

**Universidade Feevale**  
**Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Materiais e**  
**Processos Industriais**

**BRUNO ROSENA MACHADO**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO**  
**ADITIVO CRISTALIZANTE NAS**  
**PROPRIEDADES MECÂNICAS DO**  
**CONCRETO AO LONGO DO TEMPO**

**Novo Hamburgo**  
**2022**

**Universidade Feevale**  
**Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Materiais e**  
**Processos Industriais**

**BRUNO ROSENA MACHADO**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO  
ADITIVO CRISTALIZANTE NAS  
PROPRIEDADES MECÂNICAS DO  
CONCRETO AO LONGO DO TEMPO**

Dissertação apresentada ao  
Mestrado Profissional em  
Tecnologia de Materiais e  
Processos Industriais como  
requisito parcial para a obtenção  
do título de Mestre em Tecnologia  
de Materiais e Processos  
Industriais.

**Orientador:** Prof. Dra. CARINA MARIANE STOLZ  
**Coorientador:** Prof. Dr. ALEXANDRE SILVA DE VARGAS

**Novo Hamburgo**  
**2022**

## DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)

Machado, Bruno Rosena.

Análise da influência do aditivo cristalizante nas propriedades mecânicas do concreto ao longo do tempo / Bruno Rosena Machado. – 2022.

102 f. ; il. color. ; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais) – Universidade Feevale, Novo Hamburgo-RS, 2022.

Inclui bibliografia.

“Orientador: Prof. Dra. CARINA MARIANE STOLZ ; Coorientador: Prof. Dr. ALEXANDRE SILVA DE VARGAS”.

1. Concreto. 2. Durabilidade. 3. Aditivo cristalizante. 4. Absorção. 5. Microscopia eletrônica de varredura (MEV). I. Título.

CDU 691.328

Bibliotecária responsável: Bruna Heller – CRB 10/2348

**Universidade Feevale**  
**Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Materiais e**  
**Processos Industriais**

**BRUNO ROSENA MACHADO**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO  
ADITIVO CRISTALIZANTE NAS  
PROPRIEDADES MECÂNICAS DO  
CONCRETO AO LONGO DO TEMPO**

Dissertação de mestrado aprovada pela banca examinadora em X de X de 2021, necessária para conferir ao autor o título de Mestre em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais.

**Componentes da Banca Examinadora:**

Prof. Dra Carina Mariane Stolz  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Profa. Dra. Laís Zucchetti  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Marco Antônio Siqueira Rodrigues  
Universidade Feevale

Dedico esse trabalho a minha esposa Maira Abreu Barros, pelo apoio e incentivo contínuo.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a professora Dra. Carina Mariane Stolz e o professor Dr. Alexandre Silva de Vargas pela orientação e ensinamentos no decorrer desse trabalho.

Agradeço também aos professores Dr. Carlos Leonardo Pandolfo Carone, Dra. Claudia Oliveira, Dra. Daniela Muller de Quevedo, Dr. Fabrício Celso, Dr. Fernando Dal Pont Morisso, Dra. Vanusca Dalosto Jahno e o Dr. Moisés de Mattos Dias, professores esses que me passaram uma parte de seus conhecimentos adquiridos ao longo de suas vidas acadêmicas.

Agradeço ao professor Dr. Marco Antônio Siqueira Rodrigues pelo incentivo e apoio necessário para a conclusão desta etapa acadêmica.

Agradeço a Universidade Feevale por disponibilizar esse curso a sociedade e pela seriedade e investimentos em infraestrutura, o que permitiu a realização dessa pesquisa.

Agradeço a empresa Britasinos, em especial o saudoso engenheiro Emerson, por disponibilizar os materiais utilizados nessa pesquisa.

E por fim, agradeço todas as pessoas que não foram citadas anteriormente, mas que contribuíram de alguma forma para que esse trabalho fosse concluído.

## RESUMO

Uma das propriedades que influenciam a durabilidade do concreto é a permeabilidade. Para atingir a durabilidade prevista em projeto, é importante que o concreto endurecido tenha baixa permeabilidade, mitigando a percolação de agentes agressivos para o interior do material. Para proporcionar um material mais durável, uma das alternativas que pode ser adotada, é adicionar na mistura do concreto aditivo cristalizante. Neste contexto, o presente trabalho tem o objetivo de avaliar o efeito da adição de aditivos cristalizantes em concretos, sobre a absorção de água e resistência mecânica, ao longo do tempo, com diferentes ambientes e cura. Para isso, foi dosado um concreto referência, com proporcionamento em massa, de 1:2,55:3,05 (cimento, areia, pedra britada) e relação a/c de 0,51. Foi estudada a adição três teores do mesmo aditivo cristalizante, (0,6%, 0,8% e 1,0%, em relação à massa de cimento), os agregados e a água se mantiveram fixos, independentes do percentual de aditivo utilizado. Os corpos de provas foram curados em três ambientes distintos, com o intuito de avaliar a influência do ambiente de cura no efeito do aditivo na mistura, e após, submetidos aos ensaios de resistência à compressão axial, determinação da absorção de água por imersão e absorção de água por capilaridade, nas idades de 28 e 91 dias. Os resultados mostraram que a cura alternada seco/úmido obteve maior resistência à compressão axial e os percentuais de aditivos empregados nos proporcionamentos não influenciaram nos resultados obtidos, assim como não influenciaram na absorção de água por imersão. Para o ensaio de absorção de água por capilaridade, notou-se uma eficiência maior para o proporcionamento contendo 1,0% de aditivo cristalizante, assim como a cura em câmara umidade teve um percentual menor de absorção de água. Foram realizadas análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) aos 828 dias após a moldagem dos corpos de prova, nas amostras curadas em câmara úmida, para os quatro proporcionamentos analisados, onde se observa a formação de etringita (Eft) nos poros do concreto com aditivo cristalizante.

**Palavras-chave:** Concreto, Durabilidade, Aditivo Cristalizante, Absorção, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

## ABSTRACT

One of the properties that influence the durability of concrete is its permeability. In order to achieve the durability foreseen in the project, it is important that the hardened concrete has low permeability, mitigating the percolation of aggressive agents into the material. To provide a more durable material, one of the alternatives that can be adopted is to add a crystallizing additive to the concrete mix. In this context, the present work aims to evaluate the effect of the addition of crystallizing additives in concrete, on water absorption and mechanical strength, over time, with different environments and curing. For this, a reference concrete was dosed, with a mass proportion of 1:2.55:3.05 (cement, sand, crushed stone) and a w/c ratio of 0.51. The addition of three levels of the same crystallizing additive was studied (0.6%, 0.8% and 1.0%, in relation to the cement mass), the aggregates and the water remained fixed, regardless of the percentage of additive used. . The specimens were cured in three different environments, in order to evaluate the influence of the curing environment on the effect of the additive in the mixture, and after that, they were subjected to axial compression strength tests, determination of water absorption by immersion and absorption. of water by capillarity, at the ages of 28 and 91 days. The results showed that the alternating dry/wet curing obtained greater resistance to axial compression and the percentages of additives used in the proportions did not influence the results obtained, as well as they did not influence the absorption of water by immersion. For the capillary water absorption test, a higher efficiency was observed for the proportion containing 1.0% of crystallizing additive, as well as the curing in a humidity chamber had a lower percentage of water absorption. Scanning electron microscopy (SEM) analyzes were carried out at 828 days after molding the specimens, in the samples cured in a humid chamber, for the four proportions analyzed, where the formation of ettringite (Eft) in the pores of the concrete with crystallizing additive.

**Keywords:** Concrete, Durability, Crystallizing Additive, Absorption, Scanning Electron Microscopy (SEM).



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Pasta de Cimento com Relação a/c=0,33 (idade 2 anos), Apresentando Reduzida Presença de Poros.....	16
Figura 2: Pasta de Cimento com Relação a/c=0,60 (idade 2 anos), Apresentando Maior Quantidade de Poros.....	16
Figura 3: Estrutura de Ligação entre Poros do Concreto .....	17
Figura 4: Tipos de Poros do Concreto.....	18
Figura 5: Formação dos Hidratos de Silicato de Cálcio Através do Pocesso de Cristalização do Aditivo Cristalizante quando em Contato com a água: a) Aditivo Cristalizante Inerte em uma Fissura; b) Contato do Aditivo com a Água com Início da Cristalização; c) Cristalização do Aditivo.....	22
Figura 6: Ilustração da Formação de Cristais nos Poros.....	23
Figura 7: Processo de Cristalização dos Poros.....	24
Figura 8: Curva Granulométrica do Agregado Graúdo.....	31
Figura 9: Curva Granulométrica da Brita.....	33
Figura 10: Etapas das Análises.....	35
Figura 11: Produção dos concretos em Betoneira Estacionária.....	37
Figura 12: Ensaio de abatimento da mistura.....	37
Figura 13: Moldagem dos Corpos de Prova.....	38
Figura 14: CPs em Repouso por 24 horas .....	39
Figura 15: Corpos de Prova Submetidos a Cura em Câmara Úmida.....	40
Figura 16: Corpos de Prova Exposto ao Ar Livre no Processo de Cura Alternada ...	40
Figura 17: Processo de Preparação dos Corpos de Prova: a) Retífica Utilizada; Superfície Retificada .....	41
Figura 18: Lavagem dos CPs para a Realização dos Ensaios.....	42
Figura 19: Prensa Hidráulica para Ensaio de Resistência à Compressão Axial .....	43
Figura 20: Ensaio de Absorção de Água por Imersão.....	44
Figura 21: Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade.....	45
Figura 22: Gráfico de Resistência à Compressão aos 28 e 91 dias.....	52
Figura 23: Gráfico Geral de Resistência à Compressão aos 28 e 91 dias .....	53
Figura 24: Gráfico de Absorção de Água por Imersão aos 28 e 91 dias .....	60
Figura 25: Gráfico Geral de Absorção de Água por Imersão aos 28 e 91 dias .....	61
Figura 26: Gráfico de Absorção de Água por Capilaridade aos 28 e 91 dias.....	67

Figura 27: Gráfico Geral de Absorção de Água por Capilaridade em Relação aos Ambientes de Cura.....	68
Figura 28: Gráfico Geral de Absorção de Água por Capilaridade aos 28 e 91 dias ..	69
Figura 29: Análise da influência do teor de aditivo cristalizante na absorção de água por capilaridade dos concretos analisados .....	69
Figura 30: Micrografia da superfície de fratura de uma amostra de concreto referência, utilizando o microscópio JOEL JSM-6510LV com ampliação de: a) 200x; b) 1000x .....	70
Figura 31: Micrografia da superfície de fratura de uma amostra de concreto com 0,6% de aditivo cristalizante, utilizando o microscópio JOEL JSM-6510LV com ampliação de: a) 200x; b) 1000x .....	72
Figura 32: Micrografia de Cristais nas Fissuras Tratadas com Aditivo Cristalizante ..	73
Figura 33: Micrografia da superfície de fratura de uma amostra de concreto com 0,8% de aditivo cristalizante, utilizando o microscópio JOEL JSM-6510LV com ampliação de: a) 200x; b) 1000x .....	73
Figura 34: Micrografia de Cristais nas Fissuras Tratadas com Aditivo Cristalizante ..	74
Figura 35: Micrografia da superfície de fratura de uma amostra de concreto com 1,0% de aditivo cristalizante, utilizando o microscópio JOEL JSM-6510LV com ampliação de: a) 200x; b) 1000x .....	75

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classe de consistência do concreto no estado fresco.....	21
Tabela 2: Limites de Composição do Cimento Portland (porcentagem de massa) ...	30
Tabela 3: Requisitos Químicos do Cimento Portland (expresso em porcentagem de massa) .....	30
Tabela 4: Requisitos Físicos e Mecânicos .....	30
Tabela 5: Ensaio do agregado miúdo.....	31
Tabela 6: Ensaio do agregado graúdo .....	32
Tabela 7: Características físicas do aditivo cristalizante .....	34
Tabela 8: Siglas de Identificação dos Proporcionamentos.....	36
Tabela 9: Proporcionamentos dos Concretos .....	36
Tabela 10: Determinação da Consistência pelo Método Tronco de Cone NBR NM 67 (ABNT, 1998) .....	38
Tabela 11: Ensaio do concreto no estado endurecido.....	42
Tabela 12: Resistência à Compressão Axial do Concreto de Referência (TR) .....	47
Tabela 13: Resistência à Compressão Axial do Concreto com 0,6% de Aditivo (T-0,6) .....	48
Tabela 14: Resistência à Compressão Axial do Concreto com 0,8% de Aditivo (T-0,8) .....	49
Tabela 15: Resistência à Compressão Axial do Concreto com 1,0% de Aditivo (T-1,0) .....	50
Tabela 16: Análise de Variância para Resistência à Compressão (MPa) tendo como Variáveis a Cura, Idade das Amostras e Teor de Aditivo .....	51
Tabela 17: Absorção de Água por Imersão do Concreto de Referência (TR) .....	55
Tabela 18: Absorção de Água por Imersão do Concreto com 0,6% de Aditivo (T-0,6) .....	56
Tabela 19: Absorção de Água por Imersão do Concreto com 0,8% de Aditivo (T-0,8) .....	57
Tabela 20: Absorção de Água por Imersão do Concreto com 1,0% de Aditivo (T-1,0) .....	58
Tabela 21: Análise de Variância para Absorção por Imersão (%) tendo como Variáveis a Cura, Idade das Amostras e Teor de Aditivo .....	59
Tabela 22: Absorção de Água por Capilaridade do Concreto de Referência (TR) ....	62

Tabela 23: Absorção de Água por Capilaridade do Concreto com 0,6% de Aditivo (T-0,6).....	63
Tabela 24: Absorção de Água por Capilaridade do Concreto com 0,8% de Aditivo (T-0,8).....	64
Tabela 25: Absorção de Água por Capilaridade do Concreto 1,0% de Aditivo (T-1,0).....	65
Tabela 26: Análise de Variância para Absorção por Capilaridade (%) tendo como Variáveis a Cura, Idade das Amostras e Teor de Aditivo .....	66
Tabela 27: Teste LSD; variável RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL Probabilidades para Erro de Testes Post Hoc: Entre MS = 1,5504, df = 30,000.....	83
Tabela 28: Teste LSD; variável ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO Probabilidades para Erro de Testes Post Hoc: Entre MS = 0,00147, df = 31,000.....	84
Tabela 29: Teste LSD; variável ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE Probabilidades para Erro de Testes Post Hoc: Entre MS = 0,00047, df = 41,000.....	85

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

**ABNT** – Associação Brasileira de Normas Técnicas

**ACI** – American Concrete Institute

**EN** – European Standard

**IPT/EPUSP** – Instituto de Pesquisas Tecnológicas / Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo

**ANOVA** – Análise de Variância

**MEV** – Microscopia Eletrônica de Varredura

**N** – Newton

**MPa** – Mega Pascal

**%** - Porcentagem

**°C** – Graus Celsius

**mm** – Milímetro

**Ø** – Diâmetro da Amostra

**h** – Hora

**CP** – Corpo de Prova

**TR** – Traço de Referência

**T-0,6** – Traço Contendo 0,6% de Aditivo Cristalizante em Relação a Massa  
de Cimento

**T-0,8** – Traço Contendo 0,8% de Aditivo Cristalizante em Relação a Massa  
de Cimento

**T-1,0** – Traço Contendo 1,0% de Aditivo Cristalizante em Relação a Massa  
de Cimento

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
1.1	PERMEABILIDADE E POROSIDADE.....	15
1.2	OBJETIVOS.....	19
1.3	OBJETIVO GERAL.....	19
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>20</b>
2.1	PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO.....	20
2.2	PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO.....	21
2.3	ADITIVOS CRISTALIZANTES PARA CONCRETOS.....	21
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>29</b>
3.1	MATERIAIS.....	29
3.1.1	CIMENTO PORTLAND.....	29
3.1.2	AGREGADO MIÚDO.....	30
3.1.3	AGREGADO GRAÚDO.....	32
3.1.4	ADITIVO CRISTALIZANTE.....	33
3.2	MÉTODOS.....	34
3.2.1	PROPORCIONAMENTO DO CONCRETO.....	35
3.2.2	PRODUÇÃO DOS CONCRETOS.....	36
3.2.3	CURA DOS CORPOS DE PROVA.....	39
3.2.4	PREPARO DOS CORPOS DE PROVA.....	41
3.2.5	ENSAIOS DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO.....	42
3.2.5.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	43
3.2.5.2	COEFICIENTE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO.....	43
3.2.5.3	COEFICIENTE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE.....	44
3.2.6	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA - MEV.....	45
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>46</b>
4.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	46
4.2	ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO.....	54
4.3	ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE.....	61
4.4	ANÁLISE DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA - MEV.....	70
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>76</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>77</b>

<b>APÊNDICES .....</b>	<b>82</b>
------------------------	-----------

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material mais utilizado na construção civil e o segundo material mais consumido pela humanidade, ficando atrás apenas da água (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Mediante a esta estatística e sua importância para a construção civil, é primordial que se tenha atenção com sua resistência e durabilidade, pois o concreto é um material empregado com o objetivo de que seja resistente o suficiente para suportar os esforços solicitados pelas estruturas e que seja durável no decorrer de sua vida útil sem que sejam necessárias medidas extras de manutenção ou reparo do mesmo (ARAÚJO, 2014).

O concreto é produzido a partir de um meio cimentante, geralmente alcançado pela reação do cimento hidra e água (NEVILLE; BROOKS, 2013), juntamente com a mistura de agregados graúdos e agregados miúdos. Durante o processo de mistura, podem ser acrescentados no composto alguns tipos de aditivos e adições, com o intuito de alterar suas propriedades, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido (MEHTA; MONTEIRO, 2014), entre as quais estão a resistência e a durabilidade.

A NBR 15.575-1 (ABNT, 2013) define a durabilidade como sendo a “capacidade da edificação ou de seus sistemas de desempenhar suas funções, ao longo do tempo e sob condições de uso e manutenção especificadas no manual de uso, operação e manutenção” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013). A NBR 6118 (ABNT, 2014) define a durabilidade como sendo a capacidade da estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas no momento da elaboração do projeto. A durabilidade do compósito é uma propriedade que depende de alguns fatores, entre os quais se destaca a permeabilidade em seu estado endurecido.

