



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**AVALIAÇÃO DE DIFERENTES SISTEMAS DE CURA TÉRMICA  
DE CONCRETO PARA APLICAÇÃO EM PRÉ-MOLDADOS**

Douglas Augusto Ullmann

Lajeado, novembro de 2018



Douglas Augusto Ullmann

**AVALIAÇÃO DE DIFERENTES SISTEMAS DE CURA TÉRMICA  
DE CONCRETO PARA APLICAÇÃO EM PRÉ-MOLDADOS**

Monografia apresentada ao Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade do Vale do Taquari, como parte dos requisitos para obtenção de título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Ms. Emanuele Amanda Gauer

Lajeado, novembro de 2018

Douglas Augusto Ullmann

## **AVALIAÇÃO DE DIFERENTES SISTEMAS DE CURA TÉRMICA DE CONCRETO PARA APLICAÇÃO EM PRÉ-MOLDADOS**

A banca examinadora abaixo APROVA o trabalho de conclusão de curso apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – Etapa II, do curso de graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES, como parte da exigência para a obtenção do grau em Bacharel em Engenharia Civil.

Profa. Dra. Emanuele Amanda Gauer – orientadora  
Universidade do Vale do Taquari

Prof. Me. Rafael Mascolo  
Universidade do Vale do Taquari

Prof. Me. Douglas Ferreira Velho  
Universidade do Vale do Taquari

Lajeado, novembro de 2018

*“Existe algo mais perigoso do que  
deuses insatisfeitos e irresponsáveis  
que não sabem o que querem?”*

- Harrari, Yuval N.

## AGRADECIMENTOS

Nenhum caminho da vida pode ser trilhado sozinho.

Por isso, no fechamento desta importante etapa da vida, devem ser reconhecidos todos aqueles que fizeram parte desse processo e contribuíram enormemente para que eu pudesse chegar até aqui.

Agradeço, primeiramente, aos meus pais, Helena e Paulo, pela educação, valores, cuidados e amor incondicional empenhados ao longo de toda a minha vida. Sem eles, eu não seria nada.

Aos meus irmãos, Diego e Daniel, pelo apoio e pela parceria.

À minha tia, Olimira, por ter sido uma segunda mãe.

À minha namorada, Marina, que enche o meu coração de alegria e expectativas pelo que a vida há de proporcionar.

À professora Débora Pedroso Righi, que me orientou de forma dedicada e empenhada na Etapa I deste trabalho e que continuou oferecendo seu apoio até o final, mesmo durante as suas próprias batalhas.

À professora Emanuele Amanda Gauer, que abraçou a orientação da Etapa II deste trabalho e não mediu esforços para me auxiliar em tudo que precisei.

Aos demais professores e professoras da Univates, sem os quais ninguém chegaria a lugar nenhum.

Aos colegas de curso, pela parceria ao longo de toda a faculdade.

A todos vocês, os meus mais sinceros agradecimentos!

## RESUMO

A construção civil moderna, buscando racionalidade e produtividade na produção de elementos pré-moldados, adotou a cura térmica do concreto para fins de aceleração do desenvolvimento de resistência e, conseqüentemente, a desforma mais rápida das peças e reutilização mais frequente das fôrmas e espaços de estoque, bem como a entrega mais rápida dos produtos aos clientes. Para isso, diferentes técnicas de cura térmica foram desenvolvidas com o propósito de satisfazer as necessidades específicas de cada tipo de estrutura e/ou da indústria produtora. Da mesma forma, há uma série de fatores envolvidos na cura térmica que influenciam o resultado final do concreto produzido. Nesse sentido, o presente trabalho avaliou dois métodos de cura térmica – em estufa e a vapor – em comparação com a cura ambiente tradicional, bem como o impacto da adição de sílica ativa nas propriedades de desenvolvimento de resistência e de porosidade dos concretos produzidos. Utilizando o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI), pedra britada 1, areia média e aditivo superplastificante, foi elaborado um traço de baixa relação água/cimento (0,34) e realizados os ensaios de resistência à compressão axial, tração por compressão diametral e caracterização de porosidade, absorção e massa específica das amostras. Ao fim, foi constatado que ambas as curas térmicas produzem resultados semelhantes em todos os ensaios, bem como que essas técnicas são efetivas na aceleração de resistência mecânica suficientemente alta, nas primeiras 12 horas de idade, para que os elementos sejam desmoldados e manuseados. Também foi verificado que a adição de sílica ativa no traço contribui para a diminuição da maior porosidade no concreto ocasionada pelas altas temperaturas do tratamento térmico de cura, embora não tenham sido identificados impactos da pozolana na resistência mecânica das amostras.

**Palavras-chave:** cura térmica; pré-moldados; sílica ativa.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - velocidades de hidratação dos compostos (em forma pura) do cimento Portland.....	25
Figura 2 – taxa de liberação de calor do cimento Portland ao longo do tempo.....	26
Figura 3 – início e fim de pega relacionados com a trabalhabilidade e rigidez do concreto .....	27
Figura 4 – grau de hidratação do cimento para temperatura distintas .....	29
Figura 5 – Desenvolvimento de resistência em concreto com cinza volante comparado com concreto de controle (sem essa adição).....	31
Figura 6 – Comparativo do desenvolvimento de resistência do concreto com e sem aditivo acelerador (CaCl <sub>2</sub> ).....	36
Figura 7 – Comparativo do desenvolvimento de resistência de concreto com e sem aditivo superplastificante .....	36
Figura 8 – Efeito da temperatura e do aditivo retardador na pega do cimento.....	37
Figura 9 – Ciclo térmico típico da cura térmica .....	38
Figura 10 – Relação entre a duração/temperatura de cura com a resistência adquirida em moldes de pasta de cimento pura. ....	40
Figura 11 – Relação entre a resistência dos concretos curados termicamente com o concreto curado à temperatura de 23°C .....	44
Figura 12 – Caracterização granulométrica do agregado graúdo .....	52
Figura 13 – Curva granulométrica da brita .....	52

Figura 14 – Ensaio do frasco de Chapman, para obtenção da massa específica da areia .....	54
Figura 15 – Curva granulométrica da areia. ....	55
Figura 16 – Curvas de Abrams.....	57
Figura 17 – Ensaio de abatimento de tronco de cone (slump test). <b>Erro! Indicador não definido.</b>	
Figura 18 – Moldagem dos corpos-de-prova..... <b>Erro! Indicador não definido.</b>	
Figura 19 – Estufa utilizada na cura sem vapor dos corpos-de-prova.....	63
Figura 20 – Corpos-de-prova moldados, com a face protegida por plástico filme.....	64
Figura 21 – Ciclo da cura térmica executada em estufa sem vapor.....	65
Figura 22 – Monitoramento da temperatura dos CPs com termômetro a laser .....	66
Figura 23 – Estufa a vapor montada para cura dos corpos-de-prova .....	67
Figura 24 – Estufa fechada com termômetros monitorando a sua temperatura interna .....	67
Figura 25 – Ciclo da cura térmica executada em estufa com vapor.....	68
Figura 26 – Ensaio de compressão axial dos corpos-de-prova de concreto .....	70
Figura 27 – Ensaio de tração por compressão diametral. ....	71
Figura 28 – Fluxograma da pesquisa .....	74
Figura 29 – Ciclos térmicos das curas térmicas .....	77
Figura 30 – Resistência à compressão das amostras com 12 horas .....	78
Figura 31 – Resistência a compressão axial nas idades de 12 horas, 7 dias e 28 dias .....	82
Figura 32 – Evolução de resistência à compressão dos grupos .....	84
Figura 33 – Resistências à compressão obtidas por dos Santos (2016).....	85
Figura 34 – Resistências à tração por compressão diametral dos CPs .....	89
Figura 35 – Relação entre a resistência à tração e resistência à compressão.....	93

Figura 36 – Índice de vazios e absorção dos grupos de concreto.....	93
Figura 37 – Relação entre a resistência à compressão e índice de vazios .....	95
Figura 38 – Relação entre a massa específica e índice de vazios .....	95

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação das adições minerais.....	30
Tabela 2 – Aditivos de acordo com seus efeitos no concreto.....	34
Tabela 3 – Influência do tempo de pré-cura nos concretos curados termicamente ..	40
Tabela 4 – Conformidade das características do cimento com as exigências da NBR 16697 (ABNT, 2018). .....	47
Tabela 5 – Propriedades da sílica ativa utilizada no trabalho .....	48
Tabela 6 – Propriedades do aditivo superplastificante .....	49
Tabela 7 – Consumo de água no concreto (kg/m <sup>3</sup> ) .....	58
Tabela 8 – Volume compactado seco do agregado graúdo .....	59
Tabela 9 – CPs submetidos a compressão axial.....	70
Tabela 10 – CPs submetidos a tração por compressão diametral .....	71
Tabela 11 – CPs moldados para os ensaios .....	75
Tabela 12 – ANOVA entre C1 e C2 às 12 horas de idade, onde o fator é o tipo de cura .....	80
Tabela 13 – ANOVA entre C2 e C2S às 12 horas, onde o fator é a presença da sílica .....	81
Tabela 14 – ANOVA entre C1, C2 e C3 aos 7 dias, onde o fator é o tipo de cura ....	83
Tabela 15 – ANOVA entre C2 e C2S aos 7 dias, onde o fator é presença de sílica .	83

Tabela 16 – Resistências à compressão em relação a $f_{c28}$ .....	84
Tabela 17 – ANOVA entre C1 e C2 aos 28 dias, onde o fator é o tipo de cura.....	86
Tabela 18 – ANOVA entre C2 e C2S aos 28 dias, onde o fator é o tipo de cura .....	86
Tabela 19 – ANOVA entre C1, C2 e C3 aos 28 dias, onde o fator é o tipo de cura ..	88
Tabela 20 – ANOVA entre C1, C2 e C3 aos 7 dias, onde o fator é o tipo de cura. ...	90
Tabela 21 – ANOVA entre C2 e C2S aos 7 dias, onde o fator é a presença de sílica. .....	90
Tabela 22 – Resistências à tração em relação a $f_{t28}$ .....	91
Tabela 23 – ANOVA entre C1, C2 e C3 aos 28 dias, onde o fator é o tipo de cura ..	91
Tabela 24 – ANOVA entre C1 e C1S aos 28 dias, onde o fator é presença de sílica .....	92
Tabela 25 – ANOVA entre C2 e C2S aos 28 dias, onde o fator é presença de sílica .....	92

## LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABCIC – Associação Brasileira da Construção Industrializada de Concreto

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ARI – Alta Resistência Inicial

CBIC – Câmara Brasileira da Indústria da Construção

C1 – grupo de CPs curados em estufa, sem adição de sílica ativa

C1S – grupo de CPs curados em estufa, com adição de sílica ativa

C2 – grupo de CPs curados a vapor, sem adição de sílica ativa

C2S – grupo de CPs curados a vapor, com adição de sílica ativa

C3 – grupo de CPs curados ao ambiente, sem adição de sílica ativa

CP – Corpo de prova

FGV – Fundação Getúlio Vargas

MPa – Megapascal

NBR – Norma Brasileira

NCPA – National Precast Concrete Association

$f_{cn}$  – resistência à compressão do concreto na idade de n dias

$f_{tn}$  – resistência à tração do concreto na idade de n dias

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1 Relevância .....	18
1.2 Objetivo Geral .....	19
1.3 Objetivos específicos .....	19
1.4 Delimitação .....	19
1.5 Estrutura do trabalho.....	20
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>21</b>
2.1. Cura térmica do concreto.....	22
2.1.1 Fatores determinantes na cura térmica do concreto.....	22
2.1.1.1 Hidratação e pega do cimento Portland .....	23
2.1.1.2 Influência da temperatura.....	28
2.1.1.3 Influência das adições minerais .....	29
2.1.1.3 Influência dos aditivos.....	33
2.1.1.4 Ciclos térmicos.....	37
2.1.2 Métodos de cura térmica .....	41

2.1.3 Efeitos da cura térmica .....	42
-------------------------------------	----

### **3 MATERIAL E MÉTODOS .....46**

3.1 Caracterização dos materiais .....	46
3.1.1 Cimento .....	47
3.1.2 Água .....	48
3.1.3 Sílica ativa .....	48
3.1.4 Aditivo .....	48
3.1.5 Agregado graúdo .....	49
3.1.6 Agregado miúdo .....	53
3.2 Dosagem do concreto .....	56
3.2 Ensaio de abatimento de tronco de cone ( <i>slump test</i> ) .....	60
3.4 Programa experimental .....	61
3.4.1 Moldagem dos corpos de prova.....	62
3.4.2 Métodos de cura .....	62
3.4.2.1 Cura térmica em estufa seca .....	63
3.4.2.2 Cura térmica a vapor.....	66
3.4.2.3 Cura ambiente.....	68
3.4.3 Ensaio no estado endurecido.....	69
3.4.3.1 Compressão axial .....	69
3.4.3.2 Tração por compressão diametral.....	71
3.4.3.3 Absorção, índice de vazios e massa específica.....	72
3.5 Análise de variância (ANOVA) .....	73
3.6 Resumo da pesquisa.....	73

<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>76</b>
4.1 Análise dos ciclos térmicos .....	76
4.2 Resistência à compressão .....	78
4.3 Resistência à tração por compressão diametral .....	88
4.4 Características físicas .....	93
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>97</b>
5.1 Conclusões .....	97
5.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	99
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>101</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>106</b>
APÊNDICE A – Granulometrias da areia e da brita .....	107
APÊNDICE B – Resultados individuais e médios (MPa) dos ensaios de compressão axial e tração por compressão diametral.....	108
APÊNDICE C – Massas (kg) das amostras, para cálculo da porosidade, absorção e massas específicas.....	109
APÊNDICE D – Valores individuais e médios da porosidade, absorção e massas específicas dos corpos-de-prova.....	110

## 1 INTRODUÇÃO

A construção civil moderna, assim como muitos outros mercados da atualidade, vem evoluindo em uma série de aspectos. Desde a otimização de recursos materiais e humanos, até a preocupação com os resíduos gerados e lançados à natureza, são elementos que impulsionam a modernização dos processos produtivos e construtivos dessa área, principalmente quando se considera a concorrência crescente que o setor vem apresentando. O fato de o país estar em fase de recuperação de uma das mais graves crises econômicas de sua história é outro motor dessas mudanças de visão e comportamento do mercado.

Assim, a principal alternativa que surgiu no final do século XIX e que vem crescendo a passos largos nas últimas décadas é o pré-moldado. As diversas vantagens relacionadas ao emprego desse tipo de estrutura, principalmente aquelas relacionadas à menor necessidade de mão-de-obra e à otimização de tempo e de materiais, fez com que este fosse um importante aliado dos países que se viram obrigados a reconstruir rapidamente suas cidades destruídas após o fim da II Guerra Mundial, principalmente na Europa e no Japão (Pigozzo *et al.*, 2005).

Já no Brasil, que não participou ativamente do conflito e no qual havia abundância de mão-de-obra barata naquela época, esta indústria não se desenvolveu como poderia e ainda é parte pequena do ramo construtivo. No início da década de 1990, enquanto países como Finlândia, Espanha e Holanda apresentavam um consumo superior a 150 kg de concreto por habitante para produção de pré-moldados,

no Brasil esse valor era de apenas 20 kg (EL DEBS, 2000). No ano de 2013, o consumo consolidado de cimento no Brasil chegou em quase 71 milhões de toneladas (CBIC, 2018), sendo que apenas cerca de 420 mil toneladas foram utilizadas pelas empresas de pré-fabricados (ABCIC, 2014), ou seja, apenas 0,6% do total.

Apesar deste uso ainda tímido, os pré-moldados vêm sendo empregados de forma crescente em diversos setores do país, como o industrial, comercial, estádios esportivos e infraestrutura, “sempre que a agilidade de construção e qualidade são condicionantes para a viabilidade da obra” (CHASTRE E LÚCIO, 2012). A necessidade de se acelerar a produção dos elementos pré-moldados e de otimização dos recursos da indústria torna essencial que o mercado se utilize de técnicas que permitam um fluxo produtivo mais eficiente.

De acordo com El Debs (2000), a utilização do concreto pré-moldado possui duas características principais: a industrialização da construção e a racionalização das estruturas de concreto. Tais prerrogativas tem como principais objetivos: a) a otimização do consumo de matérias primas; b) a diminuição dos desperdícios; c) a serialização dos elementos fabricados; d) o aumento do controle de qualidade e; e) a agilização do processo de moldar uma estrutura. Segundo Ordóñez *apud* El Debs (2010), “a industrialização da construção é o emprego, de forma racional e mecanizada, de materiais, meios de transporte e técnicas construtivas, para se conseguir uma maior produtividade”.

Neste sentido, a cura térmica do concreto surgiu como uma alternativa muito interessante do ponto de vista econômico para as indústrias de pré-moldados, uma vez que proporciona um desenvolvimento de resistência do concreto muito mais acelerado e, conseqüentemente, permite a desforma e manuseio dos elementos muito mais cedo. Esta característica é vantajosa pois o principal gargalo do processo produtivo de pré-moldados está no tempo “morto” em que a peça permanece curando dentro das fôrmas, período este que impede o uso dos moldes para produção de outros elementos.

## 1.1 Relevância

Os dados de vendas de estruturas pré-moldadas nos Estados Unidos, reunidos pela National Precast Concrete Association – NCPA (2016), mostra que esse mercado sofreu uma forte retração a partir do ano de 2008, no emergir da crise econômica mundial. A partir do ano de 2012, no entanto, os números voltaram a crescer constantemente, ano após ano, chegando próximos de se igualarem às vendas pré-crise.

Já no Brasil, os resultados do setor de pré-fabricados, obtidos em pesquisa realizada pela Fundação Getúlio Vargas – FGV e publicados no anuário de 2016 da Associação Brasileira da Construção Industrializada de Concreto - ABCIC, mostram uma queda considerável na produção de pré-moldados no país em 2015, em comparação com o ano de 2014. Essa retração, de 12,7%, é justificada pela ABCIC como resultado da crise econômica que se iniciou no país em 2015 – considerando que o setor imobiliário e, conseqüentemente, a construção civil, costumam ser os primeiros setores afetados por qualquer crise macroeconômica.

Apesar disso, considerando o crescimento das vendas de pré-moldados nos EUA após a recuperação da crise econômica global, pode-se esperar uma expansão na utilização desses elementos na construção civil brasileira, conforme sua economia se reestabeleça. Conseqüentemente, a produtividade deverá se tornar questão-chave nesse processo, trazendo a cura térmica como importante aliada.

Embora a cura térmica se mostre vantajosa pelo aspecto econômico, sua adoção exige cuidados. Muitos estudos vêm sendo feitos ao longo dos últimos anos, buscando investigar as conseqüências que temperaturas mais elevadas durante a cura implicam sobre as características finais do concreto. O que tem se descoberto é que são muitas as variáveis que alteram o resultado, desde as temperaturas aplicadas e o tempo de cura – Verbeck e Helmuth *apud* Neville (2016) – até os aditivos e adições minerais utilizados – De Melo (2001) e Cao e Detwiler *apud* Salvador Filho (2001).

Por isso, se mostra de extrema importância a investigação experimental dessas

variáveis, a partir das informações já publicadas na bibliografia disponível e nos estudos já realizados.

## **1.2 Objetivo Geral**

O presente trabalho tem como objetivo geral a avaliação da efetividade de dois tipos de cura térmica em comparação com a cura úmida tradicional para aplicação em pré-moldados.

## **1.3 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos são os seguintes:

- a) desenvolver um traço de concreto seguindo os preceitos do método de dosagem da ABCP;
- b) estudar as porcentagens 0% e 10% de sílica ativa nos concretos utilizados neste estudo;
- c) realizar uma comparação entre três tipos distintos de cura: cura úmida, cura térmica seca e cura térmica a vapor;
- d) analisar o comportamento dos concretos, no estado fresco, utilizando-se o ensaio de consistência como parâmetro de controle;
- e) analisar o comportamento e as características dos concretos estudados, no estado endurecido, por meio dos seguintes ensaios: compressão axial; tração por compressão diametral, absorção, índice de vazios e massa específica.

## **1.4 Delimitação**

O estudo se delimita na produção de corpos-de-prova de concreto – utilizando

como materiais o cimento Portland do tipo V de alta resistência inicial (CP V ARI), pedra britada 1, areia média, sílica ativa e aditivo superplastificante –, bem como na execução dos três tipos de cura (úmida, estufa seca e estufa a vapor) e dos ensaios de resistência à compressão, tração por compressão diametral, absorção, índice de vazios e massa específica.

