificar, o traço T-4, com maior teor de aditivo cristalizante, apresentou uma massa específica maior em relação aos demais traços, que apresentaram valores mais próximos. Todos os valores obtidos nesse ensaio são muito próximos, sendo a diferença entre eles, praticamente nula. O traço T-4, apresentou o maior valor, correspondente a cerca de 1% a mais no resultado de massa específica em relação ao traço referência. O traço T-1 e T-2,5 apresentaram o mesmo resultado, sendo a diferença muito pequena em relação ao traço referência, tornado a mesma insignificante.

Desta forma, podemos analisar que a adição do aditivo cristalizante, sendo um material em pó, pode modificar essa propriedade, porém esta adição no concreto, não promove uma alteração considerável em sua massa. Castro e Pandolfell (2009), evidenciam a contribuição do aditivo nas propriedades físicas do concreto, verificando que nas primeiras idades, a adição mineral pode ser considerada inerte. Entretanto, a situação se torna complexa por causa do efeito físico gerado pela adição sobre o empacotamento de partículas e, dessa forma, sobre as forças que controlam a distância entre as partículas de cimento no início do processo de hidratação. O efeito físico causado é conhecido como efeito filler, que corresponde ao processo de refinamento dos poros, onde os produtos da reação de hidratação atuam no preenchimento dos espaços capilares grandes, aumentando a resistência e reduzindo a permeabilidade do concreto

## 4.2 ESTADO ENDURECIDO

Neste tópico estão abordados os resultados obtidos com os ensaios realizados nas amostras no estado endurecido, ou seja, resistência à compressão, módulo de elasticidade e absorção de água por imersão, índice de vazios, massa específica.

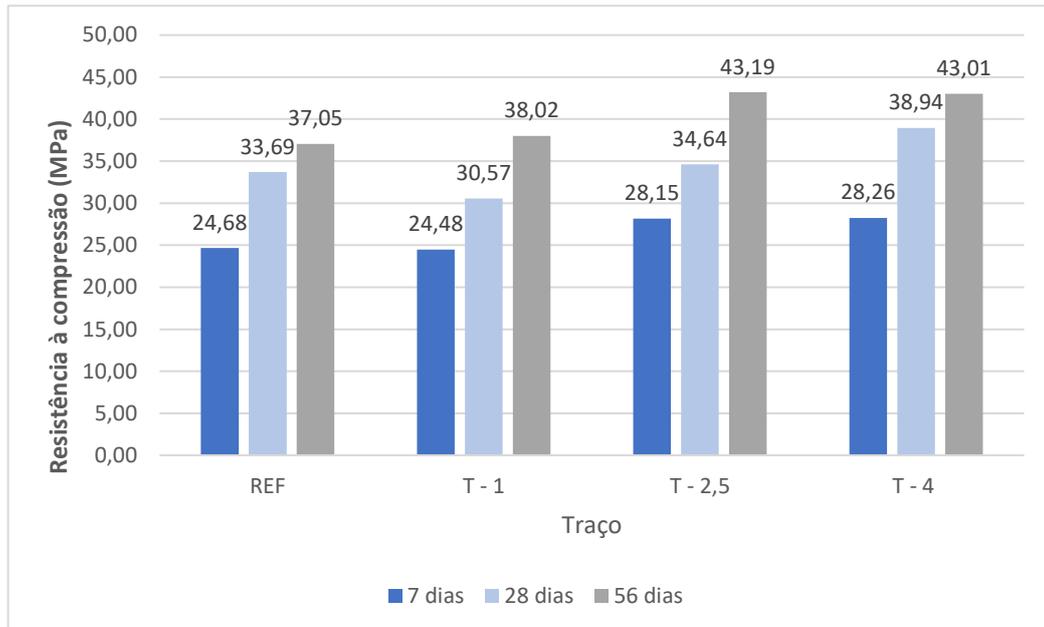
### 4.2.1 Análise dos resultados em amostras sem pré-carga

Nesta etapa foram analisados os resultados obtidos nos ensaios em estado endurecido nas amostras sem pré-carga para indução de fissuras.

#### 4.2.1.1 Resistência à compressão

Através dos ensaios de resistência à compressão realizados nesta pesquisa, foi possível verificar a tensão de ruptura dos traços empregados. A Figura 12 apresenta a média da resistência à compressão de cada traço aos 7, 28 e 56 dias.

Figura 12 – Resistência a compressão



Fonte: Autor (2021).

A partir da Figura 12, podemos verificar que todos os traços obtiveram a resistência esperada de 30 MPa aos 28 dias, sendo que o traço T-4 apresentou maior resistência no ensaio aos 7 e 28 dias comparado com os demais traços, e o traço T-2,5 apresentou o maior valor aos 56 dias. O traço T-1 obteve os menores valores em 7 e 28 dias e o traço referência obteve o menor valor aos 56 dias.

Ao analisar a resistência a compressão, ao longo do tempo, o concreto referência apresentou um aumento de 27% de resistência aos 28 dias e 33% aos 56 dias. Os traços T-1, T-2,5 e T-4, apresentaram um comportamento semelhante, apresentando acréscimo de resistência superior a 15% dos 7 aos 28 dias e um crescimento ainda mais acentuado após esta idade com acréscimo superior a 30%.

O traço T-1 obteve os menores valores de resistência aos 7 e 28 dias, entretanto, apresentou um valor superior ao concreto referência no ensaio aos 56 dias. O traço T-4 apresentou cerca de 13% a mais de resistência em comparação ao concreto referência em todas as idades. O traço T-2,5 também obteve resistência

superior de cerca de 13% em relação ao referênciã nas idades de 7 e 56 dias, já aos 28 dias apresentou resistênciã superior de apenas 3% ao concreto referênciã.

Desta forma, é possível analisar que a adiçã do aditivo cristalizante no concreto aumenta sua resistênciã a compressã, mesmo em idade mais precoce, sendo que este aumento foi observado apenas nas dosagens maiores de 2,5% e 4%, na dosagem de 1% não foi obtido um aumento de resistênciã significativo. Este pode estar relacionado com as característicã destes materiais, que reagem com a umidade disponível no interior do concreto e com os subprodutos do cimento disponíveis na matriz cimentícia (CAPPELLESSO, 2016).

Hassani *et al.* (2017), utilizaram em trabalho a adiçã de 1% de aditivo cristalizante na mistura cimentícia, e obtiveram aumento da resistênciã à compressã dos concretos aos 28 dias, porém atribuíram maior influênciã ao tipo de cimento utilizado e da relação água/aglomerante, mesmo que tal porcentagem tenha se mostrado significativa ao acréscimo da resistênciã de um modo geral. Esse mesmo resultado foi identificado neste trabalho, porém com influênciã significativa do aditivo cristalizante. Já Ferrara e Krelani (2010), notaram o contrário em seu trabalho, verificando que o teor de 1% de aditivos cristalizante não conferiu aumento da resistênciã à compressã de amostras de concreto até os 30 dias, quando comparadas às amostras sem as adições.

Takagi (2013), como neste trabalho, verificou que o aditivo cristalizante melhora a resistênciã a compressã das amostras, obtendo um acréscimo de 12% no concreto com cimento CII e adiçã de 2,5% de aditivo, sobre o concreto referênciã aos 28 dias. Na pesquisa de Roig-flores *et al.* (2015) foi avaliado uma adiçã de 4% de aditivo cristalizante em relação à massa de cimento, obtendo um aumento de aproximadamente 15% na resistênciã à compressã em relação ao concreto de referênciã, na idade de 28 dias.

Ziegler (2020) apresenta em sua pesquisa ganhos de resistênciã de até 54,6% aos 28 dias em concretos com aditivo cristalizante em comparaçã à referênciã, evidenciando que este comportamento pode estar relacionado com o preenchimento dos poros e vazios provocados pelo aditivo cristalizante, de forma a contribuir com a resistênciã a compressã, sendo essa mesma característicã identificada nesta pesquisa.

Com o intuito de entender se a adição do aditivo cristalizante, apresentou um efeito nos resultados, a Tabela 2 apresenta a análise de variância entre os valores de resistência à compressão aos 7, 28 e 56 dias dos traços empregados nesta pesquisa.

Tabela 2 – Análise de variância (ANOVA) da resistência à compressão

<b>Fonte</b>	<b>GDL</b>	<b>SQ</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>F crítico</b>	<b>Valor de P</b>	<b>Efeito significativo</b>
<i>Entre os traços aos 7 dias</i>	3	26,334	8,7781	14,658	6,5913	0,0126	S
<i>Entre os traços aos 28 dias</i>	3	71,652	23,884	10,406	6,5913	0,0232	S
<i>Entre os traços aos 56 dias</i>	3	62,911	20,970	44,424	6,5913	0,0015	S

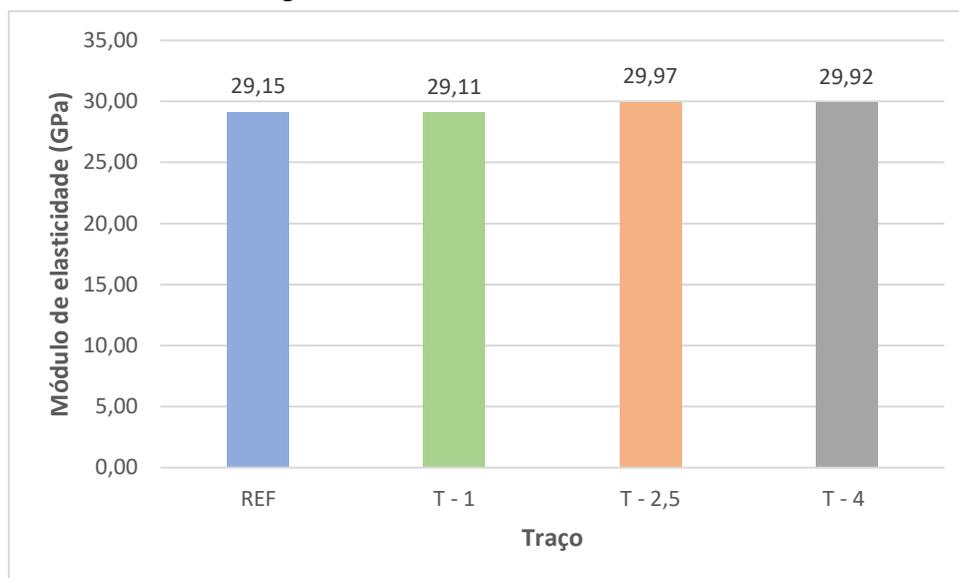
Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada.  
Fonte: Autor (2021).

Os resultados da análise de variância apresentaram, para um nível de confiança de 95%, efeito significativo (valor de 'p' inferior a 0,05), ou seja, há diferença entre os traços, para esta propriedade em todas as idades, demonstrando que há diferenças entre os teores de adição do aditivo cristalizante.

#### 4.2.1.2 Módulo de elasticidade

A partir dos ensaios de modulo de elasticidade foram verificados os dados de cada traço, sendo utilizado as médias dos 3 corpos de provas ensaiados, na Figura 13 podemos analisar os resultados dos ensaios realizados aos 56 dias de idade.

Figura 13 – Módulo de elasticidade



Fonte: Autor (2021).

Os resultados médios obtidos de módulo de elasticidade dos traços com aditivo cristalizante, aos 56 dias, estão muito próximos do traço de referência, com variação máxima de até 3%. Moreira (2016) apresentou um resultado parecido em seu trabalho, onde aos 28 dias obteve a variação máxima de 4% nos concretos contendo aditivo, sugerindo que o aditivo não interfere nos resultados de módulo de elasticidade.