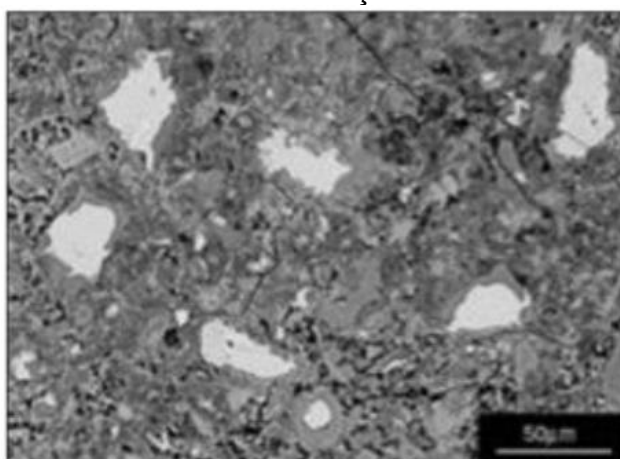
### 1.1 PERMEABILIDADE E POROSIDADE

A permeabilidade é definida como sendo a propriedade que permite o fluxo de um fluido através de um sólido poroso, e o principal fluxo de fluido que existe no concreto é a água, a qual é a responsável pelo transporte de agentes químicos para o interior do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014), podendo danificar sua estrutura superficial e interna, tornando-o menos durável.



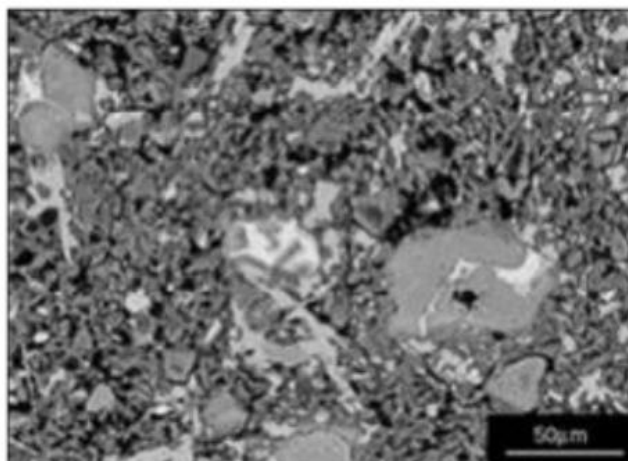
A permeabilidade de um concreto está diretamente ligada à relação água/cimento da mistura, pois quanto maior for a relação, mais poroso será a estrutura do sólido, permitindo uma maior circulação de fluídos pelo seu interior (NEVILLE, 2013). A figura 1 mostra uma análise de MEV para uma determinada pasta de cimento com relação água/cimento de 0,33, com 2 anos após a moldagem, onde é possível observar uma quantidade reduzida de poros na mistura, o que dificulta o fluxo de fluídos no interior da pasta. Já na figura 2, a pasta de cimento possui uma relação água/cimento de 0,60, com dois anos de idade, onde é possível observar uma quantidade maior de poros, o que facilita a passagem de líquidos para dentro da matriz.

Figura 1: Pasta de Cimento com Relação  $a/c=0,33$  (idade 2 anos), Apresentando Reduzida Presença de Poros



Fonte: Adaptado de Neville (2013)

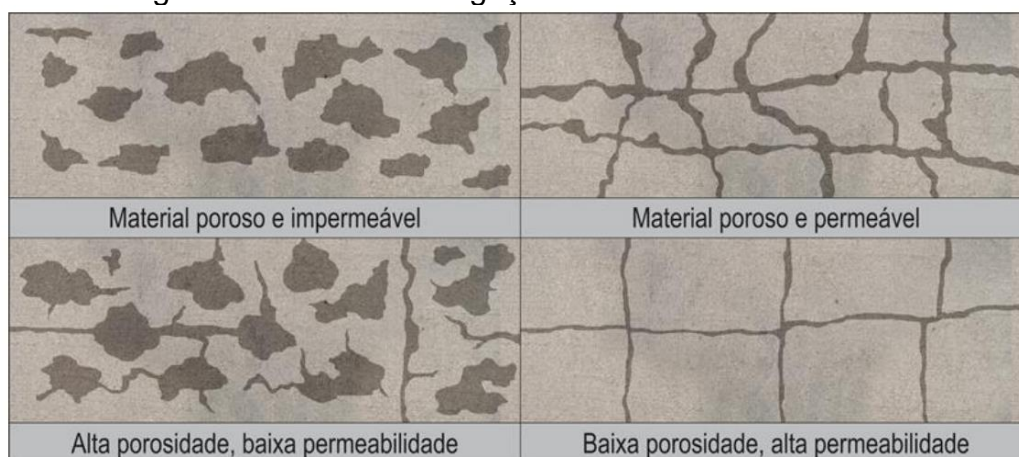
Figura 2: Pasta de Cimento com Relação  $a/c=0,60$  (idade 2 anos), Apresentando Maior Quantidade de Poros



Fonte: Adaptado de Neville (2013)

Coutinho (2005) destaca outro ponto importante de ser observado, a característica estrutural dos poros, pois se os vazios se formarem interligados uns aos outros, isso facilitará o transporte dos fluídos dentro da mistura endurecida, e analogamente, se o concreto for poroso e não tiver interligação entre os espaços, ele será menos permeável. A permeabilidade está relacionada à porosidade, no entanto, essa relação não é proporcional em todas as misturas, e sim proporcional as ligações entre os poros. Os canais de transportes passam a ser prejudiciais à estrutura quando ultrapassam 120nm de diâmetro, o que permite um fluxo de líquidos.

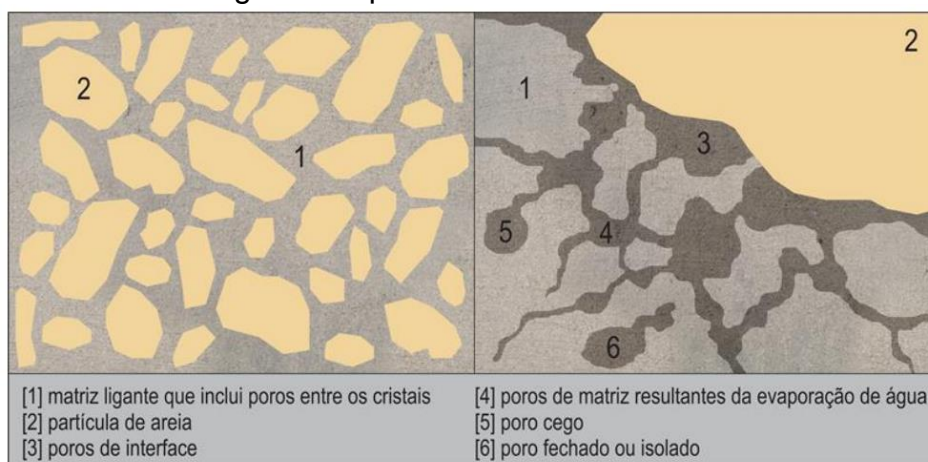
Figura 3: Estrutura de Ligação entre Poros do Concreto



Fonte: Adaptado de Coutinho (2005)

Rato (2006) escreve que o fenômeno de ligação entre os poros, que forma uma rede dentro do concreto, é denominado de porosidade aberta, e quando se tem uma estrutura de vazios isolados, é denominada porosidade fechada, o que dificulta o transporte dos fluídos. Os chamados poros abertos podem ser também do tipo cego, esses têm apenas uma de suas extremidades ligadas à rede, nesse caso, eles não são agentes que contribuirão diretamente para o deslocamento de líquidos no interior do sólido (RATO, 2006). A figura 4 a seguir ilustra os tipos de poros possíveis de uma estrutura.

Figura 4: Tipos de Poros do Concreto



Fonte: Adaptado de Rato (2006)

Com base nesses quesitos, observa-se que a permeabilidade também influencia na durabilidade do concreto, evidenciando a importância que esta propriedade em estudo exerce, para que sejam evitadas as manifestações patológicas nas estruturas. Assim, com o intuito de modificar as propriedades dos concretos e aumentar a sua durabilidade, atualmente existem diversos tipos de aditivos. A norma brasileira NBR 11.768 (ABNT, 2011), define aditivo para concreto como sendo o produto adicionado durante o processo de preparação do concreto, em quantidade não maior que 5% da massa de material cimentício, com o objetivo de modificar propriedades no estado fresco e/ou no estado endurecido.

Uma das opções para reduzir a permeabilidade do concreto é adicionando aditivos cristalizantes no momento da mistura dos materiais. Por serem aditivos ainda em desenvolvimento no mercado mundial, os cristalizantes não são classificados pelas normas brasileiras, com isso, se faz necessário recorrer às normativas internacionais que regulamentam esse produto. A norma europeia EN 934-2 (2001) classifica os aditivos cristalizantes como sendo resistente a água. O ACI Committee 212 classifica os cristalizantes como sendo substâncias químicas hidrofílicas, que aumentam a densidade do silicato de cálcio hidratado (CHS) do cimento, gerando um bloqueio dos poros do concreto e conseqüentemente impedindo a penetração de água para seu interior. Vale ressaltar que cinzas volantes, pozolanas naturais, sílica ativa ou cimento de escória não são considerados aditivos cristalizantes (REPORT ON CHEMICAL ADMIXTURES FOR CONCRETE, 2010).

No presente trabalho serão avaliados os efeitos da adição de aditivos cristalizantes no concreto, com a intenção de quantificar a redução do fluxo de água, visando proteger estes compósitos quanto à deterioração prematura e consequentemente aumentando da vida útil das estruturas de concreto, tornando-as duráveis para o período para o qual foram projetadas.

## 1.2 OBJETIVOS

A seguir, estão apresentados os objetivos que se busca alcançar com o presente estudo, abordando-os de maneira geral e específica.

### 1.3 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do presente trabalho é analisar a influência de diferentes percentuais de aditivo cristalizante nas propriedades mecânicas e absorção do concreto ao longo do tempo, quando submetidos a ambientes de cura distintos.

### 1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Abaixo estão descritos os objetivos específicos do presente estudo:

- a) Avaliar o efeito do teor de aditivo cristalizante na resistência à compressão axial no concreto;
- b) Medir o percentual de absorção de água por imersão do concreto dosado com diferentes teores de aditivos cristalizantes;
- c) Quantificar a absorção de água por capilaridade do concreto dosado com diferentes percentuais de aditivos cristalizantes;
- d) Avaliar a influência dos diferentes ambientes de cura na resistência à compressão axial, absorção de água por imersão e absorção de água por capilaridade;
- e) Analisar a morfologia das amostras de concreto com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura (MEV).

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Vasconcelos (1992) relata que as primeiras tentativas de produzir uma “pedra artificial” através do cimento ocorreram em 1855, na Alemanha, fruto da revolução industrial. No Brasil, as primeiras obras com o aglomerante foram erguidas em 1904, no Rio de Janeiro.

O concreto é definido pela NBR 12.655 (ABNT, 2015) como sendo o “material formado pela mistura homogênea de cimento, agregados miúdo e graúdo e água, com ou sem a incorporação de componentes minoritários, que desenvolve suas propriedades pelo endurecimento da pasta de cimento” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015). Este é um material bifásico, inicialmente sendo um material pastoso e, depois da sua cura, passa a ser um material sólido e relativamente resistente (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Neste capítulo será descrito o concreto como material de construção civil propriamente dito, abordando suas características tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Outro aspecto importante que será abordado nesse capítulo é o aditivo cristalizante, tema principal do presente trabalho, descrevendo suas características e os principais estudos já realizados até o momento, uma vez que esse aditivo é relativamente novo, portanto, ainda existem muitas dúvidas que precisam ser sanadas.

### 2.1 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

O concreto fresco é aquele que “está completamente misturado e que ainda se encontra em estado plástico, capaz de ser adensado por um método escolhido” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015).

Atualmente, existem no Brasil ensaios normalizados, para determinar essas propriedades do concreto. Mehta e Monteiro (2014) afirmam que se não for dada a devida atenção ao concreto no estado fresco, será em vão a escolha de bons materiais e uma boa dosagem. Todos os ensaios devem ser realizados nos primeiros momentos de produção do concreto, para se ter um controle da qualidade do produto que está sendo produzido.

A NBR 8.953 (ABNT, 2015) classifica o concreto no estado fresco em relação a sua classe de abatimento, conforme apresenta a tabela 1 a seguir.

Tabela 1: Classe de consistência do concreto no estado fresco

<b>Classe</b>	<b>Abatimento mm</b>	<b>Aplicações Típicas</b>
S10	$10 \leq A < 50$	Concreto extrusado, vibroprensado ou centrifugado
S50	$50 \leq A < 100$	Alguns tipos de pavimentos e de elementos de fundações
S100	$100 \leq A < 160$	Elementos estruturais, com lançamento convencional do concreto
S160	$160 \leq A < 220$	Elementos estruturais com lançamento bombeado do concreto
S220	$\geq 220$	Elementos estruturais esbeltos ou com alta densidade de armaduras

Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015)

O comitê ACI 212.3R (2010) ressalta que o aditivo cristalizante pode alterar algumas propriedades no estado fresco do concreto, como a redução da necessidade de água, aumento do ar incorporado na mistura e o aumento do tempo de pega da mistura.

## 2.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

A NBR 12.655 (ABNT, 2005) define concreto endurecido como sendo o “concreto que se encontra no estado sólido e que desenvolveu resistência mecânica” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015). Almeida (2002) lista como propriedades do concreto no estado endurecido como sendo o peso específico, deformações, resistência à compressão, resistência à tração e taxa de permeabilidade.

Amaral (2005) diz que o concreto endurecido é aquele que já foi estabelecido o fim da pega inicial do cimento, e que suas principais características são a compacidade, resistência mecânica, elasticidade, retração, fluência, durabilidade, massa específica, propriedades térmicas, absorção, permeabilidade e difusão.

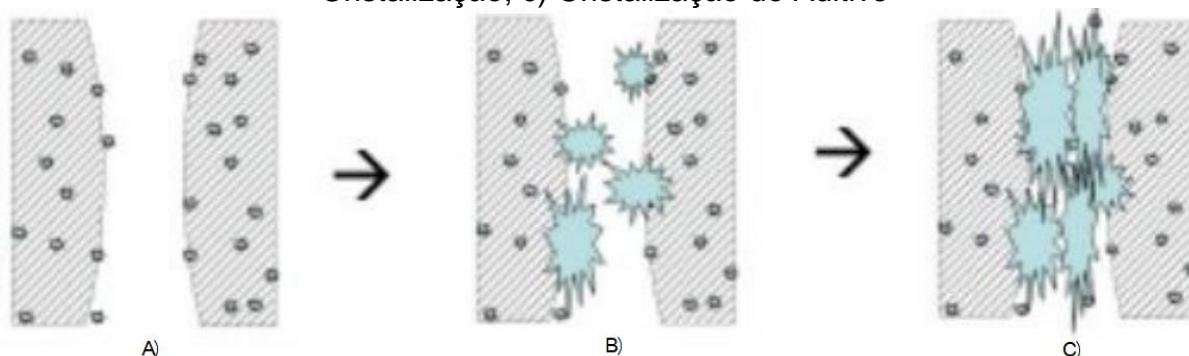
## 2.3 ADITIVOS CRISTALIZANTES PARA CONCRETOS

O processo de cicatrização em matrizes cimentícias tem sido objeto de estudo de diversos autores nos últimos 10 anos. Para cada estudo, nota-se uma metodologia experimental diferente em alguns aspectos, o que confirma a falta de diretrizes técnicas para regimentar as análises. Hassani *et al.* (2017) observaram

que o aumento da utilização do aditivo cristalizante em concretos e argamassas não implicou consequentemente na divulgação das orientações a serem seguidas para a utilização do produto e em informativos sobre o assunto, o que de certa forma coloca em discussão a utilização dos produtos com essa mesma finalidade.

Por serem substâncias químicas hidrofílicas, os cristalizantes reagem com a água e com as partículas do material cimentante do concreto, formando assim hidratos de silicato de cálcio e/ou bloqueios dos poros nas microfissuras capilares existentes. Essas barreiras cristalinas se desenvolvem ao longo da microestrutura do concreto, tornando-se parte permanente do sólido após a reação com a água. Essas barreiras provocadas pela adição de cristalizantes na mistura do concreto resistem à penetração da água e pressão hidrostática, o que classifica esse aditivo, dentro do ACI Committee 212, como sendo “Misturas Redutoras de Permeabilidade em Condições Hidrostáticas - PRAHs” (REPORT ON CHEMICAL ADMIXTURES FOR CONCRETE, 2010). A figura 5 a seguir representa graficamente o processo de formação dos cristais nos poros e fissuras do concreto. A figura 5A representa graficamente uma fissura no concreto e o aditivo cristalizante inerte, onde não se iniciou o processo de cristalização. A partir do momento em que o aditivo entra em contato com a água, inicia-se o processo de cristalização, dando o início ao selamento da fissura, como ilustra a figura 5B. Por fim, na figura 5C, é mostrada a fissura fechada através da cristalização do aditivo, o que dificulta a passagem de líquidos por essa fenda.

Figura 5: Formação dos Hidratos de Silicato de Cálcio Através do Pocesso de Cristalização do Aditivo Cristalizante quando em Contato com a água: a) Aditivo Cristalizante Inerte em uma Fissura; b) Contato do Aditivo com a Água com Início da Cristalização; c) Cristalização do Aditivo



Fonte: Adaptado de Biparva; Yuers (2010)

Os cristais resultantes da reação do aditivo cristalizante se formam nos poros e fissuras do concreto através da reação química com a água, hidróxido de cálcio, alumínio, outros hidróxidos metálicos e sais. Com a formação cristalina, a água é impedida de penetrar na estrutura, contudo, a cristalização permite a passagem do vapor d'água, evitando assim, a formação da pressão de vapor dentro do concreto. Se ao longo da vida útil, a estrutura apresentar fissuras, seja por qual for o motivo, os cristalinóis irão se formar na região, impedindo a infiltração de água e agentes químicos. Caso não tenha a presença de água no concreto, os cristalinóis permanecem dormentes e só se cristalizam após as reações químicas. Quanto mais tempo tiver a estrutura, mais impermeável ela vai ser, devido a maior cristalização nos poros capilares (CONCRETO; CONSTRUÇÕES, 2009).

A figura 6 ilustra a formação dos cristais, impedindo a penetração da água pelos poros, e ao mesmo tempo permitindo a passagem de gases de alívio de pressão.

Figura 6: Ilustração da Formação de Cristais nos Poros



Fonte: Adaptado de Xypex (2022)

A figura 7 mostra o processo de cristalização dos poros através de Microscopia Eletrônica de Varredura-MEV.



Figura 7: Processo de Cristalização dos Poros



Fonte: Adaptado de Xypex (2022)

Ferrara *et al.* (2018) fizeram um estudo sobre aditivos cristalizantes, com CPs curados em imersão na água, exposição ao ciclo úmido/seco e ao ar livre, no período de um ano, repetindo os ciclos de fissuração e cicatrização. Os autores chegaram à conclusão de que a condição de cura do CP é o fator mais relevante para a cicatrização, pois influencia diretamente nos resultados de desempenho do aditivo.

