



**CENTRO UNIVERSITÁRIO DE BRASÍLIA – UniCEUB**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA E CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS–FATECS**

**PROGRAMA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA**

**BÁRBARA CICUTO GONÇALVES PEREIRA**  
**RAÍSSA SOARES DO NASCIMENTO**

**OS EFEITOS DE DIFERENTES ADITIVOS CRISTALIZANTES NAS**  
**PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO E**  
**ENDURECIDO**

**BRASÍLIA**  
**2017**



**BÁRBARA CICUTO GONÇALVES PEREIRA  
RAÍSSA SOARES DO NASCIMENTO**

**OS EFEITOS DE DIFERENTES ADITIVOS CRISTALIZANTES NAS  
PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO E  
ENDURECIDO**

Relatório final de pesquisa de Iniciação Científica  
apresentado à Assessoria de Pós-Graduação e  
Pesquisa pela Faculdade de Tecnologia e  
Ciências Sociais Aplicadas – FATECS

Orientação: Irene de Azevedo Lima Joffily

**BRASÍLIA  
2017**

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus por ter nos concedido força, sabedoria e capacidade de superação diante de todas as dificuldades enfrentadas ao longo desta jornada. Não há dúvidas de que sem Ele nossos objetivos não teriam sido alcançados com sucesso.

Ao Severo, que pela incrível dedicação em seu trabalho e por todo o conhecimento que nos passou, tornou-se não só um técnico, mas um amigo e professor. Obrigada por sua intensa colaboração e companheirismo. Este trabalho não seria o que é sem seu apoio.

Às nossas famílias e amigos por cada pequena comemoração, indescritível compreensão, encorajamento, torcida, motivação e suporte.

À Irene, nossa orientadora, pelo constante incentivo e ativa contribuição à nossa formação acadêmica.

À coordenação da Engenharia Civil, Assessoria Acadêmica de Pesquisa e equipe do laboratório de Materiais de Construção do UniCEUB pela contínua assistência.

Aos professores que ao longo dessa jornada nos auxiliaram, apoiaram e compreenderam nossas dificuldades.

Às empresas Ciplan e Engemix pela doação dos materiais para o desenvolvimento da pesquisa, assim como a todos os fabricantes pelo fornecimento dos aditivos cristalizantes utilizados.

## **OS EFEITOS DE DIFERENTES ADITIVOS CRISTALIZANTES NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO**

**Raíssa Soares do Nascimento – UniCEUB, PIC Institucional, aluno bolsista**  
*raissa\_soares12@hotmail.com*

**Bárbara Cicuto Gonçalves Pereira – UniCEUB, PIC institucional, aluno voluntário**  
*barbara.cicuto.pereira@gmail.com*

**Irene de Azevedo Lima Joffily – UniCEUB, professor orientador**  
*irene.lima@uniceub.br*

Os fenômenos de degradação das estruturas de concreto mais frequentes são, na maioria das vezes, ocasionados pela água como principal meio de transporte de substâncias agressivas. Dentro desse contexto, os aditivos cristalizantes contribuem para a durabilidade das construções a partir da formação de compostos cristalinos no interior dos poros e capilares do concreto, tornando-o impermeável à penetração de água e outras substâncias agressivas. Esse trabalho tem o objetivo de comparar o desempenho de quatro diferentes aditivos cristalizantes disponíveis no mercado brasileiro por meio de um estudo dos efeitos de cada um nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido. Para o desenvolvimento do estudo foi adotada uma metodologia experimental, que consistiu na execução de seis traços de concreto, sendo um traço sem aditivo para efeitos comparativos (traço piloto), quatro dosados com aditivo cristalizantes distintos e um traço complementar contendo adição de sílica ativa com a finalidade de comparar o efeito dessa adição nas propriedades do concreto em relação aos cristalizantes. De acordo com os resultados obtidos no estudo verificou-se que três dos aditivos testados reduziram a absorção capilar do concreto à água, porém com valores distintos de 88,2%, 59,1% e 42,9% em relação ao traço piloto. Em contrapartida, os resultados de resistência à compressão não indicam modificações significativas causadas pelo uso dos aditivos cristalizantes. Dentre os seis traços que compõem o estudo, a sílica ativa apresentou o melhor desempenho em termos de altura de ascensão capilar com redução de 35% quando comparada ao traço piloto, assim como na evolução da resistência à compressão, com um aumento de 24,1% na idade de 28 dias. Quanto às propriedades no estado fresco, observou-se que dois dos aditivos cristalizantes testados causaram efeitos de redução no abatimento do concreto, com diminuição de 50 mm em relação ao Traço Piloto. Com base nos resultados do estudo também foi possível concluir que, de modo geral, os aditivos cristalizantes testados apresentam desempenhos distintos e indicam a necessidade de se criar uma norma brasileira para estipular os requisitos mínimos de desempenho dos produtos comercializados no Brasil com função de cristalizantes.

**Palavras-Chave: Concreto; Aditivos cristalizantes; Sílica Ativa**

# SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1.	OBJETIVO GERAL.....	2
1.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2
2.	FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	3
2.1.	DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO .....	3
2.3.	SISTEMA DE IMPERMEABILIZAÇÃO POR CRISTALIZAÇÃO .....	6
3.	METODOLOGIA .....	11
3.1.	MATERIAIS CONSTITUINTES .....	12
3.2.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO .....	13
3.2.1	Ensaio de caracterização dos Agregados .....	13
3.2.2	Ensaio de caracterização do Cimento Portland .....	19
3.3.	TRAÇOS DE CONCRETO .....	22
3.4.	ENSAIOS DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO .....	25
3.5.	ENSAIOS DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO .....	30
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
4.1.	PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO .....	36
4.1.1.	Abatimento do tronco de cone.....	36
4.1.2.	Teor de ar incorporado .....	40
4.1.3.	Massa específica aparente.....	41
4.1.4.	Tempo de início de pega .....	42
4.2.	PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO .....	44
4.2.1.	Absorção de água por capilaridade.....	44
4.2.2.	Imagens termográficas .....	49
4.2.3.	Permeabilidade pelo método do cachimbo .....	52
4.2.4.	Resistência à compressão .....	53
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	58
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	59
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	60

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Formação dos cristais no interior do concreto. ....	6
Figura 2: Formação de cristais na fissura .....	8
Figura 3: Procedimento de peneiramento mecânico das amostras.....	14
Figura 4: Frasco de Chapman para ensaio de determinação da massa específica dos agregados....	17
Figura 5: Procedimento de lavagem das amostras para determinação do teor de material pulverulento .....	18
Figura 6: Aparelho de Vicat para determinação do tempo de pega do cimento.....	21
Figura 7: Agregados utilizados para dosagem dos traços de concreto .....	22
Figura 8: Materiais usados na dosagem do traço TSA.....	24
Figura 9: Organograma do processo de mistura dos materiais do concreto .....	25
Figura 10: Ilustração das etapas do ensaio de abatimento de tronco de cone .....	26
Figura 11: Equipamento utilizado no ensaio do teor de ar incorporado .....	27
Figura 12: Conjunto do ensaio de massa específica do concreto no estado fresco.....	29
Figura 13: Ensaio de determinação do tempo de pega do concreto – Agulha de penetração.....	30
Figura 14: Recipiente do ensaio de determinação da absorção de água por capilaridade .....	32
Figura 15: Ensaio de permeabilidade pelo método do cachimbo. ....	34
Figura 16: Ensaio de abatimento de tronco de cone .....	37
Figura 17: Partículas brancas identificadas no traço TA4.....	39
Figura 18: Imagens Termográficas do TP após 72 horas de imersão parcial dos corpos-de-prova. ...	49
Figura 19: Imagens Termográficas do TA1 após 72 horas de imersão parcial dos corpos-de-prova. .	50
Figura 20: Imagens Termográficas do TA2 após 72 horas de imersão parcial dos corpos-de-prova. .	50
Figura 21: Imagens Termográficas do TA3 após 72 horas de imersão parcial dos corpos-de-prova. .	50
Figura 22: Imagens Termográficas do TA4 após 72 horas de imersão parcial dos corpos-de-prova. .	51
Figura 23: Imagens Termográficas do TSA após 72 horas de imersão parcial dos corpos-de-prova. .	51

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Limites máximos de fissuração estabelecidos pela NBR 6118 (2014) .....	7
Tabela 2: Nomenclatura de identificação dos traços .....	11
Tabela 3: Ensaio do concreto no estado fresco e endurecido .....	12
Tabela 4: Ensaio de caracterização dos agregados .....	13
Tabela 5: Composição granulométrica dos agregados miúdos .....	15
Tabela 6: Composição granulométrica dos agregados graúdos.....	15
Tabela 7: Resultados de massa específica dos agregados miúdos .....	17
Tabela 8: Teor de material pulverulento determinado para os agregados .....	18
Tabela 9: Ensaio de caracterização do Cimento Portland .....	19
Tabela 10: Resultados do ensaio de resistência à compressão do cimento .....	20
Tabela 11: Tempo de início e fim de pega do Cimento.....	21
Tabela 12: Critérios propostos pela NBR 6118 (2014) para as classes de agressividade ambiental ..	23
Tabela 13: Proporções de dosagem dos traços de concreto do estudo.....	24
Tabela 14: Resultado do ensaio de abatimento do tronco de cone.....	36
Tabela 15: Classificações dos traços quanto ao abatimento do tronco de cone.....	38
Tabela 16: Teor de ar incorporado nos traços de concreto .....	40
Tabela 17: Resultados de massa específica dos traços .....	41
Tabela 18: Leituras de resistência à penetração do ensaio de tempo de pega do concreto .....	42
Tabela 19: Equações para obtenção do tempo de pega do concreto .....	43
Tabela 20: Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade - 19 dias .....	45
Tabela 21: Resultado do ensaio de absorção de água por capilaridade - 63 dias .....	45
Tabela 22: Resultados do ensaio de permeabilidade pelo método do cachimbo.....	52
Tabela 23: Resultados de resistência à compressão para as três idades de ensaio .....	54
Tabela 24: Síntese de resultados dos ensaios do concreto no estado fresco e endurecido.....	57

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Curva de distribuição granulométrica dos agregados miúdos .....	16
Gráfico 2: Curvas de distribuição granulométrica dos agregados graúdos .....	16
Gráfico 3: Evolução da resistência à penetração em função do tempo.....	42
Gráfico 4: Quantidade de água absorvida pelo concreto em função do tempo aos 63 dias de idade .	48
Gráfico 5: Quantidade de água penetrada no concreto em função do tempo .....	53
Gráfico 6: Evolução da resistência à compressão dos traços de concreto .....	55

## SIGLAS

°C .....	Graus célsius
a/c .....	Relação água/cimento
$\alpha$ % .....	Teor de argamassa
cm .....	Centímetro
cm <sup>2</sup> .....	Centímetro quadrado
cm <sup>3</sup> .....	Centímetro cúbico
g.....	Gramas
h.....	Hora
kg.....	Kilograma
MPa .....	Mega-pascal
$\mu$ m.....	Micrometro
mm .....	Milímetro
mL .....	Mililitro
r <sup>2</sup> .....	Coeficiente de correlação

## 1. INTRODUÇÃO

Em decorrência do crescimento de problemas de deterioração precoce das estruturas em construções civis, a durabilidade do concreto é um tema cada vez mais abordado em estudos com enfoque na ciência dos materiais e nas modernas normas de projeto de engenharia.

A durabilidade do concreto fabricado com cimento Portland é determinada pela sua capacidade de resistir à ação de intempéries, ao ataque químico, à abrasão, ou qualquer outro processo de deterioração (ACI 201.2R, 2008).

Soares (2014) aponta que, de acordo com levantamentos realizados por setores ligados à construção civil, a água em seus três estados físicos (gasoso, líquido, sólido) é uma das grandes e principais responsáveis pelas patologias nas construções, e que, a fim de evitar tais agressões e consequentes deteriorações, diversas técnicas, sobretudo sistemas de impermeabilização, vêm sendo desenvolvidos para promover estanqueidade de elementos de concreto.

Dentre os sistemas de impermeabilização disponíveis no mercado, a incorporação de aditivos cristalizantes no concreto tem se destacado como uma das técnicas que melhor atende às necessidades construtivas de obras em que há dificuldade de aplicação de barreiras físicas de impermeabilização superficial, pois proporciona uma aplicação prática que não depende de mão-de-obra especializada, o que permite a flexibilidade no planejamento da obra.

Takagi, Almeida Júnior e Oliveira (2007) definem que o tratamento químico cristalizante tem por objetivos impermeabilizar, proteger e aumentar a durabilidade de novos concretos, além de atuar na recuperação e reabilitação de estruturas existentes.

O mecanismo de ação dos aditivos cristalizantes é dado pela formação de uma estrutura cristalina insolúvel que se torna parte integrante da estrutura de concreto e leva ao aumento das características impermeáveis, prevenindo a penetração de fluidos tanto por pressões hidrostáticas positivas como negativas.

### **1.1. OBJETIVO GERAL**

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o desempenho de quatro diferentes aditivos cristalizantes comercializados no mercado brasileiro da construção civil por meio de um estudo prático dos efeitos nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido.

### **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Avaliar se há diferença de desempenho entre os quatro aditivos cristalizantes testados;
- Verificar os efeitos dos aditivos cristalizantes na trabalhabilidade e tempo de pega do concreto;
- Determinar se os aditivos cristalizantes influenciam na resistência à compressão do concreto.
- Comparar o efeito dos aditivos cristalizantes com a sílica ativa na permeabilidade e absorção capilar de água do concreto endurecido.

## **2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

O desenvolvimento de processos patológicos precoces nas construções tem tornado as exigências atribuídas à durabilidade e desempenho das estruturas de concreto cada vez mais rígidas nas últimas décadas.

Somado ao atual quadro de competitividade do mercado, são fatores que impõem ao setor da construção civil o desafio de desenvolver técnicas e soluções cada vez mais eficientes no sentido de prolongar a vida útil das estruturas, assegurando sua funcionalidade dentro dos padrões desejáveis de segurança e economia.

Considerando a abrangência e complexidade do tema, nesta seção será apresentado um conciso levantamento de fatores que interferem na durabilidade do concreto e uma revisão acerca das propriedades e mecanismos de ação dos aditivos cristalizantes.

### **2.1. DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO**

Segundo Medeiros, Andrade e Helene (2011), o conceito de durabilidade foi introduzido pelas normas de engenharia internacionais no início da década de 80, definindo-a como resultado da interação entre a estrutura de concreto, o ambiente e as condições de uso, operação e manutenção.

Com base nesse conceito, entende-se que a vida útil das estruturas depende não somente da classe de agressividade do ambiente em que está inserida a obra, mas também da capacidade do concreto de resistir às ações físicas, químicas e mecânicas a que é submetido, conforme proposto por Araujo, Rodrigues e Freitas (2000).

Para tanto, a NBR 6118 (2014) classifica diferentes tipos de ambientes quanto ao grau de agressividade e risco de deterioração da estrutura, estabelecendo requisitos que devem ser cumpridos para efeitos de projeto e execução. Conforme a classe de agressividade ambiental da obra a norma determina a relação água/cimento de dosagem, a classe de resistência do concreto e o cobrimento nominal necessário para proteger a estrutura.

Contudo, convém considerar que as condições de durabilidade do concreto estão associadas a uma série de fatores além da relação água/cimento, resistência mínima à compressão e consumo de cimento. Pode-se afirmar que em termos de durabilidade e vida útil de uma estrutura, o concreto pode ser classificado como durável desde que apresente um mínimo de resistência a intempéries, à penetração de agentes degradantes, aos esforços mecânicos e a qualquer outro mecanismo de degradação ao qual ele será exposto.

De acordo com Isaia *et al.* (2011), os fenômenos de degradação mais frequentes no concreto são, na maioria das vezes, causados pela água como principal meio de transporte de substâncias agressivas, seja na forma pura, com íons dissolvidos (sulfatos e cloretos), ou na forma de vapor.

Moreira (2016) esclarece que, devido à necessidade de construir estruturas de concreto menos permeáveis e mais resistentes aos ataques de agentes agressivos, tais como cloretos, sulfatos e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), um grande número de pesquisadores tem estudado diferentes formas de produzir concretos com uma microestrutura mais densa, a partir do uso de relação água/cimento mais baixa, da incorporação de adições minerais e um aumento no consumo de Cimento Portland.

Entretanto, estas particularidades que os tornam tão vantajosos também trazem desvantagens, sendo a principal delas a formação de fissuras em função dos diversos processos de retração. Sucessivamente, a abertura de fissuras no concreto afeta sua estabilidade e durabilidade propiciando a difusão de agentes agressivos que podem comprometer a impermeabilidade do concreto de tal maneira que embora essas medidas apresentem vantagens relevantes seu ônus pode inviabilizá-las.

Nesse sentido, é justificável que dentre as diversas medidas disponíveis para minimizar os riscos de deterioração das estruturas, a aplicação de sistemas de impermeabilização continua sendo considerada uma das soluções que garante maior segurança à vida útil das estruturas. No entanto, para a escolha do sistema de impermeabilização mais adequado às necessidades da construção é fundamental conhecer os diferentes mecanismos de transporte de fluidos que atuam no concreto, os quais dependem, principalmente, da estrutura de poros contida em seu interior.