Mehta e Monteiro (2008), citam que apesar de o concreto não apresentar um comportamento linear, é importante uma estimativa do módulo de elasticidade, para que se possa, além de conhecer as tensões induzidas pelas deformações associadas aos efeitos ambientais, também calcular as tensões de projeto sob carga. Desta forma, é favorável que não ocorrerá interferência do aditivo cristalizante nesta característica do concreto, já que esta, dependente também do módulo de elasticidade dos materiais empregados no traço adotado.

Diante disso, os fatores que afetam a porosidade do concreto são de extrema importância na determinação do módulo de elasticidade. E segundo Takagi, Júnior e Oliveira (2004) e Ziegler (2020) o processo de cristalização realizado pelo aditivo cristalizante é considerado um sistema de fechamento e proteção dos poros, sendo assim a utilização do aditivo cristalizante na matriz cimentícia, diminui a porosidade do concreto o que pode justificar a pequena variação apresentada neste trabalho.

A fim de identificar se a adição do aditivo cristalizante, apresentou um efeito nos resultados, a Tabela 3 apresenta a análise de variância entre os valores do módulo de elasticidade aos 56 dias dos traços empregados nesta pesquisa.

Tabela 3– Análise de variância (ANOVA) do módulo de elasticidade

<b>Fonte</b>	<b>GDL</b>	<b>SQ</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>F crítico</b>	<b>Valor de P</b>	<b>Efeito significativo</b>
<i>Entre os traços</i>	3	2,0076	0,6692	0,9787	4,0661	0,4495	NS
<i>Erro</i>	8	5,4700	0,6837				

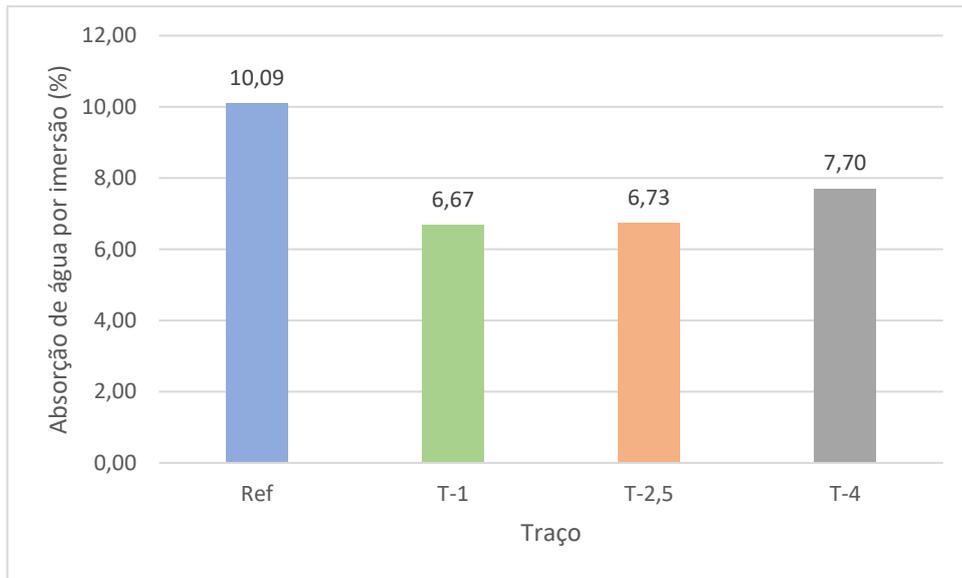
Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada.  
Fonte: Autor (2021).

O resultado da análise de variância apresentou, para um nível de confiança de 95%, efeito não significativo (valor de 'p' superior a 0,05), ou seja, não há diferença entre os traços, para esta propriedade, demonstrando que a utilização do aditivo não causou nenhum efeito para o módulo de elasticidade.

#### 4.2.1.3 Absorção de água por imersão, massa específica e índice de vazio

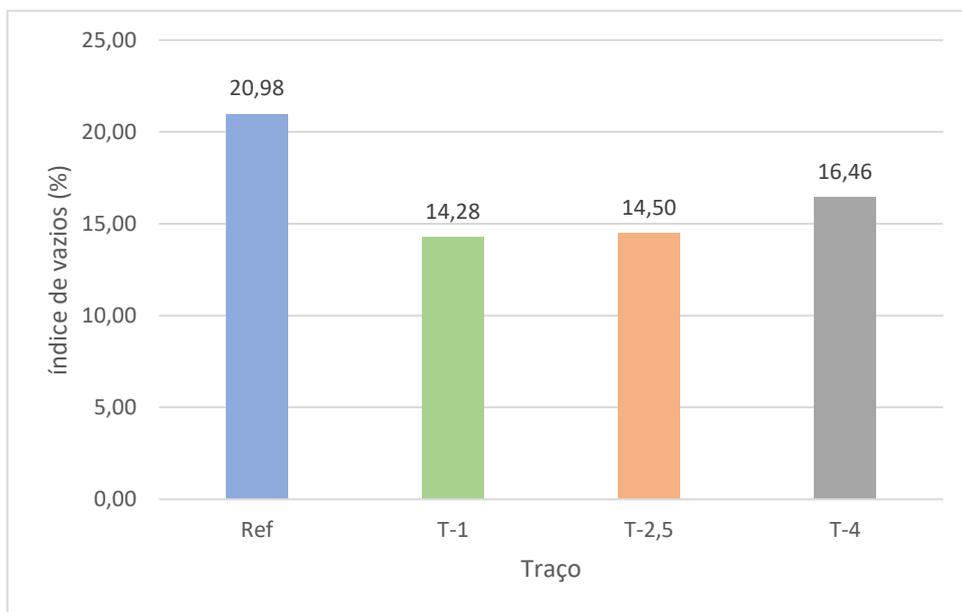
Nesta etapa estão apresentados os resultados da absorção de água, índice de vazios e massa específica, sendo que a primeira análise que foi realizada é a de absorção de água. Na Figura 14 podemos verificar a absorção de água após 56 dias e na Figura 15 podemos analisar os valores do índice de vazios das amostras ensaiadas.

Figura 14 – Absorção de água por imersão



Fonte: Autor (2021).

Figura 15 – Índice de vazios



Fonte: Autor (2021).

De acordo com os dados apresentados no gráfico acima, podemos verificar que o concreto referência apresentou maior absorção, sendo o traço T-1 que apresentou o menor valor, cerca de 34% menor em relação à referência. Os traços T-2,5 e T-4, também apresentaram absorção menor em relação ao traço referência, entorno de 33% e 24% respectivamente. O índice de vazios apresentou resultado semelhante aos resultados de absorção, sendo que um está diretamente ligado ao outro. Desta forma, o concreto referência apresentou maior índice de vazio,

evidenciando que o aditivo cristalizante preenche os vazios existentes na matriz cimentícia.

É possível verificar a ação do aditivo cristalizante por meio da redução da absorção de água nos traços T-1, T-2,5 e T-4, provavelmente, pela formação cristalina no interior dos poros, o que contribui para a diminuição da permeabilidade da matriz cimentícia.

No trabalho de Takagi (2013), foi verificado uma redução de 19,9% na taxa de absorção de água devido ao uso de aditivo cristalizante em concretos com cimento CII. Ziegler (2020), apresentou o mesmo resultado em sua pesquisa, onde obteve redução na taxa de absorção de até 41%, sendo observado um efeito mais considerável aos 91 dias, indicando que a redução da absorção percebida é devido principalmente ao efeito do aditivo cristalizante utilizado. Esses resultados são semelhantes aos resultados obtidos neste trabalho.

Hermann *et al.* (2016) cita que em decorrência da formação do C-S-H decorrente da reação do aditivo cristalizante, há uma redução do volume dos vazios da matriz cimentícia com o passar do tempo. Por isso os concretos contendo aditivo apresentaram um valor inferior de absorção de água em relação ao concreto referência. Segundo Takagi, Júnior e Oliveira (2004) a formação cristalina só ocorre na presença de água, e nessa pesquisa, todos os corpos de prova foram mantidos em cura submersa, o que contribuiu para formação dos cristais e redução da absorção de água.

Com o intuito de entender se a adição do aditivo cristalizante, apresentou um efeito nos resultados, a Tabela 4 apresenta a análise de variância entre os valores de absorção de água e índice de vazios aos 56 dias dos traços empregados nesta pesquisa.

Tabela 4 – Análise de variância (ANOVA) da absorção de água e índice de vazios

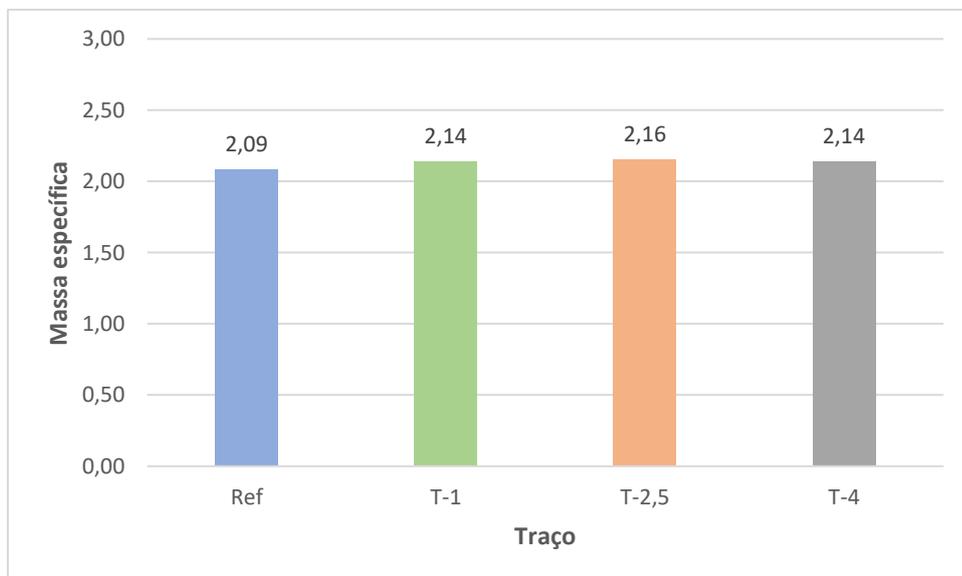
<b>Fonte</b>	<b>GDL</b>	<b>SQ</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>F crítico</b>	<b>Valor de P</b>	<b>Efeito significativo</b>
<i>Entre os traços na absorção</i>	3	15,310	5,1034	3,5308	6,5913	0,1272	NS
<i>Entre os traços no índice de vazios</i>	3	58,052	19,350	3,6650	6,5913	0,1208	NS

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), ou seja, não possui nenhuma diferença entre os traços empregados nesta pesquisa para as propriedades mencionadas.

Na Figura 16 podemos notar os valores da massa específica no estado endurecido das amostras ensaiadas.

Figura 16 – Massa específica



Fonte: Autor (2021).

Por meio dos dados obtidos, pode-se verificar que a variação entre a massa

específica dos concretos analisados foi pequena. Os traços que apresentaram maior massa específica foram as que continham aditivo cristalizante, sendo que, a variação desta propriedade, para todas as matrizes cimentícias, não foi superior a 0,07 g/cm<sup>3</sup>.

A Tabela 5 apresenta a análise de variância entre os valores de massa específica aos 56 dias dos traços empregados nesta pesquisa.

Tabela 5 – Análise de variância (ANOVA) da massa específica

<i>Fonte</i>	<i>GDL</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F crítico</i>	<i>Valor de P</i>	<i>Efeito significativo</i>
<i>Entre os traços</i>	3	0,0056	0,0018	3,8087	6,5913	0,1145	NS
<i>Erro</i>	4	0,0019	0,0004				

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada.