Com o objetivo de avaliar a influência dos diferentes tipos de cimento na eficiência do aditivo cristalizante, Vieira e Damasio (2017) estudaram a potencial cicatrização do concreto com cimentos Portland CP II-Z, CP IV e CP V-ARI RS, através da adição de aditivo cristalizante na mistura. Para a realização dos estudos, os autores moldaram CPs cilíndricos de 100 mm x 200 mm, curaram os mesmos submersos em água até os 28 dias de idade. Após a cura, os CPs foram submetidos à ruptura parcial, aplicando 90% da carga nominal que o concreto suportava durante 60 segundos. Após esse procedimento, os CPs foram novamente submersos em água e novamente ensaiados quanto à resistência mecânica à compressão aos 56, 84 e 112 dias de idade, metodologia diferente da adotada por Ferrara *et al.* (2018).

Outra metodologia adotada para avaliar os efeitos do aditivo no concreto foi a utilizada por Ferrara *et al.* (2016). Os autores analisaram os efeitos do aditivo cristalizante, quanto a redução da permeabilidade e o processo de autocura do concreto. Os pesquisadores moldaram CPs com e sem a adição de cristalizantes, curados ao ar livre e imersos em água. Nos CPs imersos em água, para medir a autocura, foram abertas fissuras nas amostras após 60 dias da moldagem e realizaram os ensaios mensalmente, até o período de dois anos.

Pazderka; Hájková (2016) testaram a adição de cristalizantes para blocos de concreto, adicionando 1,5% e 2% em relação à massa de cimento. Obtiveram mudanças representativas nos ensaios de penetração de água sob pressão realizado aos 28 dias após a moldagem. Bohus; Drochytka (2012) também

analisaram o uso do aditivo para água sob pressão, no entanto, só constataram melhorias importantes com 6 meses de idade das amostras.

Cappellesso *et al.* (2019) escolheram o sistema normalizado para curar os corpos de provas para a realização dos ensaios. Os autores provocaram as fissuras aos 3 e 28 dias após a moldagem dos testemunhos e foram monitoradas até o período de 91 dias de idade. Após as fissuras terem sido abertas, as amostras foram submetidas ao ciclo úmido/seco, com imersão de dois dias em água e doze dias em condições seca. Para quantificar a capacidade autocura do concreto contendo aditivos cristalizantes, os autores utilizaram os procedimentos de velocidade de pulso ultrassônico e microscopia óptica.

Magalhães *et al.* (2018) analisaram o desempenho de cristalizantes em concretos expostos à penetração de cloretos. Para o estudo, os autores moldaram corpos de provas cilíndricos de 100 mm X 200 mm, deixaram em processo de cura submersa em água até os 28 dias de idade, e realizaram os devidos ensaios.

Em seus estudos, Ferrara *et al.* (2018) concluíram que a cura em ciclos úmido/seco foi capaz de realizar a cicatrização, quase que por completo, das fissuras com largura inferior a 0,30 mm, mesma conclusão que tiveram Ferrara *et al.* (2016) e Vieira e Damasio (2017). Ferrara *et al.* (2018) também observaram que nos corpos de provas totalmente imersos em água, o fechamento das fendas foi mais significativo, se comparado aos ciclos de úmido/seco, principalmente com as aberturas menores que 0,15 mm. Ferrara *et al.* (2018) perceberam que a selagem das fissuras vai aumentando com o passar do tempo, e que a repetição dos ciclos de fissuração e cicatrização não afeta a cicatrização das aberturas menores que 0,15 mm.

Vieira e Damasio (2017) observaram que o cristalizante se mostrou muito eficaz para a selagem das fissuras causadas pela ruptura parcial das amostras. Aos 84 dias, os concretos com cimento Portland CP II-Z e CP IV tiveram resultados parecidos, e aos 112 dias o CP IV teve uma elevada cicatrização, chegando a 41,9% de recuperação da resistência. Os autores frisaram que os agregados usados para a dosagem do proporcionamento, não eram os mais indicados para o estudo, devidas suas características granulométricas, e que, em caso de uma melhor seleção, os resultados podem ser ainda melhores. Num contexto geral, os autores destacam que o cimento mais vantajoso, entre os estudados, para usar em um proporcionamento que contém cristalizante é o CP II-Z.

Ferrara *et al.* (2016) observaram que os corpos de provas que continham aditivo cristalizante tiveram cicatrização rápida e satisfatória, e que mesmo após seis meses, até mesmo doze meses, apresentaram melhora na selagem das fissuras, ao contrário dos que não continham aditivo cristalizante, que não tiveram cicatrização significativa, mesmo após seis meses, quase não atingiram 50% dos resultados alcançados com as amostras que continham cristalizante. Com os corpos de prova curados ao ar livre, os períodos ensaiados foram repetidos. As amostras produzidas com aditivos apresentaram capacidade de cristalização das fissuras parecidas com as sem adição e imersas em água. Já as amostras que não continham aditivos, ao serem curadas ao ar livre, tiveram uma selagem das fissuras insignificante, chegando ao máximo 5% de cicatrização da fenda, após um período de doze meses. Não foram observados ganhos relevantes na cicatrização de nenhuma das amostras após o período de doze meses de moldagem dos corpos de prova.

Dufka e Melichar (2018) avaliaram os efeitos causados pelos aditivos cristalizantes na durabilidade do concreto autoadensável exposto à ambientes agressivos no período de um ano. Foram analisados três conjuntos de amostras, um conjunto, considerado como referência, teve amostras em condições laboratoriais, com temperatura de aproximadamente 20°C e umidade relativa do ar de 50%. Em outro conjunto, os testemunhos foram expostos ao gás dióxido de enxofre, em uma concentração de 3%, nas mesmas condições ambientais dos testemunhos de referência. No último conjunto, os corpos de provas foram expostos ao gás dióxido de carbono, com concentração de 3% e as mesmas condições ambientais dos demais conjuntos. As amostras foram submetidas aos ambientes de análise, descritos acima, após 28 dias de moldagem.

Com os resultados, Dufka e Melichar (2018) concluíram que o uso de cristalizantes diminuiu a degradação do concreto, o que aumenta a sua vida útil. Nos ensaios do concreto no estado fresco, não foram observadas mudanças significativas das propriedades do proporcionamento que possuía cristalizante em comparação ao que não continha. Nos ensaios do concreto no estado endurecido, as amostras sem aditivos e exposta ao dióxido de enxofre apresentaram maior deterioração, danificando praticamente toda a superfície, chegando a uma profundidade de aproximadamente 5 mm e, uma diminuição da resistência à compressão em torno de 40%. Já nas amostras que continham o cristalizante, a superfície foi danificada em aproximadamente 60% e a resistência à compressão

não diminuiu mais que 20%. Não foram constatadas mudanças significativas nas propriedades do concreto exposto ao dióxido de carbono. Com esse estudo, Dufka & Melichar (2018) chegaram à conclusão de que os aditivos cristalizantes ajudam a proteger a estrutura do concreto quanto aos efeitos nocivos dos gases.

Cappellesso *et al.* (2019) observaram que as fissuras das amostras com relação água/cimento de 0,30, com 3 dias, foram maiores que as demais relações água/cimento avaliadas. Constatou-se semelhanças nas aberturas realizadas aos 3 e 28 dias, com diferentes relações água/cimento, até chegarem de 80 a 90 dias demonstrando uma capacidade de autocura. Por fim, os autores concluíram que, a capacidade de autorregeneração é superior para idades de fissuração menores e relações água/cimento mais baixas e que o selamento das fendas é mais relevante para fissura abertas aos 3 dias de moldagem.

Para verificar a interação dos cristalizantes na mistura, Magalhães *et al.* (2018) utilizaram dois aditivos cristalizantes, de fabricantes diferentes, para fazer a comparação entre eles, com isso se fez necessário dosar seis proporcionamentos de concreto, todos contendo cimento Portland CP III-40. Os autores usaram proporcionamento de classe de resistência C25 com relação água/cimento 0,60 e, C30 com relação A/C 0,55. Os proporcionamentos que continham aditivos apresentaram um melhor desempenho a exposição ao cloreto, após 28 dias de idade, confirmando assim, a capacidade de cristalização dos poros do concreto. Nos estudos de Hassani *et al* (2017), foi observado que a relação água/cimento da mistura influenciou mais nos resultados do que o próprio aditivo em estudo, que foi utilizado na taxa de 1% em relação a massa do aglomerante. Esse estudo mostra também que os proporcionamentos que continham uma relação A/C de 0,55 são menos permeáveis. Isso acontece porque concretos com relações A/C menores, são menos porosos e conseqüentemente mais impermeáveis.

Para o ensaio de absorção por capilaridade aos 7 dias de idade dos corpos de prova, Magalhães *et al* (2018) realizaram as medições nos intervalos de tempo de 3h, 6h, 12h, 48h e 72h após a face do corpo de prova ser colocada em contato com a lâmina d'água. Observaram que as misturas que continham adição não apresentaram ganhos, e em alguns casos, absorveram mais água do que as que não continham as adições. Isso reforça a hipótese de que para os aditivos cristalizantes exercerem suas funções, precisa-se de uma idade maior, de no mínimo 28 dias, conforme já apresentado em outros estudos anteriores.

Alguns estudos que compararam a sílica ativa com o cristalizante observaram que o primeiro é mais eficiente no fechamento dos poros da mistura, como é o caso da pesquisa realizada por Cappellesso *et al.* (2016), que notaram uma melhora na resistência à compressão e absorção de água nas amostras com sílica ativa.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

Nesse capítulo serão apresentados os materiais e métodos utilizados na pesquisa de análise da influência do aditivo cristalizante nas propriedades mecânicas do concreto.

#### **3.1 MATERIAIS**

Os materiais utilizados no concreto para a produção dos corpos de prova foram o Cimento Portland como aglomerante, areia natural quartzosa como agregado miúdo e pedra basáltica britada como agregado graúdo. O aditivo cristalizante analisado nos proporcionamentos é de origem canadense.

##### **3.1.1 CIMENTO PORTLAND**

O cimento Portland empregado no proporcionamento foi o CP II-F40, por ser uma recomendação da NBR 11.768 (ABNT, 2011), para a avaliação de aditivos químicos para concreto. Para a classe de resistência do cimento, foi adotado a “F40”, pelo fato de ser a classe mais usada atualmente por uma usina de concreto do Vale do Rio dos Sinos, RS, contribuindo de forma regional para a utilização destes materiais.

As tabelas 2, 3 e 4 mostram as características exigidas pela NBR 16.697 (ABNT, 2018) para esse tipo de cimento que foi utilizado nos proporcionamentos de concretos.

Tabela 2: Limites de Composição do Cimento Portland (porcentagem de massa)

<b>Designação Normalizada</b>	Cimento P. Composto com Material Carbonático
<b>Sigla</b>	CP II-F
<b>Classe de Resistência</b>	40
<b>Sufixo</b>	RS ou BC
<b>Clínquer + Sulfatos de Cálcio</b>	75 - 89
<b>Escória Granulada de Alto-forno</b>	0
<b>Material Pozolânico</b>	0
<b>Material Carbonático</b>	11 - 25

Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018

Tabela 3: Requisitos Químicos do Cimento Portland (expresso em porcentagem de massa)

<b>Sigla</b>	<b>Resíduo Insolúvel (RI)</b>	<b>Perda ao Fogo (PF)</b>	<b>Trióxido de Enxofre (SO<sub>3</sub>)</b>
CP II-F	≤ 7,5	≤ 12,5	≤ 4,5

Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018

Tabela 4: Requisitos Físicos e Mecânicos

<b>Sigla</b>	<b>Classe</b>	<b>Finura</b>	<b>Tempo de Início de Pega (Min)</b>	<b>Tempo de fim de Pega (Min)</b>	<b>Expansibilidade a Quente (Min)</b>	<b>Resistência à Compressão (MPa)</b>		
		<b>Resíduo na Peneira 75 µm</b>				<b>3 dias</b>	<b>7 dias</b>	<b>28 dias</b>
CP II-F	40	≤ 10	≥ 60	≥ 600	≤ 5	≥ 15	≥ 25	≥ 40

Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018

### 3.1.2 AGREGADO MIÚDO

Como agregado miúdo, foi utilizada uma areia natural quartzosa, proveniente do Rio Jacuí / RS. Seguem listados na tabela 5, os ensaios que foram realizados na areia, juntamente com as normas vigentes que foram seguidas para a realização dos mesmos e os valores obtidos nos ensaios de caracterização.

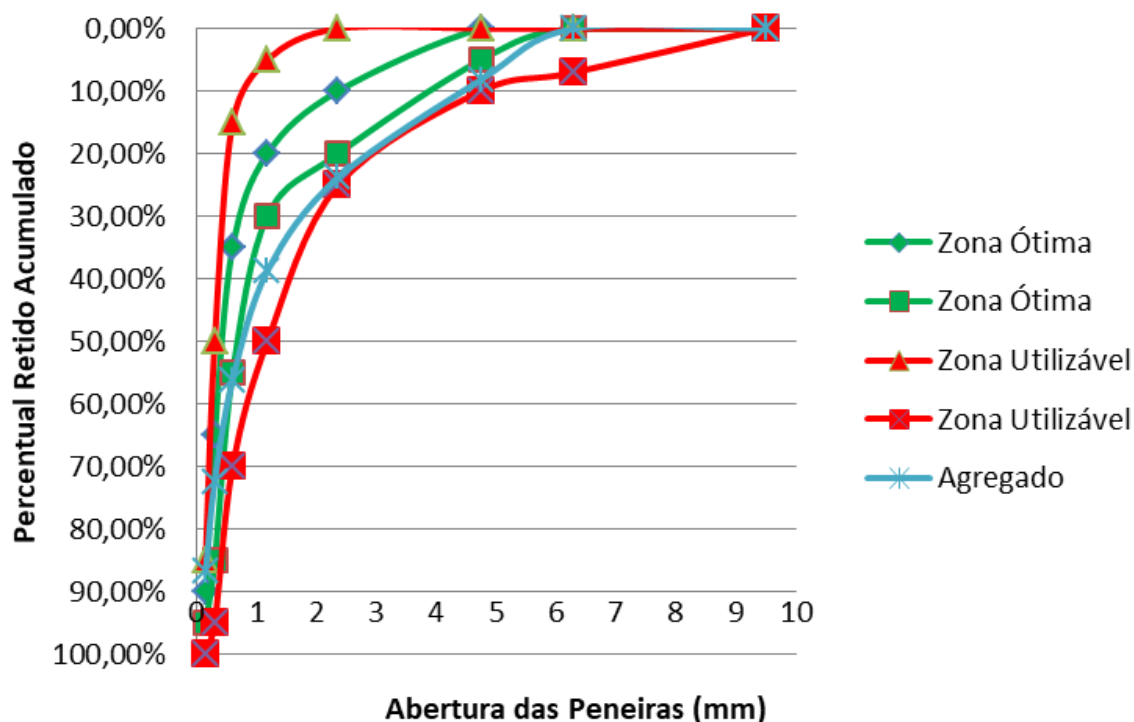
Tabela 5: Ensaio do agregado miúdo

Tipo de Ensaio	Norma Vigente	Resultado
Módulo de Finura	ABNT NBR NM 248/2003	1,90
Dimensão Máxima	ABNT NBR NM 248/2003	2,30 mm
Massa Unitária	ABNT NBR NM 45/2006	1,50 g/cm <sup>3</sup>
Massa Específica	ABNT NBR NM 52/2009	2,60 g/cm <sup>3</sup>
Teor de Material Pulverulento	ABNT NBR NM 46/2003	3,50 %
Impurezas orgânicas	ABNT NBR NM 49/2001	300 ppm

Fonte: Autor, 2019

Com base nos resultados obtidos nos ensaios de granulometria da areia, pode-se classificar o agregado miúdo como sendo de tamanho médio, conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003). O teor de material pulverulento está dentro do recomendado pela NBR NM 46 (ABNT, 2003), que estipula o percentual máximo de 5%. As impurezas contidas no material também estão abaixo das máximas recomendadas pela NBR NM 49 (ABNT, 2001). Na figura 8, pode-se observar a curva granulométrica da areia, demonstrando que o agregado está dentro da zona utilizável, conforme parâmetros exigidos pela NBR 7.211 (ABNT, 2009).

Figura 8: Curva Granulométrica do Agregado Graúdo



Fonte: Autor, 2019



### 3.1.3 AGREGADO GRAÚDO

O agregado graúdo utilizado no proporcionamento do concreto foi de pedra basáltica britada. Todos os ensaios inerentes ao agregado, bem como as normas vigentes que foram seguidas, estão listados na tabela 6 a seguir.

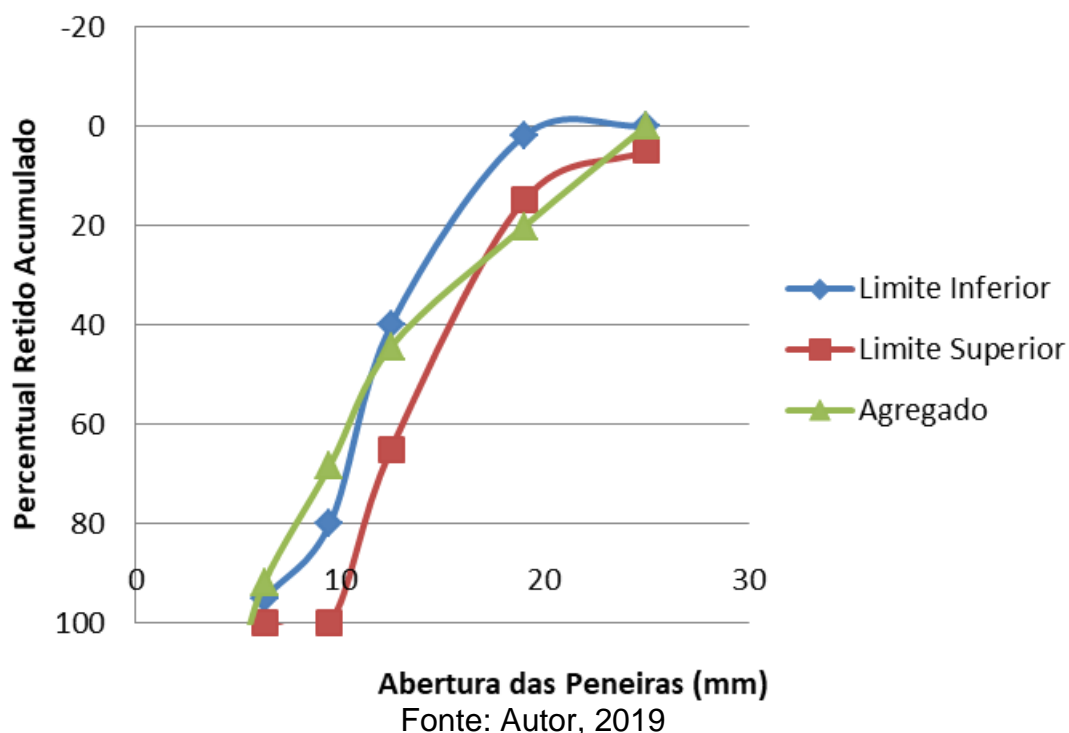
Tabela 6: Ensaios do agregado graúdo

<b>Tipo de Ensaio</b>	<b>Norma Vigente</b>	<b>Resultado</b>
Módulo de Finura	ABNT NBR NM 248/2003	5,72
Dimensão Máxima	ABNT NBR NM 248/2003	9,5 mm
Massa Específica	ABNT NBR NM 53/2009	2,95 g/cm <sup>3</sup>
Massa Unitária Seca	ABNT NBR NM 45/2006	1,55 g/cm <sup>3</sup>
Teor de Material Pulverulento	ABNT NBR NM 46/2003	1,50 %

Fonte: Autor, 2019

O teor de material pulverulento está dentro do recomendado pela NBR NM 46 (ABNT, 2003), que estipula o percentual máximo de 2% para agregado graúdo. A figura 9 a seguir, curva granulométrica do agregado graúdo, demonstra que o agregado não está totalmente dentro da zona utilizável, conforme os parâmetros exigidos pela NBR 7.211 (ABNT, 2009), no entanto, a norma permite a utilização de agregados que não se enquadrem completamente nos parâmetros, desde que sejam tomados cuidados no preparo do proporcionamento do concreto e que se tenha um acompanhamento laboratorial no decorrer do processo, medidas essas que foram adotadas no momento da dosagem dos corpos de provas.