## **2.2. MECANISMOS DE TRANSPORTE ATUANTES NO CONCRETO**

Do ponto de vista de durabilidade, os mecanismos de transporte relevantes são a permeabilidade ao ar atmosférico e a absorção capilar de água, pois a penetração destes compostos ao interior do concreto governa a formação de um ambiente favorável à ocorrência de reações degradantes como corrosão do aço, o que compromete a vida útil das estruturas.

Segundo Neville (2015), a durabilidade do concreto depende muito da facilidade com os que os fluidos, sejam líquidos ou gases, podem penetrar e se movimentar em seu interior sob determinada pressão – propriedade que normalmente é denominada permeabilidade.

Diferentemente, a absorção é definida como a capacidade do concreto de absorver e reter água por meio de tensões capilares, isto é, são geradas forças de atração pelos poros da estrutura sobre os líquidos que estão em contato com a superfície. A absorção do concreto não necessariamente está associada à permeabilidade, mas sim com a medida total do volume de poros, representando um parâmetro de maior importância no transporte de fluidos para o interior da estrutura.

É válido ressaltar que a permeabilidade é a medida do fluxo de um líquido sob pressão em materiais saturados, enquanto a absorção capilar refere-se à medida deste fluxo em materiais não saturados, o que normalmente ocorre nas reais situações envolvendo as estruturas de concreto armado que são sujeitas a ciclos de molhagem e secagem (MOREIRA, FIGUEIREDO E HELENE; 2001).

Além disso, a velocidade de penetração da água observada no ensaio de permeabilidade do concreto é da ordem de  $10^{-12}$  m/s, enquanto no ensaio de absorção de água por capilaridade este valor é da ordem de  $10^{-6}$  m/s, ou seja, um milhão de vezes mais rápido. Logo, quando comparada à permeabilidade, a absorção capilar de água é muito mais relevante como fator determinante para a penetração de agentes agressivos (CAMARINI, 1999).

Visto que a água, em seus três estados físicos (gasoso, líquido, sólido), é uma das grandes responsáveis pelas patologias nas construções, diversos sistemas e técnicas vêm sendo desenvolvidos, para que as agressões e deterioração ocasionadas pela água sejam evitadas (SOARES, 2014).

### 2.3. SISTEMA DE IMPERMEABILIZAÇÃO POR CRISTALIZAÇÃO

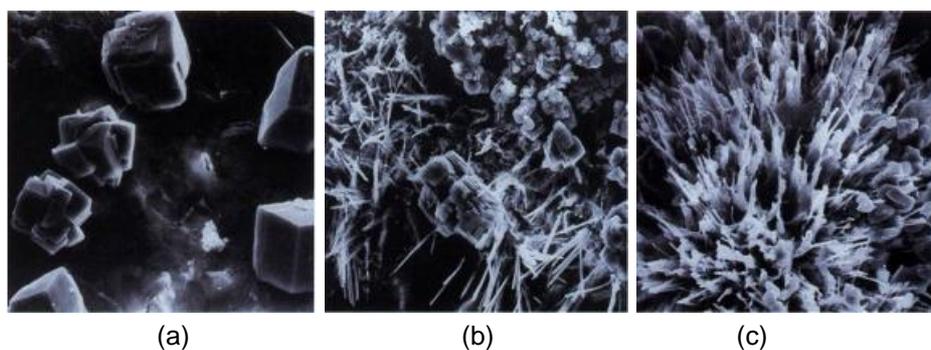
Dentro do contexto apresentado, fica evidente que a aplicação de impermeabilização nas estruturas de concreto é uma medida indispensável de proteção e preservação da vida útil das construções, capaz de minimizar ou até mesmo evitar os riscos de deterioração do concreto pelos mecanismos de transporte da água e ação de agentes agressivos.

Em situações cotidianas de obra, normalmente a técnica construtiva adotada para a impermeabilização das estruturas é a aplicação de produtos à base de cimento, materiais asfálticos e poliméricos que formam uma barreira física superficial, impedindo a entrada de água através do concreto. No entanto, os sistemas de impermeabilização superficiais apresentam algumas desvantagens, uma vez que são mais vulneráveis a deterioração causada por intempéries.

Nesse sentido, o sistema de impermeabilização por cristalização se destaca pela capacidade de proporcionar estanqueidade ao concreto em nível microscópico através do efeito de preenchimento dos poros capilares, que contribuem para o aumento das características impermeáveis, dificultando assim a penetração de líquidos e gases.

Takagi, Almeida Júnior e Oliveira (2007) definem o tratamento de cristalização como um processo físico-químico onde os ingredientes ativos do cristalizante desencadeiam reações catalíticas, totalmente compatíveis com as reações de hidratação do cimento, em que ocorre a formação de cristais não solúveis e não tóxicos numa profundidade mínima de 50 mm na estrutura do concreto (Figura 1), de modo a garantir que não haja a penetração de água por capilaridade, suportando pressões hidrostáticas tanto positivas como negativas de até 0,7 MPa.

Figura 1: Formação dos cristais no interior do concreto.  
(a) Concreto não tratado; (b) Início da formação dos cristais; (c) Cristalização final.



Fonte: Takagi, Almeida Júnior e Oliveira (2007).

A rigor, quando comparado aos sistemas convencionais de impermeabilização, o tratamento cristalizante apresenta a vantagem de ser integrado ao concreto através da formação de uma estrutura cristalina insolúvel no interior dos poros e capilares, ou seja, é um sistema ausente de filme superficial.

Por esse motivo, a tecnologia de impermeabilização por cristalização vem sendo adotada principalmente em obras com estruturas de formas complexas, onde há dificuldades de aplicação dos sistemas de impermeabilização superficiais, desde que a estrutura não esteja sob risco potencial de desenvolver fissuras ativas, por se tratar de um sistema de impermeabilização rígido.

Ourives, Bilesky e Yokoyama (2008) explicam que a formação cristalina impede a penetração de água, porém permite a passagem do vapor d'água evitando a pressão de vapor dentro do concreto. Essa ação pode ser validada pelos autores Pazderka e Hájková (2016), que após testarem o uso de dois aditivos cristalizantes no concreto, obtiveram percentuais de apenas 16% e 20% de redução na absorção de vapor d'água, afirmando que o efeito é relativamente insignificante e contribui para a durabilidade do concreto em termos de minimizar o potencial de risco oferecido à estrutura em função da pressão de vapor.

Associado à este mecanismo de ação dos aditivos, cabe destacar que nos sistemas de cristalização a formação de cristais permite a capacidade de auto-cicatrização de fissuras passivas de até 0,4 mm de abertura, máximo permitido pela NBR 6118 (ABNT, 2014) para concretos armados inseridos na classe de agressividade ambiental I (Tabela 1), o que impede novos caminhos de penetração de água.

Tabela 1: Limites máximos de fissuração estabelecidos pela NBR 6118 (2014)

Tipo de concreto estrutural	Classe de agressividade ambiental (CAA) e tipo de protensão	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações em serviço a utilizar
Concreto simples	CAA I a CAA IV	Não há	-
Concreto armado	CAA I	ELS-W $w_k \leq 0,4$ mm	Combinação frequente
	CAA II e CAA III	ELS-W $w_k \leq 0,3$ mm	
	CAA IV	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014)

Nos sistemas de impermeabilização aplicados superficialmente, como mantas e membranas, as solicitações de carga em estruturas submetidas à pressão positiva, como no caso de reservatórios, ou a pressões negativas, como em lajes de subpressão ou cortinas, podem gerar fissuras que comprometem o desempenho do sistema e reduzem a vida útil das estruturas.

Ourives, Bilesky e Yokoyama (2008) colocam em destaque que nos sistemas de cristalização, se novas fissuras aparecem durante a vida útil da estrutura, os cristais se formarão nessas fissuras também impedindo novos caminhos de passagem para a água (Figura 2). Quando não há água dentro da fissura, os cristais permanecem dormentes, porém, quando ocorre nova interação com a água, os cristais voltam a reagir, mantendo assim o concreto protegido.

Figura 2: Formação de cristais na fissura



Fonte: Ourives, Bilesky e Yokoyama (2008)

Todas as particularidades envoltórias dos aditivos cristalizantes contribuem para que o tratamento de impermeabilização por cristalização capilar seja eficaz na proteção contra a ação de intempéries e águas correntes, reduzindo o risco de danificação do concreto.

Para fins de avaliação do desempenho dos aditivos frente à permeabilidade do concreto, Mačanovskis *et. al.* (2016) concluiu que os aditivos cristalizantes reduziram em até 75% a profundidade de penetração de água em ensaios laboratoriais.

Paralelamente ao tema discorrido, Mehta e Monteiro (2014) também sugerem o efeito positivo de adições minerais no concreto: “Como a reação pozolânica envolvendo adições minerais causa um refinamento dos poros que reduz a permeabilidade do concreto, tanto os estudos de campo como os de laboratório mostraram melhoria considerável na durabilidade química do concreto contendo essas adições”.

Pesquisas realizadas com concretos com a mesma relação a/c e mesma resistência, porém com adições minerais, concluíram que a absorção capilar de água em um concreto com 8% de sílica ativa é cerca de metade do que em um concreto sem adição (LOPES *et al.*, 2007).

Para efeitos práticos a resistência à compressão normalmente é o indicador mais usado para caracterizar um concreto endurecido e em concretos dosados com aditivos cristalizantes ou com adição de sílica ativa, o efeito de preenchimento dos poros capilares contribui para a formação de uma microestrutura mais densa e conseqüentemente para maior desenvolvimento de resistência mecânica.

Neville e Brooks (2013) ressaltam que em muitas situações, outras características, como a durabilidade, impermeabilidade e estabilidade de volume podem ser de fato mais importantes que a resistência à compressão.

Contudo, é válido considerar que muitas propriedades do concreto, inclusive a impermeabilidade e a resistência química a intempéries, podem ser deduzidas a partir dos dados de resistência, pois ambas estão diretamente ligadas à estrutura de poros (MEHTA, MONTEIRO; 2014).

Em um estudo prático desenvolvido por Cappellesso *et. al.* (2016) para avaliar o desempenho de aditivos cristalizantes e adição de sílica ativa no concreto, os autores verificaram que o aditivo cristalizante utilizado proporcionou um aumento de 16% na resistência à compressão do concreto, e concluíram que o resultado pode estar em função da redução dos poros capilares que é provocada pela formação de cristais no interior do material.

Neste mesmo estudo, o concreto com adição de sílica ativa apresentou o melhor desempenho quando comparado ao de referência (sem adições ou aditivos), com um aumento de 28% na resistência à compressão e 16% de redução na absorção capilar de água por imersão total.

Diferentemente, de acordo com resultados de um trabalho apresentado por Pazderka e Hájková (2016), até os 28 dias de idade, não foram observados acréscimos ou decréscimos significantes na resistência à compressão de dois tipos de concretos dosados com aditivos cristalizantes distintos. Para ambos, a variação entre os resultados foi da ordem de 1% a menos em relação ao traço de referência (sem aditivo). Os autores propuseram a hipótese de que o desenvolvimento de resistência do concreto com o aditivo é tardio, sugerindo a realização de estudos posteriores para confirmação.

No entanto, embora o tratamento de impermeabilização por cristalização seja uma solução inovadora e em crescimento, existem poucos estudos acerca dos efeitos desse tipo de aditivo nas propriedades do concreto em seu estado fresco.

Sabe-se que as condições de operação do concreto nas primeiras idades (lançamento, adensamento e acabamento) representam fatores determinantes no desempenho final da estrutura, e normalmente são definidas através do conceito de trabalhabilidade do concreto.

Mehta e Monteiro (2014) definem que a trabalhabilidade depende de dois fatores: a consistência e a coesão, definidas pela facilidade de escoamento e pela resistência à segregação, respectivamente. A consistência é o componente físico que traduz as propriedades intrínsecas da mistura fresca nos índices de mobilidade da massa. Dentre os indicadores mais adotados para avaliar a trabalhabilidade do concreto, estão o abatimento do tronco de cone, o tempo de pega e o teor de ar incorporado.

Logo, ainda que as facilidades de aplicação do sistema de impermeabilização de estruturas por cristalização sejam indiscutíveis, também convém verificar se os aditivos cristalizantes afetam as características do concreto no estado fresco em nível de prejudicar ou até mesmo restringir a aplicabilidade e as condições de operação nas primeiras idades.

### 3. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do estudo foi adotada uma metodologia experimental, que consistiu na execução de seis traços de concreto, sendo um traço sem aditivo para efeitos comparativos, denominado Traço Piloto, quatro dosados com aditivo cristalizantes distintos e um traço complementar contendo adição de sílica ativa com a finalidade de comparar o efeito dessa adição nas propriedades do concreto em relação aos cristalizantes.

Uma família de concreto são grupos de traços que apresentam linearidade entre as propriedades relevantes, tais como a consistência e a classe de resistência. Concretos de uma mesma família normalmente devem ser provenientes de um único fabricante e conter cimentos do mesmo tipo e agregados de mesma origem geológica. Se aditivos químicos, metacaulim ou sílica ativa forem acrescentados à mistura, as novas composições do concreto podem formar famílias separadas.

Com base no conceito apresentado, pode-se afirmar que a metodologia adotada para o desenvolvimento deste trabalho consistiu em um estudo comparativo entre seis famílias separadas de concreto, para fins práticos, denominadas de “traço de Concreto”.

Na tabela 2 apresenta-se uma legenda com a nomenclatura adotada para a identificação de cada traço de concreto.

Tabela 2: Nomenclatura de identificação dos traços

<b>SIGLA</b>	<b>NOMENCLATURA</b>
TP	Traço Piloto (sem aditivo)
TA1	Traço com aditivo cristalizante 1
TA2	Traço com aditivo cristalizante 2
TA3	Traço com aditivo cristalizante 3
TA4	Traço com aditivo cristalizante 4
TSA	Traço com adição de sílica ativa

O estudo comparativo entre os traços foi desenvolvido por meio de ensaios do concreto no estado fresco e endurecido com o objetivo de determinar as propriedades consideradas de maior relevância para o estudo. Os ensaios adotados para determinação dessas propriedades e as normas de especificação são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Ensaios do concreto no estado fresco e endurecido

ENSAIO	NORMA	IDADE DO ENSAIO
Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone	NBR NM 67 (1998)	Fresco
Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico	NBR NM 47 (2002)	Fresco
Concreto e argamassa - Determinação dos tempos de pega por meio de resistência à penetração	NBR NM 9 (2003)	Fresco
Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico	NBR 9833 (2008)	Fresco
Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos	NBR 5739 (2007)	7, 28 e 63 dias
Permeabilidade de água pelo método do cachimbo		84 dias
Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade	NBR 9779 (2012)	19 e 63 dias

### 3.1. MATERIAIS UTILIZADOS

#### ▪ Cimento Portland Pozolânico – CP IV

Baseado em um estudo desenvolvido por Regattieri, Silva e Helene (1996), o cimento definido para a composição dos traços foi o Cimento Portland Pozolânico - CP IV – 32 (NBR 5736: 1991), que contém adição de pozolana em um teor de 15% a 50% em massa. De acordo com os autores acima citados, quando comparado aos outros tipos de cimento, o CP IV apresenta melhor desempenho na redução de absorção capilar do concreto.

Tendo em vista esse estudo, a decisão por esse tipo de cimento é justificada pela intenção de criar o melhor cenário no que diz respeito a fatores colaborativos à impermeabilização de forma a apresentar resultados que descrevam a máxima capacidade que esses produtos têm de promover estanqueidade.

#### ▪ **Agregados**

A escolha dos agregados se deu em função de situações convencionais observadas em usinas de concreto da região visando melhores condições de trabalhabilidade em obra. Foram utilizados dois agregados miúdos, sendo uma combinação de areia de cava, conhecida por areia rosa e uma areia artificial. Como agregado graúdo foram utilizados brita 0 e brita 1.

### **3.2. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO**

A fim de singularizar os materiais utilizados (Cimento Portland, Agregados Miúdos e Agregados Graúdos), realizou-se os ensaios de caracterização que permitem determinar algumas de suas propriedades físicas e químicas.

#### **3.2.1 Ensaios de caracterização dos Agregados**

Os ensaios de caracterização dos agregados miúdos e graúdos foram realizados seguindo procedimentos especificados pelas normas brasileiras, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4: Ensaios de caracterização dos agregados

<b>ENSAIO</b>	<b>NORMA</b>
Agregados - Determinação da composição granulométrica	NBR NM 248 (2003)
Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman	NBR 9776 (1987)
Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem	NBR NM 46 (2003)

Previamente aos procedimentos dos ensaios de caracterização foram coletadas amostras do lote de cada agregado. As amostras foram colocadas em estufa durante 24 horas para secagem completa e depois resfriadas à temperatura ambiente.

▪ **Composição granulométrica**

Os quatro agregados foram caracterizados quanto à composição granulométrica por meio do método de peneiramento estabelecido pela NBR NM 248 (2003). O objetivo do ensaio é determinar o módulo de finura e a dimensão máxima característica dos agregados, pois são fatores relevantes no que diz respeito ao custo e a trabalhabilidade do concreto. Para operação do ensaio, foi adotado o procedimento de peneiramento manual das amostras (Figura 3).

Figura 3: Procedimento de peneiramento mecânico das amostras



Fonte: Autores

Nas Tabelas 5 e 6 são apresentados os resultados finais de dimensão máxima característica e módulo de finura obtidos no ensaio e a composição granulométrica das duas amostras ensaiadas para cada agregado, expressa em percentual de material retido em cada peneira do conjunto de ensaio.