Fonte: Autor (2021).

O resultado da análise de variância apresentou, para um nível de confiança de 95%, efeito não significativo (valor de 'p' superior a 0,05), ou seja, não há diferença entre os traços utilizados nesta pesquisa para a propriedade de massa específica.

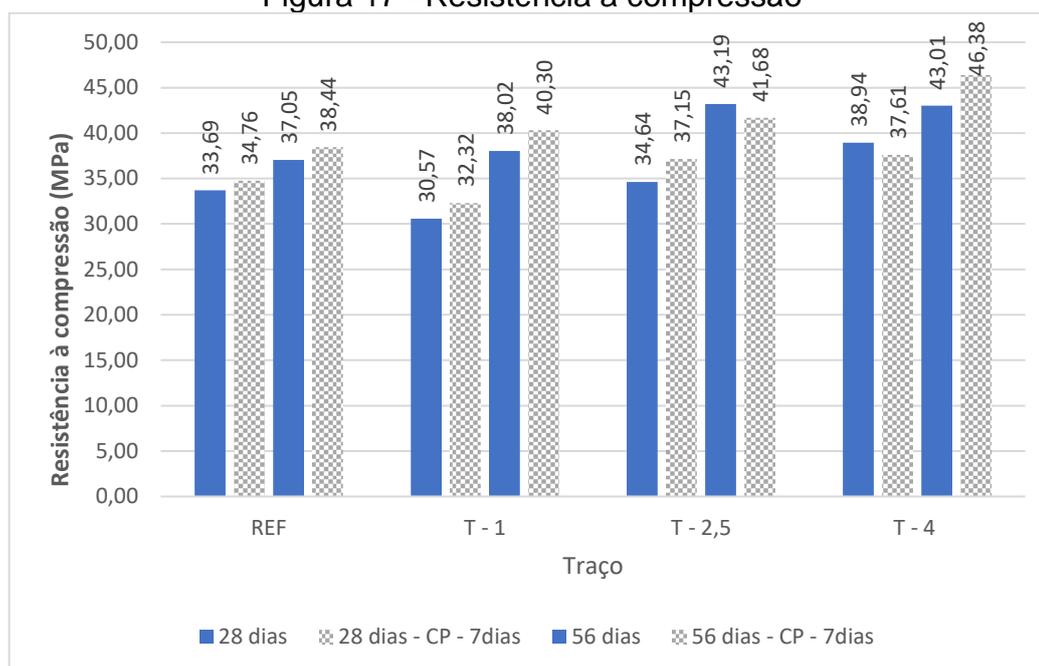
#### 4.2.2 Análise dos resultados em amostras com pré-carga aos 7 dias

Neste tópico foram analisados os resultados obtidos nos ensaios em estado endurecido nas amostras com pré-carga aos 7 dias para indução de fissuras, sendo comparadas as amostras sem pré-carga.

##### 4.2.2.1 Resistência à compressão

Através dos ensaios de resistência à compressão realizados nesta pesquisa, foi possível verificar a tensão de ruptura dos traços empregados. A Figura 17 apresenta a média da resistência à compressão de cada traço aos 28 dias e 56 dias, sem pré-carga e com pré-carga aos 7 dias.

Figura 17 – Resistência a compressão



Fonte: Autor (2021).

Com base nos dados do gráfico acima, podemos verificar que os traços referência e T-1, apresentaram resultados superiores nas amostras que receberam pré-carga tanto aos 28 dias, quando aos 56 dias. Esse resultado indica que nestes traços ocorreu a recuperação da resistência a compressão após o fissuramento, sendo que esses resultados foram entorno de 5% maior que nas amostras sem pré-carga.

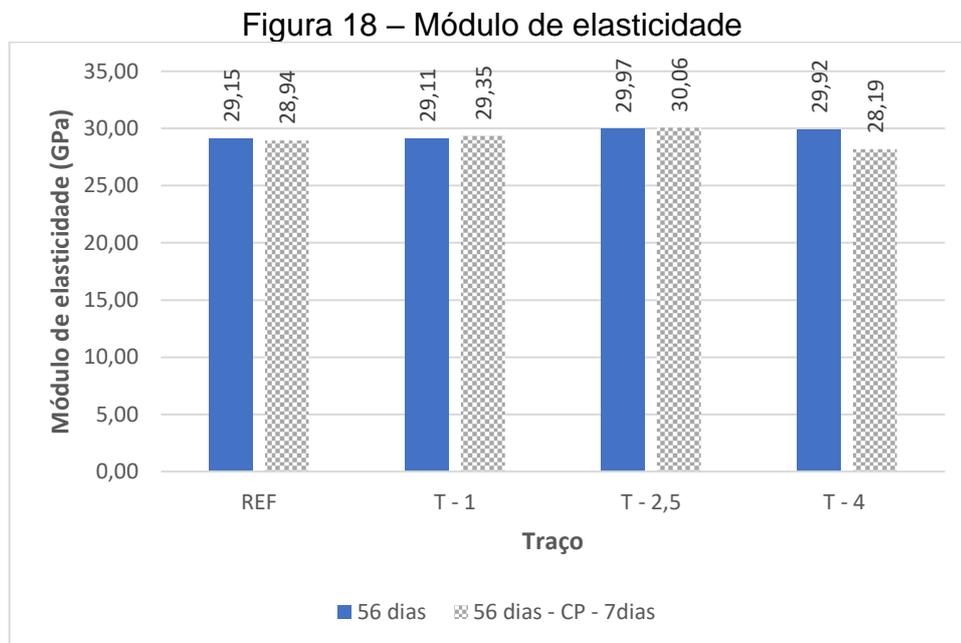
O traço T-2,5 apresentou maior resultado de resistência a compressão no ensaio aos 28 dias nas amostras com pré-carga os 7 dias, já no ensaio aos 56 dias, esse resultado foi inferior em comparação as amostras sem pré-carga. O contrário aconteceu no traço T-4, que apresentou melhor resultado no ensaio aos 56 dias e resultado inferior aos 28 dias. Com isso podemos analisar que no traço T-4, a recuperação da resistência após o fissuramento ocorre de forma mais lenta, porém de forma eficaz. Já no traço T-2,5, a recuperação ocorre de forma mais eficaz logo após o fissuramento, e com o passar do tempo essa recuperação diminui.

Desta forma, podemos verificar que ocorreu a autocicatrização em todos os traços, através da recuperação da resistência a compressão após o recebimento de pré-carga. Moreira (2016) obteve resultados parecidos comparando em seu trabalho traços íntegros e fissurados, em amostras com aditivo cristalizante, observando que aos 28 dias não ocorreu uma variação considerável na resistência à compressão. E

explica que isso ocorre, devido ao pouco tempo para a cicatrização das amostras. Entretanto, a autora indica que aos 63 dias obteve um ganho de resistência, na ordem de 10%, sendo uma hipótese de que pode ocorrer melhorias nas propriedades mecânicas dos concretos ao longo prazo.

#### 4.2.2.2 Módulo de elasticidade

A partir dos ensaios de modulo de elasticidade foram verificados os dados de cada traço, sendo utilizado as médias dos 3 corpos de provas ensaiados, na Figura 18 podemos analisar os resultados dos ensaios realizados aos 56 dias de idade, sem pré-carga e com pré-carga aos 7 dias.



Fonte: Autor (2021).

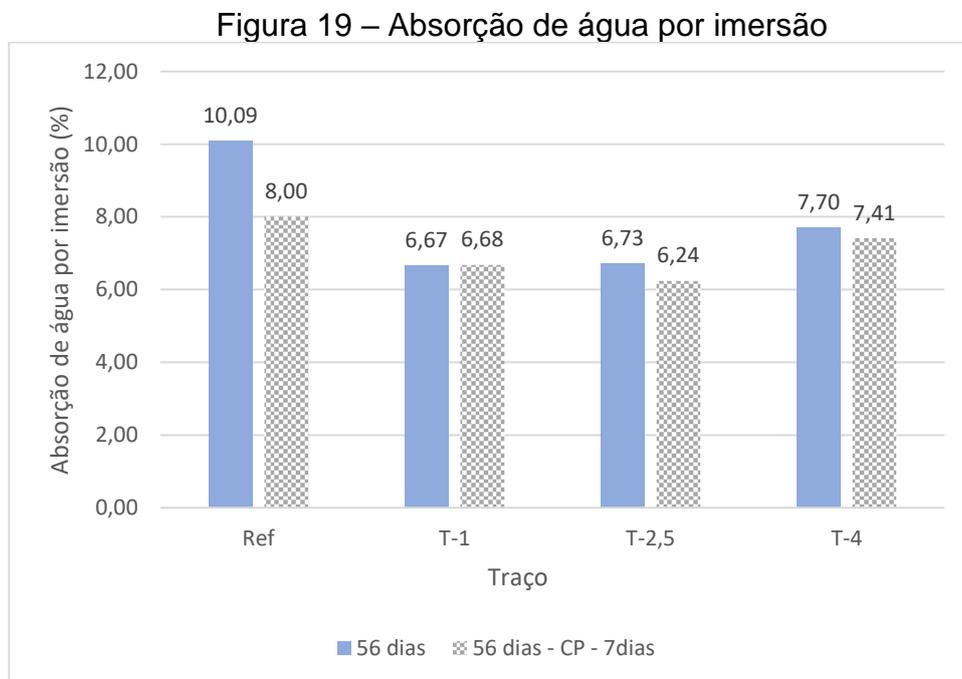
Analisando os dados do gráfico acima, podemos notar que no traço T-4, as amostras com pré-carga tiveram um resultado inferior de 6% em relação as amostras sem pré-carga, indicando que neste traço, o aditivo cristalizante não conseguiu atuar de forma a recuperar esta propriedade.

Os demais traços apresentaram pequena variação entre as amostras com e sem pré-carga, sendo que essa diferença foi de no máximo 1%. Com isso, é possível analisar que nestes traços, ocorreu a recuperação dessa propriedade após o

fissuramento, provavelmente através da autocicatrização, que atuou reduzindo os poros e selando as fissuras.

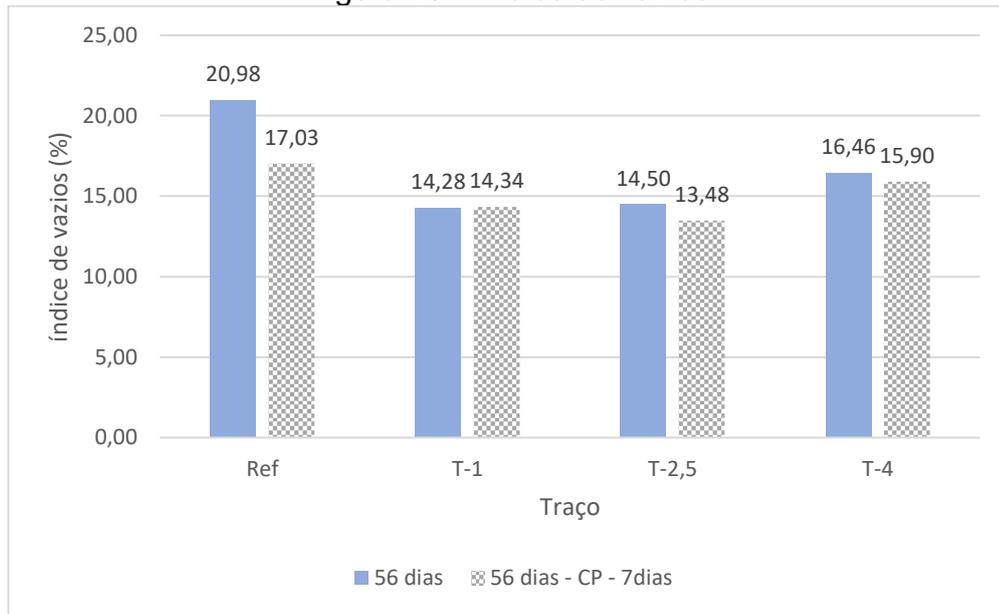
#### 4.2.2.3 Absorção de água por imersão, massa específica e índice de vazio

Nesta etapa estão apresentados os resultados da absorção de água, índice de vazios e massa específica, sendo que a primeira análise que foi realizada é a de absorção de água. Na Figura 19 podemos verificar a absorção de água após 56 dias, sem pré-carga e com pré-carga aos 7 dias e na Figura 20 podemos analisar os valores do índice de vazios das amostras ensaiadas.