Figura 9: Curva Granulométrica da Brita



### 3.1.4 ADITIVO CRISTALIZANTE

O aditivo cristalizante que foi utilizado no presente estudo é de origem canadense. Esse aditivo foi adicionado ao proporcionamento de concreto no momento da mistura dos materiais. Ele é alcalino, constituído basicamente por cimento Portland, areia de sílica fina tratada e compostos químicos ativos, é comercializado na forma de pó, em embalagens de 3 kg e 18 kg (XYPEX, 2022).

O fabricante recomenda que esse produto seja dosado no percentual de 0,8% em relação à massa de cimento Portland, em concretos de reservatórios, estações de tratamento de água e efluentes, estruturas de contenção secundárias, túneis, lajes de subsolo, fundações, estacionamentos subterrâneos, piscinas e componentes. O fabricante adverte também que o composto pode afetar o tempo de pega do concreto, dependendo da temperatura e das condições climáticas, mas que em condições normais, essa reação não acontece. É relatado ainda, que o uso do aditivo pode aumentar a resistência mecânica do concreto. A tabela 7 a seguir, trás as propriedades físicas do aditivo cristalizante utilizado, conforme o fabricante.

Tabela 7: Características físicas do aditivo cristalizante

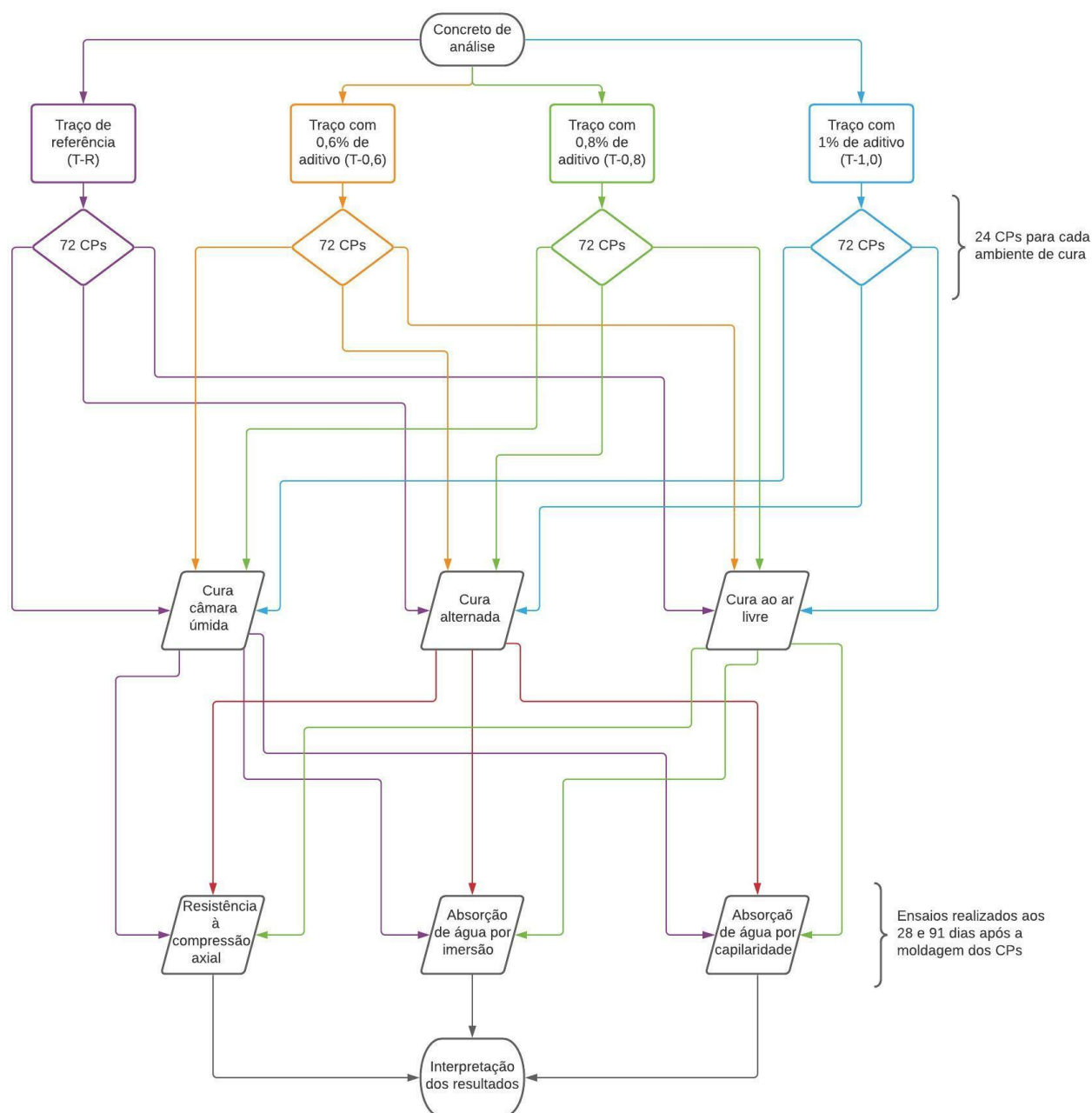
<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
Massa Específica Aparente	1,02 kg/L
Massa Específica Absoluta	2,90 kg/L

Fonte: Adaptado do Fabricante, 2022

### 3.2 MÉTODOS

Para atingir os resultados do presente trabalho, foi adotada uma metodologia experimental para analisar a influência do aditivo cristalizante nas propriedades mecânicas do concreto ao longo do tempo. A figura 10 demonstra as etapas que foram seguidas para a realização das análises.

Figura 10: Etapas das Análises



Fonte: Autor, 2019

### 3.2.1 PROPORCIONAMENTO DO CONCRETO

Para a realização do estudo, foram produzidos quatro concretos, um sem conter aditivo cristalizante, definido como proporcionamento de referência, para que fossem comparados os resultados obtidos nos demais contendo cristalizantes. Além do concreto referência, foram produzidos outros três concretos com as mesmas quantidades de cimento, areia e brita do referência, mas com adição de 0,6%, 0,8%

e 1%, de aditivo cristalizante em cada, em relação à massa do cimento. O fabricante recomenda a adição de 0,8% em relação a massa do cimento, no entanto foi analisado também a adição com mais e com menos adição em relação a recomendada, buscando avaliar possíveis alterações de comportamento.

Para a definição do proporcionamento, foi adotado o método IPT/EPUSP de dosagem de concretos, visando atingir uma resistência à compressão de 30MPa, aos 28 dias. A tabela 8 apresenta uma legenda das siglas de identificação dos proporcionamentos que foram estudados e, a tabela 9 detalha os materiais que compõe a mistura.

Tabela 8: Siglas de Identificação dos Proporcionamentos

<b>Sigla</b>	<b>Nomenclatura</b>
T-R	Proporcionamento de Referência
T-0,6	Proporcionamento Contendo 0,6% de Aditivo Cristalizante
T-0,8	Proporcionamento Contendo 0,8% de Aditivo Cristalizante
T-1,0	Proporcionamento Contendo 1,0% de Aditivo Cristalizante

Fonte: Autor, 2019

Tabela 9: Proporcionamentos dos Concretos

<b>Sigla</b>	<b>T-R</b>	<b>T-0,6</b>	<b>T-0,8</b>	<b>T-1,0</b>
Cimento CP II-F40 (kg)	1,00	1,00	1,00	1,00
Agregado Miúdo (kg)	2,55	2,55	2,55	2,55
Agregado Graúdo (kg)	3,05	3,05	3,05	3,05
Relação Água / Cimento	0,51	0,51	0,51	0,51
Aditivo Cristalizante (kg)	-	0,006	0,008	0,010

Fonte: Autor, 2019

### 3.2.2 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS

Com as proporções dos materiais descrita na tabela 9, iniciou-se o processo de mistura, no qual foi utilizado um equipamento betoneira estacionária de 400 litros de capacidade, como mostra a figura 11.

Figura 11: Produção dos concretos em Betoneira Estacionária



Fonte: Autor, 2019

Cada concreto foi produzido em um único lote de produção, para evitar diferenças entre misturas de mesmo proporcionamento. Como foram produzidos quatro concretos diferentes, esse procedimento de mistura se repetiu por quatro vezes, sendo que primeiro foi produzido o concreto de referência e em seguida os proporcionamentos com 0,6%, 0,8% e 1,0% de aditivo cristalizante em relação à massa de cimento.

Os materiais foram misturados por um período de 5 minutos consecutivos, após esse tempo, foi feito o teste de consistência pelo método de abatimento de tronco de cone, também conhecido como Slump Test, conforme a NBR NM 67 (ABNT, 1998) e apresentado na figura 12. A tabela 10 apresenta os resultados desse ensaio para cada concreto.

Figura 12: Ensaio de abatimento da mistura



Fonte: Autor, 2019

Tabela 10: Determinação da Consistência pelo Método Tronco de Cone NBR NM 67 (ABNT, 1998)

<b>Sigla</b>	<b>Abatimento (mm)</b>
T-R	125
T-0,6	120
T-0,8	120
T-1,0	115

Fonte: Autor, 2019

Observa-se que o resultado do ensaio de consistência apresentou variação de  $\pm 5$ mm para os diferentes concretos produzidos, mostrando que o aditivo cristalizante exerce influência nesta propriedade.

Após a determinação da consistência do concreto, iniciou-se o processo de moldagem com adensamento manual dos corpos de provas, seguindo as recomendações da NBR 5.738 (ABNT, 2015). Através do resultado da consistência, permitiu-se determinar duas camadas de enchimento das formas, sendo que cada camada deveria receber doze golpes de adensamento da haste metálica. Os golpes foram distribuídos uniformemente em toda a seção transversal da forma, com o cuidado para evitar o contato da haste com o fundo do molde. Após o total enchimento e aplicados todos os golpes da última camada, foi batido levemente na face externa das formas para eliminar eventuais vazios, em seguida, realizou-se o rasamento do excesso de concreto e a devida identificação de cada corpo de prova produzido. A figura 13 ilustra essa etapa do processo.

Figura 13: Moldagem dos Corpos de Prova



Fonte: Autor, 2019

Foram usadas formas plásticas e metálicas com formato cilíndrico, de tamanho de 100 mm x 200 mm, aplicado desmoldante vegetal próprio para essa finalidade em todos os recipientes. Os corpos de provas permaneceram estáticos na própria superfície em que foram moldados por 24 horas, conforme mostra a figura 14, livres de vibrações e agentes externos, após esse período, foram destinados para os ambientes de cura já pré-estabelecidos. No total, foram moldadas 216 amostras para a realização dos ensaios previstos inicialmente.

Figura 14: CPs em Repouso por 24 horas



Fonte: Autor, 2019

### 3.2.3 CURA DOS CORPOS DE PROVA

As amostras cilíndricas foram curadas em três ambientes distintos. O primeiro ambiente foi conforme indicado na NBR 5.738 (ABNT, 2015), em câmara úmida, no segundo ambiente adotou-se um sistema alternado seco/úmido e no terceiro ambiente os corpos de prova ficaram expostos ao ar livre.

Os corpos de prova curados conforme a NBR 5.738 (ABNT, 2015) foram moldados e armazenados em superfície horizontal rígida e plana, livre de qualquer vibração. Após 24h da moldagem, foram desmoldados e levados a uma câmara úmida à temperatura de  $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa do ar superior a 95% até o período determinado para a realização dos devidos ensaios, que foram aos 28 e 91 dias após a moldagem, conforme mostra a figura 15.



Figura 15: Corpos de Prova Submetidos a Cura em Câmara Úmida



Fonte: Autor, 2019

No processo de cura alternada seco/úmido, após o período de endurecimento do concreto de 24 horas, os corpos de provas foram desmoldados e ficaram 7 dias totalmente submersos em água em temperatura ambiente e 7 dias expostos ao ar livre, em ambiente coberto e ventilado, livre dos raios solares e chuvas, isolados da umidade do piso, em um local plano e livre de vibrações, alternando assim o processo de cura. Esse procedimento se repetiu até as datas programadas para a execução dos ensaios aos 28 e 91 dias (figura 16).

Figura 16: Corpos de Prova Exposto ao Ar Livre no Processo de Cura Alternada



Fonte: Autor, 2019

Dentre os procedimentos de cura que foram adotados, o mais simples foi o de cura ao ar livre, que consistiu simplesmente em expor os corpos de prova ao ambiente externo do Laboratório de Materiais e Técnicas Construtivas da Universidade FEEVALE, coberto e ventilado, livre dos raios solares e chuvas, isolados da umidade do piso. Esse procedimento iniciou-se após o período de 24 horas após a moldagem. As amostras ficaram em um local plano e livre de vibrações.

Todas as amostras produzidas, para os três procedimentos de cura, foram analisadas aos 28 e 91 dias após a moldagem. Ao final dos ensaios realizados, os resultados obtidos no estudo foram submetidos à análise de variância ANOVA, com o auxílio do *Software* Estatística 8.

### 3.2.4 PREPARO DOS CORPOS DE PROVA

Nas idades programadas para a realização dos ensaios, os corpos de prova foram retirados dos ambientes de cura em que se encontravam e realizados os processos de preparação para o ensaio. Todas as amostras foram submetidas ao processo de retificação das faces, processo que consistiu em remover uma fina camada das extremidades das amostras, através de um processo mecânico com disco abrasivo, fazendo com que a superfície ficasse lisa, sem ondulações e livres de abaulamento. Foi utilizado um equipamento próprio para essa finalidade, o que garantiu a perpendicularidade da face em relação ao eixo do corpo de prova (figura 17).

Figura 17: Processo de Preparação dos Corpos de Prova: a) Retifica Utilizada; Superfície Retificada



Fonte: Autor, 2019

Para os ensaios de absorção de água por capilaridade e absorção de água por imersão, as amostras foram lavadas com água corrente e sabão neutro (figura 18), para eliminar possíveis partículas restantes do desmoldante que foi aplicado nas formas no momento da produção dos corpos de provas, para evitar uma interferência deste produto nos resultados obtidos dos ensaios realizados.

Figura 18: Lavagem dos CPs para a Realização dos Ensaios



Fonte: Autor, 2019

### 3.2.5 ENSAIOS DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

Para avaliar o comportamento dos concretos com aditivo cristalizante no estado endurecido, foram realizados os ensaios apresentados na tabela 11, seguindo as normas vigentes para a realização dos mesmos.

Tabela 11: Ensaios do concreto no estado endurecido

<b>Tipo de Ensaio</b>	<b>Norma Vigente</b>	<b>Número de CPs</b>	<b>Idades dos Ensaios</b>
Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos	ABNT NBR 5.739/2018	72	28 e 91
Determinação da Absorção de Água por Imersão	ABNT NBR 9778/2009	72	28 e 91
Determinação da Absorção de Água por Capilaridade	ABNT NBR 9778/2013	72	28 e 91

Fonte: Autor, 2019

A seguir, estão descritos mais detalhadamente os ensaios mencionados:

### 3.2.5.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Esse ensaio consiste em determinar a resistência mecânica do concreto, conforme a NBR 5.739 (ABNT, 2018). Ele foi realizado com o auxílio de uma prensa hidráulica de classe 1, Emic PC200 (Figura 19), célula TRD 30, com o auxílio do software Tesc versão 3.01, que exerce uma força contínua e isenta de choques no centro do corpo de prova até que o mesmo se rompa. Após o rompimento, a prensa hidráulica apresenta a força máxima alcançada, em Newtons (N), durante o processo de ruptura. Com essa informação, é possível calcular a resistência mecânica à compressão do concreto analisado.

Figura 19: Prensa Hidráulica para Ensaio de Resistência à Compressão Axial



Fonte: Autor, 2019

### 3.2.5.2 COEFICIENTE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

Este ensaio consiste em determinar o coeficiente de absorção de água por imersão, conforme a NBR 9778 (ABNT, 2009). Para tal, o corpo de prova foi seco em estufa por um período de 72 horas, após essa etapa foi registrada a massa seca da amostra. Logo após a leitura da massa, os CPs foram imersos em água a uma temperatura de  $23 (\pm 2)^\circ\text{C}$ , descansando nessa condição por 72 horas. Concluída a fase de saturação, as amostras foram levadas a um recipiente onde ficaram submersos a uma água em ebulição, que começou entre 15 minutos e 30 minutos

após o início do processo, mantendo-os nessa condição por 5 horas (figura 20). À medida que a água evaporava, ela era repostada para evitar que o corpo de prova ficasse com alguma parte para fora do líquido. Depois que a água resfriou naturalmente, foi registrada a massa saturada de cada corpo de prova, bem como seu coeficiente de absorção por meio da seguinte fórmula matemática:

$$A = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100$$

Figura 20: Ensaio de Absorção de Água por Imersão



Fonte: Autor, 2019

### 3.2.5.3 COEFICIENTE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Esse ensaio consiste em determinar a absorção de água pela capilaridade do corpo de prova, conforme a NBR 9779 (ABNT, 2013). As amostras foram secas em estufa por um período de 72 horas, então foi anotada sua massa seca. Para determinar a absorção da água por meio da capilaridade, os corpos de provas foram colocados em contato com uma lâmina de água de 5 mm em sua face inferior, permanecendo nessa condição por 72 horas (figura 21). Passado o período de contato da face com a água, foi registrada a massa úmida, o que posteriormente permitiu determinar o coeficiente de absorção de cada corpo de prova através da equação matemática a seguir:

$$C = \frac{M_{sat} - M_s}{S}$$

Figura 21: Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade



Fonte: Autor, 2019

### 3.2.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA - MEV

Nos quatro proporcionamentos de concretos estudados foram feitas análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para as amostras curadas em câmara úmida aos 828 dias após a moldagem. Para a análise de MEV foi utilizado um equipamento da marca JOEL JSM-6510LV, do laboratório de materiais da Universidade FEEVALE. As amostras analisadas foram extraídas dos corpos de provas cilíndricos 100 mm X 200 mm e depois preparadas e metalizadas para a devida análise no equipamento.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esse capítulo apresenta os resultados dos ensaios realizados aos 28 e 91 dias após a moldagem dos corpos de provas. Foram realizados os ensaios de resistência mecânica à compressão, absorção de água por imersão e capilaridade, além de uma análise de Microscopia Eletrônica de Varredura aos 828 dias.