Tabela 5: Composição granulométrica dos agregados miúdos

Peneira		Areia Rosa		Areia Artificial	
Nº	mm	Amostra 1	Amostra2	Amostra 1	Amostra2
		% retida acumulada	% retida acumulada	% retida acumulada	% retida acumulada
2"	50,0	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1/2"	37,5	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1/4"	31,5	0,00	0,00	0,00	0,00
1"	25,0	0,00	0,00	0,00	0,00
3/4"	19,0	0,00	0,00	0,00	0,00
1/2"	12,5	0,00	0,00	0,00	0,00
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,00	0,00
1/4"	6,30	0,00	0,00	0,00	0,00
Nº 4	4,75	0,00	0,01	0,65	0,33
Nº 8	2,36	0,72	0,55	34,13	30,35
Nº 16	1,18	1,65	1,52	63,95	59,98
Nº 30	0,60	3,37	3,15	79,13	76,55
Nº 50	0,30	14,75	14,78	87,55	86,88
Nº 100	0,15	77,21	77,38	95,45	96,50
Fundo	-	100,51	99,97	99,93	100,00
<b>Módulo de Finura</b>		<b>0,98</b>	<b>0,97</b>	<b>3,61</b>	<b>3,51</b>
<b>D máx (mm)</b>		<b>0,60</b>	<b>0,60</b>	<b>4,75</b>	<b>4,75</b>

Tabela 6: Composição granulométrica dos agregados graúdos

Peneira		Brita 0		Brita 1	
Nº	mm	Amostra 1	Amostra2	Amostra 1	Amostra2
		% retida acumulada	% retida acumulada	% retida acumulada	% retida acumulada
2"	50,0	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1/2"	37,5	0,00	0,00	0,00	0,00
1.1/4"	31,5	0,00	0,00	0,00	0,00
1"	25,0	0,00	0,00	0,00	0,00
3/4"	19,0	0,00	0,00	0,98	0,00
1/2"	12,5	0,36	0,30	48,17	50,07
3/8"	9,50	5,27	7,47	86,96	87,78
1/4"	6,30	62,95	60,72	97,79	96,60
Nº 4	4,75	86,43	84,67	99,10	98,46
Nº 8	2,36	96,98	96,44	99,24	98,97
Nº 16	1,18	97,26	97,20	99,25	99,01
Nº 30	0,60	97,32	97,36	99,26	99,04
Nº 50	0,30	97,39	97,51	99,31	99,10
Nº 100	0,15	97,98	97,91	99,53	99,36
Fundo	-	99,37	99,93	99,98	99,99
<b>Módulo de Finura</b>		<b>5,79</b>	<b>5,79</b>	<b>6,84</b>	<b>6,82</b>
<b>D máx (mm)</b>		<b>12,5</b>	<b>12,5</b>	<b>19,0</b>	<b>19,0</b>

Nos Gráficos 1 e 2 são representadas as curvas de distribuição granulométrica dos agregados.

Gráfico 1: Curva de distribuição granulométrica dos agregados miúdos

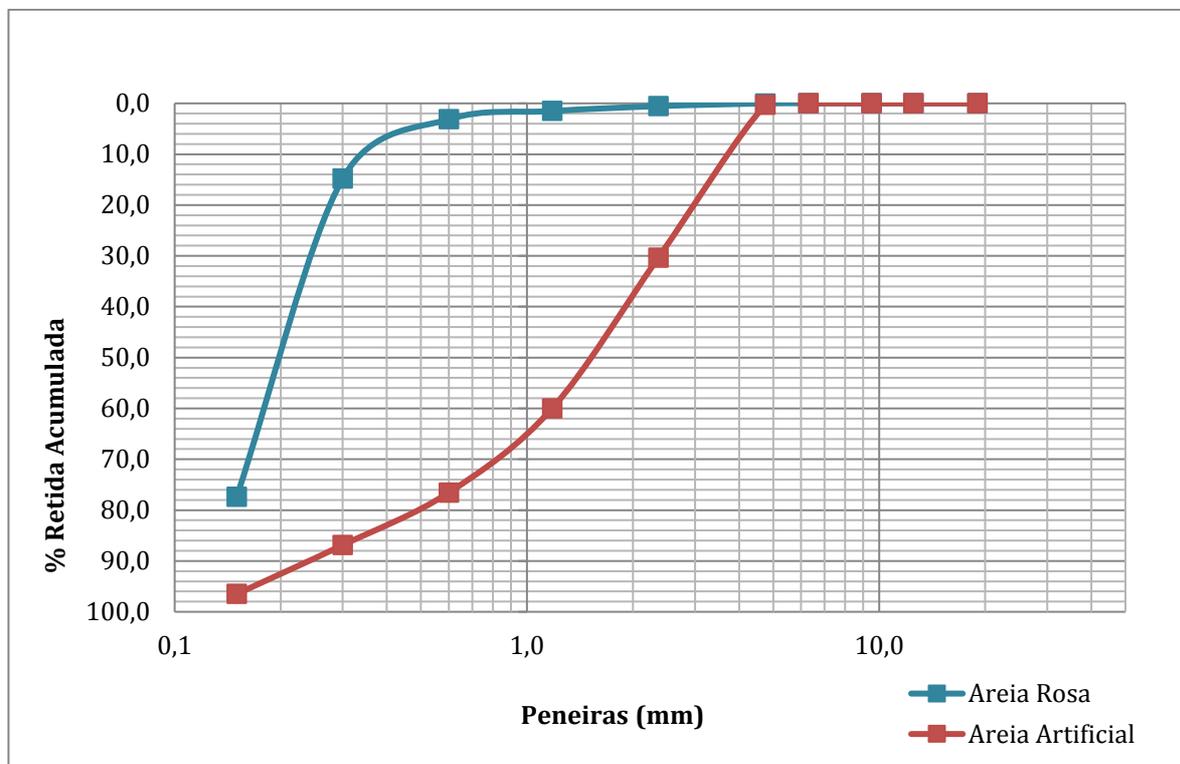
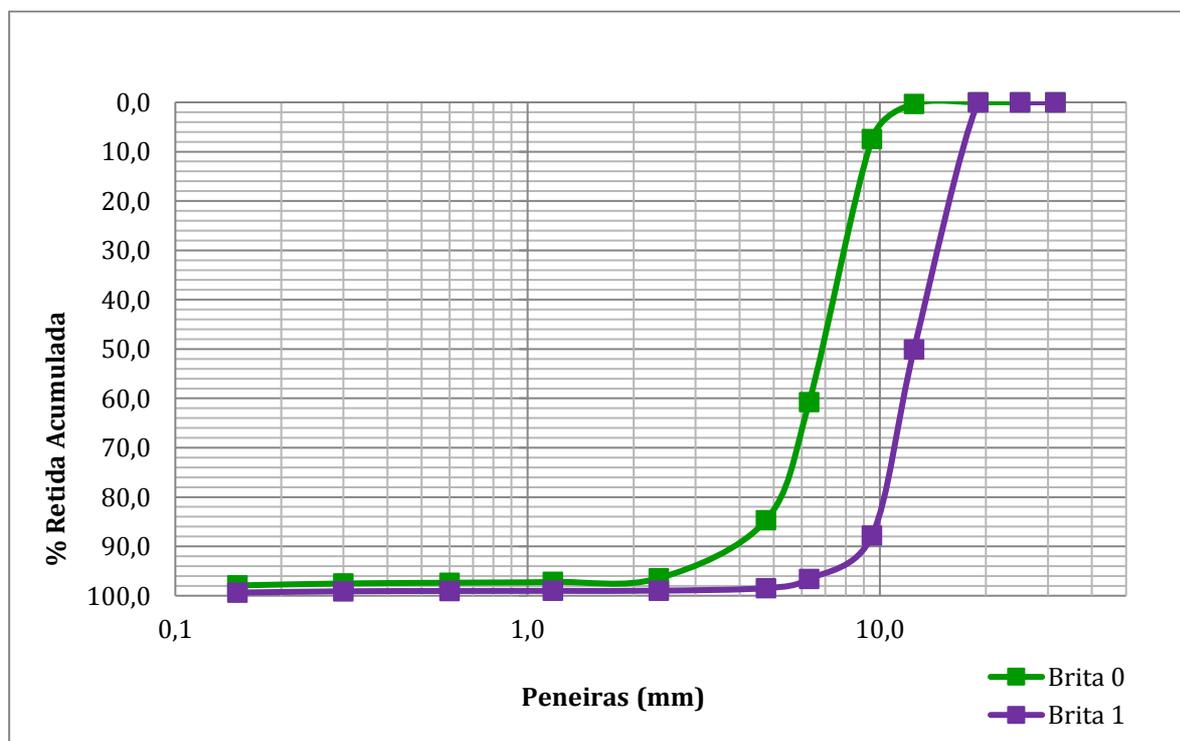


Gráfico 2: Curvas de distribuição granulométrica dos agregados graúdos



- **Massa específica**

Os agregados miúdos constituintes dos traços (Areia Rosa e Areia Artificial) foram caracterizados quanto à massa específica por meio do método de ensaio do frasco de Chapman (Figura 4).

Figura 4: Frasco de Chapman para ensaio de determinação da massa específica dos agregados



Fonte: Autores

A partir da leitura no frasco de Chapman, determinou-se a massa específica dos dois agregados miúdos, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7: Resultados de massa específica dos agregados miúdos

Massa específica $\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )		
Amostra	Areia Rosa	Areia Artificial
Amostra 1	2,63	2,72
Amostra 2	2,66	2,76

- **Teor de material pulverulento**

O ensaio de determinação de material pulverulento foi realizado com o objetivo de determinar a quantidade percentual de partículas inferiores à 0,075 mm contida nas amostras coletadas dos lotes de cada agregado, denominado material pulverulento.

A importância deste ensaio é justificada pelo efeito de retenção de água causado pelos materiais pulverulentos durante o procedimento de mistura do concreto e hidratação da pasta de cimento, o que pode resultar em problemas de retração e/ou perda de trabalhabilidade.

O método de ensaio adotado consiste em determinar a massa de material fino que passa na peneira nº 200 (75 µm) por lavagem da amostra com água (Figura 5), seguindo os procedimentos estabelecidos pela NBR NM 46 (2003). Para a lavagem dos agregados graúdos foi utilizado agente umectante de modo a auxiliar na separação das partículas mais finas das mais grossas.

Figura 5: Procedimento de lavagem das amostras para determinação do teor de material pulverulento



Fonte: Autores

Os resultados obtidos neste ensaio são apresentados na Tabela 8. Nota-se que todos os agregados apresentaram quantidade acima da máxima permitida pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

Tabela 8: Teor de material pulverulento determinado para os agregados

Agregado	Teor de pulverulento (%)	Limite máximo NBR 7211 (2009)
Areia Rosa	9,10%	5%
Areia Artificial	16,26%	5%
Brita 0	4,89%	1%
Brita 1	1,90%	1%

### 3.2.2 Ensaios de caracterização do Cimento Portland

Os ensaios de caracterização do cimento foram realizados com o objetivo de verificar se as propriedades físicas e mecânicas do lote de Cimento Portland Pozolânico (CP IV) usado na dosagem dos traços estão de acordo com os critérios da norma de especificação do Cimento Portland Pozolânico – CP IV – NBR 5736 (ABNT, 1991).

Para fins de caracterização do Cimento Portland, foram realizados os ensaios listados na Tabela 9.

Tabela 9: Ensaios de caracterização do Cimento Portland

ENSAIO	NORMA
Determinação da resistência à compressão	NBR 7215 (1997)
Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200)	NBR 11579 (2013)
Determinação da pasta de consistência normal	NBR NM 43 (2003)
Determinação do tempo de pega	NBR NM 65 (2003)

#### ▪ Resistência do Cimento Portland à compressão

O método de ensaio consiste em determinar a resistência à compressão de quatro corpos-de-prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, seguindo os procedimentos estabelecidos pela NBR 7215 (ABNT, 1997).

Os corpos-de-prova foram mantidos em processo de cura até o instante do procedimento de ruptura na prensa hidráulica. Para cada idade prevista foram rompidos 4 corpos-de-prova.

Finalmente, calcula-se a média aritmética das resistências obtidas, considerando o desvio padrão máximo de 6% permitido pela NBR 7215 (1997), para então determinar o resultado do ensaio e verificar se está em conformidade com os limites mínimos de resistência estabelecidos pela NBR 5736 (1991) para cada idade.

Conforme apresentado na Tabela 10, os resultados de resistência à compressão do CP IV – 32 para as idades de 3, 7 e 38 dias são superiores aos limites mínimos exigidos por norma.

Tabela 10: Resultados do ensaio de resistência à compressão do cimento

Idade	Resistência média à compressão (MPa)	Limite mínimo de resistência média (MPa)	Desvio Relativo Máximo (%)
3 dias	20,8	10,0	3,3%
7 dias	34,1	20,0	4,2%
28 dias	44,3	32,0	1,4%

#### ▪ Índice de finura do Cimento Portland

O princípio operacional deste ensaio segue o método estabelecido pela NBR 11579 (ABNT, 2013), que consiste no peneiramento de uma amostra de cimento para determinar o percentual de partículas com dimensão inferior à 0,075 mm, denominado índice de finura do cimento. Para determinação do índice de finura do Cimento Portland Pozolânico CP IV foi adotado o método de peneiramento manual.

Concluído todo o procedimento definidos pela norma, determinou-se a massa de cimento retida na peneira nº 200 (75 µm) para o cálculo do índice de finura.

O resultado de índice de finura do cimento obtido ao final do ensaio foi de 3,84%, atendendo o limite máximo de 8,0% permitido pela NBR 5736 (1991).

#### ▪ Pasta de consistência normal

O método de ensaio é especificado pela NBR NM 43 (2003) e estabelecido como procedimento prévio obrigatório para o ensaio de determinação do tempo de pega do cimento.

Conforme o conceito definido pela norma, pasta de consistência normal é a pasta na qual a sonda de Tetmajer penetra uma distância de  $(6 \pm 1)$  mm da placa base. O objetivo do ensaio é determinar a quantidade de água, que adicionada ao cimento, produz a pasta com essa consistência exata.

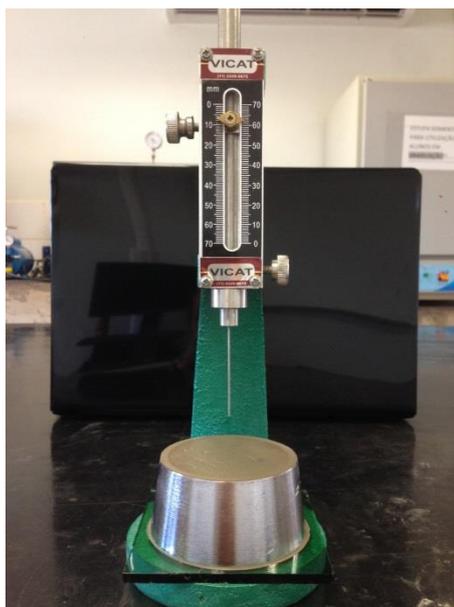
No ensaio executado para determinação da pasta de consistência normal da amostra de cimento, após 6 tentativas, a quantidade de água acrescentada à mistura para obtenção da pasta de consistência normal foi de 185 g.

▪ **Tempo de pega do cimento**

Os procedimentos desse ensaio foram adotados seguindo as diretrizes apresentadas na NBR NM 65 (ABNT, 2003) e adotando a quantidade de 185g de água, conforme dado obtido no ensaio anterior, para a produção da pasta de consistência normal.

O conjunto utilizado para os procedimentos técnicos do ensaio é composto pelo aparelho de Vicat, acoplado às agulhas de início e fim de pega (Figura 6). O ensaio tem o objetivo de coletar resultados do tempo de pega do cimento, definidos operacionalmente pelo período decorrido desde a adição da água ao cimento até a penetração de  $(4 \pm 1)$  mm da agulha de Vicat do fundo, para o início de pega, e até a penetração de 0,5 mm da agulha de Vicat na superfície, para o fim de pega.

Figura 6: Aparelho de Vicat para determinação do tempo de pega do cimento



Fonte: Autores

O resultado desse ensaio é limitado por parâmetros apresentados na NBR 5736 (1991). Na Tabela 11 comparativa dos resultados e parâmetros estipulados por norma.

Tabela 11: Tempo de início e fim de pega do Cimento

PEGA	Tempo (horas)	Limites da NBR 5736 (horas)
Início	03:20	01:00
Fim	03:50	12:00

Conforme exposto na Tabela 11 os resultados obtidos encontram-se dentro dos estipulados pela norma.

### 3.3. TRAÇOS DE CONCRETO

Para obter um concreto com maior compacidade e melhor coesão optou-se por um traço composto de dois agregados miúdos (Areia Rosa e Areia Artificial) e dois agregados graúdos (Brita 0 e Brita 1), conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7: Agregados utilizados para dosagem dos traços de concreto



Fonte: Autores

Os materiais componentes e as proporções foram mantidas para os seis traços de concreto, alterando-se apenas o aditivo cristalizante utilizado em cada um, ou adição, no caso da sílica ativa. Para os aditivos cristalizantes definiu-se a proporção de 1% sobre a massa de cimento do traço, seguindo as recomendações dos fabricantes especificadas nas fichas técnicas de cada produto. Já o traço denominado TSA foi dosado com substituição parcial do cimento (em massa) por 8% de sílica ativa.