Fonte: Autor (2021).

Figura 20 – Índice de vazios



Fonte: Autor (2021).

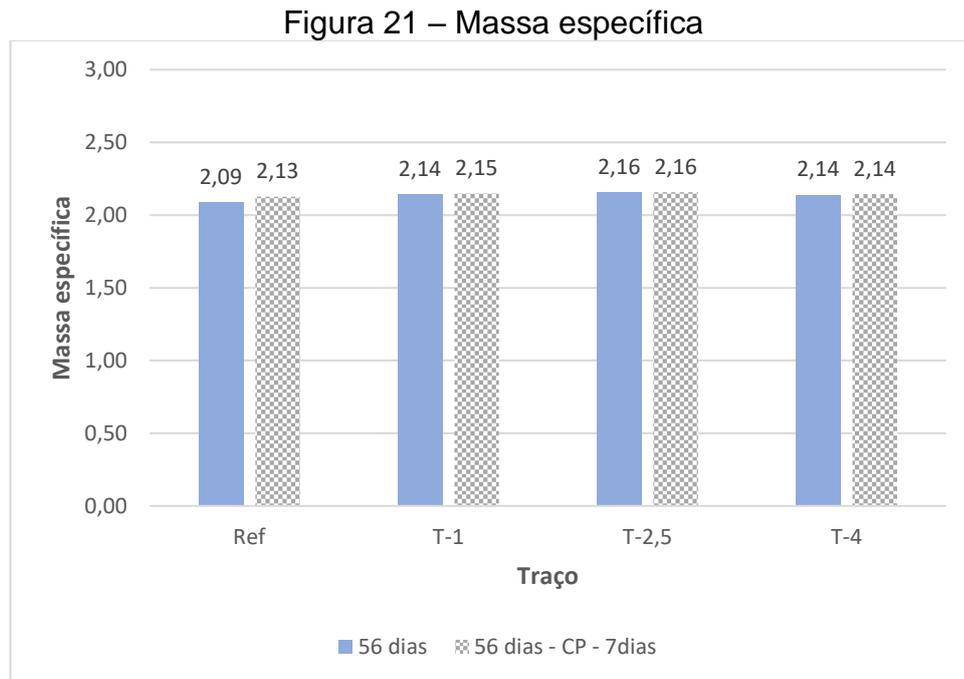
Com base nos dados obtidos neste ensaio, pode-se verificar que nas amostras com pré-carga aos 7 dias, o traço referência e os traço T-2,5 e T-4 apresentaram resultados de taxa de absorção e índice vazios inferior as amostras sem pré-carga, obtendo redução de 21% no traço referência, 7% no traço T-2,5 e 4% no traço T-4. Enquanto no traço T-1, a taxa de absorção e o índice de vazios apresentou valores praticamente iguais em comparação as amostras sem pré-carregamento. Com isso, podemos observar o efeito de cicatrização das fissuras em todos os traços, porém com menos intensidade no traço T-1. O uso do aditivo cristalizante pode ter colaborado para ação de autocicatrização, porém nos traços com o aditivo, o resultado foi menos eficiente que o concreto referência.

Os aditivos cristalizantes possuem capacidade de preencher os poros capilares da matriz cimentícia, tornando o concreto menos permeável, o que pode ter contribuído para a redução na absorção de água nos concretos confeccionados com o aditivo (HELENE *et al.*, 2018). Nesta pesquisa é possível identificar tal característica para as amostras que utilizaram o aditivo.

Ziegler (2020), obteve melhores resultados aos 91 dias, quando um efeito mais considerável foi observado com a utilização de aditivo cristalizante, onde a redução da absorção foi de 24%, 43% e 31%. Na pesquisa realizada por Joa *et al.* (2015) a utilização de 3% de aditivo cristalizante em argamassas proporcionou uma redução da porosidade e da absorção de água em argamassas. Já, Hassani *et al.*

(2017) constataram que não houve diferença considerável nos resultados de absorção de água em concretos contendo 1% de aditivo cristalizante aos 28 dias, mesmo resultado obtido neste trabalho no traço com este índice de adição.

Na Figura 21 podemos notar os valores da massa específica no estado endurecido das amostras ensaiadas.



Fonte: Autor (2021).

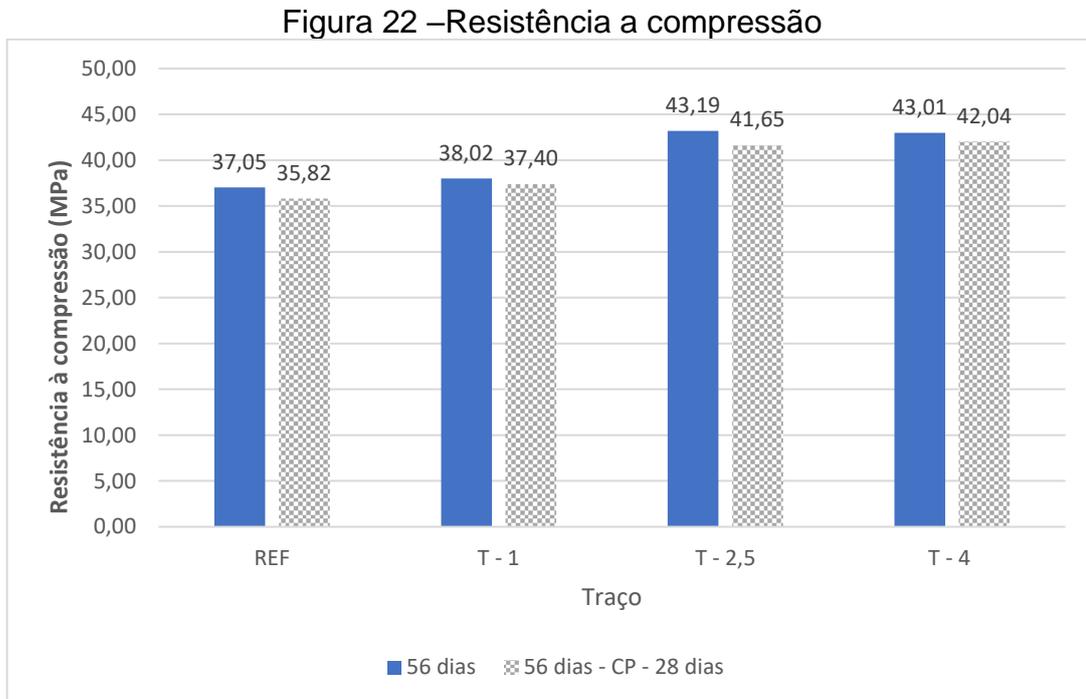
Analisando os dados apresentados no gráfico acima, podemos observar que não ocorreu alteração significativa nos resultados de massa específica em todos os traços, comprando as amostras sem pré-carga e com pré-carga aos 7 dias. A maior variação foi no traço referência de 0,04g/cm<sup>3</sup>.

#### 4.2.3 Análise dos resultados em amostras com pré-carga aos 28 dias

Nesta parte foram analisados os resultados obtidos nos ensaios em estado endurecido nas amostras com pré-carga aos 28 dias para indução de fissuras em comparação com as amostras sem pré-carga.

##### 4.2.3.1 Resistência à compressão

Através dos ensaios de resistência à compressão realizados nesta pesquisa, foi possível verificar a tensão de ruptura dos traços empregados. A Figura 22 apresenta a média da resistência à compressão de cada traço aos 56 dias, sem pré-carga e com pré-carga aos 28 dias.



Fonte: Autor (2021).

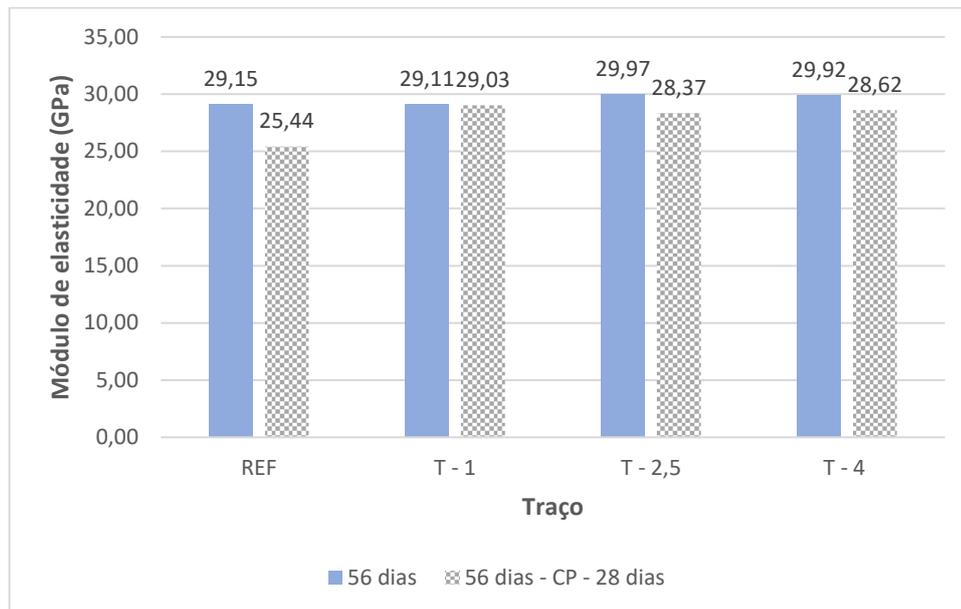
Comparando as amostras sem pré-carga e com pré-carga é possível analisar que as amostras que receberam carregamento aos 28 dias, apresentaram valores menores de resistência a compressão em todos os traços, com uma variação de 2% a 4%, não sendo possível avaliar a autocicatrização através do aditivo cristalizante, pois os traços com a adição obtiveram o mesmo resultado que o traço referência.

De acordo com Takagi (2013), o pré-carregamento do concreto gera o aumento da porosidade e conseqüentemente a diminuição da sua resistência a compressão. Desta forma, o fissuramento interno inicialmente reduz a resistência a compressão, porém nos concretos com aditivo cristalizante, essa resistência é recuperada com o tempo, quando ocorre o preenchimento progressivo das fissuras por géis de CSH formados devido aos efeitos da autocicatrização. Em seu trabalho, Takagi obteve uma recuperação entre 3,9% e 29,6% da resistência a compressão aos 56 dias nos concretos fissurados aos 28 dias, esta recuperação também foi observada nos traços deste trabalho que continham aditivo cristalizante.

#### 4.2.3.2 Módulo de elasticidade

A partir dos ensaios de módulo de elasticidade foram verificados os dados de cada traço, sendo utilizado as médias dos 3 corpos de provas ensaiados, na Figura 23 podemos analisar os resultados dos ensaios realizados aos 56 dias de idade, sem pré-carga e com pré-carga aos 28 dias.