Antes dos resultados serem submetidos às análises estatísticas, foi realizado o tratamento de espúrios, não considerando na análise os resultados que não se enquadravam dentro da média mais o desvio padrão e a média menos o desvio padrão.

### 4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Os corpos de provas destinados para o ensaio de compressão foram de formato cilíndrico de 100 mm x 200 mm, sendo que para cada concreto, ambiente de cura e teor de aditivo foram analisadas três amostras. A tabela 12 mostra os resultados dos ensaios realizados aos 28 e 91 dias para os três teores de aditivos e tipos de cura das amostras. A tabela 13 mostra os resultados obtidos para o traço contendo 0,6% de aditivo cristalizante em relação à massa do cimento e, na sequência, as tabelas 14 e 15 apresentam os resultados para os traços com 0,8% e 1% respectivamente, para aditivo em relação ao cimento da mistura.

**Tabela 12: Resistência à Compressão Axial do Concreto de Referência (TR)**

Idade de Ensaio (dias)	Ambiente de Cura	Corpo de Prova	Resistência à Compressão Axial (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coef. de Variação (%)
28	Câmara Úmida	I	27,3			
28	Câmara Úmida	II	28,3	27,3	0,95	3,48
28	Câmara Úmida	III	26,4			
28	Ao ar Livre	I	26,1*			
28	Ao ar Livre	II	28	27,95	0,07	0,25
28	Ao ar Livre	III	27,9			
28	Alternada	I	26,3			
28	Alternada	II	26	26,15	0,21	0,81
28	Alternada	III	27,8*			
91	Câmara Úmida	I	38,3			
91	Câmara Úmida	II	38,5	38,4	0,14	0,37
91	Câmara Úmida	III	43,3*			
91	Ao ar Livre	I	40,3			
91	Ao ar Livre	II	37,5*	40,9	0,85	2,07
91	Ao ar Livre	III	41,5			
91	Alternada	I	44,5			
91	Alternada	II	44,5	44,5	0	0
91	Alternada	III	38,6*			

\* Resultado espúrio e excluído da análise

Fonte: Autor, 2022



**Tabela 13: Resistência à Compressão Axial do Concreto com 0,6% de Aditivo (T-0,6)**

Idade de Ensaio (dias)	Ambiente de Cura	Corpo de Prova	Resistência à Compressão Axial (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coef. de Variação (%)
28	Câmara Úmida	I	35,9*			
28	Câmara Úmida	II	25,3	27,2	2,69	9,88
28	Câmara Úmida	III	29,1			
28	Ao ar Livre	I	34			
28	Ao ar Livre	II	32,6	33,3	0,99	2,97
28	Ao ar Livre	III	29,9*			
28	Alternada	I	32,5			
28	Alternada	II	38,5*	33,9	1,98	5,84
28	Alternada	III	35,3			
91	Câmara Úmida	I	42,1			
91	Câmara Úmida	II	44,4	41,9	2,61	6,22
91	Câmara Úmida	III	39,2			
91	Ao ar Livre	I	38,9			
91	Ao ar Livre	II	41,3	40,1	1,70	4,23
91	Ao ar Livre	III	35,5*			
91	Alternada	I	43,9			
91	Alternada	II	43,7	43,5	0,47	1,09
91	Alternada	III	43			

\* Resultado espúrio e excluído da análise

Fonte: Autor, 2022

**Tabela 14: Resistência à Compressão Axial do Concreto com 0,8% de Aditivo (T-0,8)**

Idade de Ensaio (dias)	Ambiente de Cura	Corpo de Prova	Resistência à Compressão Axial (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coef. de Variação (%)
28	Câmara Úmida	I	22,7			
28	Câmara Úmida	II	31,9*	23,5	1,06	4,52
28	Câmara Úmida	III	24,2			
28	Ao ar Livre	I	33,2			
28	Ao ar Livre	II	30,4*	33,7	0,64	1,89
28	Ao ar Livre	III	34,1			
28	Alternada	I	33,7			
28	Alternada	II	32,8	33,3	0,45	1,35
28	Alternada	III	33,3			
91	Câmara Úmida	I	40,4			
91	Câmara Úmida	II	44*	40,0	0,57	1,41
91	Câmara Úmida	III	39,6			
91	Ao ar Livre	I	38,9			
91	Ao ar Livre	II	42,2*	38,8	0,14	0,36
91	Ao ar Livre	III	38,7			
91	Alternada	I	46*			
91	Alternada	II	40,2	39,3	1,27	3,24
91	Alternada	III	38,4			

\* Resultado espúrio e excluído da análise

Fonte: Autor, 2022

**Tabela 15: Resistência à Compressão Axial do Concreto com 1,0% de Aditivo (T-1,0)**

Idade de Ensaio (dias)	Ambiente de Cura	Corpo de Prova	Resistência à Compressão Axial (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coef. de Variação (%)
28	Câmara Úmida	I	23,6*			
28	Câmara Úmida	II	20,6	20,7	0,14	0,68
28	Câmara Úmida	III	20,8			
28	Ao ar Livre	I	27,8*			
28	Ao ar Livre	II	24,2	24,55	0,49	2,02
28	Ao ar Livre	III	24,9			
28	Alternada	I	25,3			
28	Alternada	II	24	24	1,40	5,84
28	Alternada	III	22,5			
91	Câmara Úmida	I	44,1			
91	Câmara Úmida	II	40,5	42,6	1,81	4,24
91	Câmara Úmida	III	42,6			
91	Ao ar Livre	I	37,3			
91	Ao ar Livre	II	36,7	37	0,42	1,15
91	Ao ar Livre	III	43,2*			
91	Alternada	I	42,8*			
91	Alternada	II	44,9	44,7	0,28	0,63
91	Alternada	III	44,5			

\* Resultado espúrio e excluído da análise

Fonte: Autor, 2022

Os resultados obtidos no ensaio de compressão axial foram submetidos à análise de variância (ANOVA) fatorial, que mostrou diferenças estatisticamente significativas entre os tipos de cura, idades ensaiadas e teores de aditivos, assim como para a cura em relação a idade e o teor de aditivo, a idade em relação ao teor de aditivo e a relação da cura/idade/teor de aditivo. A tabela 16 a seguir, resume os resultados da análise, onde se pode observar que todas as combinações apresentam diferenças significativas em algum aspecto analisado. Após a análise fatorial, foi realizada uma análise múltipla de médias pelo método de Fisher, para fazer o comparativo entre as amostras. A tabela 27 do apêndice mostra os resultados obtidos nessa análise.

**Tabela 16: Análise de Variância para Resistência à Compressão (MPa) tendo como Variáveis a Cura, Idade das Amostras e Teor de Aditivo**

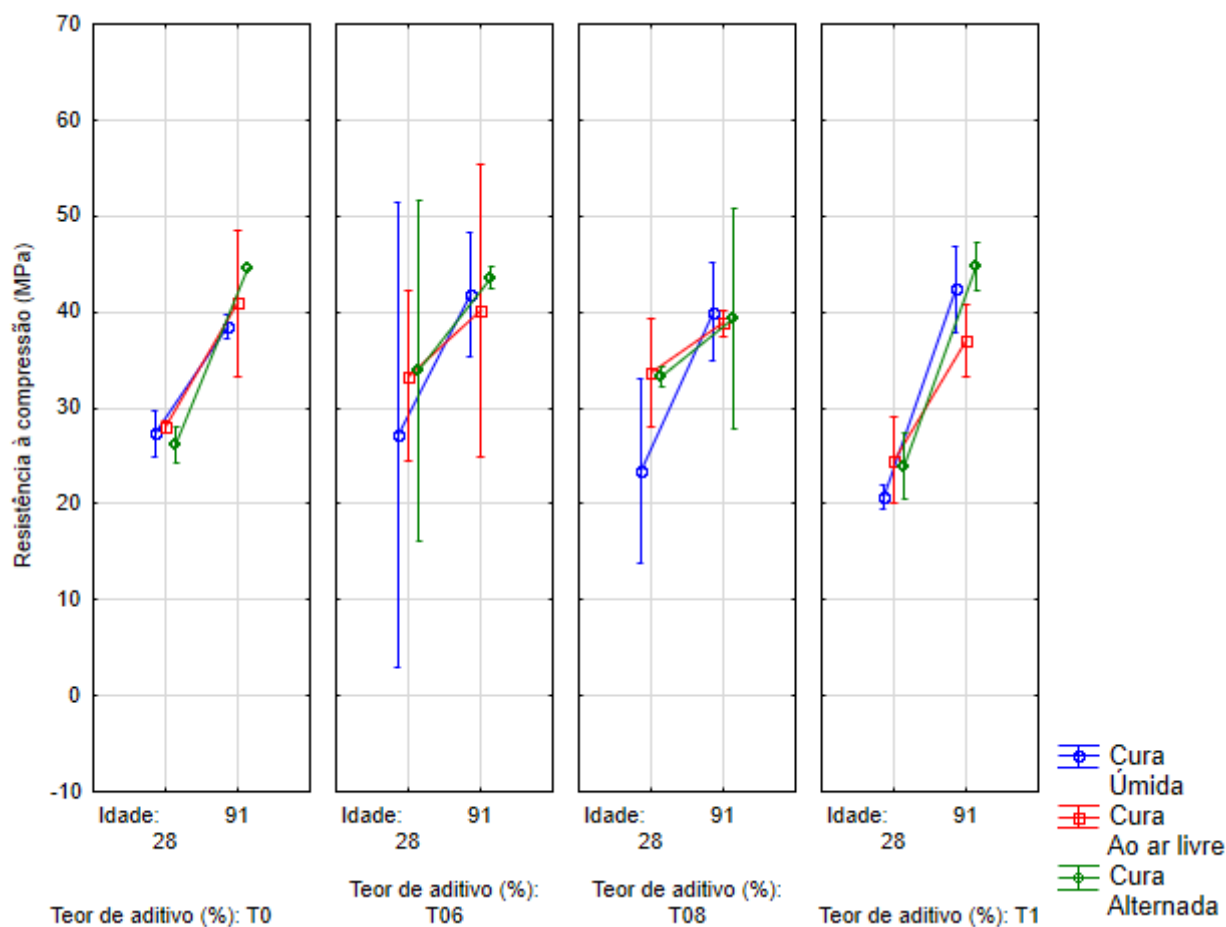
	<b>SQ</b>	<b>GLD</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>P</b>	<b>SIGNIF.</b>
<b>CURA</b>	111,35	2	55,67	35,91	0,000000	<b>SIM</b>
<b>IDADE (DIAS)</b>	2216,62	1	2216,62	1429,72	0,000000	<b>SIM</b>
<b>TEOR DE ADITIVO (%)</b>	135,03	3	45,01	29,03	0,000000	<b>SIM</b>
<b>CURA x IDADE (DIAS)</b>	96,74	2	48,37	31,20	0,000000	<b>SIM</b>
<b>CURA x TEOR DE ADITIVO (%)</b>	33,46	6	5,58	3,60	0,008339	<b>SIM</b>
<b>IDADE (DIAS) x TEOR DE ADITIVO (%)</b>	166,97	3	55,66	35,90	0,000000	<b>SIM</b>
<b>CURA x IDADE (DIAS) x TEOR DE ADITIVO (%)</b>	112,22	6	18,70	12,06	0,000001	<b>SIM</b>
<b>Erro</b>	46,51	30	1,55			

SQ = SOMA QUADRÁTICA / GLD = GRAUS DE LIBERDADE / MQ = MÉDIA QUADRÁTICA / F = VALOR DE F; P = SIGNIFICÂNCIA: SIGNIF. = SIGNIFICATIVO

Fonte: Autor, 2022

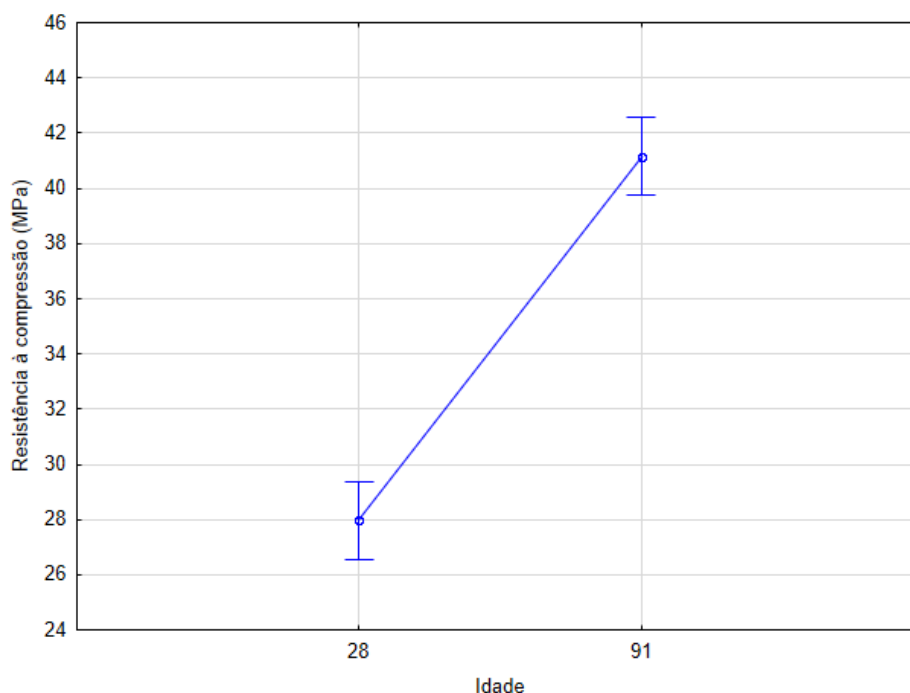
A figura 22 mostra o gráfico dos resultados dos ensaios de resistência à compressão axial, tanto para 28 dias após a moldagem, quanto para 91 dias após a mistura do traço de concreto.

**Figura 22: Gráfico de Resistência à Compressão aos 28 e 91 dias**



Fonte: Autor, 2022

As análises estatísticas mostraram que entre os corpos de provas ensaiados aos 28 dias de idade, não houve mudanças estatisticamente significativas nos resultados das amostras de referência, curadas em ambientes distintos, assim como não houve mudanças estatisticamente significativas para os CPs rompidos aos 91 dias. No entanto, comparando as idades, notou um aumento significativo da resistência mecânica à compressão do concreto ensaiado aos 91 dias em relação aos 28 dias, como ilustra o gráfico de resistência à compressão entre as idades dos CPs analisados da figura 23. Esse aumento aconteceu para os diferentes ambientes de cura, bem como o ambiente de cura influenciou nos resultados, sendo que a cura alternada alcançou os resultados maiores no ensaio.

**Figura 23: Gráfico Geral de Resistência à Compressão aos 28 e 91 dias**

Fonte: Autor, 2022

Para as amostras que continham 0,6%, 0,8% e 1,0% de aditivo cristalizante em relação à massa de cimento, houveram diferenças significativas nos resultados obtidos aos 28 dias em relação aos ensaios realizados aos 91 dias, assim como houveram diferenças comparando os ambientes de cura em que os CPs foram submetidos, onde os resultados aos 91 dias foram mais elevados, e também a cura alternada atingiu os resultados maiores de resistência à compressão axial do lote. Pedroso *et al.* (2020) concluíram que os CPs ensaiados aos 91 dias obtiveram maior resistência mecânica à compressão, e que o percentual de aditivo cristalizante da mistura não influenciou nos resultados obtidos.

As amostras curadas em câmara úmida e rompidas aos 91 dias se mostraram iguais estatisticamente às amostras curadas ao ar livre e ensaiadas na mesma idade, para todas as proporções estudadas. As amostras curadas ao ar livre se enquadram no mesmo grupo das amostras curadas com processo alternado de molhagem, aos 28 dias. Aos 91 dias, as amostras tiveram um aumento significativo da resistência à compressão axial em relação há 28 dias.

Para os ensaios realizados aos 91 dias, não houveram diferenças estatisticamente significativas dos resultados das amostras curadas em câmara úmida em relação às amostras curadas ao ar livre, que por sua vez também se

mostraram similares com às amostras curadas alternadamente, no entanto, às amostras curadas alternadamente foram diferentes estatisticamente das curadas em câmara úmida, para todos os traços estudados.

#### 4.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

O ensaio de absorção de água por imersão foi realizado com amostras de concreto cilíndricas de 100 mm x 200 mm, contendo três exemplares para cada situação estudada. A tabela 17 mostra os resultados dos ensaios de absorção de água por imersão do traço de referência realizado aos 28 e 91 dias para os três tipos de cura das amostras. A tabela 18 mostra os resultados obtidos para o traço contendo 0,6% de aditivo cristalizante em relação à massa do cimento e, na sequência, as tabelas 19 e 20 apresentam os resultados para os traços com 0,8% e 1% respectivamente, para aditivo em relação ao cimento da mistura.