### **1.5 Estrutura do trabalho**

O presente trabalho foi estruturado em três partes. A primeira é uma revisão bibliográfica (Capítulo 2), na qual será abordada a cura térmica do concreto e os mecanismos físicos e químicos envolvidos nesse processo, bem como os benefícios e prejuízos que implicam a adoção desta técnica. Na segunda parte (Capítulo 3) será elaborado um programa experimental baseado nas informações e conceitos pré-estabelecidos na revisão bibliográfica, onde serão descritos os materiais empregados na experimentação (3.1), o método de dosagem (3.2), as formas de cura (3.6) e os ensaios executados (3.4 e 3.7). Por fim, serão apresentados os resultados obtidos ao longo da experimentação, sendo desenvolvidas discussões e comentários a respeito deles, fazendo-se breves comparativos com estudos semelhantes de outros autores.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Um dos principais objetivos no emprego das estruturas pré-moldadas na construção civil moderna é a rápida execução dessas peças estruturais. A indústria busca sempre aperfeiçoar os processos relacionados à fabricação, principalmente quanto aos tempos necessários em cada etapa do processo. Neste sentido, El Debs (2000) diz que se procura sempre a liberação da fôrma e do elemento pré-moldado o mais rápido possível, para que a primeira possa ser reutilizada na peça subsequente e para que a peça já moldada possa ser manuseada adequadamente. A fim de satisfazer esse requisito, o autor cita 3 formas de acelerar a cura do concreto: utilização do cimento ARI; utilização de aditivos; e aumento da temperatura.

Iserhardt (2000) amplia essa gama de possibilidades e separa as técnicas de aceleração do ganho de resistência em cinco categorias:

- a) métodos químicos: adição de produtos químicos (aditivos) que aceleram a pega do concreto;
- b) métodos físicos: aquecimento dos componentes do concreto e exploração do calor de hidratação do cimento;
- c) tecnologia do concreto: diminuição da quantidade de poros, emprego de cimento de alta resistência inicial (CPV-ARI), diminuição da relação a/c, aumento do consumo de cimento e compactação do concreto fresco;
- d) influência do calor: aplicação térmica através de água quente, radiação infravermelha, vapor d'água saturado, uso de corrente elétrica e ambiente

com ar quente;

- e) métodos combinados: aqueles nos quais são aplicados, em conjunto, duas ou mais técnicas daquelas mencionadas acima.

Neste sentido, esta revisão apresenta os métodos de curar termicamente o concreto, os fatores envolvidos e os efeitos que essas técnicas causam na estrutura e na resistência do material, a fim de que sejam ponderados os benefícios e as adversidades do emprego da cura térmica na indústria de pré-moldados.

## **2.1. Cura térmica do concreto**

Em relação ao aumento da temperatura, uma das alternativas que vem sendo utilizada no mercado é a cura térmica dos elementos pré-moldados. Esta técnica atua como catalisadora das reações de hidratação do cimento Portland, onde a temperatura mais elevada de cura diminui o período de latência do concreto, fazendo com que a estrutura da pasta se defina mais cedo (NEVILLE, 2016). Embora tal sistema possibilite ganhos de resistência muito mais rápidos nas primeiras idades, ele pode causar efeitos adversos no concreto a partir dos 7 dias, de acordo com diversas particularidades adotadas no processo e que serão discutidas adiante.

### **2.1.1 Fatores determinantes na cura térmica do concreto**

Adotando a cura térmica com o intuito de acelerar o desenvolvimento de resistência mecânica do concreto – principalmente para concretos pré-moldados –, diversas pesquisas realizadas pelo meio acadêmico ao longo das últimas décadas observaram que esta técnica envolve uma série de fatores que afetam a dinâmica da hidratação da pasta de cimento. Desde os materiais utilizados até os diferentes ciclos térmicos podem influenciar positiva ou negativamente esse processo, fazendo com que seja de extrema importância o conhecimento detalhado desses mecanismos, como será melhor elaborado nos itens a seguir.

### 2.1.1.1 Hidratação e pega do cimento Portland

De acordo com Bauer (2000), os componentes essenciais do cimento Portland são a Cal (CaO), a sílica (SiO<sub>2</sub>) e o óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), os quais geralmente constituem 95 a 96% da massa total. Também são verificadas a existência de magnésia (MgO) em proporções de 2 a 3% e óxidos menores em proporções geralmente inferiores a 1%.

Estes componentes básicos, misturados homoganeamente em proporções adequadas, são submetidos à calcinação em fornos com temperaturas de aproximadamente 1450°C, formando o que chamamos de clínquer. Nesse processo, reações químicas conduzem à formação de quatro compostos (MEHTA e MONTEIRO, 2014):

- a) Silicato tricálcico (C<sub>3</sub>S) – entre 45 e 60%
- b) Silicato bicálcico (C<sub>2</sub>S) – entre 15 e 30%
- c) Aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A) – entre 6 e 12%
- d) Ferroaluminato tetracálcico (C<sub>4</sub>AFe) – entre 6 e 8%

A importância de se conhecer esses compostos e, principalmente, suas proporções no cimento, consiste na correlação entre estes e as propriedades finais do cimento, como resistência mecânica e às intempéries, tempos de cura, etc. (BAUER, 2000).

O aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A) é o principal responsável pela pega do cimento, por ser o agente mais reativo da mistura, sendo um composto que contribui muito para o calor de hidratação. Enquanto isso, o ferroaluminato tetracálcico (C<sub>4</sub>AFe) tem papel fundamental na resistência química do concreto, principalmente contra os ataques de sulfatos (KIHARA; CENTURIONE, 2005).

O silicato tricálcico (C<sub>3</sub>S) é o composto que mais contribui para a resistência do concreto em todas as idades, principalmente até o fim dos primeiros trinta dias de

cura. Já o silicato bicálcico ( $C_2S$ ) é responsável pelos ganhos de resistência em idades mais avançadas, especialmente após um ano de cura (BAUER, 2000).

De acordo com Neville e Brooks (2013), estes silicatos de cálcio, quando hidratados, formam o que chamamos de C-S-H (abreviação da fórmula  $C_3S_2H_3$ ), juntamente com a liberação de cal na forma cristalina, o  $Ca(OH)_2$ . As equações 1 e 2 a seguir demonstram, aproximadamente, as reações que ocorrem nesse processo.



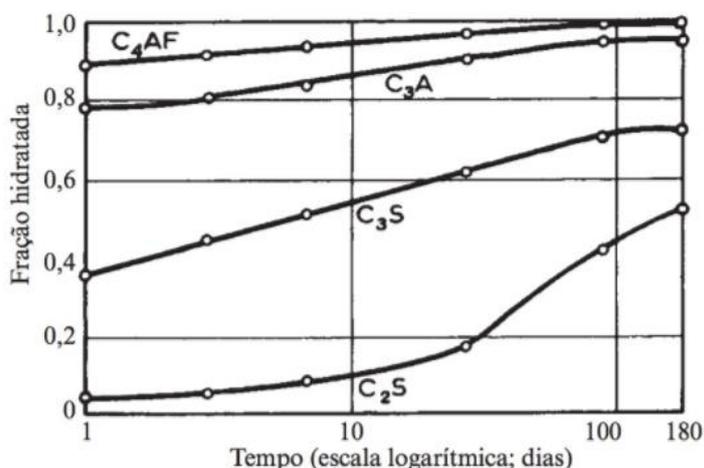
Embora a quantidade de  $C_3A$  nos cimentos geralmente seja pequena, é essencial entender a forma como esta se hidrata, pois a reação costuma ocorrer de forma muito rápida, no que se costuma chamar de pega instantânea. Tal fenômeno, porém, é amenizado pela adição de sulfato de cálcio ao clínquer. A reação aproximada está demonstrada na equação 3.



Sendo o cimento Portland uma mistura heterogênea de diversos compostos, as diversas reações provocadas pela hidratação destes ocorre simultaneamente, mas não na mesma velocidade. Os aluminatos hidratam mais rapidamente que os silicatos, sendo que os primeiros são os responsáveis pela perda de consistência e a pega da pasta, enquanto os segundos têm papel central nos aspectos de endurecimento (KIHARA; CENTURIONE, 2005).

Embora esses compostos, em estado puro, hidratem em velocidades bastante distintas – conforme demonstra a Figura 2 – em função das suas reatividades, quando estes todos estão misturados no cimento Portland a variação de velocidade ocorre em função da interação entre eles. Segundo Neville (2016), exames microscópicos indicam que a hidratação ocorre por uma redução gradativa da dimensão dos grãos de cimento, sem que sejam hidratados preferencialmente os compostos mais reativos.

Figura 1 - velocidades de hidratação dos compostos (em forma pura) do cimento Portland



Fonte: NEVILLE (2016).

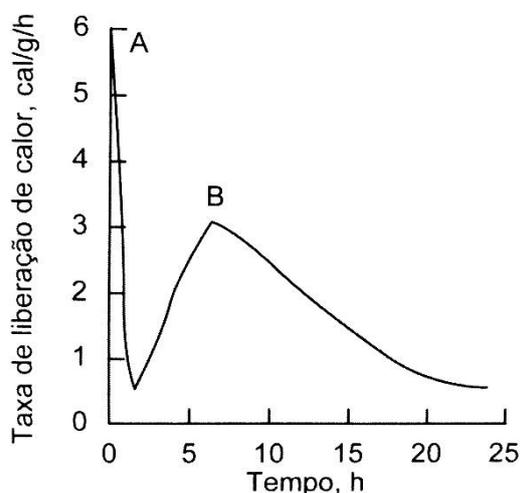
Durante o processo de hidratação do cimento, ocorre liberação de energia na forma de calor, ou seja, a reação é exotérmica. Essa característica pode ser tanto positiva como negativa, considerando o comportamento desse fenômeno em obras de grandes volumes de concreto – que pode acarretar no aparecimento de fissuras – como em ambientes de baixas temperaturas – onde o calor de hidratação pode ser imprescindível para a devida cura do concreto (BAUER, 2000).

O entendimento do calor de hidratação é importante para que se possa prever a pega e o endurecimento do concreto produzido. A Figura 3 apresenta uma curva característica da taxa de liberação de calor com o tempo. Logo quando a água é misturada ao cimento, ocorre um pico de liberação de calor (pico A indicado na Figura 3) que dura alguns minutos e que representa a hidratação inicial da superfície dos grãos do aglomerante. Conforme Neville (2016), essa reação forma uma camada externa de silicato de cálcio hidratado, que praticamente interrompe o processo de hidratação da parte interna dos grãos por um certo tempo.