Os agregados miúdos foram dosados em uma proporção de 2,30 kg para 1,0 kg de cimento, com um percentual de 30% de areia rosa e 70% de areia artificial. Os agregados graúdos foram dosados em uma proporção de 2,94 kg para 1,0 kg de cimento, com o percentual de 50% para a brita 0 e 50% para a brita 1, conforme proposto por Rodrigues (1998). Para as proporções dadas, o traço apresenta 52,8% de teor de argamassa.

Para evitar dificuldades de operação dos ensaios devido à possíveis perdas excessivas de abatimento causadas pelos aditivos cristalizantes, os traços foram dosados com 1% de aditivo polifuncional sobre a massa de cimento (quantidade máxima recomendada pelo fabricante). Esses aditivos se caracterizam por desempenhar funções plastificantes e retardar a pega do concreto, promovendo a manutenção da trabalhabilidade da massa.

Na primeira etapa metodológica do trabalho, produziu-se uma mistura de 8 litros de concreto padronizada sob as mesmas proporções de cimento e agregados do Traço Padrão (TP) e fator a/c inicial de 0,40 (400 g de água para 1 kg de cimento). Gradualmente, o fator a/c foi ajustado, acrescentando água até obter uma mistura com a trabalhabilidade desejada, mais especificamente com abatimento de 100 a 120 mm.

Por fim, obteve-se abatimento de 110 mm para um fator a/c = 0,60, correspondente à proporção entre a quantidade total de água adicionada à betoneira e a quantidade de cimento da mistura. Ressalta-se que fator água/cimento (a/c) de 0,60 atende ao limite máximo permitido pela NBR 6118 (ABNT, 2014) para a classe de agressividade ambiental II, conforme apresentado na Tabela 12. Todas as proporções do traço definidas são apresentadas na Tabela 13.

Tabela 12: Critérios propostos pela NBR 6118 (2014) para as classes de agressividade ambiental

Concreto	Tipo	Classe de agressividade (tabela 6.1)			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40

Fonte: NBR 6118 (2014)

Tabela 13: Proporções de dosagem dos traços de concreto do estudo

Traço	Cimento CP IV (kg)	Areia Rosa (kg)	Areia Artificial (kg)	Brita 0 (kg)	Brita 1 (kg)	Água (kg)	Aditivo Polifuncional (% sobre a massa de cimento)	Aditivo Cristalizante (% sobre a massa de cimento)	Sílica Ativa (% sobre a massa de cimento)
TP	1,0	0,69	1,61	1,47	1,47	0,60	1,0%	---	---
TA1								1,0%	---
TA2								1,0%	---
TA3								1,0%	---
TA4								1,0%	---
TSA								---	8,0%

Após o ajuste da quantidade de água dos traços, calculou-se o consumo de cimento e a quantidade dos materiais necessária para produzir em cada mistura um volume pré-determinado de concreto para a execução de todos os ensaios. Na Figura 8 é possível visualizar os materiais usados na dosagem do traço TSA (com adição de sílica ativa).

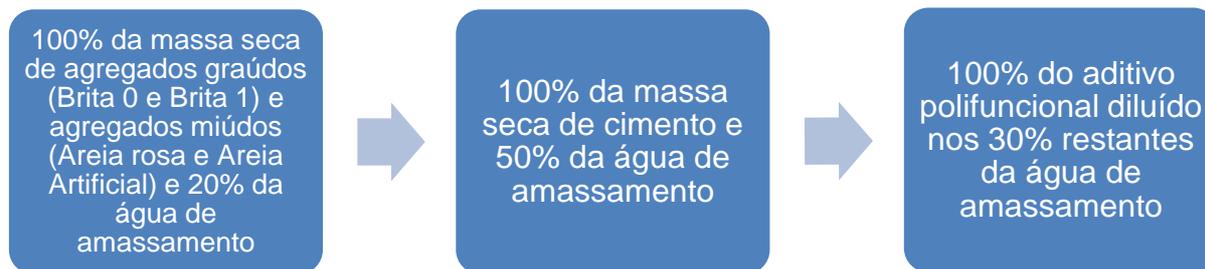
Figura 8: Materiais usados na dosagem do traço TSA



Fonte: Autores

O procedimento de mistura dos traços foi realizado mecanicamente pela mesma betoneira (com capacidade de 250 litros). O tempo de mistura também foi padronizado em torno de 8 minutos contados a partir do contato inicial da água com o cimento de maneira a evitar variabilidade dos resultados. A ordem de inserção dos materiais na betoneira foi definida em três etapas subsequentes, como apresentado no organograma da Figura 9.

Figura 9: Organograma do processo de mistura dos materiais do concreto



Para definir o método de inserção dos aditivos cristalizantes na massa de concreto, realizou-se um estudo de dosagem prática testando diferentes procedimentos de mistura especificados pelos fabricantes. Mediante esse estudo experimental observou-se que o descumprimento do procedimento de mistura recomendado para cada aditivo resultou em reduções excessivas no abatimento do traço. Logo, os aditivos cristalizantes foram acrescentados à mistura por meio de procedimentos distintos, buscando-se seguir rigorosamente a instrução de mistura recomendada para cada aditivo em suas respectivas fichas técnicas.

Na mistura do TA1, o aditivo cristalizante foi inserido na betoneira ao final da etapa 2 da mistura dos principais materiais componentes (cimento, agregados e fração da água) e antes do aditivo polifuncional diluído. Na mistura do TA2 e TA3, o aditivo cristalizante foi diluído em uma fração de 25% da água de amassamento e inserido na betoneira na terceira etapa descrita acima. Por fim, na mistura do TA4 a dosagem foi realizada na etapa 1, o aditivo cristalizante foi inserido na betoneira com 30% da massa dos agregados graúdos e miúdos e 60% da água de amassamento do traço.

Imediatamente após a operação de mistura de cada traço procedeu-se à realização dos ensaios do concreto no estado fresco e à moldagem de 10 (dez) corpos-de-prova cilíndricos, com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, seguindo os procedimentos de adensamento e cura determinados pela NBR 5738 (ABNT, 2015).

### **3.4. ENSAIOS DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO**

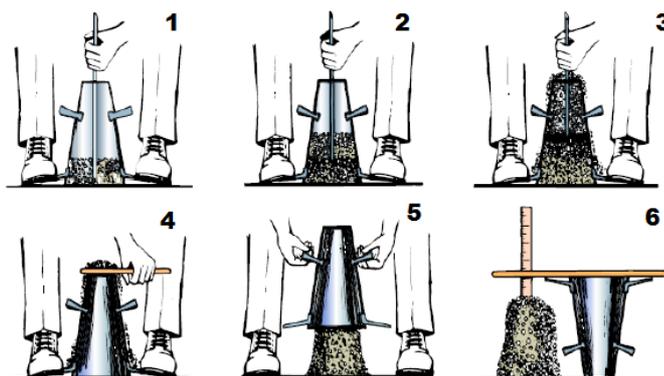
Nesta seção serão apresentados os métodos adotados em cada ensaio para determinação das propriedades do concreto, seguindo os procedimentos de norma.

### 3.4.1. Abatimento do tronco de cone

O ensaio de abatimento do tronco de cone segue os procedimentos prescritos na norma NBR NM 67 (ABNT, 1998) e tem como objetivo determinar a consistência do concreto fresco através da medida de seu assentamento.

Para a execução do ensaio utiliza-se uma placa metálica de base, uma haste metálica de adensamento e um molde de tronco de cone com as seguintes medidas: 200 mm de diâmetro na base inferior, 100 mm de diâmetro na base superior e 300 mm de altura. O abatimento é a medida da diferença de altura entre o tronco de cone e o eixo da massa de concreto após o desmolde. A Figura 10 ilustra os procedimentos de ensaio passo a passo.

Figura 10: Ilustração das etapas do ensaio de abatimento de tronco de cone



Fonte: <http://www.clubedoconcreto.com.br/2013/08/ensaio-do-slump-test-ensaio-de.html>

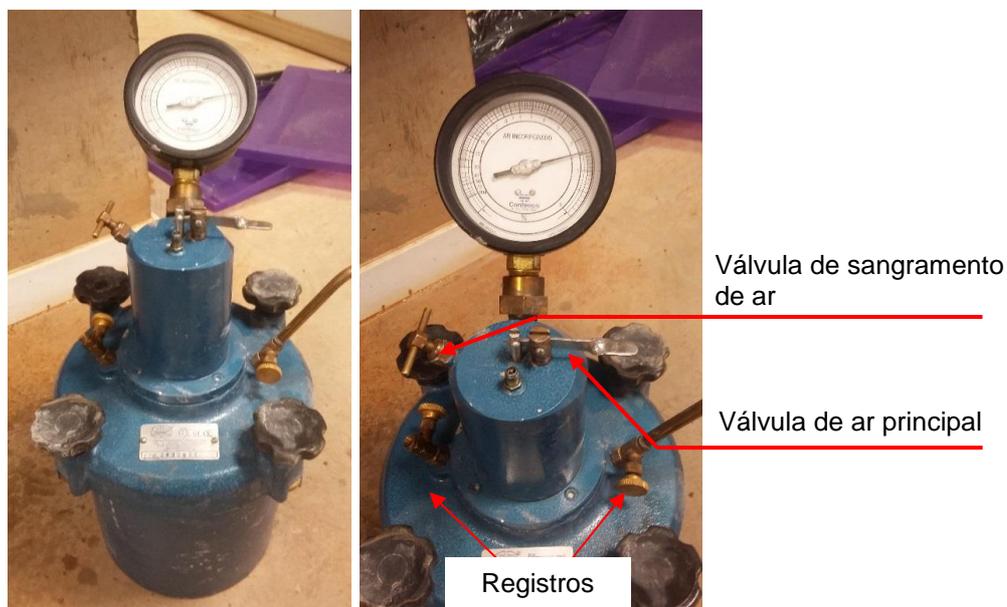
Em função dos resultados de abatimento obtidos nos ensaios, determinou-se a classe de consistência de cada traço, de acordo com os critérios especificados pela NBR 8953 (2015) Para cada classe de consistência, a norma define as aplicações típicas do concreto em obra.

### 3.4.2. Teor de ar pelo método pressométrico

O ensaio é realizado conforme os procedimentos da norma NBR NM 47 (ABNT, 2002) e tem como objetivo determinar o teor de ar da massa de concreto fresco a partir da mudança do volume do concreto causada por uma alteração na pressão.

Na norma são apresentados dois tipos de equipamentos medidores de ar disponíveis para execução do ensaio, os quais diferem em sua técnica operativa. Nesse trabalho, o equipamento utilizado para a determinação do teor de ar do concreto fresco pelo método pressométrico foi o medidor tipo B (Figura 11).

Figura 11: Equipamento utilizado no ensaio do teor de ar incorporado



Fonte: Autores

O princípio operacional deste medidor consiste em igualar as pressões de um volume de ar conhecido, a uma pressão conhecida, em uma câmara de ar estanque, com um volume de ar desconhecido na amostra de concreto.

Inicialmente, enche-se o recipiente com a amostra de concreto em quatro camadas com altura de aproximadamente 10 cm. Utilizando uma haste metálica, cada camada é adensada manualmente com 14 golpes verticais distribuídos a cada 10.000 mm<sup>2</sup> de superfície.

Finalizados os procedimentos de enchimento e adensamento, deve-se rasar a superfície da amostra contida no recipiente com régua metálica deslizando-a sobre a borda em movimentos de vai-e-vem até sua regularização, limpar cuidadosamente as bordas do recipiente e da tampa e em seguida proceder ao fechamento hermético do aparelho.

Posteriormente, a válvula de ar principal é fechada e os dois registros localizados na tampa são abertos. Com auxílio de uma seringa, injeta-se água através de um dos registros para que o ar existente entre a tampa e a superfície de concreto seja totalmente eliminado. A água deve ser introduzida até que saia através do registro oposto sem bolhas de ar. Para expulsar o ar aprisionado acima da superfície da amostra de concreto, deve-se sacudir o equipamento suavemente.

Após fechar a válvula de sangramento de ar, deve-se bombear ar para a câmara até que o ponteiro do manômetro esteja na posição inicial, indicando pressão igual a zero. Por fim, os dois registros devem ser fechados e a válvula de ar principal aberta. Quando necessário, o manômetro é estabilizado até o ponteiro de pressão inicial por expulsão de ar, abrindo suavemente a válvula de sangramento, ou repetindo o procedimento de bombeamento.

Para melhor estabilizar a pressão antes da leitura de porcentagem de ar, devem ser efetuados golpes suaves com os dedos e então a leitura da porcentagem de ar na escala do manômetro é registrada. O resultado é expresso em porcentagem com aproximação de 0,1% para teores até 2% e 0,2% para teores de 2% a 8%.

### **3.4.3. Massa específica pelo método gravimétrico**

Para determinar a massa específica do concreto no estado fresco foi adotado o método gravimétrico de ensaio, conforme os procedimentos prescritos pela NBR 9833 (2008). O método consiste em determinar a massa de concreto fresco (em kg) contido em um recipiente de medidas conhecidas.

Na Figura 12 é possível visualizar o recipiente usado no ensaio para a determinação da massa do conjunto.

Figura 12: Conjunto do ensaio de massa específica do concreto no estado fresco



Fonte: Autores

#### **3.4.4. Tempo de início de pega do concreto**

O tempo de início de pega de cada traço foi determinado de acordo com o princípio do método de resistência à penetração, seguindo os procedimentos especificados pela NBR NM 9 (ABNT, 2003).

Segundo o conceito definido pela norma, o tempo de início de pega do concreto é correspondente ao período de tempo decorrido desde a adição de água na betoneira até o momento em que a leitura de resistência à penetração é igual a 3,5 MPa.

Primeiramente, uma amostra da mistura de concreto foi separada e peneirada na peneira nº 4 (4,75 mm) até obter uma amostra constituída apenas de argamassa, de modo a evitar erros na leitura de penetração provocados por partículas de agregado graúdo.

Em seguida, com a argamassa obtida através do peneiramento preencheu-se um molde cilíndrico até a altura de 130 mm, conforme recomendado pela norma. O procedimento de adensamento foi conduzido manualmente com haste metálica e foram efetuados 40 golpes uniformemente distribuídos em toda a superfície da amostra.

Por fim, a amostra foi mantida em repouso e em intervalos regulares de tempo penetrou-se a agulha de ensaio na argamassa para determinar a resistência à penetração da amostra, como é mostrado na Figura 13. O ensaio foi concluído quando a leitura de resistência à penetração da agulha foi de 4,50 MPa, equivalente a escala máxima de medida da agulha.

Figura 13: Ensaio de determinação do tempo de pega do concreto – Agulha de penetração



Fonte: Autores

### **3.5. ENSAIOS DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO**

Os ensaios do concreto no estado endurecido foram executados em idades pré-determinadas de modo a avaliar a evolução dos efeitos dos aditivos cristalizantes nas propriedades do concreto.

#### **3.5.1 Absorção de água por capilaridade**

Para determinação da absorção de água por capilaridade foram adotados os procedimentos de ensaio especificados pela NBR 9779 (ABNT, 2012). O método consiste em medir o aumento de massa de corpos-de-prova parcialmente imersos em água para determinar a absorção do concreto por capilaridade e a ascensão capilar ao final do ensaio.

Em 2016, os autores Pazderka e Hajková desenvolveram um estudo com aditivos cristalizantes e concluíram que o efeito total de impermeabilização dos concretos dosados com aditivos cristalizantes se inicia aproximadamente no 12º dia de idade do traço. Baseado nesse estudo optou-se por realizar o ensaio em duas idades (19 dias e 63 dias) de modo a comparar o desempenho dos aditivos cristalizantes na redução da absorção de água do concreto em função de sua idade.

No ensaio de cada traço a amostra é constituída de 3 (três) corpos-de-prova cilíndricos. Os procedimentos prévios à execução do ensaio incluíram o armazenamento dos corpos-de-prova em ciclos de cura de catorze dias submerso (cura úmida) e sete dias exposto ao ar (cura seca) a fim de simular ciclos de molhagem e secagem para induzir o processo de cristalização.

No dia anterior ao ensaio, os corpos-de-prova foram mantidos em estufa a  $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$  durante aproximadamente 24 horas até a secagem completa. Em seguida, os corpos-de-prova são retirados para resfriamento ao ar, até atingir a temperatura de  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ , e então, determina-se a massa seca ( $m_s$ ) de cada um.

O método de ensaio estabelecido pela norma recomenda que seja instalado um recipiente preenchido com água onde os corpos-de-prova devem ser posicionados sobre suportes de modo que o nível de água no recipiente permaneça constante a  $5 \pm 1 \text{ mm}$  acima da face inferior dos corpos-de-prova, evitando a molhagem de outras superfícies.

Em atendimento à norma, o ensaio foi executado usando três tampas de plástico como suporte para cada um dos corpos-de-prova. As tampas foram posicionadas com a parte aberta para cima e preenchidas com água de modo a manter toda a superfície da face inferior dos corpos-de-prova em contato com a água (Figura 14).

Figura 14: Recipiente do ensaio de determinação da absorção de água por capilaridade



Fonte: Autores

Durante o ensaio, devem ser registradas as massas saturadas (*msat*) dos três corpos-de-prova após os períodos de 3h, 6h, 24h, 48h e 72h, contado a partir do momento de início da imersão parcial no recipiente preenchido com água.