**Tabela 17: Absorção de Água por Imersão do Concreto de Referência (TR)**

Idade de Ensaio (dias)	Ambiente de Cura	Corpo de Prova	Absorção por Imersão (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)	Coef. de Variação (%)
28	Câmara Úmida	I	5,82			
28	Câmara Úmida	II	5,9*	5,80	0,03	0,49
28	Câmara Úmida	III	5,78			
28	Ao ar Livre	I	5,94			
28	Ao ar Livre	II	6,02	5,99	0,04	0,73
28	Ao ar Livre	III	6,01			
28	Alternada	I	6,14*			
28	Alternada	II	5,95	5,97	0,02	0,36
28	Alternada	III	5,98			
91	Câmara Úmida	I	4,85			
91	Câmara Úmida	II	4,94*	4,87	0,03	0,58
91	Câmara Úmida	III	4,89			
91	Ao ar Livre	I	5,04			
91	Ao ar Livre	II	5,04	5,04	0,00	0,00
91	Ao ar Livre	III	4,9*			
91	Alternada	I	4,75			
91	Alternada	II	4,68	4,72	0,05	1,05
91	Alternada	III	4,9*			

\* Resultado espúrio e excluído da análise

Fonte: Autor, 2022



**Tabela 18: Absorção de Água por Imersão do Concreto com 0,6% de Aditivo (T-0,6)**

Idade de Ensaio (dias)	Ambiente de Cura	Corpo de Prova	Absorção por Imersão (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)	Coef. de Variação (%)
28	Câmara Úmida	I	5,96			
28	Câmara Úmida	II	5,86	5,91	0,07	1,20
28	Câmara Úmida	III	6,11*			
28	Ao ar Livre	I	6,25			
28	Ao ar Livre	II	6,21	6,21	0,04	0,57
28	Ao ar Livre	III	6,18			
28	Alternada	I	5,84*			
28	Alternada	II	5,78	5,79	0,01	0,12
28	Alternada	III	5,79			
91	Câmara Úmida	I	4,69*			
91	Câmara Úmida	II	4,88	4,85	0,03	0,71
91	Câmara Úmida	III	4,83			
91	Ao ar Livre	I	5,05			
91	Ao ar Livre	II	5,08	5,08	0,04	0,80
91	Ao ar Livre	III	5,13			
91	Alternada	I	4,78			
91	Alternada	II	4,56*	4,735	0,06	1,34
91	Alternada	III	4,69			

\* Resultado espúrio e excluído da análise

Fonte: Autor, 2022

**Tabela 19: Absorção de Água por Imersão do Concreto com 0,8% de Aditivo (T-0,8)**

Idade de Ensaio (dias)	Ambiente de Cura	Corpo de Prova	Absorção por Imersão (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)	Coef. de Variação (%)
28	Câmara Úmida	I	5,86			
28	Câmara Úmida	II	5,86	5,86	0,00	0,00
28	Câmara Úmida	III	8,91*			
28	Ao ar Livre	I	5,91			
28	Ao ar Livre	II	5,94	5,91	0,03	0,43
28	Ao ar Livre	III	5,89			
28	Alternada	I	5,67			
28	Alternada	II	5,72	5,72	0,06	0,96
28	Alternada	III	5,78			
91	Câmara Úmida	I	4,87			
91	Câmara Úmida	II	4,78	4,83	0,06	1,32
91	Câmara Úmida	III	4,39*			
91	Ao ar Livre	I	4,81*			
91	Ao ar Livre	II	4,98	5,00	0,03	0,57
91	Ao ar Livre	III	5,02			
91	Alternada	I	4,73			
91	Alternada	II	4,73	4,73	0,00	0,00
91	Alternada	III	4,66*			

\* Resultado espúrio e excluído da análise

Fonte: Autor, 2022

**Tabela 20: Absorção de Água por Imersão do Concreto com 1,0% de Aditivo (T-1,0)**

Idade de Ensaio (dias)	Ambiente de Cura	Corpo de Prova	Absorção por Imersão (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)	Coef. de Variação (%)
28	Câmara Úmida	I	5,85*			
28	Câmara Úmida	II	5,81	5,80	0,01	0,24
28	Câmara Úmida	III	5,79			
28	Ao ar Livre	I	6,01			
28	Ao ar Livre	II	6,23*	6,03	0,03	0,47
28	Ao ar Livre	III	6,05			
28	Alternada	I	5,98			
28	Alternada	II	5,89	5,97	0,05	0,83
28	Alternada	III	5,97			
91	Câmara Úmida	I	4,81			
91	Câmara Úmida	II	4,83	4,83	0,04	0,75
91	Câmara Úmida	III	4,88			
91	Ao ar Livre	I	4,96			
91	Ao ar Livre	II	4,98	4,97	0,01	0,28
91	Ao ar Livre	III	5,25*			
91	Alternada	I	4,79			
91	Alternada	II	4,82	4,81	0,02	0,44
91	Alternada	III	5*			

\* Resultado espúrio e excluído da análise

Fonte: Autor, 2022

Os resultados obtidos no ensaio de absorção de água por imersão foram submetidos à análise de variância (ANOVA) fatorial, que mostrou diferenças estatisticamente significativas para os tipos de cura, idades ensaiadas e teores de aditivos, assim como para a cura em relação a idade e o teor de aditivo, a idade em relação ao teor de aditivo e a relação da cura/idade/teor de aditivo. A tabela 21 resume os resultados da análise, onde se pode observar que todas as combinações possíveis se apresentam diferenças significativas em algum aspecto. Após a análise fatorial, foi realizada a análise múltipla de média pelo método de Fisher, para fazer o comparativo entre as amostras. A tabela 28 do apêndice mostra os resultados obtidos nessa análise múltipla das médias pelo método de Fisher.

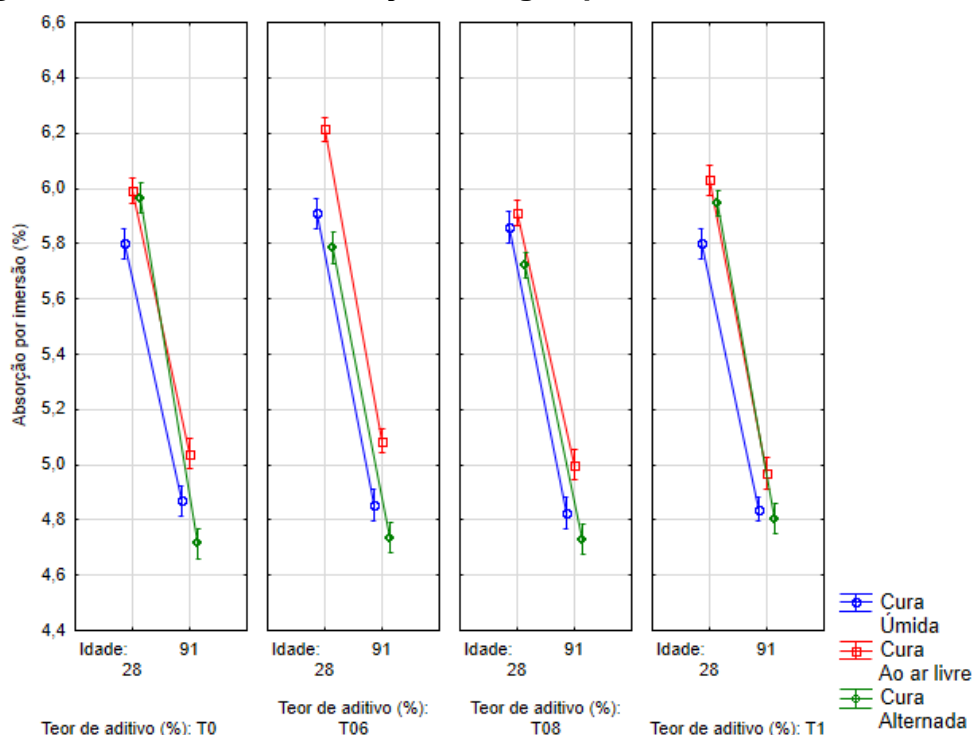
**Tabela 21: Análise de Variância para Absorção por Imersão (%) tendo como Variáveis a Cura, Idade das Amostras e Teor de Aditivo**

	<b>SQ</b>	<b>GLD</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>P</b>	<b>SIGNIF.</b>
<b>CURA</b>	0,549	2	0,275	186	0,000000	SIM
<b>IDADE (DIAS)</b>	14,342	1	14,342	9733	0,000000	SIM
<b>TEOR DE ADITIVO (%)</b>	0,055	3	0,018	12	0,000016	SIM
<b>CURA x IDADE (DIAS)</b>	0,033	2	0,016	11	0,000233	SIM
<b>CURA x TEOR DE ADITIVO (%)</b>	0,117	6	0,019	13	0,000000	SIM
<b>IDADE (DIAS) x TEOR DE ADITIVO (%)</b>	0,017	3	0,006	4	0,017800	SIM
<b>CURA x IDADE (DIAS) x TEOR DE ADITIVO (%)</b>	0,067	6	0,011	8	0,000048	SIM
<b>Erro</b>	0,046	31	0,001			

SQ = SOMA QUADRÁTICA / GLD = GRAUS DE LIBERDADE / MQ = MÉDIA QUADRÁTICA / F = VALOR DE F; P = SIGNIFICÂNCIA: SIGNIF. = SIGNIFICATIVO  
Fonte: Autor, 2022

A figura 24, gráfico de absorção de água por imersão, mostra as médias obtidas nos ensaios realizados aos 28 e 91 dias, para os quatro teores de aditivo estudados e para os três ambientes de cura em que as amostras foram submetidas.

**Figura 24: Gráfico de Absorção de Água por Imersão aos 28 e 91 dias**



Fonte: Autor, 2022

No ensaio de absorção de água por imersão com corpos de provas curados em câmara úmida, tanto para 28 dias quanto para 91 dias de idade das amostras, assim como para os diferentes teores de aditivos estudados, não se observou diferenças significativas para a mesma idade, no entanto, na comparação entre as idades de ruptura, as amostras com 91 dias absorveram menor quantidade de água do que aquelas testadas aos 28 dias. Magalhães *et al.* (2018) também obtiveram resultados com menor absorção de água nos ensaios realizados aos 56 dias em relação aos ensaios realizados aos 28 dias, isso se relaciona com a formação de cristais nos poros do concreto em idades mais avançadas, o que reduz a absorção de água.

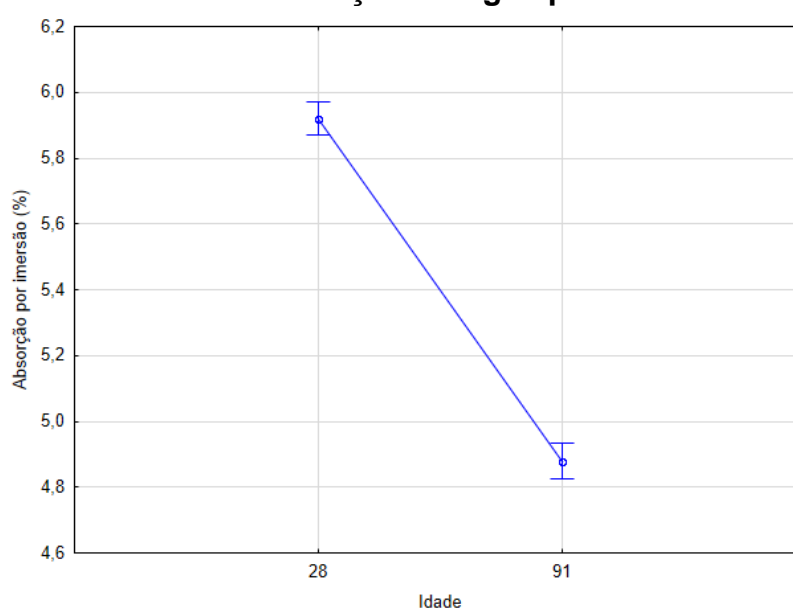
Para a cura ao ar livre, os resultados dos ensaios aos 28 dias mostraram diferenças significativas entre os concretos com percentuais diferentes de aditivo. No entanto para os ensaios realizados aos 91 dias, apenas as amostras com 0,6% de aditivo na mistura apresentaram diferença significativa das demais, pois absorveram maior quantidade de água que as outras.

Na cura alternada, os resultados do ensaio aos 28 dias mostraram uma diferença estatisticamente significativa entre as amostras, no entanto, para 91 dias, os resultados obtidos não tiveram diferenças estatisticamente significativas, podendo

ser considerado do mesmo grupo e que as amostras com mais idade de moldagem absorvem menos água comparada com os testemunhos mais jovens.

A figura 25 a seguir mostra o gráfico de absorção de água por imersão entre as idades dos CPs analisados, onde mostra que os ensaios realizados aos 91 dias de idade obtiveram menor absorção de água em relação aos ensaios realizados aos 28 dias, isso ocorre devido à formação de cristais nos poros do concreto em virtude da adição do aditivo cristalizante na mistura, fenômeno esse ilustra pela figura 31.

**Figura 25: Gráfico Geral de Absorção de Água por Imersão aos 28 e 91 dias**



Fonte: Autor, 2022

### 4.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Para realizar o ensaio de absorção de água por capilaridade, foram utilizados corpos de provas cilíndricos de 100 mm x 200 mm, do mesmo lote de dosagem dos que foram utilizados nos demais ensaios. A tabela 22, absorção de água por capilaridade do traço de referência, mostra os resultados dos ensaios realizados aos 28 e 91 dias para os três tipos de cura das amostras. A tabela 23 mostra os resultados obtidos para o traço contendo 0,6% de aditivo cristalizante em relação à massa do cimento e, na sequência, as tabelas 24 e 25 apresentam os resultados para os traços com 0,8% e 1% respectivamente, de aditivo em relação a massa de cimento da mistura.

**Tabela 22: Absorção de Água por Capilaridade do Concreto de Referência (TR)**

Idade de Ensaio (dias)	Ambiente de Cura	Corpo de Prova	Absorção por Capilaridade (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)	Coef. de Variação (%)
28	Câmara Úmida	I	0,79			
28	Câmara Úmida	II	0,82	0,81	0,02	1,89
28	Câmara Úmida	III	0,81			
28	Ao ar Livre	I	0,94			
28	Ao ar Livre	II	0,97	0,94	0,03	3,19
28	Ao ar Livre	III	0,91			
28	Alternada	I	0,91			
28	Alternada	II	0,87	0,89	0,02	2,25
28	Alternada	III	0,89			
91	Câmara Úmida	I	0,70			
91	Câmara Úmida	II	0,70	0,70	0,01	1,65
91	Câmara Úmida	III	0,68			
91	Ao ar Livre	I	0,64*			
91	Ao ar Livre	II	0,87	0,90	0,04	4,71
91	Ao ar Livre	III	0,93			
91	Alternada	I	0,80*			
91	Alternada	II	0,72	0,71	0,01	1,99
91	Alternada	III	0,70			

\* Resultado espúrio e excluído da análise

Fonte: Autor, 2022

**Tabela 23: Absorção de Água por Capilaridade do Concreto com 0,6% de Aditivo (T-0,6)**

Idade de Ensaio (dias)	Ambiente de Cura	Corpo de Prova	Absorção por Capilaridade (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)	Coef. de Variação (%)
28	Câmara Úmida	I	0,81			
28	Câmara Úmida	II	0,79	0,81	0,02	2,00
28	Câmara Úmida	III	0,83			
28	Ao ar Livre	I	0,9			
28	Ao ar Livre	II	0,87	0,88	0,02	1,53
28	Ao ar Livre	III	0,88			
28	Alternada	I	0,85			
28	Alternada	II	0,84	0,85	0,03	2,65
28	Alternada	III	0,89			
91	Câmara Úmida	I	0,67			
91	Câmara Úmida	II	0,7	0,70	0,03	3,00
91	Câmara Úmida	III	0,73			
91	Ao ar Livre	I	0,82			
91	Ao ar Livre	II	0,73	0,76	0,05	4,58
91	Ao ar Livre	III	0,76			
91	Alternada	I	0,76			
91	Alternada	II	0,76	0,76	0,00	0,00
91	Alternada	III	0,65*			

\* Resultado espúrio e excluído da análise

Fonte: Autor, 2022



**Tabela 24: Absorção de Água por Capilaridade do Concreto com 0,8% de Aditivo (T-0,8)**

Idade de Ensaio (dias)	Ambiente de Cura	Corpo de Prova	Absorção por Capilaridade (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)	Coef. de Variação (%)
28	Câmara Úmida	I	0,81			
28	Câmara Úmida	II	0,84	0,81	0,02	2,14
28	Câmara Úmida	III	0,81			
28	Ao ar Livre	I	0,83			
28	Ao ar Livre	II	0,85	0,83	0,02	2,41
28	Ao ar Livre	III	0,81			
28	Alternada	I	0,86			
28	Alternada	II	0,84	0,85	0,01	1,18
28	Alternada	III	0,85			
91	Câmara Úmida	I	0,6*			
91	Câmara Úmida	II	0,74	0,73	0,02	2,93
91	Câmara Úmida	III	0,71			
91	Ao ar Livre	I	0,82*			
91	Ao ar Livre	II	0,72	0,72	0,00	0,00
91	Ao ar Livre	III	0,72			
91	Alternada	I	0,74			
91	Alternada	II	0,73	0,74	0,02	2,06
91	Alternada	III	0,76			

\* Resultado espúrio e excluído da análise

Fonte: Autor, 2022

**Tabela 25: Absorção de Água por Capilaridade do Concreto 1,0% de Aditivo (T-1,0)**

Idade de Ensaio (dias)	Ambiente de Cura	Corpo de Prova	Absorção por Capilaridade (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)	Coef. de Variação (%)
28	Câmara Úmida	I	0,69			
28	Câmara Úmida	II	0,73	0,71	0,02	2,82
28	Câmara Úmida	III	0,71			
28	Ao ar Livre	I	0,83			
28	Ao ar Livre	II	0,81	0,82	0,01	1,22
28	Ao ar Livre	III	0,82			
28	Alternada	I	0,78			
28	Alternada	II	0,76	0,78	0,02	1,96
28	Alternada	III	0,79			
91	Câmara Úmida	I	0,67			
91	Câmara Úmida	II	0,58*	0,68	0,01	2,08
91	Câmara Úmida	III	0,69			
91	Ao ar Livre	I	0,7			
91	Ao ar Livre	II	0,72	0,71	0,01	1,99
91	Ao ar Livre	III	0,8*			
91	Alternada	I	0,65			
91	Alternada	II	0,66	0,66	0,02	3,15
91	Alternada	III	0,69			

\* Resultado espúrio e excluído da análise

Fonte: Autor, 2022

Os resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade foram submetidos à análise de variância (ANOVA) fatorial, que mostrou diferenças estatisticamente significativas para os tipos de cura, idades ensaiadas e teores de aditivos, assim como para a cura em relação a idade e o teor de aditivo e a relação da cura/idade/teor de aditivo, no entanto, a idade em relação ao teor de aditivo não se mostraram diferentes significativamente. A tabela 26 resume os resultados da análise múltipla de médias fatorial para absorção de água por capilaridade, onde se pode observar que as combinações testadas se apresentam diferentes significativamente em algum aspecto, exceto a combinação idade/teor de aditivo. Após a análise fatorial, foi realizada a análise múltipla de médias pelo método de Fisher, para fazer o comparativo entre as amostras. A tabela 29 do apêndice mostra os resultados obtidos nessa análise múltipla de médias pelo método de Fisher.