Figura 23 – Módulo de elasticidade



Fonte: Autor (2021).

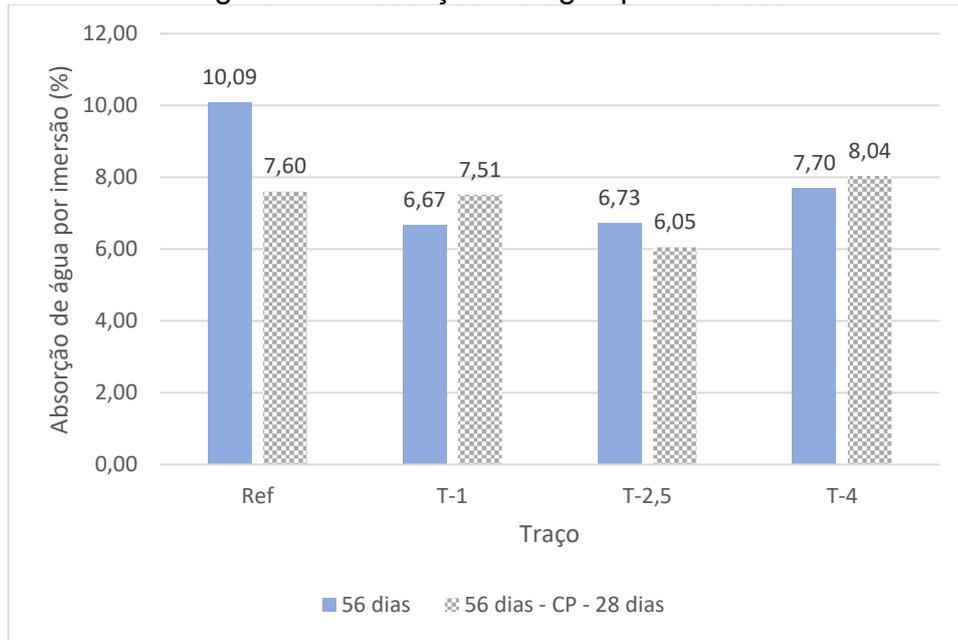
Analisando os dados do gráfico acima, podemos notar as amostras que receberam pré-carregamento aos 28 dias, obtiveram resultados mais baixos comparados com as amostras sem pré-carga.

Entretanto, o concreto referência com pré-carga apresentou uma redução de 13% a menos que o concreto sem pré-carga, enquanto, os traços com aditivo cristalizante, apresentaram redução de no máximo 5% em comparação as amostras sem pré-carga. Com isso, é possível analisar a autocicatrização dos concretos com aditivo, sendo que, o pré-carregamento aumenta a porosidade do concreto, o aditivo cristalizante preenche os poros através da autocicatrização.

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

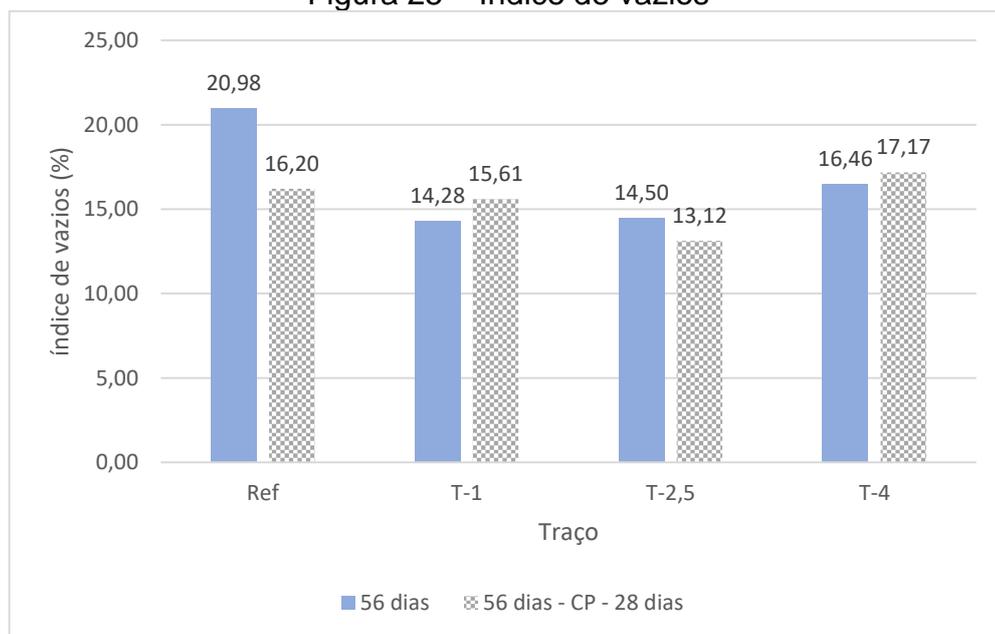
Nesta etapa estão apresentados os resultados da absorção de água, índice de vazios e massa específica, sendo que a primeira análise que foi realizada é a de absorção de água. Na Figura 24 podemos verificar a absorção de água após 56 dias, sem pré-carga e com pré-carga aos 28 dias, e na Figura 25 podemos analisar os valores do índice de vazios das amostras ensaiadas.

Figura 24– Absorção de água por imersão



Fonte: Autor (2021).

Figura 25 – Índice de vazios



Fonte: Autor (2021).

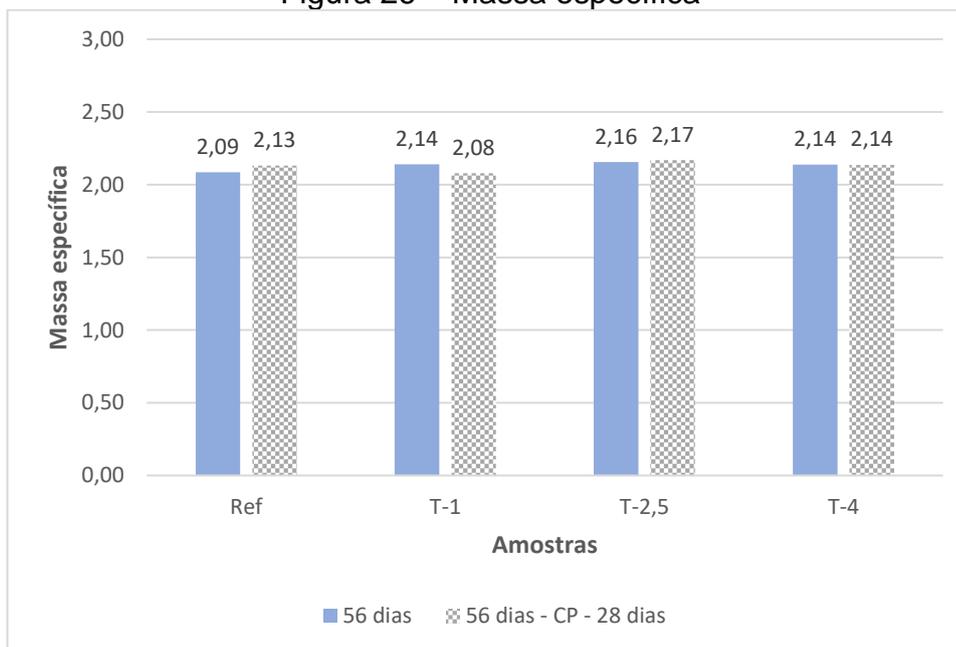
Com base nos dados obtidos neste ensaio, pode-se verificar que nas amostras com pré-carga aos 28 dias, o traço referência e o traço T-2,5 apresentaram resultados de taxa de absorção e índice vazios inferior as amostras sem pré-carga, obtendo redução de 25% no traço referência e 10% no traço T-2,5. Enquanto nos traços T-1 e T-4, a taxa de absorção e o índice de vazios apresentaram valores superiores entre 4% e 13% em comparação as amostras sem pré-carregamento.

Takagi (2013), utilizando o cimento CII com aditivo cristalizante, observou a diminuição da taxa de absorção nas amostras fissuradas aos 28 dias, nos ensaios realizados aos 56 dias. Em seu trabalho, ele verificou uma redução significativa da absorção de água em relação ao tempo, no entanto, as amostras sem aditivo cristalizante apresentaram uma porcentagem de recuperação superior, essa mesma característica foi observada nesta pesquisa. Takagi sugere que o efeito de autocicatrização depende fortemente das condições de exposição à água e ao ar.

Podemos verificar que não ocorreu cicatrização das fissuras nos traços T-1 e T-4, e assim, ocorreu o aumento do índice vazios e conseqüentemente, o aumento da taxa de absorção. A autocicatrização pode ser verificada no traço referência através da hidratação tardia do cimento. Já no traço T-2,5, a autocicatrização pode ter ocorrido pela hidratação do cimento e pela cristalização através do aditivo cristalizante. Mehta e Monteiro (2014), avaliam que a hidratação da matriz cimentícia pode não ocorrer de forma completa devido à baixa disponibilidade de água, e desta forma ocorre a maior probabilidade de restarem partículas de cimento anidro que quando expostos a água, através da hidratação tardia e da formação de fissuras, as partículas que restaram podem contribuir na capacidade e autocicatrizante da matriz.

Na Figura 26 podemos notar os valores da massa específica no estado endurecido das amostras ensaiadas.

Figura 26 – Massa específica



Fonte: Autor (2021).

Por meio dos resultados obtidos, pode-se observar que a variação entre a massa específica dos concretos analisados foi pequena. O traço T-1 apresentou a maior variação desta propriedade, sendo  $0,06 \text{ g/cm}^3$ , comparando as amostras com e sem pré-carga. Desta forma, não foi obtido alteração significativa na massa específica em relação ao pré-carregamento aos 28 dias.

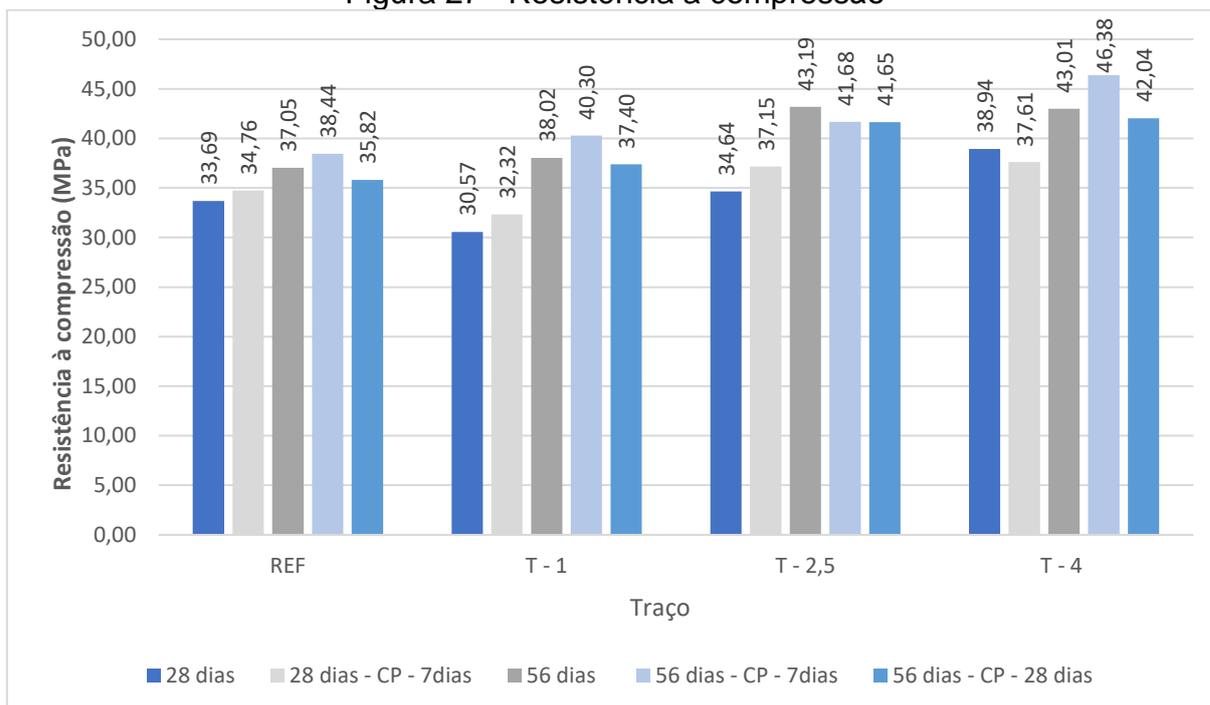
#### 4.2.4 Análise dos resultados global

Nesta etapa foram analisados os resultados obtidos nos ensaios em estado endurecido de forma global, com o objetivo de verificar as diferenças entre as amostras sem pré-carga e com pré-carga aos 7 e 28 dias de cada traço de concreto.