Finalizado o período de 72 horas de imersão parcial, a norma propõe o procedimento de ruptura dos corpos-de-prova à compressão diametral para visualização da altura de ascensão capilar da água no interior do concreto. Para que a amostra dos dois ensaios nas diferentes idades fosse constituída pelos mesmos corpos-de-prova, de modo a evitar variabilidade dos resultados, esse método foi adotado somente para o ensaio na idade de 63 dias.

Complementarmente aos procedimentos padrões de ensaio, antes da ruptura os corpos-de-prova foram submetidos ciclos de imersão parcial em água com temperatura controlada durante 15 minutos, sendo que ao final de cada procedimento os corpos-de-prova foram retirados do recipiente de ensaio para o registro imagens termográficas objetivando visualização da altura de ascensão capilar.

Para tanto, após a determinação da massa saturada dos corpos-de-prova com 72h de imersão parcial, procedeu-se ao preparo de dois recipientes com água em temperatura quente e fria. A água contida no recipiente de ensaio já instalado foi resfriada com cubos de gelo até atingir, aproximadamente, a temperatura de 5° C. Separadamente, instalou-se outro recipiente de ensaio utilizando um equipamento

banho maria digital preenchido com água o suficiente para manter o nível de  $5 \pm 1$  mm na base do corpo-de-prova e aquecido à temperatura aproximada de  $65^{\circ}\text{C}$ . Coloca-se a observação de que no intervalo de preparação dos recipientes os corpos-de-prova permaneceram fora do recipiente de ensaio.

Os registros termográficos permitem a visualização da região do corpo-de-prova que absorveu água através da diferença térmica entre as regiões, indicada pela coloração da imagem. Por fim, os corpos-de-prova foram rompidos à compressão diametral para permitir a visualização da altura de ascensão capilar da água em seu interior na idade de 63 dias.

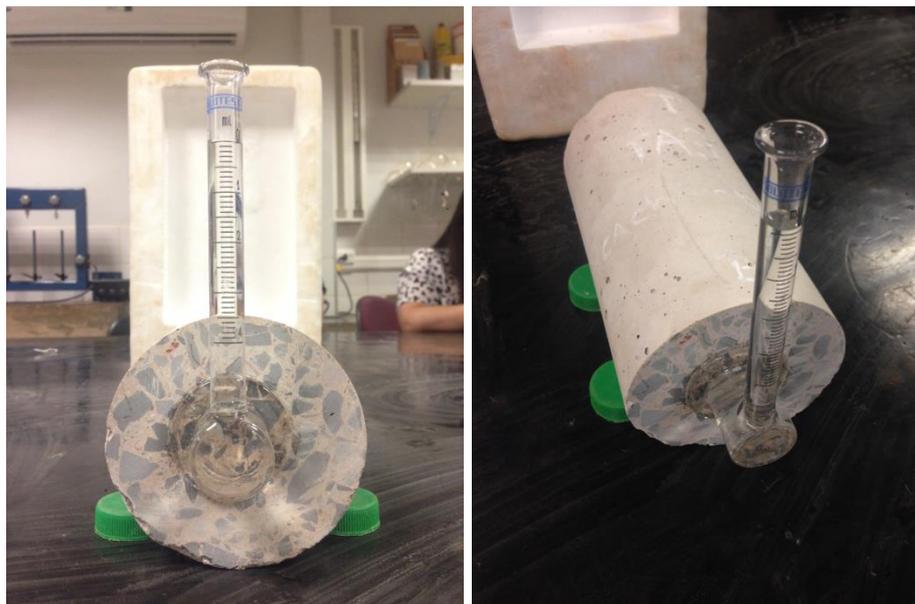
### **3.5.2 Permeabilidade pelo método do cachimbo**

O ensaio pelo método do cachimbo permitiu a avaliação da permeabilidade sob pressão do concreto com a idade de 84 dias. O procedimento consiste em determinar a penetração de água através da superfície de testemunhos de corpos-de-prova submetidos à pressão de 4 mL de água contida em um cachimbo de vidro.

O cachimbo de vidro é um instrumento de escala graduada em mililitros (mL) com capacidade de  $4\text{cm}^3$  de armazenamento, conforme apresentado na Figura 15a.

No procedimento de montagem do ensaio deve-se envolver o bordo do cachimbo com silicone e pressioná-lo sobre a superfície transversal do corpo-de-prova até a fixação completa (Figura 15b). Após a colagem é necessário verificar se o cachimbo está completamente vedado de modo a garantir a total estanqueidade do conjunto.

Figura 15: Ensaio de permeabilidade pelo método do cachimbo.



(a) Cachimbo de vidro com escala graduada em mL; (b) Cachimbo acoplado ao corpo-de-prova.  
Fonte: Autores

Em seguida, preenche-se o cachimbo com água até a marca de 4,0 ml indicada na escalada graduada e mantêm-se o conjunto em repouso. Para avaliar a permeabilidade do concreto ao longo do tempo de ensaio foram efetuadas leituras periodicamente nos intervalos de tempo decorridos em 3h, 6h, 24h e 48h após o preenchimento do cachimbo com água. Em cada leitura é registrada a quantidade de água absorvida pelo concreto, indicada na escala graduada.

O resultado de ensaio é obtido após efetuada a leitura de 48 horas de início do ensaio conforme apresentado na tabela abaixo.

### 3.5.3 Resistência à compressão

Com a finalidade de avaliar a influência dos aditivos cristalizantes na resistência mecânica do concreto, executou-se o ensaio de determinação da resistência à compressão, seguindo os procedimentos recomendados pela NBR 5739 (ABNT, 2007).

Cada traço foi ensaiado nas idades de 7, 28 e 63 dias padronizadas pela norma. No ensaio de cada idade romperam-se três corpos-de-prova de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Conforme recomenda a norma, os corpos-de-prova foram mantidos em processo de cura úmida submersa em água até o momento do ensaio.

Utilizando um paquímetro digital, coletaram-se três medidas de diâmetro dos corpos-de-prova. Com a média aritmética das três medidas, determinou-se o diâmetro de cada corpo-de-prova para o cálculo de tensão.

Conforme recomenda a norma internacional ASTM C 1231/2012, os corpos-de-prova foram previamente preparados para o ensaio, usando um par de almofadas de neoprene acopladas em bases metálicas para o nivelamento das faces do topo e da base.

Em seguida, os corpos-de-prova são posicionados no centro do equipamento de prensa hidráulica mecânica e submetidos à aplicação de carga de compressão uniaxial, em velocidade constante, até a ruptura. A leitura fornecida pelo equipamento corresponde ao pico de carga do ensaio, ou seja, a carga máxima de compressão suportada pelo corpo-de-prova.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios acima descritos bem como uma discussão acerca dos efeitos causados pelos aditivos cristalizantes nas propriedades do concreto avaliadas no estudo.

### 4.1. PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

Em função da importância das condições de operação do concreto nas primeiras idades em situações práticas dentro de obra, buscou-se verificar se os aditivos cristalizantes modificam as propriedades do concreto fresco abaixo listadas:

- Abatimento do tronco de cone (*slump*)
- Teor de ar incorporado pelo método pressométrico
- Tempo de início de pega por meio de resistência à penetração
- Massa específica pelo método gravimétrico

#### 4.1.1. Abatimento do tronco de cone

Os resultados de abatimento obtidos dos seis traços de concreto encontram-se apresentados na Tabela 14 e foram registrados *in loco* com imagens, conforme apresentado a seguir na Figura 16.

Tabela 14: Resultado do ensaio de abatimento do tronco de cone

Traço	Abatimento (mm)
TP	100
TA1	135
TA2	110
TA3	90
TA4	40
TSA	90

Figura 16: Ensaio de abatimento de tronco de cone



Fonte: Autores

Em função dos resultados de abatimento obtidos nos ensaios, determinou-se a classe de consistência de cada traço, de acordo com os critérios especificados pela NBR 8953 (ABNT, 2015). Para cada classe de consistência, a norma define as aplicações típicas do concreto em obra. Na Tabela 15 são apresentados os resultados de abatimento dos cinco traços, a classe de consistência e as aplicações típicas de cada um.

Tabela 15: Classificações dos traços quanto ao abatimento do tronco de cone

Traço	Abatimento (mm)	Classe	Aplicações típicas (NBR 8953)
TP	100	S100	Elementos estruturais, com lançamento convencional do concreto
TA1	135	S100	Elementos estruturais, com lançamento convencional do concreto
TA2	110	S100	Elementos estruturais, com lançamento convencional do concreto
TA3	90	S50	Alguns tipos de pavimentos e de elementos de fundações
TA4	40	S10	Concreto extrusado, vibroprensado ou centrifugado
TSA	90	S50	Alguns tipos de pavimentos e de elementos de fundações

Verifica-se que os quatro aditivos cristalizantes testados neste estudo causaram efeitos distintos no abatimento do concreto quando comparados ao TP. Enquanto os resultados de abatimento dos traços TA2, TA3 e TSA apresentaram uma variação de apenas 10 mm em relação ao TP, o traço TA1 resultou em um aumento de 35 mm, enquanto o TA4 causou uma redução de 60 mm em relação ao traço de referência (TP).

Na ficha técnica do aditivo cristalizante utilizado no TA1, o próprio fabricante adverte que, apesar da mistura apresentar um aspecto de menor umidade do que o convencional, o aditivo pode causar um aumento no abatimento, o que de fato, é constatado no ensaio, cujo resultado foi de 135 mm.

De modo geral, pode-se afirmar que o aditivo empregado no TA2 foi o que causou efeitos menos significantes no abatimento do concreto, pois a variação obtida não implicou na alteração da classe de consistência do traço.

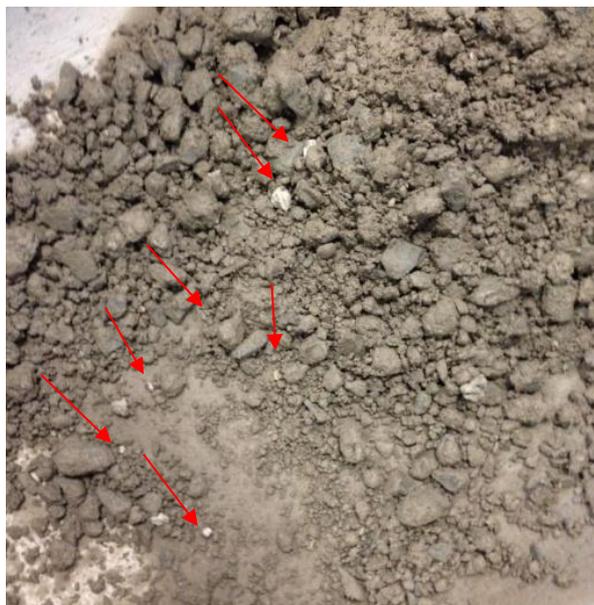
Observa-se que, embora o aditivo cristalizante correspondente ao TA3 e a sílica ativa, empregada no TSA, tenham provocado uma redução de apenas 10 mm no abatimento do traço, esse efeito causou a modificação da classe de consistência do concreto de acordo com a NBR 8953 (2015), o que implica em restrições de aplicação para determinados tipos de obra.

A hipótese estabelecida é de que o procedimento de mistura recomendado pelo fabricante pode ter influenciado na redução excessiva do abatimento do TA4, pois observou-se que diferentemente de quando adicionou-se a água na betoneira gradativamente nos demais traços, a adição de 60% da água na primeira etapa de produção do traço proporcionou a formação de uma mistura não homogênea, prejudicando a coesão do concreto, o que pode ser nitidamente visualizado no registro fotográfico apresentado anteriormente (Figura 16).

Outra peculiaridade observada durante o procedimento de misturado TA4 foi que após a inserção do aditivo na betoneira, ocorreu uma elevação imediata na temperatura da massa. Deve-se ressaltar que essa condição pode acelerar a perda de água da mistura e acarretar no processo de aceleração da pega do concreto.

Cabe, ainda, colocar que particularmente no TA4 foi possível identificar a formação de pequenas partículas de coloração branca dispersas na mistura após a adição da água, possivelmente devido ao início das reações de cristalização do aditivo (Figura 17). Acredita-se que essas partículas sejam originadas a partir da formação de aglomerações dos cristais logo após a mistura do aditivo com a água, contribuindo para redução no abatimento de tronco de cone.

Figura 17: Partículas brancas identificadas no traço TA4



Fonte: Autores

#### 4.1.2. Teor de ar incorporado

As leituras do teor de ar incorporado efetuadas no aparelho medidor pressométrico são apresentadas na Tabela 16.

Tabela 16: Teor de ar incorporado nos traços de concreto

Teor de ar incorporado (%)					
TP	TA1	TA2	TA3	TA4	TSA
1,25	3,1	1,6	10,5	1,4	1,5

Analisando os resultados obtidos é possível verificar que em relação ao Traço Piloto, o teor de ar incorporado foi superior para todos os traços dosados com aditivos cristalizantes, bem como para o traço com adição de sílica ativa.

Os traços TA2, TA4 e TSA apresentaram valores próximos ao traço de referência, com menos de 0,4% de diferença. Já o TA1 incorporou mais que o dobro e o TA3 chegou a aumentar em 8 vezes o teor de ar incorporado.

Geyer e Sá (2006) afirmam que concretos convencionais contêm no seu interior, mesmo sem o uso de aditivos incorporadores de ar, 1 a 3% do seu volume em ar aprisionado, devido ao processo de mistura.

Portanto, os resultados indicam que, com exceção do TA3, o emprego dos aditivos cristalizantes testados nos demais traços não influencia significativamente na quantidade de ar incorporado à mistura. Evidentemente, a baixa variabilidade entre os resultados pode estar associada ao grau de adensamento das amostras de ensaio e as condições de mistura do traço.

Na ficha técnica do aditivo cristalizante do TA3 não são colocadas observações de que o aditivo apresente tendência de incorporar maiores quantidades de ar à mistura. Ressalta-se que embora o de uma incorporação de ar elevada, o abatimento sofre uma pequena redução quando comparado com o TP.

### 4.1.3. Massa específica aparente

O resultado de massa específica aparente do concreto é calculado pela relação entre a massa do concreto e o volume do recipiente. Na Tabela 17 são apresentados os resultados de massa específica e aparente, além do rendimento e consumo de cimento do traço.

Tabela 17: Resultados de massa específica dos traços

Traço	$\rho_{ap}$ (kg/m <sup>3</sup> )	Rendimento (m <sup>3</sup> )	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )
TP	2387,55	0,066	348,88
TA1	2394,29	0,066	349,86
TA2	2350,51	0,067	343,47
TA3	2414,49	0,067	352,82
TA4	2363,98	0,067	345,44
TSA	2397,66	0,066	326,14

**$\rho_{ap}$  (kg/m<sup>3</sup>): massa específica aparente do concreto**

A massa específica de todos os traços variou de 2350,5 a 2414,5 kg/m<sup>3</sup>, apresentando pouca variação em relação ao traço piloto, que ficou entre uma redução de 1,5% a um aumento de 1,1%. Como os resultados de massa específica foram próximos, resultaram em valores similares de rendimento e consumo de cimento.

De acordo com os critérios de classificação do concreto quanto à massa específica, os concretos dos cinco traços são classificados como normais, pois apresentam valores compreendidos no intervalo entre 2000 kg/m<sup>3</sup> e 2800 kg/m<sup>3</sup>.

Em função da invariabilidade das massas específicas dos concretos, também foi possível concluir que todos os aditivos cristalizantes testados mantém o padrão de dosagem do concreto quanto ao rendimento da mistura e consumo de cimento do traço.

#### 4.1.4. Tempo de início de pega

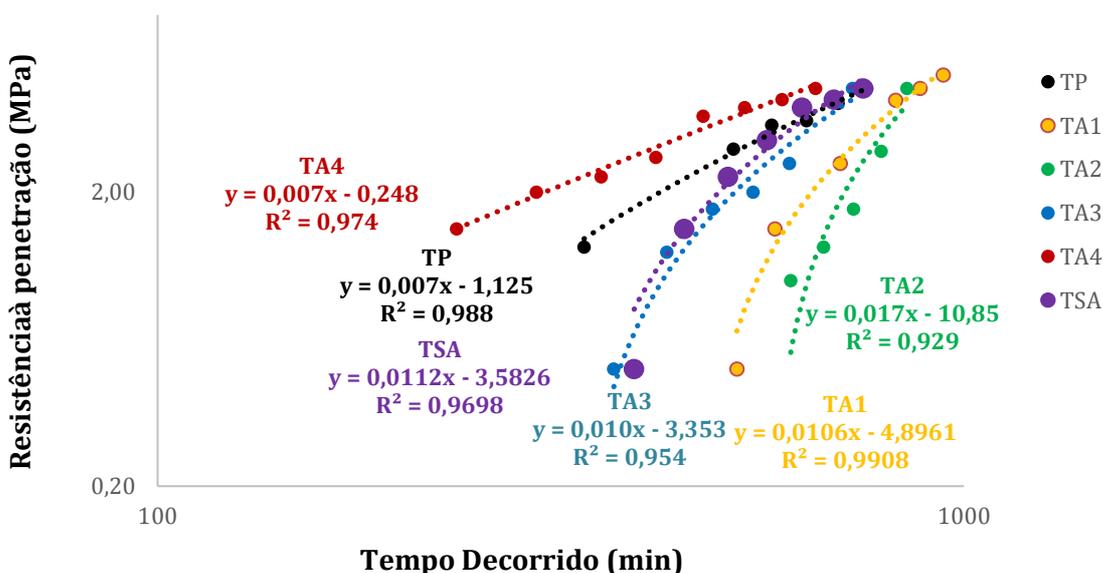
Na Tabela 18 são apresentadas as leituras efetuadas para cada traço no ensaio de determinação do tempo de início de pega. Algumas leituras não foram realizadas em função do horário, sendo indicadas na tabela com traço.