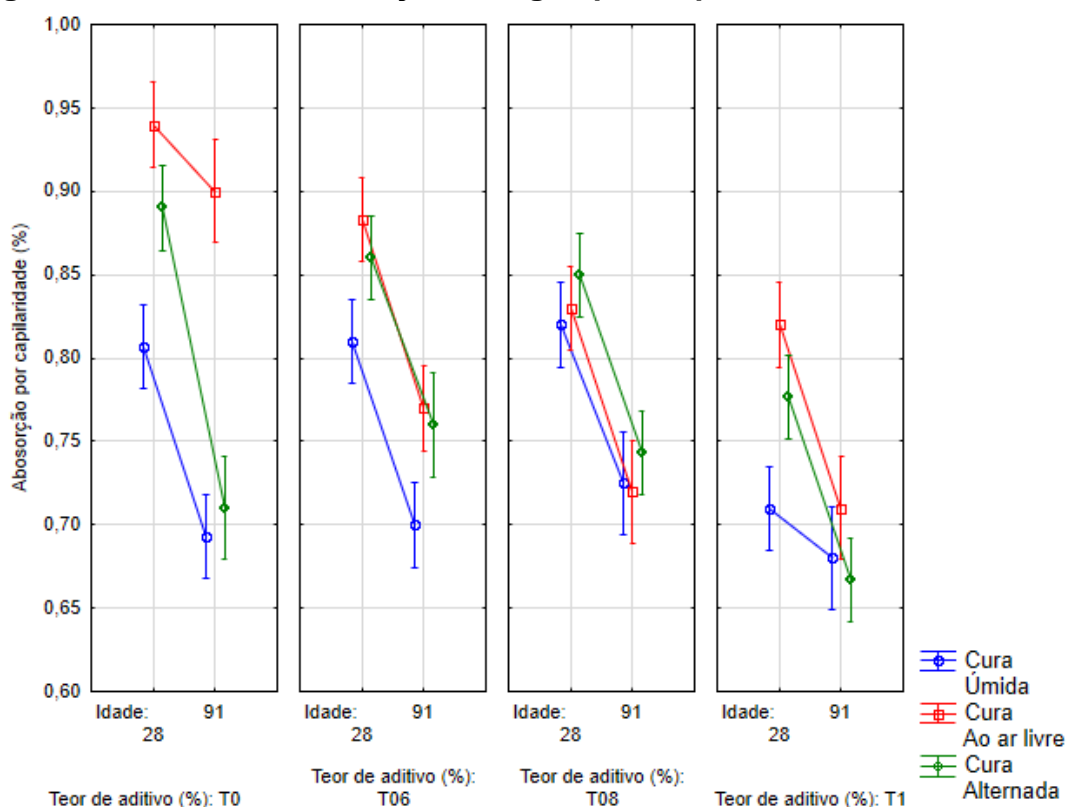
**Tabela 26: Análise de Variância para Absorção por Capilaridade (%) tendo como Variáveis a Cura, Idade das Amostras e Teor de Aditivo**

	<b>SQ</b>	<b>GLD</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>P</b>	<b>SIGNIF.</b>
<b>CURA</b>	0,06403	2	0,03201	68,19	0,000000	<b>SIM</b>
<b>IDADE (DIAS)</b>	0,16193	1	0,16193	344,88	0,000000	<b>SIM</b>
<b>TEOR DE ADITIVO (%)</b>	0,07649	3	0,02550	54,30	0,000000	<b>SIM</b>
<b>CURA x IDADE (DIAS)</b>	0,00419	2	0,00209	4,46	0,017723	<b>SIM</b>
<b>CURA x TEOR DE ADITIVO (%)</b>	0,04288	6	0,00715	15,22	0,000000	<b>SIM</b>
<b>IDADE (DIAS) x TEOR DE ADITIVO (%)</b>	0,00181	3	0,00060	1,29	0,291212	<b>NÃO</b>
<b>CURA x IDADE (DIAS) x TEOR DE ADITIVO (%)</b>	0,01366	6	0,00228	4,85	0,000797	<b>SIM</b>
<b>Erro</b>	0,01925	41	0,00047			

SQ = SOMA QUADRÁTICA / GLD = GRAUS DE LIBERDADE / MQ = MÉDIA QUADRÁTICA / F = VALOR DE F; P = SIGNIFICÂNCIA: SIGNIF. = SIGNIFICATIVO  
Fonte: Autor, 2022

A figura 26, gráfico de absorção de água por capilaridade, mostra as médias obtidas nos ensaios realizados aos 28 e 91 dias, para os quatro proporcionamentos preparados e para os três ambientes de cura em que as amostras foram submetidas.

**Figura 26: Gráfico de Absorção de Água por Capilaridade aos 28 e 91 dias**



No ensaio de absorção de água por capilaridade, com cura em câmara úmida aos 28 dias de idade das amostras, observaram-se diferenças estatisticamente significativas apenas para o traço com 1,0% de aditivo cristalizante. O mesmo aconteceu para as análises dos resultados dos ensaios realizados aos 91 dias para o traço com 1,0% de aditivo cristalizante em relação a massa de cimento, isso se explica pelo maior percentual de adição do cristalizante na mistura, proporcionando um maior selamento dos poros do concreto e consequentemente o impedimento da passagem da água para o interior da amostra. No entanto, comparando-se as amostras ensaiadas aos 28 dias com as ensaiadas aos 91 dias, nota-se uma diferença significativa na absorção de água por capilaridade, onde as analisadas posteriormente absorveram menos água.

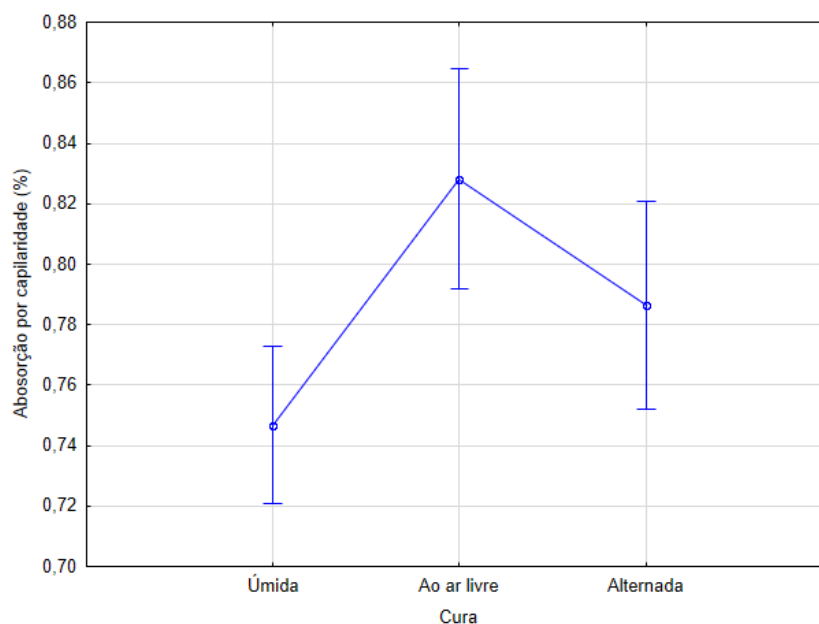
Para as amostras curadas ao ar livre, os resultados foram distintos para cada teor de aditivo adicionado ao concreto, sendo que a mistura com 1,0% de adição do cristalizante absorveu menor quantidade de água, isso se repetiu para as análises feitas com os resultados obtidos aos 28 e 91 dias após a moldagem dos corpos de provas. Esses resultados obtidos se assemelham com os obtidos por Ferrara *et al.* (2018), que também observaram uma absorção de água menor nas misturas que

continham 1% de aditivo em relação a massa de cimento, comparadas com a mistura que continha 0,8% de aditivo cristalizante.

Para a cura alternada, os resultados seguiram as tendências obtidas com o processo de cura em câmara úmida. O traço que se mostrou mais eficaz contra a permeabilidade da água foi o com 1,0% de cristalizante na mistura, diferenciando estatisticamente dos demais traços analisados, isso tanto para 28 dias quanto para 91 dias.

A figura 27 a seguir mostra o gráfico de absorção de água por capilaridade entre as idades dos CPs analisados, onde mostra que os CPs curados em câmara úmida obtiveram menor absorção de água que os demais.

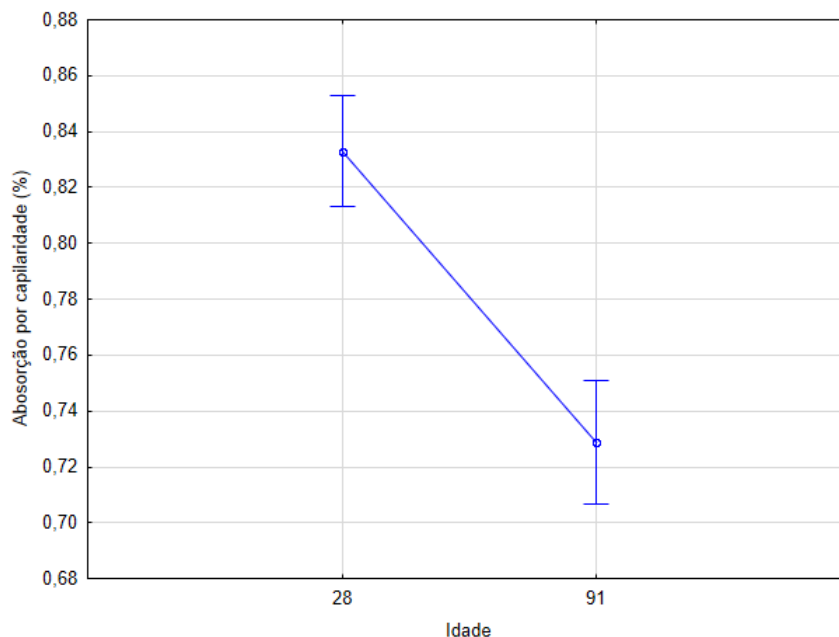
**Figura 27: Gráfico Geral de Absorção de Água por Capilaridade em Relação aos Ambientes de Cura**



Fonte: Autor, 2022

A figura 28 a seguir mostra o gráfico de absorção de água por capilaridade entre as idades dos CPs analisados, onde mostra que os ensaios realizados aos 91 dias de idade obtiveram menor absorção de água.

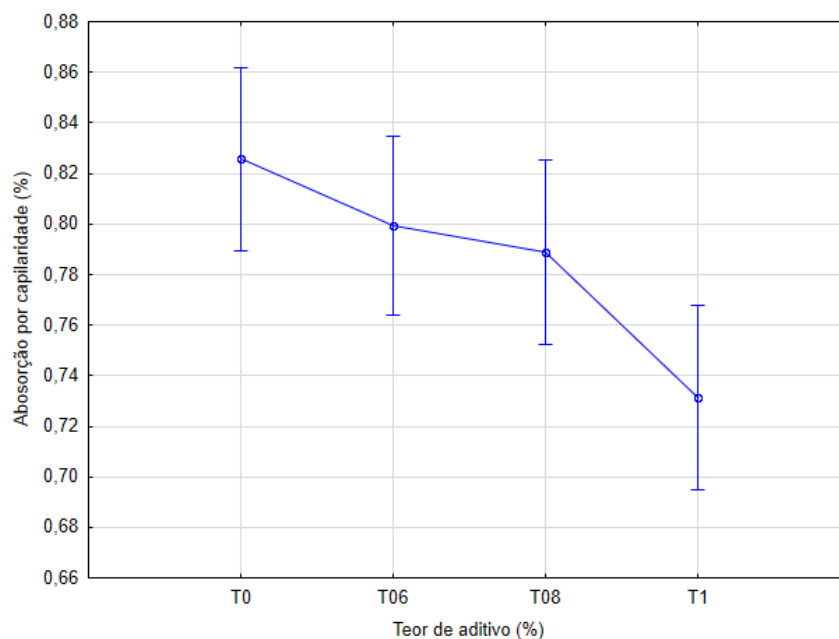
**Figura 28: Gráfico Geral de Absorção de Água por Capilaridade aos 28 e 91 dias**



Fonte: Autor, 2022

A figura 29 a seguir representa o gráfico de absorção de água por capilaridade com os diferentes teores de adição aos proporcionamentos analisados, onde mostra que a adição de 1,0% de aditivo cristalizante na mistura obteve menor absorção de água.

**Figura 29: Análise da influência do teor de aditivo cristalizante na absorção de água por capilaridade dos concretos analisados**

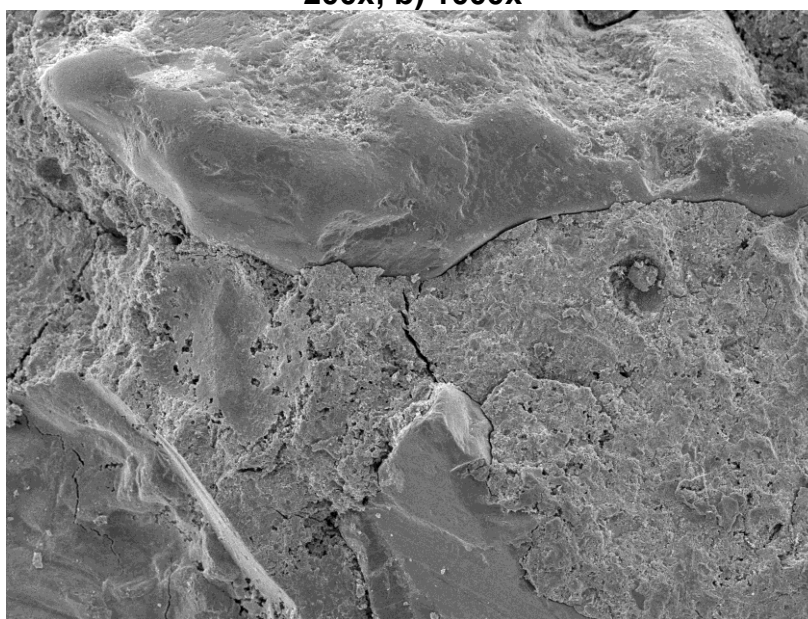


Fonte: Autor, 2022

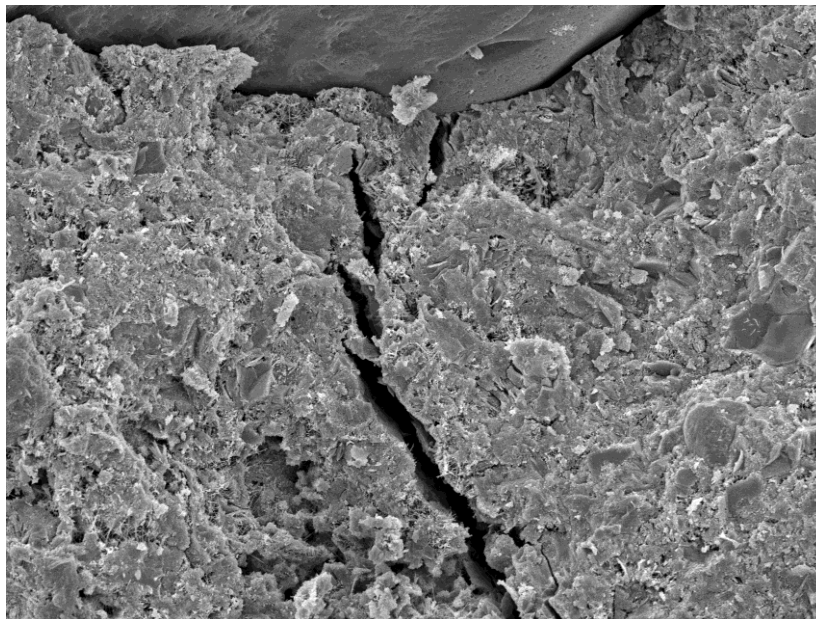
#### 4.4 ANÁLISE DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA - MEV

Nos concretos estudados, com diferentes teores de aditivos cristalizantes, foram feitas análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para as amostras curadas em câmara úmida aos 828 dias após a moldagem. A figura 30 apresenta a micrografia da superfície de fratura da amostra do concreto de referência ampliado em 1.000 vezes. Nota-se que não existe a formação expressiva de cristais nos poros da amostra, o que era o previsto, uma vez que essa amostra de referência não continha a adição de cristalizante no traço produzido. O que pode ser visto nas análises é a formação da matriz cimentícia, o agregado e a zona de transição pasta/agregado.

**Figura 30: Micrografia da superfície de fratura de uma amostra de concreto referência, utilizando o microscópio JOEL JSM-6510LV com ampliação de: a) 200x; b) 1000x**



a) 200x

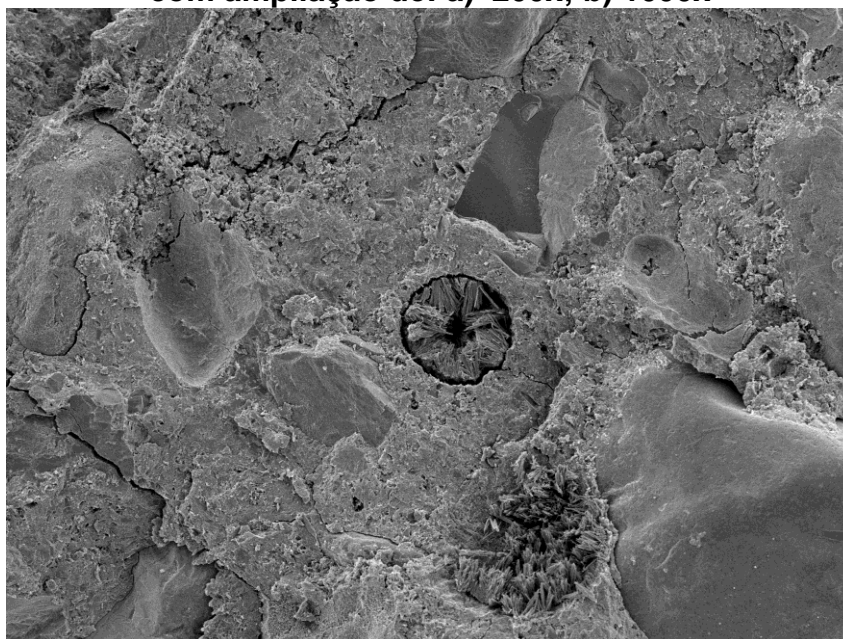


b) 1.000x  
Fonte: Autor, 2022

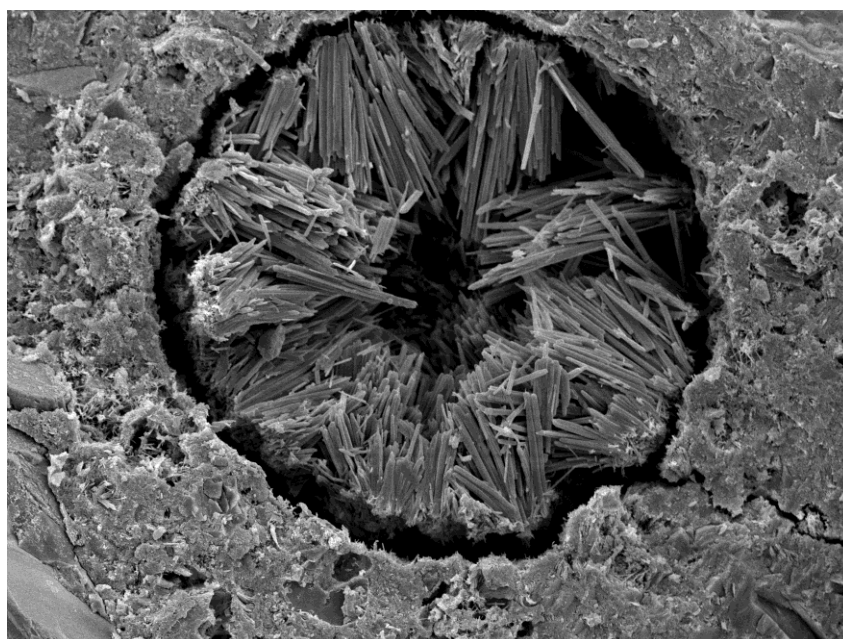
A figura 31 ilustra a micrografia da superfície de fratura de uma amostra do concreto contendo 0,6% de aditivo cristalizante em relação à massa de cimento, ampliadas em 200 vezes e em 1.000 vezes. Nota-se que existe a formação expressiva de cristais de etringita (AFt) (mineral de sulfato de alumínio e cálcio hidratado) no poro analisado, conforme sugerido por Cuenca (2018) e Pedroso (2019), resultado que comprova o efeito de fechamento dos vazios da mistura, fenômeno causado pelo aditivo cristalizante adicionado. Também é possível notar a zona de transição pasta/agregado. Resultado esse que se assemelha com os resultados encontrados por Ferrara et al (2014).