##### 4.2.4.1 Resistência à compressão

Através dos ensaios de resistência à compressão realizados nesta pesquisa, foi possível verificar a tensão de ruptura dos traços empregados. A Figura 27 apresenta a média da resistência à compressão de cada traço aos 28 e 56 dias, em amostras com pré-carga e sem pré-carga.

Figura 27 – Resistência a compressão



Fonte: Autor (2021).

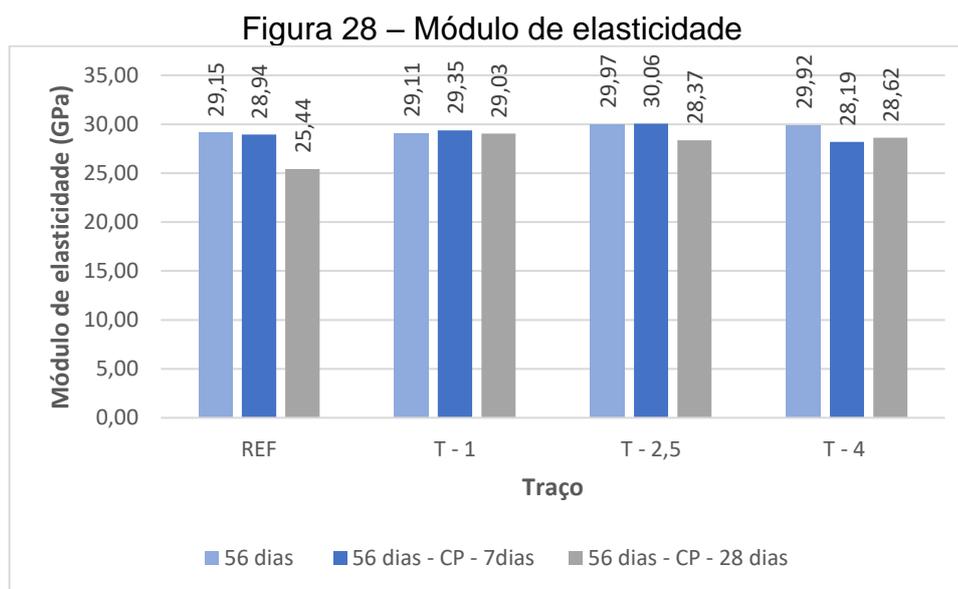
Analisando os resultados apresentados no gráfico acima, pode-se observar uma melhor recuperação desta propriedade nas amostras com fissuradas aos 7 dias, apresentando o melhor resultado após os 56 dias de cura, sendo que o traço referência apresentou um acréscimo de 10% e os traços com aditivo cristalizante apresentaram resultados superiores de até 20% em relação as amostras rompidas aos 28 dias. Esses resultados indicam que a autocicatrização ocorre de forma mais efetiva em fissuras jovens, sendo mais eficaz com o passar do tempo. A recuperação da resistência a compressão pode ser verificada em todos os traços, indicando a existência da autocicatrização, que ocorreu de forma mais efetiva nos concretos com aditivo cristalizante.

Sahmaran, et al, apresentou em seu trabalho uma diferença inferior de 27% na resistência a compressão dos corpos de provas fissurados com os não fissurados, avaliando que esta diferença cai para 7% após um período maior de cicatrização. Takagi (2013), apresentou resultados parecidos em seu trabalho com valores inferiores cerca de 18% nas amostras pré-carregadas, entretanto, após 56 dias, foram recuperados até 30% da resistência a compressão. Takagi afirma que a recuperação das propriedades de resistência a compressão podem ser relacionados com o preenchimento progressivo das fissuras através dos efeitos da autocicatrização.

Ferrara et al. (2014), explica que a autocicatrização das fissuras pode variar de acordo com a idade dessas fissuras, sendo que as fissuras encontradas em concretos jovens apresentam maior facilidade para esse fenômeno ocorrer tendo como principal mecanismo a hidratação contínua dos grãos anidros, enquanto fissuras em concretos com idade mais avançadas a probabilidade de ocorrer essa hidratação é menor. Isso pode ser identificado do traço de referência desta pesquisa.

#### 4.2.4.2 Módulo de elasticidade

A partir dos ensaios de modulo de elasticidade foram verificados os dados de cada traço, sendo utilizado as médias dos 3 corpos de provas ensaiados, na Figura 28 podemos analisar todos os resultados dos ensaios realizados aos 56 dias de idade.



Fonte: Autor (2021).

Observando os dados obtidos neste ensaio, podemos verificar que no traço referência, as amostras que sofreram o pré-carregamento, obtiveram resultados inferiores em comparação as amostras sem pré-carga, sendo está diferença, de 1% com pré-carga aos 7 dias e 13% nas amostras com pré-carga aos 28 dias. Desta forma, é possível analisar que o pré-carregamento interfere no modulo de elasticidade do concreto no traço referência, sendo que a redução desta propriedade, foi maior nas amostras onde as fissuras foram induzidas em uma idade maior de cura.

Pode-se observar que os traços T-1 e T-2,5 obtiveram resultados parecidos, em relação as amostras sem pré-carga, mostrando aumento do modulo de elasticidade nas amostras com pré-carga aos 7 dias e uma redução deste modulo nas amostras com pré-carga aos 28 dias. Porém a variação destes resultados é consideravelmente baixa, com exceção da redução no traço T-2,5 na amostra com pré-carga aos 28 dias, que apresentou uma redução de 6% em relação as demais amostras deste traço. Sendo assim, pode-se analisar que nas amostras que o carregamento foi aplicado em idade precoce de 7 dias, o aditivo cristalizante agiu de forma a recuperar as propriedades do concreto, entretanto, este comportamento não foi verificado nas amostras com pré-carga aos 28 dias de cura.

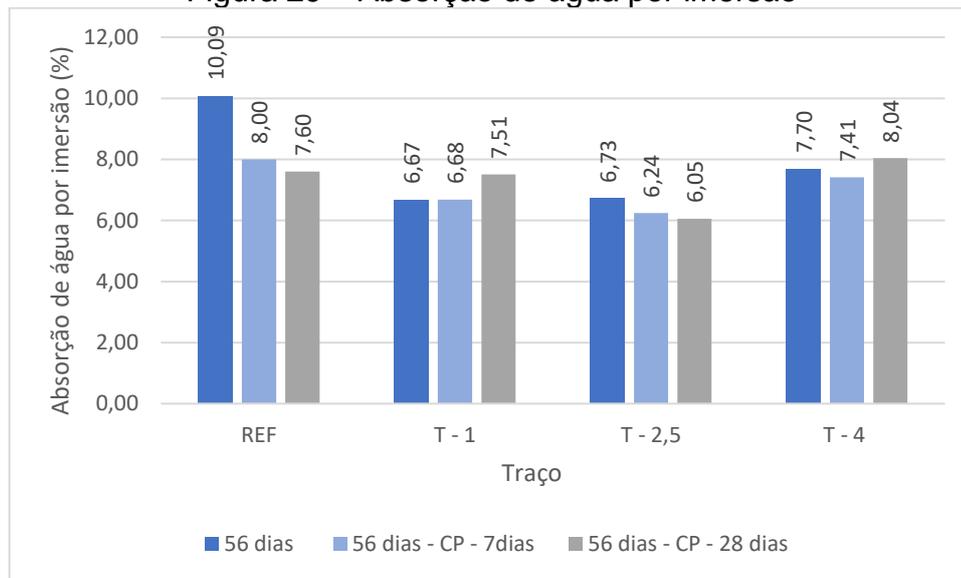
No traço T-4, as amostras que receberam o pré-carregamento, apresentaram redução do modulo de elasticidade, em comparação as amostras sem pré-carga. Esta redução foi de cerca de 5% nas amostras com pré-carga aos 7 dias e 28 dias. Desta forma, podemos verificar que não houve uma recuperação desta propriedade pelo aditivo cristalizante, mesmo com um índice maior neste traço.

Pode-se observar o efeito da autocicatrização em algumas amostras, sendo provenientes do tempo de cura e da existência de água através da cura submersa. Oliveira (2019), cita em seu trabalho que o efeito dos concretos com aditivo cristalizante, refere-se à contribuição na autocicatrização, através da cristalização interna na região da fissura e refinamento dos poros na microestrutura da matriz. Esse processo de cicatrização autógena, acontece devido ao fato de os cristais permanecerem inativos até ocorrer contato com água, iniciando um regime de colmatação das fissuras, com a formação de uma nova estrutura cristalina (BILESKEY; OURIVES; YOKOYAMA, 2009).

#### 4.2.4.3 Absorção de água por imersão, massa específica e índice de vazio

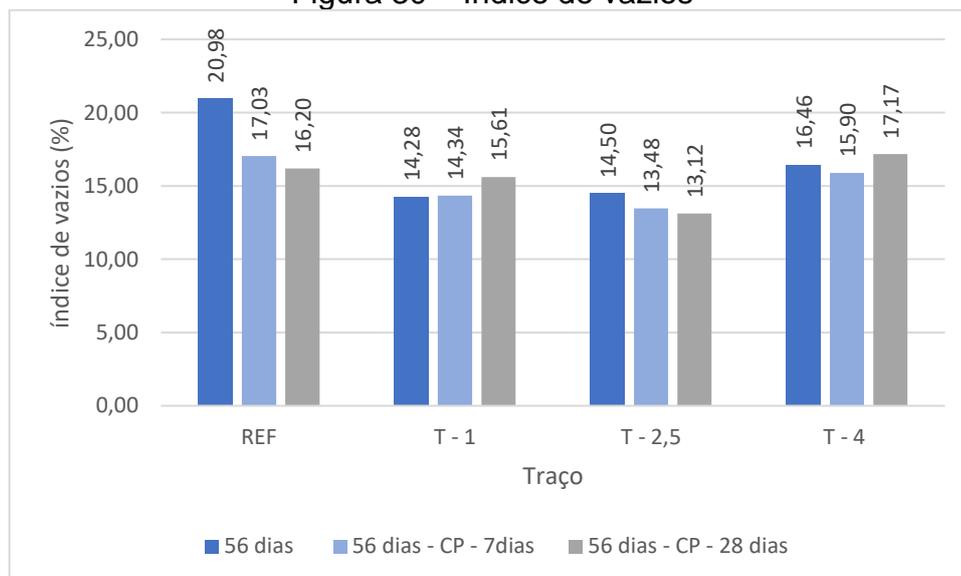
Nesta etapa estão apresentados os resultados da absorção de água, índice de vazios e massa específica, sendo que a primeira análise que foi realizada é a de absorção de água. Na Figura 29 podemos verificar a absorção de água após 56 dias e na Figura 30 podemos analisar os valores do índice de vazios das amostras ensaiadas.