Tabela 18: Leituras de resistência à penetração do ensaio de tempo de pega do concreto

Tempo decorrido (hora)	Tempo decorrido (min)	Leitura de resistência à penetração (MPa)					
		TP	TA1	TA2	TA3	TA4	TSA
04:00:00	240	0,00	0,00	0,00	0,00	1,50	0,00
05:00:00	300	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,50
06:00:00	360	1,30	0,00	0,00	0,50	2,25	1,50
07:00:00	420	-	0,00	0,00	1,25	2,63	2,25
08:00:00	480	-	0,00	0,50	1,75	3,63	3,00
09:00:00	540	2,80	0,50	0,00	2,00	-	-
10:00:00	600	3,38	1,50	-	2,50	4,25	3,88
11:00:00	660	3,50	0,00	1,30	-	4,50	4,13
12:00:00	720	4,00	2,50	1,75	4,50	-	4,50
13:00:00	780	4,50	0,00	2,75	-	-	-
14:00:00	840	-	4,10	4,50	-	-	-
15:00:00	900	-	4,50	-	-	-	-

Com as leituras de resistência à penetração efetuadas a cada intervalo de tempo decorrido, determinou-se as curvas gráficas de tendência linear que representam a evolução do tempo de pega para cada traço de concreto (Gráfico 3).

Gráfico 3: Evolução da resistência à penetração em função do tempo



A curva obtida para cada traço descreve uma equação analítica para o cálculo do tempo de início de pega do concreto. A norma estabelece dois critérios para esta condição: a curva deve ser constituída de no mínimo 7 pontos e o coeficiente de correlação de cada equação deve ser igual ou superior à 0,98 de modo que o grau de relação entre as variáveis x e y seja positivo, próximo a 1.

Para tanto, os pontos de correlação que se afastam da tendência linear da curva foram excluídos. No entanto, em função desse ajuste os resultados foram minimamente prejudicados, pois para alguns traços a curva foi obtida com número de pontos inferior ao limite mínimo de 7 exigido pela norma.

De acordo com a norma, o tempo de início de pega é equivalente ao intervalo de tempo decorrido desde a adição de água à betoneira até o momento em que a resistência à penetração da agulha na argamassa é de 3,5 MPa. Traduzindo esse critério na equação, é o tempo (x) para qual o valor de y é igual a 3,5. Logo, substituindo o y das equações das curvas de tendência linear de cada traço por 3,5, determinou-se o tempo decorrido (x) em horas e minutos correspondente ao tempo de início de pega. Esses valores são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19: Equações para obtenção do tempo de pega do concreto

TRAÇO	EQUAÇÃO	R <sup>2</sup>	X (min)	X (horas)
TP	$y = 0,007x - 1,125$	0,988	625	10:25:00
TA1	$y = 0,010x - 4,896$	0,990	792	13:12:00
TA2	$y = 0,017x - 10,85$	0,929	811	13:30:00
TA3	$y = 0,010x - 3,353$	0,954	665	11:06:00
TA4	$y = 0,007x - 0,248$	0,974	507	08:27:00
TSA	$y = 0,0131x - 3,7111$	0,997	550	09:10:00

X: Tempo decorrido desde a adição de água à betoneira  
Y: Equação analítica da curva de resistência à penetração em função do tempo  
R<sup>2</sup>: coeficiente de correlação da regressão

Os resultados apresentados apontam que em relação ao TP, o tempo de início de pega foi superior para todos os traços dosados com aditivos cristalizantes, exceto para o TA4, em que ocorreu aceleração no início das reações. Já no traço com a sílica ativa (TSA) também houve uma pequena redução no tempo de início de pega.

Conforme comentado anteriormente, o efeito de redução do abatimento causado pelo aditivo referente ao TA4 pode ser explicado em virtude da formação de cristais ocorrer rapidamente ainda durante o processo de mistura, o que também justifica o tempo de início de pega mais acelerado.

É válido ressaltar que o aditivo polifuncional usado na dosagem dos traços regula a pega do concreto no sentido de prolongar a manutenção do abatimento, o que justifica o tempo de início de pega lento de todos os traços. Todavia, para efeito comparativo dos traços, essa ação torna-se irrelevante.

Levando em consideração que os traços de concreto foram dosados sob composição e proporções iguais e condições de temperatura semelhantes (entre 20°C e 25°C), a variação entre os tempos de início de pega dos cinco traços pode ser justificada pelos efeitos que os aditivos cristalizantes causaram nas reações de hidratação do cimento, o que resultou em diferentes velocidades das reações de hidratação de cada concreto.

Nota-se, ainda, que os traços que obtiveram menores medidas de abatimento também apresentaram menor tempo de início de pega. Essa analogia entre os dois resultados está relacionada à taxa de consumo da água de amassamento em função do tempo. Isto é, a velocidade das reações de hidratação que envolvem os compostos do cimento e as reações dos aditivos cristalizantes é responsável por regular a perda de abatimento da mistura e o tempo de pega do traço.

## **4.2. PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO**

### **4.2.1. Absorção de água por capilaridade**

A absorção de água por capilaridade corresponde à quantidade de água absorvida por área superficial do corpo-de-prova em um intervalo compreendido entre duas pesagens consecutivas. Para cada intervalo de ensaio calculou-se a absorção capilar de água dos seis traços. Nas Tabelas 20 e 21, respectivamente, apresentam-se os resultados de absorção capilar obtidos nos ensaios de 19 e 63 dias de idade do concreto.

Tabela 20: Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade - 19 dias

Traço	Massa inicial dos corpos-de-prova secos (g)	Absorção (g/cm <sup>2</sup> )				
		3h	6h	24h	48h	72h
<b>TP</b>	3672,23	0,22	0,26	0,37	0,41	0,42
<b>TA1</b>	3548,12	0,21	0,30	0,52	0,63	0,67
<b>TA2</b>	3572,24	0,19	0,29	0,61	0,77	0,89
<b>TA3</b>	3748,81	0,04	0,05	0,06	0,06	0,05
<b>TA4</b>	3681,85	0,09	0,09	0,13	0,12	0,12
<b>TSA</b>	3759,15	0,08	0,08	0,11	0,12	0,13

No ensaio com idade de 19 dias dos traços, os resultados obtidos indicam que dois dos aditivos testados (TA3 e TA4) e a sílica ativa (TSA) apresentaram efeitos expressivos de redução de absorção de água quando comparados ao TP. Em termos percentuais, a redução na absorção por capilaridade foi de 70% até 88% em relação a absorção final do traço piloto com 72h.

Já os traços TA1 e TA2 tiveram valores de absorção de água superiores em relação ao TP, quando ensaiados na idade de 19 dias. Uma possível justificativa para esse resultado é que até a idade do ensaio as reações de cristalização não haviam sido completadas.

Cabe referenciar que após avaliar o desempenho de aditivos cristalizantes na permeabilidade do concreto, Pazderka e Hájková (2016) obtiveram conclusões similares, verificando que as reações de cristalização são completadas aproximadamente no 12<sup>o</sup> dia após a mistura.

Tabela 21: Resultado do ensaio de absorção de água por capilaridade - 63 dias

Traço	Massa inicial dos corpos-de-prova secos (g)	Absorção capilar (g/cm <sup>2</sup> )						Altura máxima de ascensão capilar (cm)
		3h	6h	24h	48h	48h	72h	
<b>TP</b>	3698,06	0,31	0,35	0,43	0,47	0,47	0,48	4,94
<b>TA1</b>	3510,86	0,21	0,31	0,63	0,84	0,84	0,94	12,10
<b>TA2</b>	3741,17	0,05	0,06	0,10	0,09	0,09	0,06	8,93
<b>TA3</b>	3725,99	0,14	0,17	0,23	0,27	0,27	0,28	3,21
<b>TA4</b>	3694,72	0,18	0,20	0,18	0,20	0,20	0,20	4,14
<b>TSA</b>	3730,44	0,17	0,18	0,15	0,17	0,17	0,16	2,91

Estabelecendo uma comparação entre os resultados de ensaio com 19 e 63 dias, é possível notar um aumento inesperado da absorção de água em função da evolução da idade dos traços, principalmente porque as amostras de ambos os ensaios foram constituídas pelos mesmos corpos-de-prova, mas entre as duas idades de ensaio e entre os seis traços houve uma variabilidade incoerente das massas iniciais.

Em razão dessa irregularidade, procedeu-se a uma análise detalhada dos dados coletados, e observou-se que há uma relação inversa entre a massa inicial dos corpos-de-prova secos e os resultados finais de absorção em ambos os ensaios. Relativamente, os traços cujo corpos-de-prova apresentam menores valores de massa inicial antes da imersão parcial absorveram maior quantidade de água.

Primeiramente, convém considerar que os corpos-de-prova de todos os traços deveriam apresentar massas iniciais semelhantes, dado que houve uma variação mínima entre as massas específicas determinadas no estado fresco e o procedimento de adensamento para moldagem foi padronizado para todos os traços.

Inviabilizando uma justificativa baseada nesses dois fatores, a hipótese estabelecida é de que os corpos-de-prova dos seis traços não estavam sob mesmas condições de secagem, ou seja, nem todos estavam completamente secos. Se os corpos-de-prova encontram-se parcialmente saturados antes da imersão em água há menos espaço disponível para o preenchimento dos poros capilares, reduzindo assim a quantidade de água absorvida ao final do ensaio.

Para evitar interferências nos resultados, a norma recomenda que antes do processo de imersão, os corpos-de-prova sejam submetidos à secagem ao ar e em estufa até apresentarem constância de massa. Assim como preconiza a norma os corpos-de-prova utilizados encontravam-se em ciclo de cura seco, isso é, encontravam-se previamente secos ao ar.

Devido às não coincidentes idades de moldagem dos corpos de prova de cada traço, os ensaios não foram realizados simultaneamente em todos os objetos de estudo, abrindo margem para condições de secagem diferente tanto no processo de cura seca devido à umidade relativa do ar quanto na secagem em estufa.

No que diz respeito à umidade relativa do ar e temperatura, o período de realização dos ensaios coincidiu na mesma estação do ano, não havendo assim uma variação brusca desses parâmetros.

No que tange as condições de secagem dos corpos-de-prova em estufa, como citado anteriormente, as limitações de disponibilidade de espaço no equipamento, por se tratar de uma pesquisa realizada em laboratório compartilhado com outros pesquisadores, somada a disposição alternada dos corpos-de-prova no interior da estufa, resultaram em variações nas condições de umidade das amostras de ensaio.

Portanto, os dados de massa inicial dos corpos-de-prova coletados antes da imersão parcial sugerem que a quantidade de água absorvida no ensaio foi determinada, sobretudo, pelas condições preliminares de secagem dos corpos-de-prova, prejudicando os resultados para fins de avaliar os efeitos dos aditivos cristalizantes.

Não obstante, os resultados podem ser relativamente avaliados entre os traços que contêm maior compatibilidade entre as massas iniciais dos corpos-de-prova, ou seja, possivelmente estavam sob condições de secagem ou saturação mais próximas.

No conjunto dos traços TA2, TA3 e TSA, que apresentam menor variabilidade das massas iniciais, desprezando as incoerências, o TA2 e o TSA obtiveram uma redução da absorção de água em relação ao TA3 na idade de 63 dias. Os resultados obtidos para o TA1, tanto de absorção de água quanto da altura máxima de ascensão capilar, são considerados inconclusivos devido à massa inicial ser a mais divergente entre os demais traços.

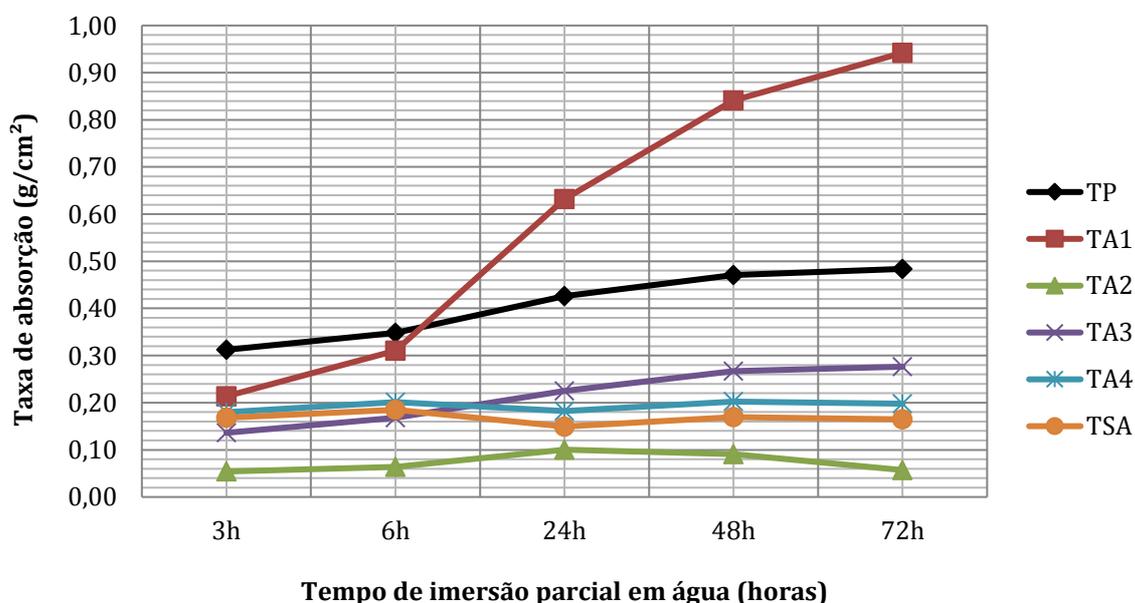
Ainda em relação ao TSA, comparado ao resultado de 16% de redução obtido por Cappellesso *et. al.* (2016) em estudo similar de concreto com adição de sílica ativa, se as variações de dosagem e margem de erros forem desprezadas, é possível que a sílica ativa de fato contribua para a redução de absorção capilar do concreto, embora não seja possível apontar o percentual reduzido com exatidão.

Seguindo o mesmo critério de avaliação, o único traço com maior viabilidade de comparação ao Traço Piloto é o TA4, para ambas as idades de ensaio. Neste caso, observa-se que em relação ao TP, o aditivo do TA4 proporcionou uma redução de aproximadamente 72% aos 19 dias e 59% aos 63 dias.

Já ao avaliar a altura de ascensão capilar, medida após o rompimento dos corpos-de-prova, verifica-se que para todos os traços há coerência com a absorção capilar, exceto para o TA2 que teve a menor absorção entre todos os traços, contudo a ascensão capilar foi a segunda maior. Esse resultado poderia ser justificado por uma conexão contínua entre os poros capilares do concreto para este traço.

Outro indicador avaliativo do desempenho dos aditivos cristalizantes testados é a velocidade de absorção dos traços, analisada através do gráfico da quantidade de água absorvida em função do tempo de ensaio decorrido (Gráfico 4).

Gráfico 4: Quantidade de água absorvida pelo concreto em função do tempo aos 63 dias de idade



É evidente que a curva obtida para o TA1 não pode ser avaliada pra fins comparativos, pois conforme explicado anteriormente, observou-se que foi o traço que obteve menor média de massa inicial dos corpos-de-prova, o que promoveu maior potencial de absorção em relação aos demais traços.

Independente das condições de secagem ou saturação dos corpos-de-prova no início do ensaio, é válido considerar que em situações práticas, normalmente, as peças estruturais apresentam umidade inicial diferente de zero ao serem reexpostas à água.

Partindo desse ponto de vista, as curvas representadas no Gráfico 4 permitem avaliar que os perfis de absorção do TA2, TA3, TA4 e TSA ao longo do tempo foram similares, pois os traços mantiveram maior uniformidade de absorção entre os intervalos de ensaio, ainda que os corpos-de-prova estivessem em condições de saturação distintas no início da imersão.