**Figura 31: Micrografia da superfície de fratura de uma amostra de concreto com 0,6% de aditivo cristalizante, utilizando o microscópio JOEL JSM-6510LV com ampliação de: a) 200x; b) 1000x**



a) 200x

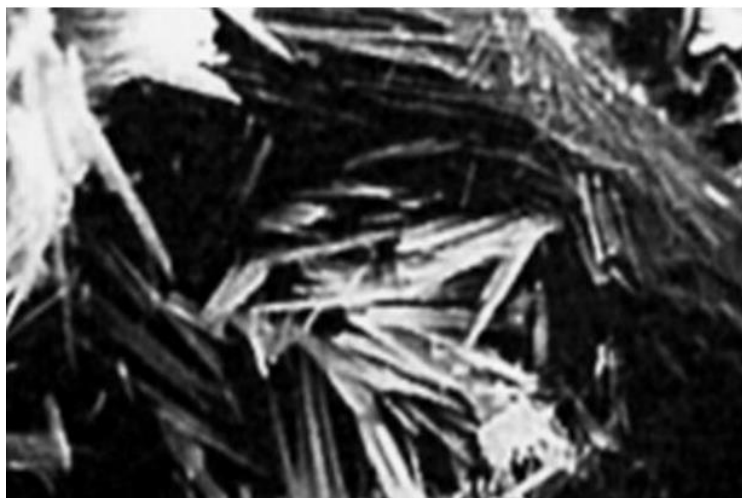


b) 1.000x

Fonte: Autor, 2022

A figura 32 representa a micrografia de cristais nas fissuras do material analisado por Takagi (2013), ampliado em 1.000x, onde nota-se o preenchimento do poro com etringita (AFt), semelhante à análise representada pela figura 33.

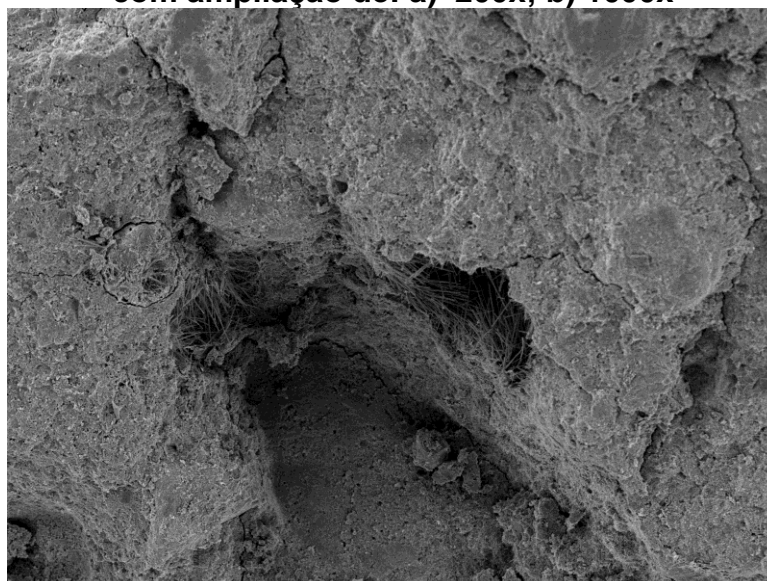
**Figura 32: Micrografia de Cristais nas Fissuras Tratadas com Aditivo Cristalizante**



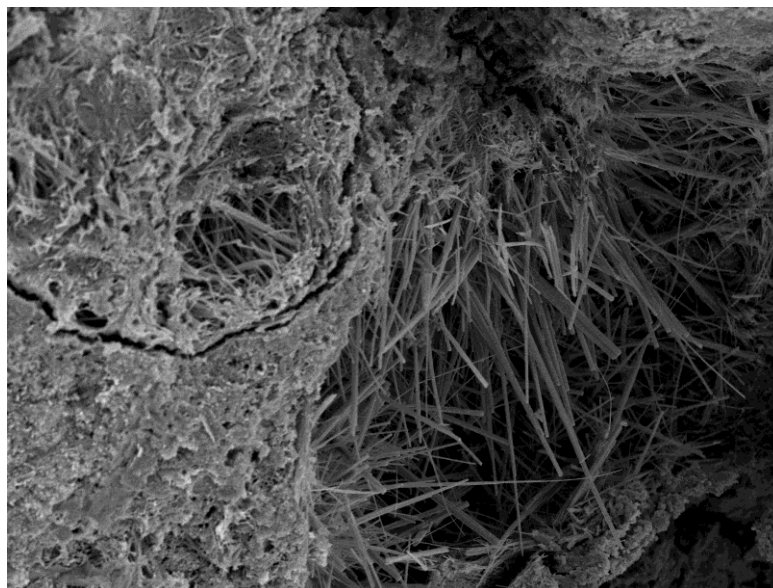
Fonte: Adaptado de Takagi, 2013

A figura 33 representa a análise feita com a amostra do concreto contendo 0,8% de aditivo cristalizante em relação a massa de cimento, ampliada em 200 vezes e em 1.000 vezes. É possível observar a formação de cristais de etringita (AFt) no poro da amostra analisada, característica sugerida pelo fabricante do aditivo cristalizante adicionado no proporcionamento. Também é mostrada a matriz cimentícia, com a zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento hidratado.

**Figura 33: Micrografia da superfície de fratura de uma amostra de concreto com 0,8% de aditivo cristalizante, utilizando o microscópio JOEL JSM-6510LV com ampliação de: a) 200x; b) 1000x**



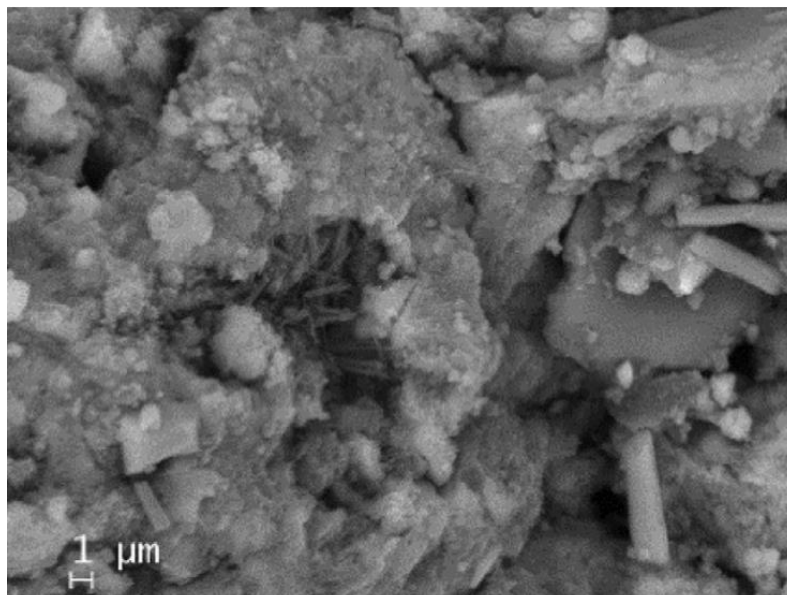
a) 200x



b) 1.000x  
Fonte: Autor, 2022

A figura 34 representa a micrografia de cristais nas fissuras do material analisado por Cuenca *et al.* (2018), onde nota-se o preenchimento do poro com cristais de etringita (AFt), semelhante à análise representada pela figura 34.

#### **Figura 34: Micrografia de Cristais nas Fissuras Tratadas com Aditivo Cristalizante**

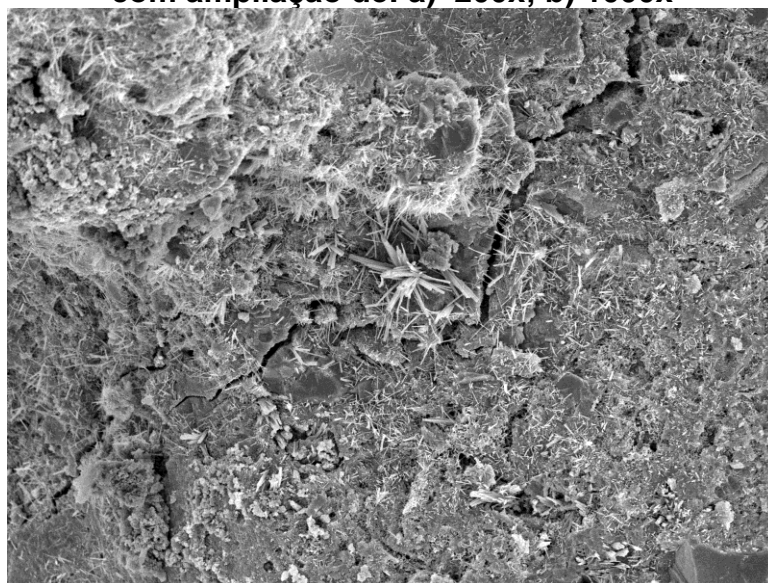


Fonte: Adaptado de Cuenca *et al.*, 2018

A figura 35 é o resultado da análise feita com a amostra do concreto contendo 1,0% de aditivo cristalizante em relação à massa de cimento, ampliada em 1.000 vezes. É possível observar a formação de cristais de etringita (AFt) no poro da

amostra analisada e por toda a superfície, resultado esse que era o esperado com a adição do aditivo cristalizante no traço do concreto, conforme sugerido pelo fabricante do produto.

**Figura 35: Micrografia da superfície de fratura de uma amostra de concreto com 1,0% de aditivo cristalizante, utilizando o microscópio JOEL JSM-6510LV com ampliação de: a) 200x; b) 1000x**



Fonte: Autor, 2022

Esses resultados se assemelham com os resultados obtidos por Pedroso (2019) em análises aos 56 dias, que também utilizou cimento CP II-F-40 no proporcionamento com 1,0% de aditivo cristalizante em relação à massa do cimento. Pedroso (2019) fez as análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) aos 56 dias após a moldagem dos corpos de prova.

## 5 CONCLUSÃO

Essa pesquisa teve como principal objetivo avaliar o efeito de aditivo cristalizante para concreto em relação a resistência à compressão axial, absorção de água por imersão e absorção de água por capilaridade, com diferentes percentuais adicionados à mistura e em ambientes de cura distintos. A seguir estão descritas as principais conclusões referentes ao estudo.

- a) Os corpos de prova rompidos aos 91 dias após a moldagem obtiveram maior resistência à compressão axial comparado com os rompidos aos 28 dias;
- b) Os corpos de prova curado em sistema alternado seco/úmido obtiveram maior resistência à compressão axial em relação aos outros ambientes de cura;
- c) Os percentuais de aditivo adicionados não influenciaram nos resultados de resistência a compressão axial;
- d) Os ambientes de cura em que os corpos de prova foram submetidos não influenciaram significativamente nos resultados de absorção de água por imersão;
- e) Os teores de aditivos dos proporcionamentos não alteraram os resultados do ensaio de absorção de água por imersão;
- f) Os corpos de prova ensaiados aos 91 dias absorveram menos água no ensaio de absorção de água por imersão, comparados com os analisados aos 28 dias;
- g) Os corpos de prova curados em câmara úmida absorveram menos umidade no ensaio de absorção de água por capilaridade, em relação aos testemunhos curados em cura alternada e ao ar livre;
- h) Aos 91 dias após a moldagem, os corpos de prova absorveram menos água que os corpos de prova com 28 dias de idade no ensaio de absorção de água por capilaridade;
- i) O concreto com teor de 1,0% de aditivo cristalizante em relação a massa do cimento absorveu menos água no ensaio de absorção de água por capilaridade comparado com os demais teores.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Mediante aos resultados obtidos nesse estudo, sugere-se o aprofundamento do estudo em algumas combinações de variáveis adotadas nesta metodologia:

- a) Avaliar a influência da adição de 1,0% de cristalizante em relação a massa de cimento nos proporcionamentos curados em câmara úmida, após 168 dias de moldagem dos corpos de prova;
- b) Avaliar a interação da adição de cristalizantes com outros tipos de cimento, e outros tipos de aditivos no mesmo proporcionamento;
- c) Avaliar outras relação A/C;
- d) Análise de MEV em todas as amostras para entendimento do comportamento global e justificativa de desempenho encontradas.

## REFERÊNCIAS

ACI Committee 212.3R-10. **Report on Chemical Admixtures for Concrete**. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2010.

ALMEIDA, Luiz Carlos de. **Concreto Armado**. Campinas, SP: Universidade Estadual de Campinas, 2002

AMARAL, Frank Cabral de Freitas. **Materiais e Processos Construtivos**. 33. ed. São José dos Campos, SP: Ita, 2005

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, RJ, 2009. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, RJ, 2013. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7.211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, RJ, 2009. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8.953**: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, RJ, 2015. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11.768**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, RJ, 2011. 19 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, RJ, 2015. 23 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.575-1**: Edificações habitacionais - Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, RJ, 2013. 71 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16.697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, RJ, 2018. 12 p.

ARAÚJO, Jose Milton de. **Curso de concreto armado**. 4. ed. Rio Grande, RS: Dunas, 2014.

BIPARVA, A.; YUERS, K. **Integral Crystalline Waterproofing Technology**, 2010.

CAPPELLESSO, Vanessa Giaretton et al. Use of Crystalline Waterproofing to Reduce Capillary Porosity in Concrete. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, Tokyo, Japan, v. 1, n. 1, p.9, 2016.

CAPPELLESSO, Vanessa Giaretton et al. Self-healing Phenomenon Evaluation in Cementitious Matrix with Different water/cement Ratios and Crack Opening Age. **International Scholarly And Scientific Research & Innovation**, Tokyo, Japan, v. 13, n. 3, p.144-151, abr. 2019.

CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 59, 2017, Bento Gonçalves, RS. **Concreto autocicatrizante com uso de cimentos Portland brasileiros de pozolana, ativados por aditivo cristalino**. São Paulo, SP: IBRACON, 2017. 14 p.

CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 60, 2018, Foz do Iguaçu, PR. **Avaliação do desempenho do uso de aditivos impermeabilizantes por cristalização capilar como barreiras à penetração de cloretos em concretos produzidos com cimento Portland de alto-forno**. São Paulo, SP: IBRACON, 2018. 18 p.

**CONCRETO & CONSTRUÇÕES**. São Paulo, SP: IBRACON, v. 55, 2009.



COUTINHO, Maria Joana Álvares Ribeiro de Souza. **Melhoria da durabilidade dos betões por tratamento da cofragem**. Porto: FEUP edições, 2005.

CUENCA, Estefanía; TEJEDOR, Antonio; FERRARA, Liberato. A methodology to assess crack-sealing effectiveness of crystalline admixtures under repeated cracking-healing cycles. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 179, p. 619-632, ago. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.261>.

DUFKA, A.; MELICHAR, T. The evaluation of the effect of crystallization additives on long term durability of self-compacting concrete. **Iop Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s.l.], v. 385, p.012011-012018, jul. 2018. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899x/385/1/012011>.

EN 934-2. **Admixtures for concrete, mortar and grout – Parte 2: Concrete admixtures – Definitions, requirements, conformity, marking and labelling**, 2001.

FERRARA, Liberato; KRELANI, Visar; CARSANA, Maddalena. A “fracture testing” based approach to assess crack healing of concrete with and without crystalline admixtures. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 68, p. 535-551, out. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.008>.

FERRARA, Liberato et al. On the use of crystalline admixtures in cement based construction materials: from porosity reducers to promoters of self healing. **Smart Materials And Structures**, [s.l.], v. 25, n. 8, p.084002-084019, 14 jul. 2016. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/25/8/084002>.

FERRARA, Liberato et al. Performance of concrete with and without crystalline admixtures under repeated cracking/healing cycles. **Matec Web Of Conferences**, [s.l.], v. 199, p.02016-02021, 2018. EDP Sciences. <http://dx.doi.org/10.1051/matecconf/201819902016>.

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

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M.. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo, SP: Instituto Brasileiro do Concreto, 2014.

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

PAZDERKA, J.; HÁJKOVÁ, E. Crustalline Admixtures and Their Effect on Slected Properties of Concrete. **Acta Polytechnica**, v. 56, p. 291, 2016.

Pedroso, Maria Goreti. **Autocicatrização do concreto com diferentes tipos de cimentos em interação com catalisador cristalino**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

RATO, V. N. P. M. **Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas**. Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2006.

SOUZA, Vicente Custódio Moreira de; RIPPER, Thomaz. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo, SP: Pini, 1998.

TAKAGI, Emilio Minoru. **Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória de alto-forno ativado por catalisador cristalino**. 2013. 130 f. Dissertação de mestrado em Engenharia de Infraestrutura Aeroportuária – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

VASCONCELOS, Augusto Carlos de. **O concreto no Brasil**. 2. ed. São Paulo, SP: Pini, 1992.

## APÊNDICES