O segundo ciclo de calor, que costuma ocorrer entre 4 e 8h de hidratação, é quando ocorre a dissolução do C<sub>3</sub>S e a formação do C-S-H. O início desse ciclo representa a pega inicial do cimento, enquanto o pico (ponto B indicado na Figura 3) representa a pega final, ocorrendo perda de trabalhabilidade e início do

endurecimento ao atingir esse ponto (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Figura 2 – taxa de liberação de calor do cimento Portland ao longo do tempo



Fonte: MEHTA e MONTEIRO (2014).

É pertinente ao presente trabalho destacar que, segundo Neville (2016), o aparecimento do pico B pode ser acelerado pela presença de álcalis, por grãos de cimento mais finos e pelo aumento da temperatura de cura. Ainda de acordo com o autor, uma considerável resistência é desenvolvida antes de finalizadas as reações de hidratação, fazendo com que uma parcela pequena dos compostos hidratados adira aos grãos anidros, ocasionando em reações de hidratação posteriores e consequente incremento de resistência.

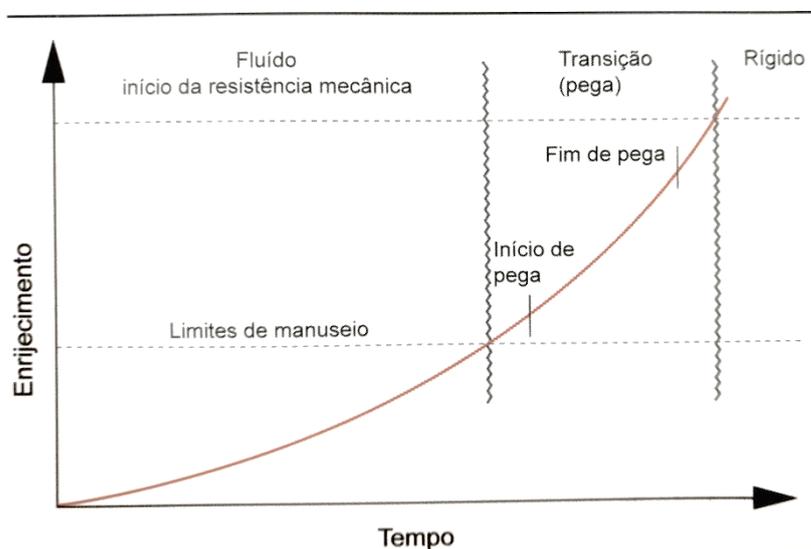
O termo pega é utilizado para descrever o processo de enrijecimento, a mudança de estado da pasta de cimento ou concreto de plástico para rígido. Bauer (2000) define esse fenômeno como a evolução das propriedades mecânicas da pasta de cimento, propriedades estas físicas, mas decorrentes de processos químicos de reação dos compostos do clínquer com a água – hidratação.

Conforme já mencionado anteriormente, o início da pega corresponde a uma rápida elevação do calor de hidratação do cimento, enquanto o fim da pega é alcançado quando se atinge o pico dessa temperatura. A pega é causada pela hidratação dos compostos do cimento Portland, sendo o  $C_3A$  e o  $C_3S$  os primeiros a reagirem. Como já foi referido, a adição do sulfato de cálcio ao clínquer impede a pega

instantânea do  $C_3A$ , fazendo com que a reação do  $C_3S$  ocorra primeiro. Essa característica é importante para o concreto produzido, pois, caso o aluminato de cálcio reagisse antes, o silicato de cálcio formado seria mais poroso e afetaria negativamente a resistência do concreto (NEVILLE, 2016).

Em se tratando de um conceito que se utiliza de uma avaliação empírica da pasta de cimento (trabalhabilidade), não há, na bibliografia atual, consenso quanto à determinação exata do início e fim da pega. Guimarães (2005) diz que o tempo de início de pega é aquele a partir do qual a pasta de cimento não pode ser mais trabalhada, enquanto que o tempo de fim de pega é quando o concreto se afigura com variações acentuadas em sua resistência. Já Mehta e Monteiro (2014) frisam que essa relação entre pega, trabalhabilidade e resistência não é necessariamente exata. De acordo com esses autores, o tempo de pega costuma ser um período mais estreito, entre os limites de trabalhabilidade e resistência (FIGURA 4).

Figura 3 – início e fim de pega relacionados com a trabalhabilidade e rigidez do concreto



Fonte: MEHTA e MONTEIRO (2014).

Há, no entanto, um procedimento normatizado pela NBR NM 45 (ABNT, 2006) para se determinar o início e fim da pega de um concreto, através do aparelho de Vicat, o qual consiste em uma agulha de 1 mm de diâmetro sob um peso de massa

normalizada. A NBR NM 65 (ABNT, 2003) define que o tempo de início da pega corresponde ao tempo entre a adição de água ao cimento até o momento em que a agulha de Vicat penetre na pasta até uma profundidade de  $4\pm 1$  mm da placa base. Já o tempo de fim de pega, segundo a mesma norma, corresponde ao período entre a adição de água ao cimento até o momento em que a agulha de Vicat não penetre mais do que 0,5 mm na pasta de cimento.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), os principais fatores que balizam o tempo de pega são a relação água/cimento, a temperatura, a composição da mistura e os aditivos utilizados. Geralmente, quanto maior a relação a/c, maior será o tempo de pega do concreto.

#### **2.1.1.2 Influência da temperatura**

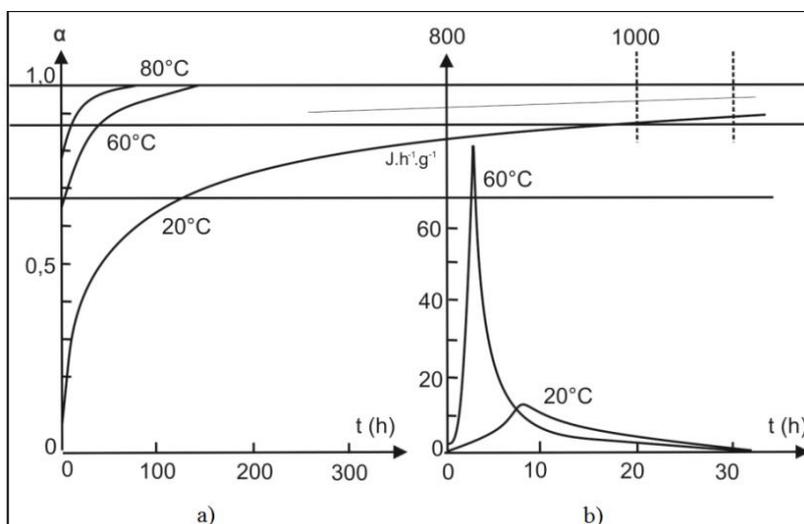
Quando se fala em cura térmica do concreto, obviamente a temperatura é o principal fator atuante no processo. Ela influencia não apenas na aceleração das reações de hidratação do cimento, mas também na interação entre o aglomerante principal, as adições minerais e os aditivos químicos eventualmente utilizados na mistura do concreto.

O aumento da temperatura colabora para a aceleração dos picos de calor característicos das curvas calorimétricas da hidratação do cimento, conforme Figura 3 apresentada anteriormente. A última fase da hidratação do cimento (período de desaceleração) também tem seus patamares modificados pela temperatura de cura, indicando que as reações que ocorrem nas diversas fases do cimento são influenciáveis pelo calor. Ou seja, os efeitos da cura térmica ocorrem também em idades posteriores (DE MELO, 2001).

De acordo com Brito (2013), a energia de ativação da hidratação pode ser prevista pelas curvas que relacionam o calor de hidratação – a uma determinada temperatura – com o seu progresso. Desta forma, para um certo tipo de cimento, o grau de hidratação é atingido numa velocidade 10 vezes maior quando a temperatura

é de 60°C do que quando é 20°C (FIGURA 9).

Figura 4 – grau de hidratação do cimento para temperatura distintas



Fonte: Brito (2013).

Desta forma, fica claro que, quanto maior a energia de ativação do cimento, maior será o impacto gerado pelo aumento de temperatura durante a cura. Ou seja, os melhores momentos para se aplicar o tratamento térmico no concreto é nos estágios iniciais da hidratação, entre os períodos de início e fim da pega. Disso, pode-se concluir que os cimentos com energias de ativação maiores, como o CPIII, são mais beneficiados por esse processo.

### 2.1.1.3 Influência das adições minerais

A NBR 11172 (ABNT, 1990) define adição como um produto de origem mineral adicionado aos cimentos, argamassas e concretos, com a finalidade de alterar suas características. Atualmente, as principais adições utilizadas nos cimentos e concretos são resíduos provenientes da indústria, principalmente a metalúrgica – a qual gera cerca de meio bilhão de toneladas de rejeitos anualmente. Por isso, a incorporação desse tipo de material aos concretos não apenas melhora algumas características técnicas do mesmo, mas também contribui com a diminuição dos impactos gerados pelo despejo desses resíduos e com a menor necessidade de extração de matérias

primas do ambiente, diminuindo, conseqüentemente, a demanda energética para produção dos cimentos (DAL MOLIN, 2005). Assim, a incorporação de adições aos cimentos é uma questão não apenas técnica, mas também econômica e ambiental.

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), as adições minerais podem ser cimentantes, pozolânicas ou ambas ao mesmo tempo. Uma classificação mais detalhada e com exemplos de materiais pode ser conferida na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Classificação das adições minerais

<b>Classificação</b>	<b>Exemplos de adições</b>
Cimentante	Escória granulada de alto-forno
Cimentante e Pozolânica	Cinza volante com alto teor de cálcio
Pozolanas altamente reativas	Sílica ativa
	Cinza de casca de arroz
Pozolanas comuns	Cinza volante com baixo teor de cálcio
	Materiais naturais (solos vulcânicos com quartzo, feldspato, zeólitas e mica)
	Metacaulim
Pozolanas pouco reativas	Escória de alto-forno resfriada lentamente
	Cinzas de forno
	Escória de caldeira
	Casca de arroz queimada em campo

Fonte: adaptado de MEHTA e MONTEIRO (2014).