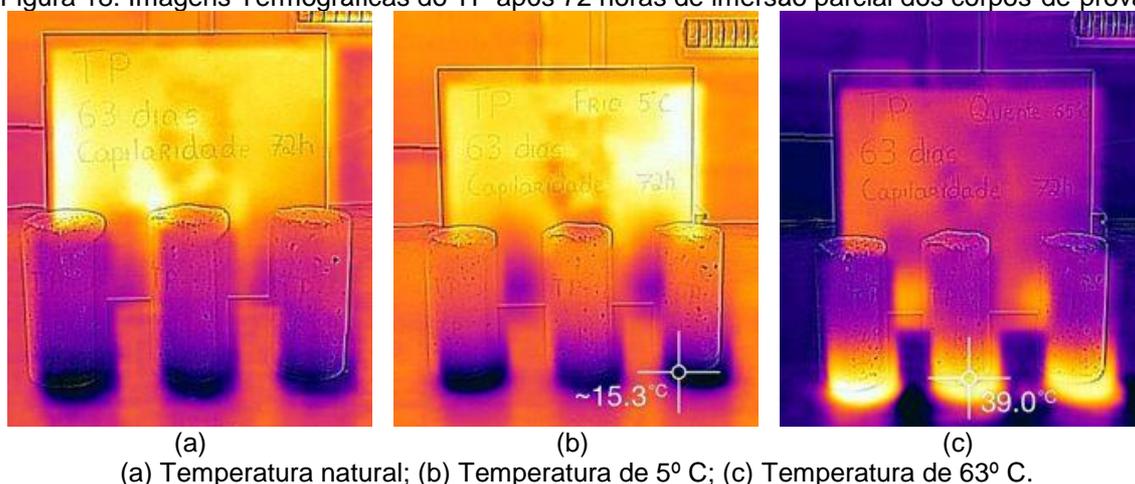
Nota-se que o traço TA2 foi o que apresentou menor absorção capilar, seguido do traço com sílica ativa. Tal comportamento ilustra que ao utilizar um cristalizante é possível reduzir a absorção capilar ainda mais do que a utilização de sílica ativa. Logo, para aumentar a durabilidade de concretos em locais com agressividade seria interessante utilizar um concreto tanto com adição de sílica ativa como de um aditivo cristalizante.

#### 4.2.2. Imagens termográficas

As imagens registradas pelo mecanismo de termografia permitem a determinação da altura de ascensão capilar superficial nos corpos-de-prova através da diferença de coloração térmica, visualmente nítidas nas regiões que absorvem maior quantidade de água. Sendo no ensaio realizado com água na temperatura ambiente e gelada, a região úmida se destaca na cor azul, enquanto com a água aquecida, a região do corpo de prova com umidade se apresenta na cor amarela.

Nas Figuras 18 a 23 são apresentadas as imagens termográficas dos corpos-de-prova de todos os ensaios do estudo após imersão parcial em água com diferentes temperaturas (natural, fria e quente) para o ensaio realizado na idade de 63 dias.

Figura 18: Imagens Termográficas do TP após 72 horas de imersão parcial dos corpos-de-prova.



(a) Temperatura natural; (b) Temperatura de 5° C; (c) Temperatura de 63° C.

Figura 19: Imagens Termográficas do TA1 após 72 horas de imersão parcial dos corpos-de-prova.

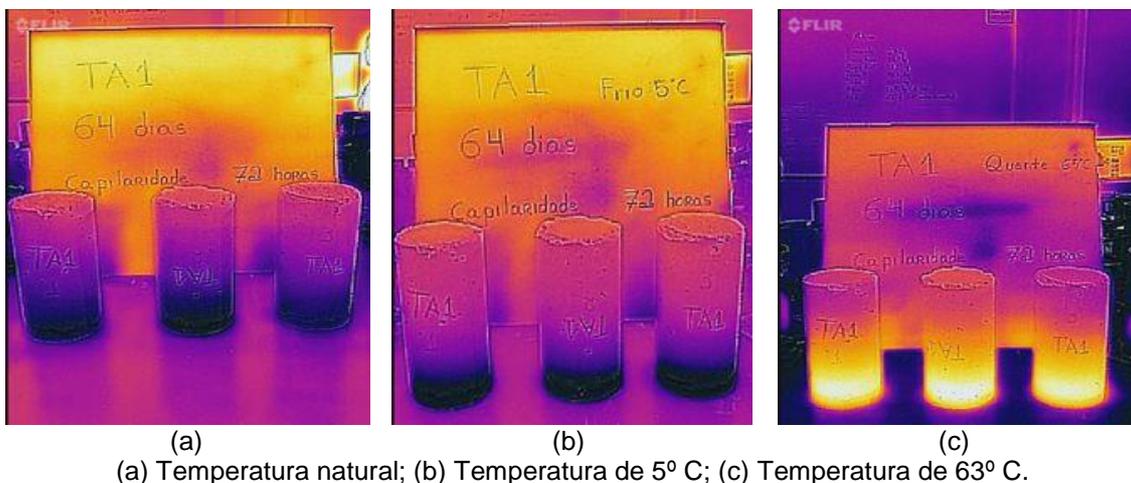


Figura 20: Imagens Termográficas do TA2 após 72 horas de imersão parcial dos corpos-de-prova.

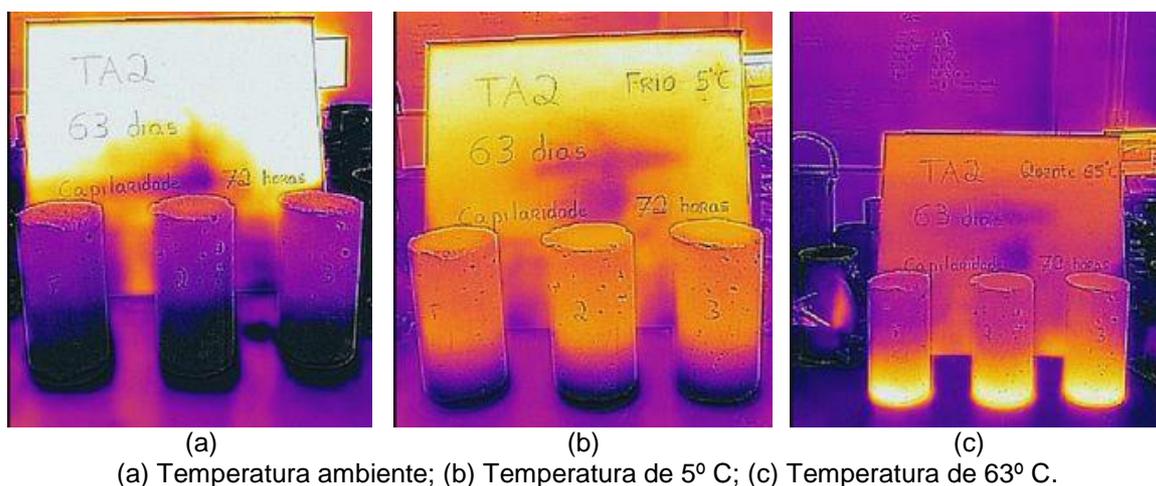


Figura 21: Imagens Termográficas do TA3 após 72 horas de imersão parcial dos corpos-de-prova.

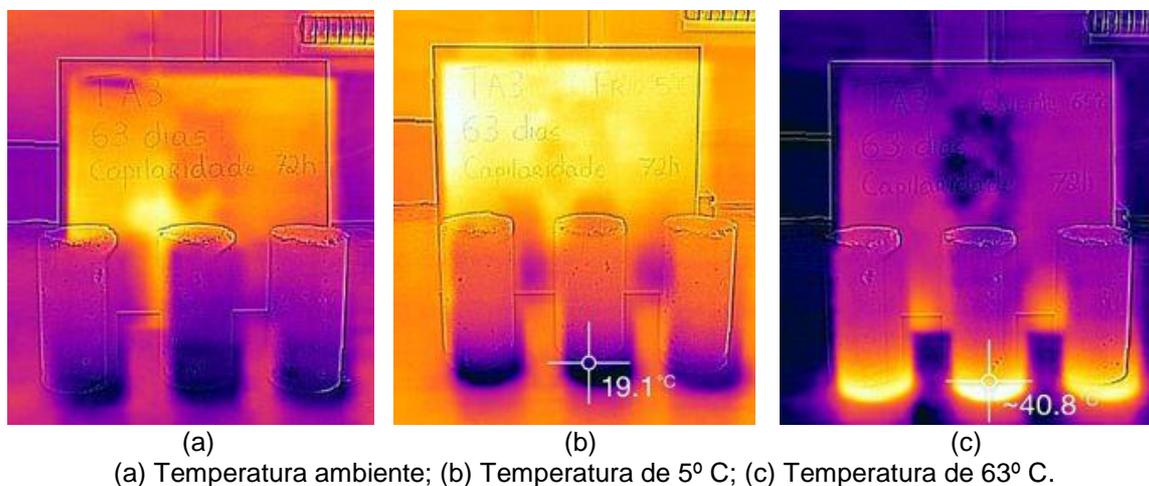


Figura 22: Imagens Termográficas do TA4 após 72 horas de imersão parcial dos corpos-de-prova.

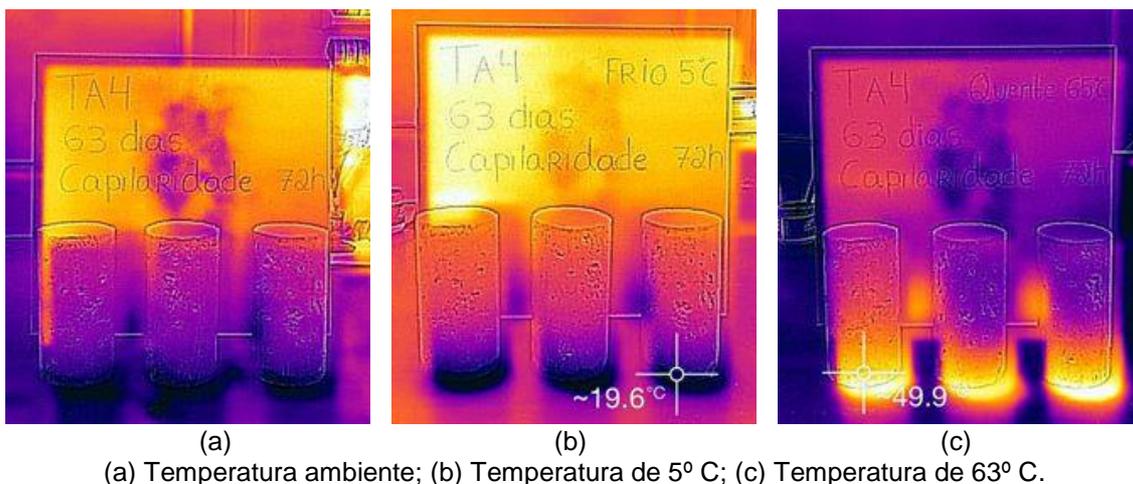
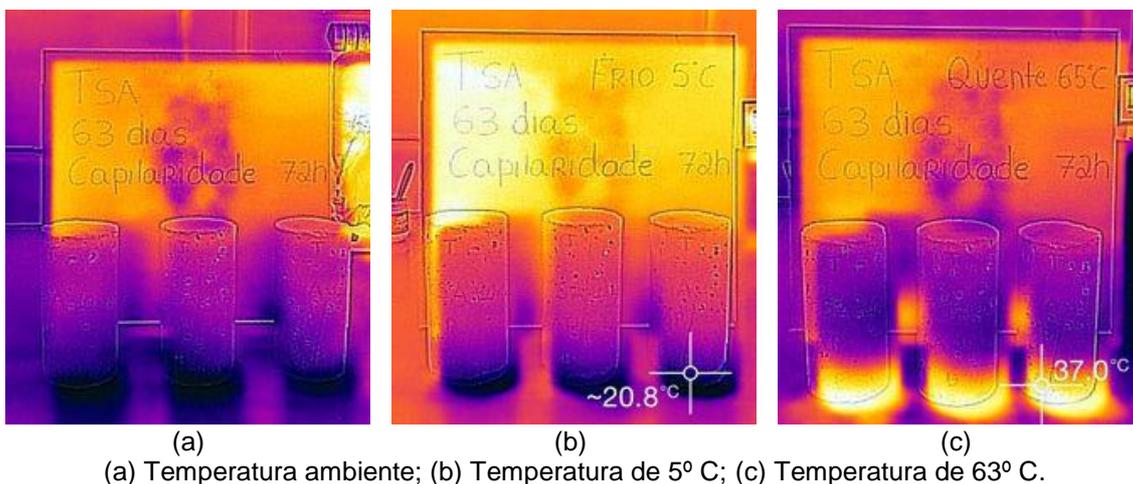


Figura 23: Imagens Termográficas do TSA após 72 horas de imersão parcial dos corpos-de-prova.



É possível notar que nas imagens após imersão parcial em água na temperatura de 65°C há um aumento na altura de ascensão capilar dos corpos-de-prova quando comparado aos registros das demais condições de temperatura.

Caso consistente, essa hipótese poderia justificar os resultados de absorção de água não condizerem com as alturas de ascensão capilar, pois o rompimento diametral e a determinação da medida de altura de ascensão capilar dos corpos-de-prova foram realizados logo após a imersão parcial em água com temperatura a 65°C.

No entanto, não se pode afirmar com evidência que temperaturas mais elevadas da água provocam aumento de ascensão capilar no concreto, pois a coloração térmica da imagem está em função da temperatura do corpo-de-prova

detectada superficialmente e não da altura atingida pela água, ou seja, não necessariamente, a água ascendeu até a altura correspondente à coloração térmica de mais calor na imagem.

#### 4.2.3. Permeabilidade pelo método do cachimbo

O resultado do ensaio pelo método do cachimbo que será adotado para efeitos de avaliação da permeabilidade do concreto é a quantidade total de água penetrada nos corpos-de-prova ao final do ensaio, conforme apresentado na Tabela 22.

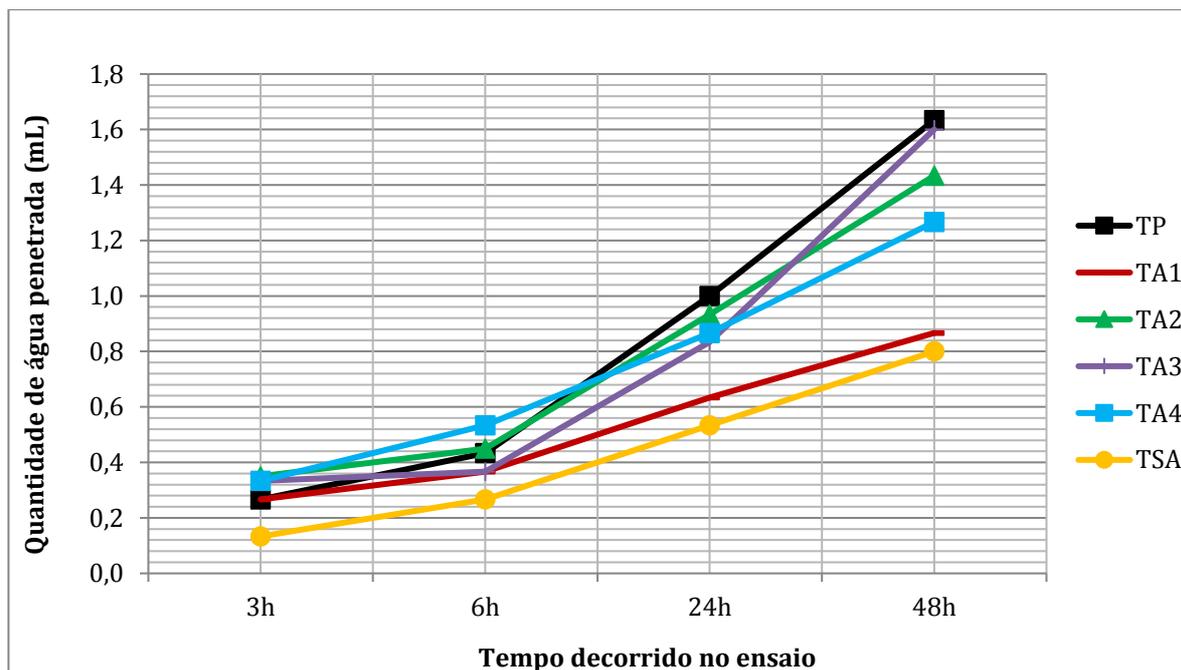
Tabela 22: Resultados do ensaio de permeabilidade pelo método do cachimbo

Traço	Quantidade de água penetrada (mL)			
	3h	6h	24h	48h
TP	0,3	0,4	1,0	<b>1,6</b>
TA1	0,3	0,4	0,6	<b>0,9</b>
TA2	0,4	0,5	0,9	<b>1,4</b>
TA3	0,3	0,4	0,8	<b>1,6</b>
TA4	0,3	0,5	0,9	<b>1,3</b>
TSA	0,1	0,3	0,5	<b>0,8</b>

O traço com adição de sílica ativa obteve o melhor resultado, apresentando mais de 50% de redução na permeabilidade do concreto em relação ao TP. Observa-se que, com exceção do TA3, os demais traços de concreto com aditivos cristalizantes apresentaram resultados positivos em relação à redução de penetração de água no concreto.

No Gráfico 5 são apresentadas curvas da quantidade de água penetrada nos traços em função do período decorrido de ensaio, sendo possível visualizar que os a sílica ativa e os aditivos cristalizantes referentes ao TA1, TA2 e TA4 contribuem para a impermeabilidade do concreto. Quanto ao TA3, embora não tenha havido redução da permeabilidade, o resultado final, após 48 horas de ensaio foi mantido igual ao do TP.

Gráfico 5: Quantidade de água penetrada no concreto em função do tempo



Não foram coletados dados preliminares das massas iniciais dos corpos-de-prova secos antes do ensaio, portanto não é possível afirmar se houve influência negativa das condições de secagem similares às observadas no ensaio de determinação de absorção de água por capilaridade.

Cabe colocar que a divergência entre os resultados obtidos para a absorção de água por capilaridade e permeabilidade pelo método do cachimbo podem ser justificados pelo desempenho modificado dos aditivos frente aos diferentes mecanismos de transporte atuantes no concreto, conforme anteriormente comentado.