Figura 29 – Absorção de água por imersão



Fonte: Autor (2021).

Figura 30 – Índice de vazios



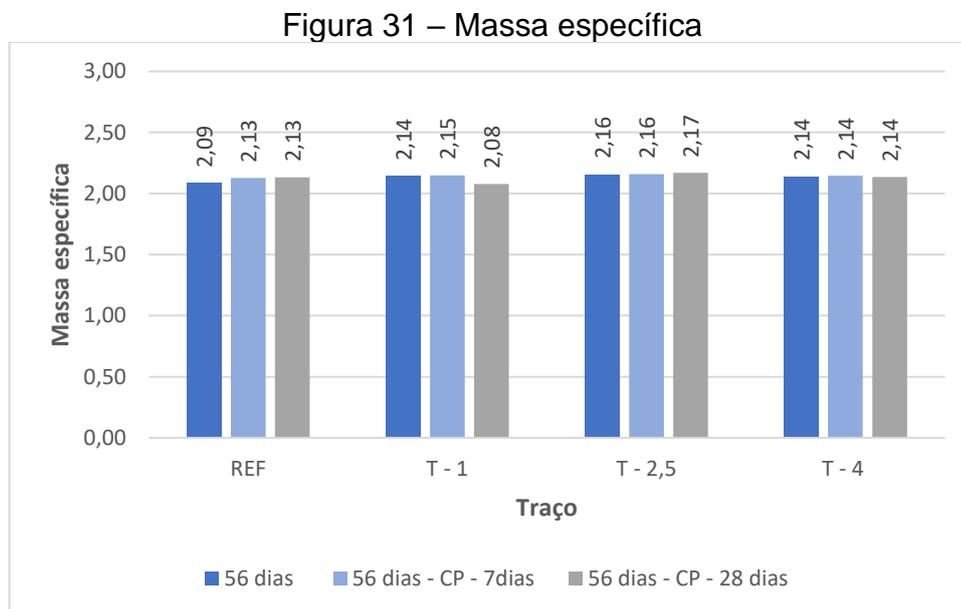
Fonte: Autor (2021).

De acordo com os dados obtidos é possível verificar que o concreto referência teve a absorção de água e o índice de vazios reduzidos mesmo com o pré-carregamento, assim como os concreto do traço T-2,5. Esses resultados, evidenciam a ação da autocicatrização, através do refinamento dos poros e selamento das fissuras. O traço T-1, apresentou maiores resultados após a fissuração, assim como o traço T-4, que teve um resultado superior nas amostras com pré-carga aos 28 dias, porém obteve um resultado levemente inferior nas amostras com pré-carga aos 7 dias,

comparadas com as amostras sem pré-carga. Pode-se analisar, que nas amostras que tiveram aumento da taxa de absorção de água e no índice de vazios, não ocorreu a cicatrização das fissuras, sendo que este comportamento pode ter ocorrido devido a formação insuficiente dos cristais, mostrando que para os traços T-1 e T-4, para esse período de ensaios, o aditivo cristalizante não foi eficiente.

Moreira (2016) notou em seu trabalho, uma variação de até 50% entre as o concreto com aditivo cristalizante e o concreto referência, avaliando que o aditivo cristalizante, possui uma grande capacidade em limitar a penetração de água pelos poros e microfissuras do concreto, indicando a menor absorção durante o ensaio. De acordo com a pesquisa de Takagi (2013), a adição de 2,5% de aditivo cristalizante ao concreto, reduziu consideravelmente as taxas de absorção dos concretos em relação a referência, sendo estas reduções na ordem de 30%. O resultado destes dois autores, são semelhantes aos encontrados neste trabalho.

Na Figura 31 podemos notar com pré-carga aos 28 dias os valores da massa específica no estado endurecido das amostras ensaiadas.



Fonte: Autor (2021).

De forma geral, analisando os dados de massa específica obtidos nesta pesquisa, pode-se verificar que não ocorreu influência nesta propriedade, através da adição de aditivo cristalizante nas matrizes cimentícias e também através do pré-

carregamento aos 7 e 28 dias. A maior variação apresentada foi de  $0,07\text{g/cm}^3$ , no traço T-1, em relação as amostras pré-carregadas aos 7 e 28 dias.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio do presente estudo foi possível avaliar as propriedades no estado fresco e endurecido dos concretos produzidos com aditivo cristalizante e relacioná-las com a autocicatrização, através da recuperação das propriedades mecânicas do concreto, sendo que, as adições utilizadas foram capazes de modificar as propriedades do concreto, e influenciar na cicatrização do mesmo. Os concretos contendo aditivo cristalizante apresentaram melhora considerável em suas propriedades, no que diz respeito, principalmente, à absorção de água e índice de vazios, além disso, também apresentaram resultados superiores de resistência a compressão e módulo de elasticidade, principalmente no traço com o índice de adição de 2.5%, quantidade indicada pelo fornecedor. De maneira mais detalhada, pode-se concluir que:

- Com relação às propriedades no estado fresco:

Analisando a trabalhabilidade nota-se que a adição de aditivo cristalizante no concreto altera sua trabalhabilidade, sendo que quanto maior a quantidade de aditivo acrescentado ao concreto, maior será a perda de trabalhabilidade. Porém, os resultados ficaram dentro do abatimento estabelecido, o que mostra pequena relevância nesta diferença.

Quanto a massa específica, verifica-se que a utilização do aditivo cristalizante não promove uma alteração significativa na massa do concreto. Pode-se notar apenas uma pequena diferença entre os traços, onde o índice de aditivo cristalizante foi proporcional ao aumento da massa de específica, sendo que o traço T-4 apresentou o maior valor.

- Com relação às propriedades no estado endurecido:

O uso do aditivo cristalizante no concreto melhora as propriedades do mesmo, apresentando aumento de resistência a compressão e também do módulo de elasticidade. Além disso, foi possível observar que o aditivo agiu de modo a reduzir os poros do concreto, apresentando menor taxa de absorção e índice de vazios. Conforme a análise estatística, a utilização do aditivo cristalizante apresentou um efeito significativo nas propriedades de resistência a compressão.

Quanto a quantidade de aditivo cristalizante, pode-se analisar que o índice ideal de adição é 2,5%, pois as amostras com índice menor não apresentaram resultados significantes nos ensaios realizados, e as amostras com índice maior,

apesar de apresentar um resultado superior de resistência a compressão e módulo de elasticidade, apresentaram os piores resultados frente autocicatrização com relação a recuperação das propriedades mecânicas nas amostras onde ocorreu a indução das fissuras através do pré-carregamento.

- Com relação à autocicatrização através da indução de fissuras:

O concreto referência apresentou o efeito de autocicatrização das fissuras, através da hidratação tardia do cimento, sendo verificado a redução da absorção de água e índice de vazios nas duas idades de pré-carregamento. Também foi possível observar a recuperação da resistência a compressão nas amostras fissuradas.

No traço T-1 observou-se a autocicatrização através da recuperação da resistência a compressão nas amostras fissuradas aos 7 e 28 dias, obtendo melhor resultado nas amostras que receberam o carregamento aos 7 dias, no ensaio realizado aos 56 dias. Desta forma, é possível notar que a cicatrização neste traço ocorre de forma lenta, sendo possível verificar esta ação também nos demais ensaios, onde os melhores resultados foram observados nas amostras que tiveram mais tempo de cura após o pré-carregamento.

No traço T-2,5 foi observado o melhor resultado de autocicatrização. Este traço apresentou o melhor resultado de absorção de água e índice de vazios nas amostras fissuradas, reduzindo essas taxas nas amostras com pré-carga aos 7 e 28 dias. Quanto a recuperação das propriedades mecânicas, foi observado um melhor resultado nas amostras fissuradas aos 7 dias, ocorrendo uma recuperação proporcional a idade de cura, mostrando a ação do aditivo cristalizante na autocicatrização desde a pré-carga para indução das fissuras.

O resultado do traço T-4 foi destoou, apresentou uma boa taxa de absorção nas amostras com fissuras jovens, porém isso não ocorreu nas amostras fissuradas aos 28 dias. Quanto ao módulo de elasticidade, não ocorreu uma recuperação significativa desta propriedade dentro do prazo dos ensaios realizados. A recuperação da resistência a compressão foi verificada de forma lenta, sendo o melhor resultado apresentado na recuperação das amostras fissuradas aos 7 dias e rompidas aos 56 dias.

Desta forma, podemos analisar que a recuperação das propriedades mecânicas e permeabilidade, indicam uma maior autocicatrização com o uso do aditivo cristalizante, sendo que sua ação é melhor observada em fissuras jovens, com

a cicatrização ocorrendo em longo prazo, havendo uma tendência de autocicatrização lenta. Conclui-se que os concretos contendo aditivo cristalizante apresentaram melhor desempenho, tanto nas propriedades das matrizes cimentícias, quando para autocicatrização do concreto, após o fissuramento. Sendo assim, a fim de inibir as consequências da manifestação de fissuras e melhorar o desempenho e a durabilidade do concreto, a adição do aditivo cristalizante no concreto é uma eficaz alternativa.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento do trabalho e após a análise dos resultados obtidos verificou-se que alguns assuntos poderiam ser estudados, e outros ensaios poderiam ser realizados, a fim de melhor compreender a autocicatrização e a ação do aditivo cristalizante. Desta forma seguem as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- avaliar o comportamento dos aditivos cristalizantes com outros tipos de cimento;
- reproduzir o ensaio de microscopia ótica, para verificar a autocicatrização interna das amostras;
- avaliar a estanqueidade de fissuras em concretos com os aditivos cristalizantes quanto ao ensaio de difusão de cloretos;
- Avaliação das mudanças na absorção de água dos concretos produzidos com aditivo cristalizante em diferentes idades de cura;
- Analisar a diferença do uso de diferentes marcas de aditivo cristalizante;

## REFERÊNCIAS

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

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. 212.3R, A. **Report on Chemical Admixtures for Concrete**. Farmington Hills: ACI Committee 212, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 5738**: concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 8522**: concreto - determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 9833**: concreto fresco – determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575**: edificações habitacionais – desempenho (parte 1 – requisitos gerais). Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR NM 52**: Agregado miúdo – determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR NM 67:** concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 9779:** Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012. 3 p

\_\_\_\_\_. **NBR 12142:** concreto — determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 16697:** Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018. 12 p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 45:** Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006. 8 p.

BALTHAR, V. K. C. B. L. M. **Retração autógena e evolução de propriedades mecânicas de pastas pozolânicas.** Tese (Doutorado em Engenharia) Universidade Federal de Rio de Janeiro, 2004.

BASF. Ficha Técnica de Produto – **MASTERLIFE® 300 D**, Master Builders Solutions. São Paulo, 2016 (Fabricante).

BILESKY, P. C.; OURIVES, C. N.; YOKOYAMA, C.M. **Avaliação do desempenho dos sistemas de impermeabilização por cristalização capilar do concreto.** Revista Concreto & Construções, São Paulo, ano XXXVII, nº55. julho/ agosto/ setembro, 2009.

BOHUS, S.; DROCHYTKA, R. Cement based material with crystal-growth ability under long term aggressive medium impact. **Applied Mechanics and Materials**, v. 166–169, n. May, p. 1773–1778, 2012.