Pode-se ainda incluir uma sexta classificação de adição mineral, o *filler*. Essa classe abarca materiais que são finamente divididos e que não possuem atividade química, fazendo que com suas únicas funções sejam o empacotamento granulométrico e agir como pontos de nucleação para hidratação dos grãos de cimento. Como exemplos, podem ser citados o calcário, o pó de quartzo e o pó de pedra (DAL MOLIN, 2005).

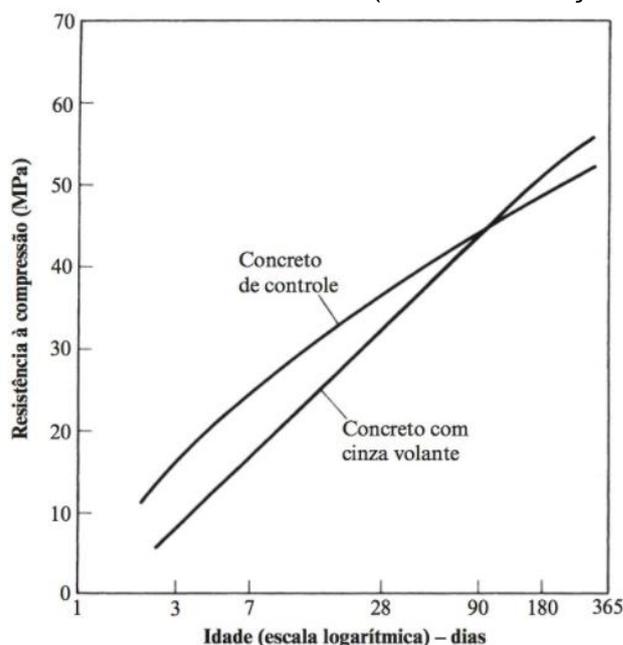
A NBR 12653 (ABNT, 1992) define os materiais pozolânicos como materiais silicosos ou silicoaluminosos que têm pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas que, quando pulverizados e na presença de umidade, reagem com o  $\text{Ca(OH)}_2$  à

temperatura ambiente, resultando na formação de compostos cimentantes.

Uma série de características dos concretos pode ser melhorada com a incorporação das pozolanas, tais como a diminuição do calor de hidratação, melhora da impermeabilidade, maior resistência a sulfatos, diminuição da ocorrência de reações álcali-agregado e melhora da trabalhabilidade. Costuma-se substituir cerca de 20 a 40% do cimento por adições minerais, sem que haja diminuição da resistência do concreto (BAUER, 2000).

Apesar desses benefícios, a substituição de parte da massa de cimento por pozolanas acarreta em um ganho de resistência mais lento e faz com que o tempo de cura seja maior. No entanto, as resistências em idades maiores costumam superar os resultados de concretos sem essa adição. A Figura 6, na qual um concreto com cinza volante é comparado com um sem essa adição, demonstra claramente esse comportamento. Nos casos em que há necessidade de altas resistências iniciais e também os benefícios das pozolanas, indica-se não a substituição, mas sim a adição de pozolanas à mistura (NEVILLE e BROOKS, 2013).

Figura 5 – Desenvolvimento de resistência em concreto com cinza volante comparado com concreto de controle (sem essa adição)



Fonte: NEVILLE e BROOKS (2013).

A cinza volante, inclusive, é adicionada na fabricação de um tipo de cimento, o CP IV (cimento Portland Pozolânico), no qual parte do clínquer é substituído – em teores que variam de 15 a 50% - por essa adição. A cinza volante também é utilizada na fabricação do CP II Z (cimento Portland composto com pozolanas), em substituição parcial (6 a 14%) do material aglomerante. Tanto o CP IV como o CP II Z têm suas características preconizadas pela NBR 16697 (ABNT, 2018).

Como apontado anteriormente na Tabela 1, a sílica ativa, subproduto do processo de produção do silício-metálico e do ferro-silício, é uma adição altamente pozolânica. Dependendo da composição química, matérias primas e dosagens utilizadas na fabricação, pode-se obter ligas com 75% ou mais de silício, integrando teores de 85 a 95% de sílica não-cristalina. Em decorrência da sua grande área superficial – em média 20.000 m<sup>2</sup>/kg – o uso dessa adição no concreto aumenta consideravelmente a necessidade de água na mistura ou o uso de aditivos superplastificante, para que a trabalhabilidade e o abatimento não fiquem prejudicados (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

De acordo com Dal Molin (2005), a reação  $\text{Ca(OH)}_2 - \text{SiO}_2$  envolvendo a sílica é rápida, ao contrário de outras pozolanas naturais. Assim, não são necessários tempos de cura muito longos para que se obtenha as resistências e níveis de impermeabilidade requeridos. Segundo Maage *apud* Dal Molin (2005), a reação pozolânica inicia por volta do sétimo dia quando a temperatura está em 20°C, começando já no segundo dia quando a temperatura sobe para os 35°C.

A incorporação da sílica ativa no concreto é extremamente recomendável quando é empregada a cura térmica nos elementos estruturais, pois a reação posterior da sílica proporciona uma menor porosidade da interface pasta-agregado (zona de transição), compensando parcialmente a diminuição da resistência dessa região causada pelas temperaturas mais elevadas da cura térmica (NEVILLE, 2016).

Já no campo das adições com propriedades cimentantes, a escória granulada de alto-forno é caracterizada pela NBR 11172 (ABNT, 1990) como um subproduto não metálico da produção de gusa em alto-forno. É obtida sob forma granulada por

resfriamento brusco, tratamento este que impede a formação de cristais e torna o produto predominantemente amorfo e potencialmente reativo.

A escória é utilizada na fabricação de vários tipos de cimento, bem como pode ser adicionada ou em substituição parcial do cimento no momento da mistura do concreto. A NBR 16697 (ABNT, 2018) define que o CP III (cimento Portland de alto-forno) pode conter teores entre 35 a 79% de escória (em relação à massa total do aglomerante). A mesma norma determina que o CP II E (cimento Portland composto com escória) pode possuir de 6 a 34% de escória.

Segundo de Melo (2000), o CP V ARI RS é composto com 30% de adição de escória de alto-forno, sendo que a reação de hidratação da escória continua quando são utilizados acionadores, como o cimento Portland ou a elevação da temperatura durante a cura. Isso, associado ao fato de que o CP V ARI é caracterizado por desenvolver altas resistências nas primeiras idades, é extremamente relevante ao objetivo experimental do presente trabalho.

Como o principal efeito da cura térmica está na aceleração das reações de hidratação que ocorrem na pasta, concretos com adições cujas velocidades de hidratação são inferiores ao clínquer do cimento Portland – como a sílica ativa e a escória de alto forno – tendem a apresentar bom comportamento na cura térmica do material (CAMARINI, 1995).

### **2.1.1.3 Influência dos aditivos**

No cenário atual, em que o concreto é um dos materiais mais utilizados pelo ser humano, é natural que se necessite de um material flexível, que se adapte às diversas condições de execução e de desempenho. Isso porque cada tipo de obra demanda técnicas e cuidados específicos, de acordo com as particularidades impostas tanto pela obra em si, como pelo ambiente e logística atreladas a ela. Para isso, o mercado da construção civil tem à sua disposição, além das adições minerais já anteriormente tratadas, dos aditivos para concreto.

Pode-se definir aditivo como um produto químico que não é essencial à composição do concreto, que geralmente é adicionado durante a mistura na betoneira em quantidades inferiores a 5%, e tem como objetivo a alteração ou melhoramento de uma ou mais características ordinárias do concreto (NEVILLE, 2016).

A composição química dos aditivos varia muito e, por isso, é difícil classificá-los de acordo com sua função, pois muitos deles simplesmente desempenham mais de uma no concreto. Alguns dos fins para os quais tais substâncias são utilizadas são: controlar tempo de pega, incorporar ar, melhorar a plasticidade da mistura, impermeabilizar, etc. (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

BAUER *et al.* (2000) sugere uma classificação baseada em dois critérios: a ação e o efeito. As ações podem ser químicas, físicas ou físico-químicas, e se caracterizam pelas modificações de solubilidade, tensão superficial e intersticial provocadas na mistura do concreto, sendo um critério mais técnico e científico. Já a classificação por efeitos, embora seja menos acurada cientificamente, busca separar os aditivos de acordo com as finalidades buscadas pela sua aplicação. A relação dos principais aditivos, classificados pelo critério dos efeitos, pode ser verificada na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 – Aditivos de acordo com seus efeitos no concreto

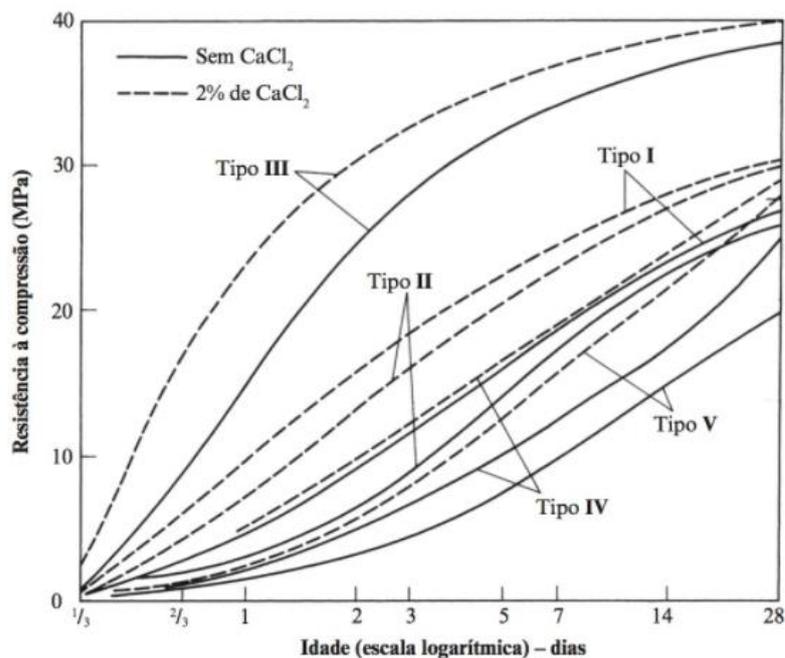
<b>Propriedade do concreto a ser modificada</b>	<b>Tipos de aditivos</b>
Trabalhabilidade	- Plastificantes redutores - Incorporadores de ar - Dispersantes ou fluidificadores
Resistência mecânica	- Redutores plastificantes
Resistência em condições especiais de exposição	- Incorporadores de ar
Tempo de pega e endurecimento	- Retardadores - Aceleradores
Impermeabilização	- Repelentes à absorção capilar - Redutores de permeabilidade
Expansão	- Geradores de gás - Estabilizadores de volume - Geradores de espuma

Fonte: adaptado de BAUER *et al.* (2000).