#### 4.2.4. Resistência à compressão

O resultado de resistência à compressão de cada traço foi determinado através da média das tensões dos três corpos-de-prova obtidas nos ensaios. Os resultados de resistência à compressão para cada idade de ensaio são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23: Resultados de resistência à compressão para as três idades de ensaio

Traço	Resistência média à compressão (MPa) - 7 dias	SD (MPa)	CV (%)
TP	27,9	0,39	1,41%
TA1	31,5	0,35	1,11%
TA2	30,4	0,42	1,37%
TA3	34,6	0,33	0,97%
TA4	39,3	0,20	0,50%
TSA	35,7	0,51	1,44%

SD: Desvio Padrão, CV: Coeficiente de Variação

Traço	Resistência média à compressão (MPa) - 28 dias	SD (MPa)	CV (%)
TP	34,3	0,45	1,31%
TA1	35,6	0,57	1,59%
TA2	34,7	0,38	1,09%
TA3	39,0	0,22	0,57%
TA4	42,9	0,30	0,70%
TSA	44,0	0,31	0,70%

SD: Desvio Padrão, CV: Coeficiente de Variação

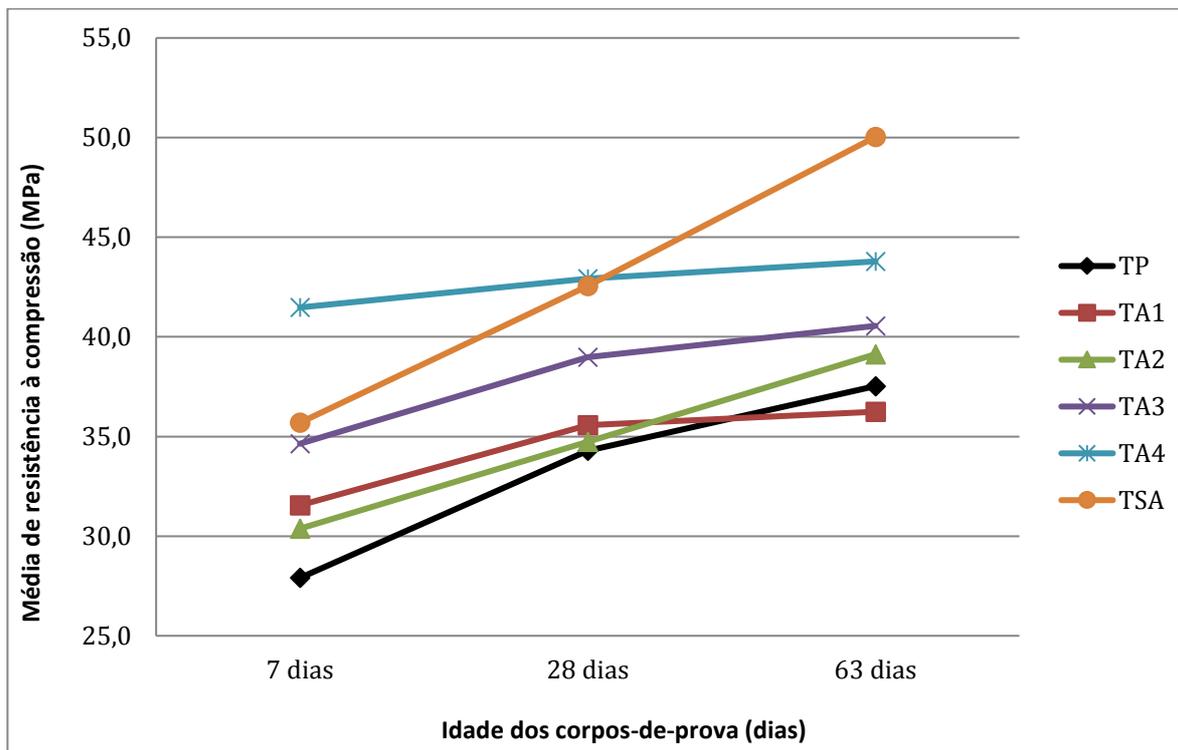
Traço	Resistência média à compressão (MPa) - 63 dias	SD (MPa)	CV (%)
TP	37,5	0,54	1,43%
TA1	38,2	0,42	1,09%
TA2	39,1	0,30	0,77%
TA3	40,6	0,27	0,66%
TA4	43,8	0,35	0,79%
TSA	50,0	0,20	0,40%

SD: Desvio Padrão, CV: Coeficiente de Variação

De acordo com os critérios de coeficiente de variação estabelecidos pela norma, os ensaios são avaliados em Nível 1 (Excelente), com exceção dos ensaios de 7 dias de idade do traço TA4 e 63 dias de idade do TA1, avaliados em Nível 2 (Muito Bom). Os valores que se encontravam afastados da média foram desprezados para o recálculo com os outros dois resultados, de modo que o ensaio foi mantido no Nível 1 de avaliação da norma.

As curvas de evolução da resistência média à compressão em função da idade do concreto são apresentadas no Gráfico 6.

Gráfico 6: Evolução da resistência à compressão dos traços de concreto



Nota-se que o emprego dos aditivos cristalizantes não diminui a resistência à compressão do concreto, ao contrário, resulta em pequenos ganhos de resistência, que neste estudo variou de 1,1% até 25,1% de aumento quando comparada com a resistência do traço piloto na idade de 28 dias. Já a adição de sílica ativa aumentou a resistência à compressão em 24,2% aos 28 dias e 33,3% aos 63 dias.

Macanovskis *et al* (2016) realizaram um estudo comparativo entre dois traços de concreto com diferentes consumos de cimento, sendo que cada traço foi testado duas vezes, uma com aditivo cristalizante e outra sem. De acordo com os resultados apresentados no trabalho, para o traço com maior consumo de cimento o aditivo cristalizante testado melhorou a resistência do concreto à compressão em 27,2% quando comparado ao traço sem aditivo. Já em outro estudo desenvolvido por Cappellesso *et al* (2016), o traço dosado com aditivo cristalizante obteve resistência à compressão 16% superior ao traço sem aditivo.

Dados de estudos desenvolvidos por outros autores apontam divergências em relação aos efeitos dos aditivos cristalizantes na resistência à compressão do concreto. Entretanto, quando comparados, observa-se similaridade entre os resultados dos trabalhos dos autores acima apresentados e os resultados obtidos

neste estudo, podendo-se concluir que de maneira geral os aditivos cristalizantes contribuem, mesmo que minimamente, para o ganho de resistência do concreto.

Verifica-se que o TA4 foi o traço dentre os aditivos testados, que apresentou maior resultado de resistência à compressão em todas as idades. Os resultados podem ser justificados pela formação de cristais desde as primeiras idades, inclusive, como relatado anteriormente, durante o processo de mistura foi possível visualizar instantaneamente os cristais formados pela reação do aditivo.

A análise dos resultados também permite a observação de que o TSA somente ultrapassou os outros traços em relação à resistência no rompimento de 63 dias. A partir dessa constatação pode-se concluir que além de apresentar resultados satisfatórios já aos 28 dias, há continuidade na evolução de resistência do concreto com adição de sílica ativa após essa idade.

Quando o resultado do TP é comparado aos demais traços contendo aditivos e o ao TSA nota-se que todos foram superiores, confirmando assim a possibilidade apresentada pelos fabricantes de que os aditivos melhoram a resistência do concreto.

Complementarmente, entende-se que a distribuição entre os poros do concreto e a conexão entre eles depende das condições de adensamento dos corpos-de-prova ensaiados. Nesse sentido, é possível observar uma correlação entre os resultados de ascensão capilar e resistência à compressão dos seis traços, o que pode ser justificado pela estrutura de poros de cada um. Mais especificamente, os traços com menor e maior altura de ascensão capilar (TSA e TA1) obtiverem, respectivamente, a maior e a menor média de resistência à compressão.

### 4.3 RESUMO DOS RESULTADOS

O desenvolvimento teórico e prático deste trabalho permitiu uma avaliação dos efeitos dos aditivos cristalizantes com base nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido determinadas em ensaios laboratoriais. Na Tabela 24 é apresentado um resumo de todos os resultados obtidos no estudo.

Tabela 24: Síntese de resultados dos ensaios do concreto no estado fresco e endurecido

Dados								
Ensaio		TP	TA1	TA2	TA3	TA4	TSA	
Ensaio no Estado Fresco	Abatimento do tronco de cone (mm)	100	135	110	90	40	90	
	Teor de ar incorporado (%)	1,25	3,10	1,60	10,5	1,40	1,50	
	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	2387,6	2394,3	2350,5	2414,5	2364,0	2397,7	
	Rendimento (m <sup>3</sup> )	0,066	0,066	0,067	0,067	0,067	0,066	
	Consumo de Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	348,88	349,86	343,47	352,44	345,44	326,14	
	Tempo de início de pega (horas)	10:25	13:12	13:30	11:06	08:27	09:10	
Estado Endurecido	Resistência média à compressão (MPa)	7 dias	27,9	31,5	30,4	34,6	39,3	35,7
		28 dias	34,3	35,6	34,7	39,0	42,9	44,0
		63 dias	37,5	38,2	39,1	40,6	43,8	50,0
	Permeabilidade à água na idade de 84 dias (mL)	1,6	0,9	1,4	1,6	1,3	0,8	
	Absorção de água por capilaridade na idade de 63 dias (g/cm <sup>2</sup> )	0,42	0,67	0,89	0,05	0,12	0,13	

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Cumprindo os objetivos específicos propostos para o desenvolvimento deste estudo, pôde-se concluir que, de modo geral, os diferentes aditivos cristalizantes testados apresentam desempenhos variados em praticamente todas as propriedades do concreto que foram avaliadas. E as considerações obtidas a partir deste estudo foram:

- No estado fresco do concreto, os aditivos cristalizantes causaram efeitos distintos, principalmente no abatimento e tempo de início de pega. Evidentemente, as duas propriedades são reguladas, sobretudo, pelo consumo de água de amassamento e velocidade das reações de hidratação do cimento, fatores que podem ter sido modificados pelos diferentes processos de cristalização de cada aditivo.
- Em síntese, pode-se concluir que o emprego de aditivos cristalizantes no concreto requer atenções às operações de concretagem em obra, mais especificamente no que diz respeito a efeitos de redução do abatimento que possam resultar no entupimento de tubulações, falhas de concretagem e dificuldades de adensamento.
- Definitivamente, torna-se fundamental viabilizar o emprego de aditivo cristalizante no concreto por meio de estudos de dosagem prática que permitam ao engenheiro prever a necessidade de soluções específicas no sentido de compensar efeitos negativos causados pelos aditivos e evitar complicações no planejamento da obra.
- A contribuição dos aditivos cristalizantes no aumento da resistência à compressão do concreto foi mínima, entretanto não resultou em redução da resistência à compressão. Portanto, pode ser adicionado sem comprometer a resistência à compressão, entretanto não deve ser adotado com a finalidade de ganhos de resistência do concreto.
- Os resultados de absorção de água por capilaridade foram evidentemente prejudicados por irregularidades nas condições de saturação e secagem das amostras ensaiadas. Contudo, para efeitos comparativos entre os traços, o

resultado mais conclusivo do estudo aponta que em relação ao Traço Piloto, um dos aditivos causou uma redução de 59% na absorção de água do concreto. Em relação à permeabilidade do concreto, os traços com aditivos cristalizantes, em sua maioria, causaram efeitos de redução na penetração de água.

- Conforme presumido pelas referências de autores de estudos similares, o traço com adição de sílica ativa obteve o melhor desempenho no que diz respeito às propriedades de impermeabilidade (avaliada pelo método de ensaio do cachimbo), e evolução de resistência à compressão do concreto, contudo no ensaio de absorção capilar um dos aditivos apresentou melhor desempenho.

Este trabalho permitiu verificar que a incorporação de aditivos cristalizantes reduzem a absorção de água sem comprometer a resistência à compressão. Entretanto alguns alteraram o abatimento de tronco de cone, o que pode dificultar sua utilização em obra. Em virtude das variações apresentadas, nota-se a importância da elaboração de uma norma que regulamente os desempenhos mínimos dos aditivos cristalizantes para concreto comercializados no Brasil.

## **6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Avaliar o desempenho de aditivos cristalizantes na permeabilidade de concretos submetidos à penetração de água sob pressão.
- Verificar se os aditivos cristalizantes contribuem para a durabilidade do concreto minimizando os riscos de carbonatação e penetração de cloretos.
- Estudar a viabilidade prática do sistema de cristalização como solução técnica para o reparo de fissuras por meio do mecanismo de auto-cicatrização.
- Desenvolver um estudo comparativo de concretos com aditivos cristalizantes variando a dosagem dos traços para os demais tipos de cimento comercializados no Brasil.
- Determinar se a alternância do método proposto por cada fabricante para inserção dos aditivos cristalizantes à mistura influencia no desempenho final do concreto.
- Comparar o desempenho de concretos dosados com adição de sílica ativa e cristalizante.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI 201.2R. American Concrete Institute - Guide to Durable Concrete. Farmington Hills, U.S.A., p. 53f. 2008.

ARAUJO, R. C. L.; RODRIGUES, E. H. V.; FREITAS, E. G. A.; **Materiais de Construção**. Rio de Janeiro, Editora Universidade Rural, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1231**: Standard Practice for Use of Unbonded Caps in Determination of Compressive Strength of Hardened Cylindrical Concrete Specimens. Philadelphia, PA, 2012. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5736: Cimento Portland Pozolânico**. Rio de Janeiro, 1991. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9833**: Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579**: Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2013. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 9**: Concreto e argamassa - Determinação dos tempos de pega por meio de resistência à penetração. Rio de Janeiro, 2003. 6 p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 43**: Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2003. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 46**: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 47**: Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002. 23 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 65**: Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998. 8 p.

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

CAMARINI, G. **Caracterização da durabilidade do concreto pela absorção de água**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 41., 1999, Salvador. *Anais...* Salvador: Ed. IBRACON, 1999.

CAPPELLESSO, Vanessa Giaretton et al. **Use of crystalline waterproofing to reduce capillary porosity in concrete**. Journal of Building Pathology and Rehabilitation. Suíça, 2016.

GEYER, A. L. B.; SÁ, R. R., **Importância do Controle de Qualidade do Concreto no Estado Fresco**. Goiás, jul. 2006. Disponível em <[http://www.realmixconcreto.com.br/downloads/Ano2\\_informativo\\_internet.pdf](http://www.realmixconcreto.com.br/downloads/Ano2_informativo_internet.pdf)> Acesso em 3 abr. 2016.

ISAIA, Geraldo C. et al. **CONCRETO: CIÊNCIA E TECNOLOGIA**. São Paulo, IBRACON, 2011. 1 v.

LOPES, A. N. M.; SILVA, E. F.; NEPOMUCENO, A. A. **Avaliação da durabilidade de concretos com e sem adição de sílica ativa para resistências entre 50 e 60 MPa**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 41. São Paulo, 1999. *Anais...* Artigo 3-1-03. São Paulo, Ed. IBRACON, 2007.

MACANOVSKIS, Artūrs et al. **Mechanical Properties and Self-Healing Effect of Concrete Containing Capillary Hydro Insulation Admixture**. Construction Science, Riga, Letônia, 2016.

MEDEIROS; M. H. F.; ANDRADE, J. J. O.; HELENE; P. Durabilidade e Vida útil das Estruturas de Concreto. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M.. **CONCRETO: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. São Paulo, IBRACON, 2014. 1 v.

MOREIRA, H. P.; FIGUEIREDO, E. P.; HELENE, P. R. L. **Avaliação da influência de alguns agentes agressivos na resistência à compressão de concretos amassados com diferentes tipos de cimentos brasileiros.** Boletim Técnico da da Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2001. 16p.

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

NEVILLE, A.M.; BROOKS, J.J. **Tecnologia do Concreto.** 2. ed. Porto Alegre, Bookman, 2013. Tradução de: Ruy Alberto Cremonini.

NEVILLE, A.M., **Propriedades do Concreto.** 5 ed. Porto Alegre, Bookman, 2015. Tradução de: Ruy Alberto Cremonini.

OURIVES, C. N.; BILESKY, P. C.; YOKOYAMA, C. M. **Avaliação do Desempenho dos Sistemas de Impermeabilização por Cristalização Capilar do Concreto.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 50, 2008, Salvador. *Anais...* Salvador, Ed. IBRACON, 2008.

PAZDERKA, J.; HAJKOVÁ, E.; **Crystalline admixtures and their effect on selected properties of concrete.** Journal of Advanced Engineering. Praga, República Checa. 2016.

REGATTIERI, C.E. X.; SILVA, M. G.; HELENE, P. **Influência do tipo de cimento na resistência, na absorção capilar e na difusão de cloretos dos concretos plásticos.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 4., 1996, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABCP, 1999.

RODRIGUES, P. P. F. **Parâmetros de Dosagem do Concreto.** ET-67. 3ª Ed. São Paulo: IBRACON - Associação Brasileira de Cimento Portland, 1998.

SOARES, Felipe Flores. **A importância do projeto de impermeabilização em obras de construção civil.** 2014. 120f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

TAKAGI, E. M.; ALMDEIRA, W. J.; OLIVEIRA, F. S. **Tratamento químico cristalizante para impermeabilização e proteção de estruturas de concreto armado.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 46, 2007, Florianópolis. *Anais...* Florianópolis, Ed. IBRACON, 2007.