CAPPELLESSO, V. G. **Avaliação da autocicatrização de fissuras em concretos com diferentes cimentos.** 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

CAPPELLESSO, V. G.; PETRY, N. S.; DAL MOLIN, D. C. C.; MASUERO, A. B. Use of crystalline waterproofing to reduce capillary porosity in concrete. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**. 1:9, p. 12. 2016.

CASTRO, A. L. de; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: **Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil.** Scielo: Cerâmica, São Paulo, v. 55, n. 333, p.18-32, jan. 2009. Trimetral. ISSN 1678-4553.

COUTO, T. A. **Reação álcali-agregado: estudo do fenômeno em rochas silicosas**. 2008. 191 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2008.

CUENCA, E.; FERRARA, L. Self-healing capacity of fiber reinforced cementitious composites. State of the art and perspectives. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 21, n. 7, p. 2777–2789, 2017.

CUENCA, E. et al. A methodology to assess crack-sealing effectiveness of crystalline admixtures under repeated cracking-healing cycles. **Construction and Building Materials**, v. 179, p. 619–632, 2018a.

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

EDVARDBSEN, C. Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete. **ACI Materials Journal**, July-Aug 1999. p. 448-455.

EDVARDBSEN, C. K. **Water permeability and self-healing of through-cracks** (in German). DAFStb Bull. Berlin.: [s.n.]. 1996.

ELSALAMAWY, M. et al. Performance of crystalline forming additive materials in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 230, p. 117056, 2020

FERRARA, L. et al. **Effect of natural fibres on the self-healing capacity of high performance fibre reinforced cementitious**. SHCC – 3rd International RILEM Conference on Strain Hardening Cementitious Composites, 03 – 05 November 2014, Dordrecht, The Netherlands. Anais...2014.

FERRARA, L. et al. Self healing of cement based materials engineered through crystalline admixtures: Experimental results from a multinational university network. **American Concrete Institute, ACI Special Publication**, v. 2015 – Janua, n SP 305, p.13.1-13.10, 2015.

FERRARA, L. et al. **On the use of crystalline admixtures in cement based construction materials : from porosity reducers to promoters of self healing**, 2016.

FERRARA, L.; KRELANI, V.; CARSANA, M. A “fracture testing” based approach to assess crack healing of concrete with and without crystalline admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 68, p.535-551, Oct. 2014.

FERRARA, L.; KRELANI, V. A fracture testing based approach to assess the self healing capacity of cementitious composites. **VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures**, 2010.

GJØRV, O. E. **Projeto de durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade**. In: FIGUEIREDO, E. P.; HELENE, P. Ed. Oficina de Textos. São Paulo, 2015

GRUYAERT, E. et al. Activation of pozzolanic and Latent-Hidraulic Reactions by Alkalis in Order to Repair Concrete Cracks. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 7, p. 04014208, 2014.

GUZLENA, S.; SAKALE, G. Self-healing concrete with crystalline admixture. **Materials Science & Engineering**, 2019

HASPARYK, N.P et al. **Deformações por Retração e Fluência**. In: CONCRETO: Ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 656-685.

HASSANI E., M. et al. Influence of permeability-reducing admixtures on water penetration in concrete. **ACI Materials Journal**, v.114, n. 6, p. 1-12, 2017.

HELENE, P; ANDRADE, T. **Concreto de cimento Portland**. In: Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. IBRACON. São Paulo, 2007. p.905-944.

HELENE, P. Introdução da durabilidade no projeto de estruturas de concreto. **Ambiente Construído**, São Paulo, v. 1, n. 2, p.45-57, jul/dez. 1997.

HELENE, P. et al. **Evaluation of the chloride penetration and life cycle of the self-healing concretes activated by crystalline admixture**. v. 11, n. 3, 2018.

HERMANN, A. et al. Particle packing of cement and silica fume in pastes using an analytical model. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [s.l.], v. 9, n. 1, p.48-65, fev. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952016000100004>.

HUANG, H. et al. Characterization and quantification of self-healing behaviors of microcracks due to further hydration in cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 52, p. 71–81, 2013.

HUANG, H. et al. Self-healing in cementitious materials: Materials, methods and service conditions. **Materials and Design**, v. 92, p. 499–511, 2016.

JCI - TC075B. **State-of-the-art report of the JCI Technical committee TC-075B: Autogenous healing in cementitious materials**. Proceedings of 4th International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications, ConMat'09. Nagoya, Japan: [s.n.]. 2009. p. Keynote Lecture, pp. 89-96.

JIANG, Z. et al. Self-healing of cracks in concrete with various crystalline mineral additives in underground environment. *Journal Wuhan University of Technology*, **Materials Science Edition**, v. 29, n. 5, p. 938–944, 2014.

JIANG, Z. et al. Influence of mineral additives and environmental conditions on the self-healing capabilities of cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 57, p. 116–127, 2015.

JOA, B. W. et al. Effect of incorporation of self healing admixture (SHA) on physical and mechanical properties of mortars. **Journal of Ceramic Processing Research**, v. 16, n. November 2015, p. s138–s143, 2015.

KAN, L. et al. Self-Healing Characterization of Engineered Cementitious Composite Materials. **ACI Materials Journal**, v. 107, n. 6, p.617-624, Nov./Dec. 2010.

LEE, H. X. D.; WONG, H. S.; BUENFELD, N. R. Self-sealing of cracks in concrete using superabsorbent polymers. **Cement and concrete Research**, v. 70, n. August 2010, p. 194-208, 2016.

LI, H.; XIAO, H.; YUAN, J.; OU, J. **Microstructure of cement mortar with nanoparticles**. In: Composites: Part B Engineering 35. p.185–189. Elsevier, 2004.

LI, V. C. et al. **Recovery against Mechanical Actions**. In: Self-healing phenomena in cement-based materials: state-ofthe- art report of RILEM Technical Committee 221-SHC: Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials, vol. 11, p. 65-117. Springer: 2013.

LI, W. et al. Recent Advances in Intrinsic Self-Healing Cementitious Materials. **Advanced Materials**, v. 30, n. 17, abr.2018.

LISBOA, E. S.; ALVES, E. S.; MELO, G. H. A. G. **Materiais de construção : concreto e argamassa**. 2. ed. Porto Alegre: SAGAH, 2017.

MEDEIROS, M. H. F.; ANDRADE, J. J.; HELENE, P. Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Ipsis. 2011. V.1. Cap. 16. P.773-808.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. In: HASPARYK, N. P. (Ed). 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2014.

MOREIRA, M. M. (2016). **Efeito do aditivo redutor de permeabilidade em concretos com diferentes tipos de cimento Portland – Contribuição aos processos de autocicatrização**. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-16A/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 162p.

MUNHOZ, F. A. C. **Efeito das adições ativas na mitigação da reação álcali-sílica e álcali-silicato**.2007. 166 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

NASIM, M.; DEWANGAN, U. K.; DEO, S. V. Effect of crystalline admixture, fly ash, and PVA fiber on self-healing capacity of concrete. **Materials Today: Proceedings**, 2020.

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

NEVILLE, A. M. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

OLIVEIRA, A. DE S. **Estudo do potencial de aditivo cristalizante como estimulador de autocicatrização de fissuras de matrizes cimentícias**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, p. 5–10, 2019.

ONGHERO, L. **Combate à retração e fissuração em concretos de alto desempenho reforçados com microfibra de vidro**. Florianópolis, Brasil, 2017, 143 p. Dissertação (Mestrado) –Universidade Federal de Santa Catarina.

OURIVES, C. N; BILESKY, P. C.; YOKOYAMA, C. M. Avaliação do Desempenho dos Sistemas de Impermeabilização por Cristalização Capilar do Concreto. **Concreto & Construções**: Congresso Internacional trata da conservação e recuperação do patrimônio construído, São Paulo, Ano XXXVII, nº55, p.24-32, jul. 2009. Trimestral. Revista oficial do IBRACON, ISSN 1809-7197.

PACHECO, Fernanda. **Análise da eficácia dos mecanismos de autocicatrização do concreto**. 2020. 350f. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2020.

PAZDERKA, J.; HÁJKOVÁ, E. Crystalline admixtures and their effect on selected properties of concrete. **Acta Polytechnica**, v. 56, n. 4, p. 306–311, 2016.

PENETRON, Brasil LTDA. Ficha Técnica de Produto – **Penetron Admix**, São Paulo, 2018a (Fabricante).

RILEM 221 - SHC. **Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials**: state of the art report technical committee 221-SHC. London: Springer, 2013. 167 p.

RILEM TC 116-PCD: permeability of concrete as a criterion of its durability. **Materials and Structures/Matériaux et Constructions**, [s. l.], v. 32, p. 174-179, Apr., 1999. Disponível em: <https://www.rilem.net/images/publis/121704.pdf>. A

ROIG-FLORES, M. et al. Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments. **Construction and Building Materials**, v. 86, p. 1–11, 2015.

ROIG-FLORES, M. et al. Effect of crystalline admixtures on the self-healing capability of early-age concrete studied by means of permeability and crack closing tests. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 447–457, 2016.

ROOIJ, M. . DE; E. S. C. J. STAR 221-SHC - Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials. [s.l: s.n.].

SALES, A. et. al. **Corrosão e degradação em estruturas de concreto: teoria, controle e técnicas de análise e intervenção**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

SAHMARAN, M. et. al. Self-healing of mechanically-loaded self-consolidating concretes with high volumes of fly-ash. **Cement and concrete Composites**, v.30, p.872-879, Jul.2008.

SENISSE, J. A. L. **Influência do consumo de água, do teor de adição de microfibras de polipropileno, e do tipo de cimento no fenômeno da retração por secagem em concretos empregados em pisos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010.

SISOMPHON, K. et al. Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 4, p. 566–574, 2012.

SISOMPHON, K. et al. Effect of exposure conditions on self healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating various cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 42, p. 217–224, 2013.

SNOECK, D.; DE BELIE, N. From straw in bricks to modern use of microfibers in cementitious composites for improved autogenous healing - A review. **Construction and Building Materials**, v. 95, p. 774–787, 2015.

SNOECK, D. et al. X-ray computed microtomography to study autogenous healing of cementitious materials promoted by superabsorbent polymers. **Cement and Concrete Composites**, v.65, p. 83-93, 2016.

SOUZA, V.C.M.;RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1998.

TAKAGI, E. M; JÚNIOR, W. A; OLIVEIRA, Fernando Souza. **Tratamento químico cristalizante para impermeabilização e proteção de estruturas de concreto armado**. In: 46º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2004, Florianópolis. Anais [...]. IBRACON

TAKAGI, E. M. **Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória de alto forno ativados por catalisador cristalino**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica - Instituto Tecnológico de Aeronáutica - São José dos Campos, SP., 2013.

TANG, S. W.et al. Recent durability studies on concrete structure. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 3, p. 195-203, 2009.

VAN TITTELBOOM , K.; DE BELIE, N. **Autogenous healing of cracks in cementitious materials with varying mix compositions**. 2nd International conference on Self-Healing Materials (ICSHM 2009). Chicago, USA: Department of Structural engineering. 2009. p. p.160.

VAN TITTELBOOM, K.; DE BELIE, N. Self-Healing in Cementitious Materials- **A Review**. **Materials**, v. 6, n. 6, p. 2182–2217, 27 May 2013.

VAN TITTELBOOM, K.; et al. Can Self-repair of concrete cracks help to obtain durable concrete? **Concrete Solutions**, p. 121, 2014.

WEIMER, B. F. et. al. **Patologia das estruturas**. 1 ed. Porto Alegre: SAGAH, 2018

ZIEGLER, Fabiana. **Avaliação da autocicatrização de fissuras em concretos com aditivos cristalizantes**. 2020. 187f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.