A ASTM C 494-10 *apud* Neville (2016) cita que os efeitos que um aditivo provoca no concreto podem variar de acordo com as proporções e características dos demais componentes da mistura (aglomerante, água, agregados e adições). Martin (2005) também destaca essa característica, tomando como exemplo os redutores de água e os aceleradores/retardadores de tempo de pega, que são muito eficazes em cimentos com baixas quantidades de C<sub>3</sub>A (aluminato tricálcico), mas pouco efetivos naqueles com baixos teores desse elemento. O autor cita ainda que os fatores que afetam a cinética de hidratação do cimento – como a temperatura – também influenciam nos efeitos específicos dos aditivos.

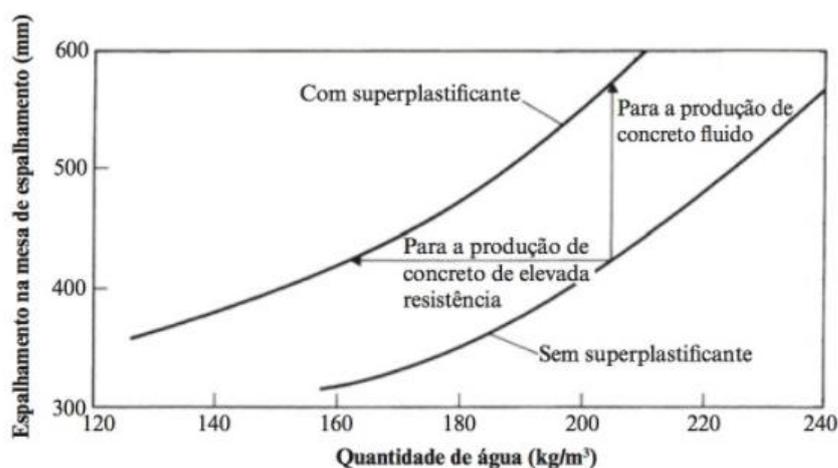
Para o tema do presente trabalho, os principais tipos de aditivos químicos de interesse são os aceleradores e os superplastificantes. Os aditivos aceleradores são produtos adicionados à mistura de concreto com o objetivo de antecipar o endurecimento e o desenvolvimento de resistência. *A priori*, esse tipo de aditivo não deve acelerar a pega da pasta de cimento, embora esse efeito possa ser observado em alguns tipos de aditivos. O principal acelerador é o cloreto de cálcio (FIGURA 6), mas alguns efeitos indesejáveis provocados por ele – como redução da resistência ao ataque de sulfatos, maior risco de desenvolvimento da reação álcali-agregado, aumento da retração e fluência e possibilidade de causar corrosão nas armaduras – fazem com que seu uso exija muito cuidado e ensaios preliminares (NEVILLE E BROOKS, 2013).

Figura 6 – Comparativo do desenvolvimento de resistência do concreto com e sem aditivo acelerador ( $\text{CaCl}_2$ )



Fonte: Neville e Brooks (2013).

Figura 7 – Comparativo do desenvolvimento de resistência de concreto com e sem aditivo superplastificante



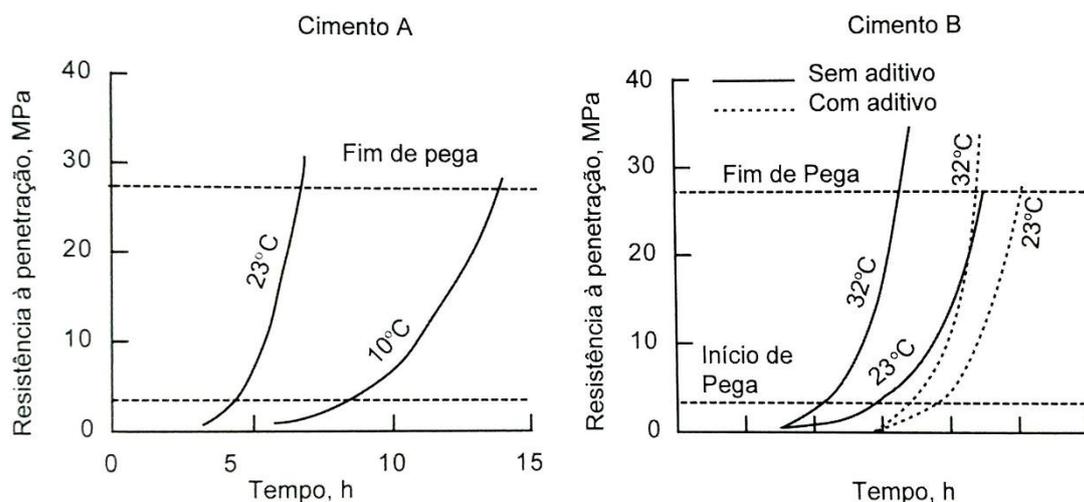
Fonte: Neville e Brooks (2013).

Já os superplastificantes são evoluções modernas dos aditivos redutores de água comuns, sendo muito utilizados em concretos de alto desempenho que se exijam fluidez ou resistências elevadas. Desta forma, o seu uso é extremamente interessante quando se requer um concreto com baixa relação água/cimento (aumento da

resistência) e/ou quando a composição da mistura possui finos de altas áreas superficiais, como a sílica ativa, por exemplo. Diferentemente dos plastificantes comuns – que atuam incorporando ar ao concreto –, os aditivos superplastificantes diminuem a tensão superficial entre os compostos da pasta de cimento. A função de elevar o desenvolvimento de resistência do concreto pode ser verificado no gráfico da Figura 7.

Os diagramas apresentados na Figura 8, elaborados a partir de ensaios da ASTM C 403, indicam que o aumento da temperatura tende a diminuir os tempos de início e de fim de pega em 4 a 7 horas, respectivamente (cimento A). Da mesma forma, constatou-se que uma temperatura mais elevada potencializou o efeito do aditivo retardador de pega (cimento B).

Figura 8 – Efeito da temperatura e do aditivo retardador na pega do cimento



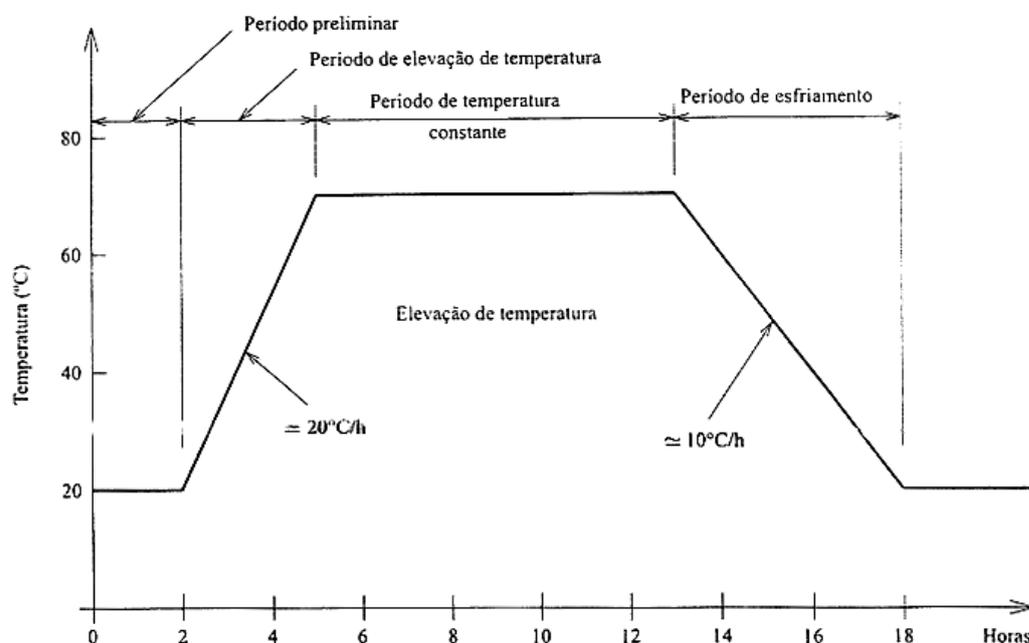
Fonte: MEHTA e MONTEIRO (2014).

#### 2.1.1.4 Ciclos térmicos

A NBR 9062 (ABNT, 2006) recomenda que se atente às velocidades de aquecimento e resfriamento dos elementos de concreto. Tanto Neville (2016) como El Debs (2000) afirmam que, idealmente, o processo de cura térmica é composto por quatro fases: período preliminar, aquecimento, patamar e resfriamento. Cada etapa

pode ter diferentes tempos e/ou temperaturas, os quais geram diferentes resultados. O gráfico da Figura 9 mostra um ciclo térmico típico.

Figura 9 – Ciclo térmico típico da cura térmica



Fonte: El Debs (2000).

Diversos autores estruturam o ciclo térmico nessas quatro fases. Iserhard (2000), as conceitua da seguinte forma:

- a) fase I (período preliminar ou de conservação): esta primeira etapa consiste no tempo entre a mistura de água ao cimento até o início do tratamento térmico. Durante esse período ocorrem as reações químicas entre a água e o cimento. Deve ser evitado a elevação da temperatura nessa fase, uma vez que a água ainda não está totalmente combinada com os demais componentes do concreto e a aplicação de calor ocasionaria expansões no material e, conseqüentemente, o enfraquecimento da sua estrutura. A aceleração da hidratação durante essa fase tende a formar uma estrutura com menor relação gel/espaco, maior porosidade e uma hidratação deficiente nas idades subsequentes. Dos Santos (2016) sintetizou os

resultados de alguns estudos que procuraram investigar a influência da pré-cura no concreto curado termicamente (TABELA 3);

- b) fase II (elevação da temperatura): é de vital importância a análise dos gradientes térmicos durante essa fase, uma vez que a temperatura deve ser elevada em um ritmo tal, que o ambiente circundante esteja mais quente que o interior do concreto. Deve-se atentar, no entanto, para que essa elevação seja compatível com as propriedades físicas do concreto, uma vez que o excesso de calor pode gerar esforços de dilatação ou mesmo o endurecimento externo precoce da peça, fazendo com que a hidratação interior do material provoque tensões de dentro para fora. Uma elevação entre 15°C e 35°C é normalmente aceita, variando de acordo com o volume da peça, os materiais empregados e o método de cura adotado;
- c) fase III (isotermia): é o período em que a temperatura máxima é atingida, permanecendo nesse patamar por um certo período de tempo. A temperatura máxima e o tempo de duração são os fatores-chave nesse processo e operam em conjunto. Temperaturas mais baixas exigem tempos de cura maiores para que se atinja as resistências que podem ser obtidas quando a temperatura é mais elevada. Uma temperatura muito alta, no entanto, pode provocar sérios danos na estrutura da pasta de cimento, bem como curas muito longas podem não apresentar benefícios relevantes. O gráfico da Figura 10 faz correlações entre a duração e a temperatura das curas com as resistências desenvolvidas pelas pastas de cimento ensaiadas. Através dele, é possível verificar que temperaturas na faixa de 80°C são efetivas em desenvolver resistência até algumas poucas horas, enquanto temperaturas ambientes requerem tempos de cura mais longos e que acabam produzindo resistências maiores;
- d) fase IV (resfriamento): é a etapa do ciclo em que a temperatura do ambiente térmico é gradativamente diminuída e, conseqüentemente, há o resfriamento do elemento de concreto. Deve haver o cuidado para que o elemento não seja exposto a impactos térmicos, os quais podem acarretar em tensões de

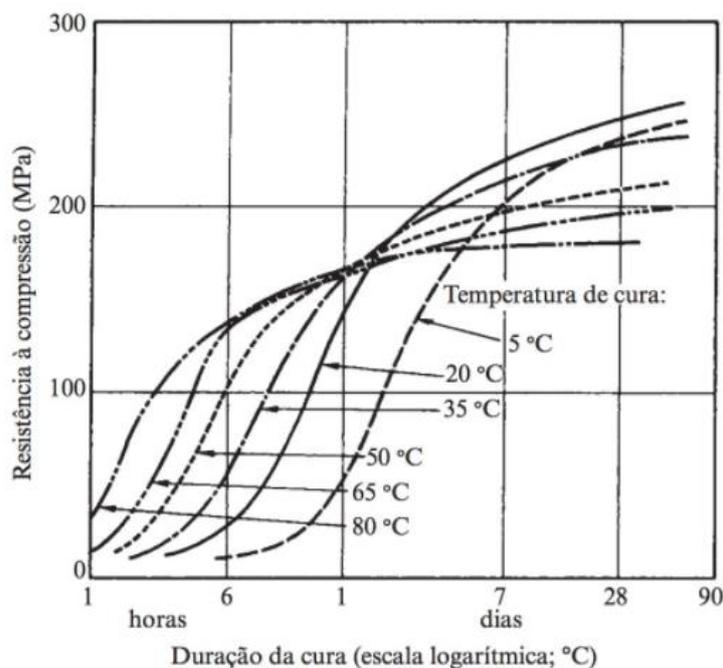
retração e fissuramento. Um gradiente de resfriamento de aproximadamente 35°C é normalmente aceitável.

Tabela 3 – Influência do tempo de pré-cura nos concretos curados termicamente

Autor(es)	Ano	Tempo da pré-cura	Comportamento ante à pré-cura
Shindeler e Chamberlin	1949	2 a 6 horas	Aumento de resistência na ordem de 15 a 40%
Hanson	1963	1 a 5 horas	Aumento da resistência e ocorrência de fissuras horizontais em períodos $\leq 1h$
Mironov	1964	Relacionado à resistência	Quando o concreto atingisse 0,7 a 0,8 Mpa
Alexanderson	1972	4 a 7 horas	Nenhuma perda de resistência foi observada
Erdem, Turanli e Erdogan	2003	Igual ao tempo de início de pega	Nenhuma perda de resistência foi observada

Fonte: dos Santos (2016).

Figura 10 – Relação entre a duração/temperatura de cura com a resistência adquirida em moldes de pasta de cimento pura.



Fonte: Neville (2016).

## 2.1.2 Métodos de cura térmica

De acordo com El Debs (2000), há quatro formas de se proceder à cura térmica dos elementos pré-moldados: a) com vapor atmosférico; b) com vapor e pressão (autoclave); c) com circulação de água ou óleo em tubos junto às fôrmas; d) e com resistência elétrica. Segundo o autor, a cura térmica com vapor atmosférico é a forma mais difundida atualmente. No mesmo sentido aponta Neville (2016), que diz que este processo pode ser considerado um tipo especial de cura úmida, pois a atmosfera saturada com vapor garante umidade ao concreto e, ao mesmo tempo, a condensação da água gera calor. Brito (2013) ainda cita a utilização de raios infravermelhos para aquecimento do concreto, técnica esta com aplicações limitadas e com poucas informações na bibliografia atual.

Nas curas a altas temperaturas sem a presença de vapor, como em uma estufa, por exemplo, exige-se um cuidado maior quanto à proteção do concreto em relação à perda de água por evaporação nas superfícies não envolvidas pela fôrma. Do contrário, essa perda de umidade da mistura pode acarretar em uma hidratação deficitária do cimento e no aparecimento de fissuras na superfície das peças. A NBR 9062 (ABNT, 2006), inclusive, exige que, nesse tipo de tratamento, a superfície do concreto seja protegida contra a secagem, mantendo-a úmida ou cobrindo-a com uma camada de material impermeável resistente à temperatura utilizada no procedimento.

Existem, ainda métodos que envolvem a utilização da energia elétrica como fonte de calor, nos quais fios podem ser distribuídos ao longo da massa de concreto, utilização da própria armadura como condutor, introdução de barras ou fios na peça ou através do emprego do próprio concreto como condutor elétrico. Esses métodos, no entanto, também costumam gerar problemas no resultado final, como fissuração de peças esbeltas, empenamento de fôrmas e rápida perda de umidade do concreto para o ambiente (BRITO, 2013).

Segundo Martins (2001), os métodos que adotam vapor são os mais recomendados (e os mais utilizados), uma vez que a água vaporizada no ambiente impediria a secagem prematura do concreto e, conseqüentemente, evitaria falhas de

hidratação e retração excessiva. Entre as técnicas com cura a vapor, é possível a execução em pressão atmosférica ou sob pressões de 6 a 20 atm. (autoclave), nas quais as temperaturas de cura podem variar entre 160 e 210°C – enquanto na pressão atmosférica as temperaturas não costumam ultrapassar os 80°C. Brito (2013) menciona que os métodos envolvendo vapor atmosférico são especialmente recomendados para a cura de elementos que não necessitam de fôrmas, como os blocos estruturais.

Não se pode, no entanto, estabelecer uma única técnica que seja perfeitamente adequada para todos os casos, pois devem ser avaliados todos os parâmetros envolvidos no processo – tipo de aglomerantes utilizados, tamanho das peças, etc. – bem como os resultados esperados. Independente da técnica de cura térmica adotada, todas têm em comum a adoção dos ciclos térmicos bem definidos, conforma já detalhado no item 2.1.1.4 (MARTINS, 2001).

### **2.1.3 Efeitos da cura térmica**

Há uma série de estudos que analisaram as variáveis ligadas à execução da cura térmica (temperatura máxima, gradientes de aquecimento e resfriamento, tempos de pega, utilização de aditivos e adições minerais, entre outros). A maioria chega à conclusão de que, em comparação ao concreto curado em temperaturas mais baixas (~23°C), os concretos submetidos à cura térmica tendem a ter uma resistência bem maior nas primeiras idades, mas menor nas idades finais (28 dias). As justificativas para tal efeito variam de estudo para estudo.

De Melo (2000), por exemplo, analisou a influência de diferentes ciclos térmicos e da presença de sílica ativa e escória granulada de alto-forno no desempenho do concreto nas idades finais. Através de microscopia eletrônica de varredura, constatou que os concretos curados termicamente têm uma zona de transição (interface pasta-agregado) mais frágil, fazendo com que a área – que costuma já ser a primeira a romper em concretos comuns – colapse com solicitações mais baixas que o normal.

No seu estudo, onde foram avaliados diferentes traços de concreto – variando desde o tipo de cimento (CPV-ARI RS e CPV-ARI-Plus), os ciclos térmicos e até a presença de sílica ativa e escória granulada – também verificou que a adição da sílica ativa tem bons resultados quando a temperatura é elevada durante a cura inicial, compensando as perdas de resistência mecânica decorrentes da cura térmica. Além disso, as alterações microestruturais (porosidade e hidratação dos componentes) são pouco afetadas em ciclos térmicos curtos (cerca de 3 horas).

Verbeck e Helmuth *apud* Neville (2016) sugeriram que a alta velocidade de hidratação dos compostos do cimento em elevadas temperaturas provoca uma distribuição heterogênea dos produtos da hidratação, pois não há tempo suficiente para que estes se difundam além da partícula de cimento, o que acarreta também em uma relação gel/espaco menor nos interstícios. Tais consequências foram evidenciadas por Goto e Roy *apud* Neville (2016), que demonstraram que os concretos curados termicamente possuem uma quantidade muito mais elevada de poros maiores que 150 nm do que aqueles curados em temperaturas mais baixas.

Dos Santos (2009) verificou que, quanto maior o tempo de espera pré-cura ( $t_0$ ), menor a relação água/cimento e maior a temperatura da fase isotérmica ( $t_2$ ), maiores são as resistências de blocos estruturais com 12 horas de idade. Utilizando o cimento CPV-ARI como aglomerante – sem a presença de adições minerais – todos os traços curados termicamente tiveram resistências mecânicas inferiores (4 a 12%) ao concreto curado da forma tradicional na idade de 28 dias.

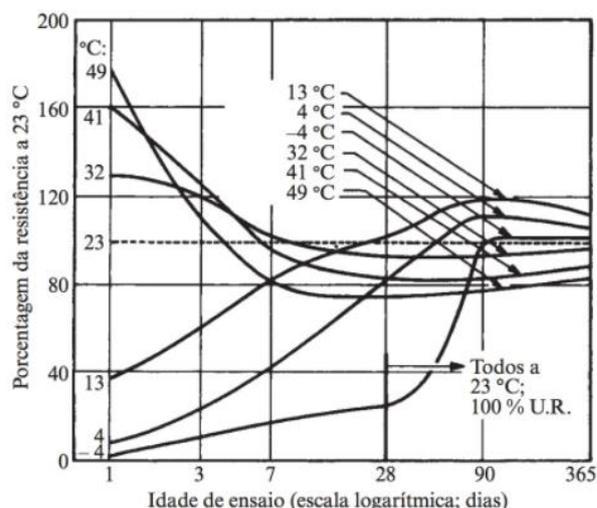
Em estudo realizado por Shindeler e Chamberlin *apud* dos Santos (2016), percebeu-se que cada temperatura de cura tem um tempo de espera (período preliminar) adequado, após o qual o rápido incremento de temperatura não afeta negativamente as resistências à compressão do concreto em idades maiores. Isto se deve, segundo o autor, ao fato de que as resistências nas idades finais sofrem grande influência da temperatura do concreto durante o período de pega. Em outras palavras, é aconselhável aguardar o fim do tempo de pega do cimento para que então se proceda à cura térmica. Segundo Neville (2016), outra hipótese que pesa a favor da necessidade do tempo de espera é que o sulfato de cálcio tem sua solubilidade

reduzida em altas temperaturas, fazendo com que parte dele não reaja com o  $C_3A$  e cause uma reação expansiva conhecida como ataque por sulfatos.

Já Rohden *et al.* (2017) avaliaram a efetividade da cura térmica em relação à cura tradicional, com dois tipos distintos de cimento (CPIV e CPV), também variando as relações a/c de cada mistura (0,45, 0,55 e 0,65). Adotando um patamar de temperatura de 70°C por 4 horas, concluíram que apenas os traços com CPV e relações a/c de 0,55 e 0,45 atingiram a resistência mínima para desmolde de elementos pré-moldados (15 MPa) na idade de 20 horas, embora os concretos submetidos à cura tradicional tenham apresentado resistências superiores aos 28 dias.

Em ensaios realizados por Kanda *et al. apud* Salvador Filho (2001), foi verificado que a resistência do concreto aos 7 dias crescia quanto maior fosse a temperatura de cura, ocorrendo uma inversão dessa relação quando se atingia os 28 dias. Essa característica fica bem evidenciada no gráfico da Figura 11. No mesmo sentido aponta Neville (2016), o qual menciona que esse efeito é principalmente observado em concretos com elevado consumo de cimento, sendo que aqueles com uma relação a/c mais baixas costumam ter um comportamento muito melhor na cura a vapor do que aqueles com relação a/c maior.

Figura 11 – Relação entre a resistência dos concretos curados termicamente com o concreto curado à temperatura de 23°C



Fonte: Neville (2016).

São relevantes ao presente trabalho, por fim, as conclusões do estudo de Cao e Detwiler *apud* Salvador Filho (2001), no qual constatou-se que a sílica ativa no concreto atua consideravelmente no refinamento dos poros causados pela cura térmica, amenizando os efeitos de diminuição da resistência que essa técnica provoca nas idades finais do concreto.

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

Tendo sido abordados os assuntos pertinentes às técnicas de aceleração do desenvolvimento de resistência do concreto através da cura térmica (a vapor e a seco), foi procedida a execução prática dos mesmos. Para isso, é de extrema importância a descrição detalhada de todos os procedimentos e materiais utilizados ao longo da experimentação.

O programa experimental do presente trabalho consiste em seis etapas: caracterização dos materiais, definição do traço de concreto, ensaios no estado fresco, moldagem dos corpos de prova, cura e ensaios no estado endurecido. Cada etapa possui diversos procedimentos que foram adotados e executados de acordo com as normas aplicáveis.

#### **3.1 Caracterização dos materiais**

Neste item serão descritos todos os materiais utilizados no concreto moldado, bem como os procedimentos preconizados pelas NBRs aplicáveis a cada caso. Todos os respectivos ensaios de caracterização foram realizados no Laboratório de Tecnologias da Construção – LATEC da Universidade do Vale do Taquari – Univates.

### 3.1.1 Cimento

Como o objetivo do presente trabalho é avaliar o ganho acelerado de resistência do concreto através da cura térmica, foi utilizado o CP V-ARI da marca Itambé como principal aglomerante da mistura. As características do cimento devem atender às exigências químicas, físicas e mecânicas da NBR 16697 (ABNT, 2018). De acordo com as informações fornecidas pelo fabricante (TABELA 4), é possível perceber que tais requisitos são cumpridos. Os valores apontados são correspondentes à média de todos os ensaios laboratoriais do referido cimento, realizados pela empresa ao longo do mês de maio de 2018, uma vez que o cimento utilizado pertence aos lotes expedidos durante aquele mês.

Tabela 4 – Conformidade das características do cimento com as exigências da NBR 16697 (ABNT, 2018).

<b>Característica</b>	<b>Limite NBR</b>	<b>CP utilizado</b>
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	-	3,09
Resíduo insolúvel (%)	≤ 1,0	0,78
Perda ao fogo (%)	≤ 4,5	3,34
Óxido magnésio (MgO) (%)	≤ 6,5	3,52
Trióxido de Enxofre (SO <sub>3</sub> ) quando C <sub>3</sub> A <8% (%)	≤ 3,5	3,12
Resíduo na peneira 75µm (%)	≤ 6,0	0,10
Área específica (m <sup>2</sup> /kg)	≥ 300	434,2
Tempo início de pega (h)	≥ 1,0	3,35
Expansibilidade a quente (mm)	≤ 5,0	0,39
Resistência à compressão 1 dia (Mpa)	≥ 14,0	24,0
Resistência à compressão 3 dias (Mpa)	≥ 24,0	39,0
Resistência à compressão 7 dias (Mpa)	≥ 34,0	46,1
Resistência à compressão 28 dias (Mpa)	-	54,8
Tempo fim de pega (h)	≤ 10,0	4,05

Fonte: adaptado da NBR 16697 (ABNT, 2018) e informações da Itambé (2018)

### 3.1.2 Água

A água de amassamento utilizada na concretagem foi proveniente da rede pública de abastecimento, serviço este de responsabilidade da unidade de Lajeado da Companhia Riograndense de Saneamento – CORSAN.

### 3.1.3 Sílica ativa

Os requisitos da sílica ativa são determinados pela norma NBR 13956-1 (ABNT, 2012). A sílica empregada no trabalho é a Silmix®, produzida pela Dow Corning. Embora não seja necessário o conhecimento das características físicas do produto para a elaboração do traço de concreto, as mesmas estão descritas na Tabela 5 a seguir, a título de registro.

Tabela 5 – Propriedades da sílica ativa utilizada no trabalho

<b>Propriedade</b>	<b>Valor</b>
Densidade aparente (kg/m <sup>3</sup> )	150 – 700
Superfície específica (m <sup>2</sup> /kg)	15.000 – 30.000
Diâmetro médio (µm)	0,40
Perda ao fogo (%)	≤ 6,0
Teor de sílica amorfa SiO <sub>2</sub> (%)	≥ 85
Teor de sílica cristalina SiO <sub>2</sub> (%)	≤ 0,5
Óxido de sódio Na <sub>2</sub> O	≥ 1,5
Carbono total C	≤ 6,0
Umidade (%)	≤ 3,0
pH	≤ 6%

Fonte: adaptado de Dow Corning (2018).

### 3.1.4 Aditivo

Buscando atingir uma relação água/cimento menor que o convencional – para

que se obtenha resistências maiores e permeabilidades menores no concreto – foi utilizado o aditivo superplastificante SUPLAST RODO 52017, produzido pela Rodo Química. As propriedades físicas e químicas do aditivo podem ser conferidas na Tabela 6 a seguir.

Tabela 6 – Propriedades do aditivo superplastificante

<b>Propriedade</b>	<b>Valor</b>
Aspecto / aparência	Líquido / amarelado
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,07
pH	8
Cloretos (%)	Não contém

Fonte: Rodo Química (2018).

Conforme a fabricante, a dosagem ideal do aditivo pode oscilar de acordo com diversas variáveis relacionadas ao concreto e à sua moldagem – como temperatura ambiente, fator a/c, tipos de cimento e agregados, etc. No entanto, ela recomenda que a dosagem esteja entre 0,2 e 1% sobre a massa de cimento.

### 3.1.5 Agregado graúdo

A seguir, serão descritos os ensaios e seus respectivos procedimentos de execução para a caracterização do agregado graúdo. Tais informações são essenciais para a definição do traço de concreto de acordo com o método ABCP que foi adotado, o qual requer que se saiba a sua massa específica, massa unitária e dimensão máxima característica.

No presente trabalho, foi utilizada na concretagem a pedra britada do tipo 1, que possui dimensões nominais entre 9,5 e 19 mm, sendo o valor mínimo correspondente à abertura da peneira na qual pelo menos 95% da amostra de brita é retida (PETRUCCI, 1998).

A massa específica é determinada pelos ensaios descritos na norma NBR NM

53 (ABNT, 2003). Primeiramente, uma amostra de 4kg foi completamente lavada e seca em estufa à temperatura de aproximadamente 100°C até que sua massa permanecesse constante. Após o resfriamento do material, o mesmo foi colocado em cesto metálico e pesado em balança de precisão (m). A seguir, a amostra foi submergida em água por um período de 24 horas, período após o qual o material foi retirado, enxaguado em toalha absorvente – até que sua superfície não apresentasse mais partículas de água – e novamente pesado ( $m_s$ ). Imediatamente após isso, o material foi pesado submerso em água ( $m_a$ ). A massa do cesto metálico é verificada antecipadamente e descontada da massa total medida. Por fim, a massa específica do agregado graúdo se deu a partir da Equação 1 a seguir.

$$d = \frac{m}{m_s - m_a} \quad (1)$$

Onde:

d = massa específica do agregado seco (g/cm<sup>3</sup>)

m = massa ao ar da amostra seca (g)

$m_s$  = massa ao ar da amostra saturada com superfície seca (g)

$m_a$  = massa em água da amostra (g)

Já para a determinação da massa unitária no estado solto, foram adotados os procedimentos indicados na norma NBR NM 45 (ABNT, 2006). Entre as três metodologias sugeridas na referida norma, optou-se pelo “método C”, em decorrência da sua maior simplicidade e semelhança com os procedimentos adotados em obra no dia-a-dia. Através deste método, utilizou-se um recipiente de volume e massa já conhecidos e despejou-se o agregado dentro, a uma altura igual ou inferior a 5 cm da abertura do mesmo, até este transbordar. Em seguida, utilizou-se uma régua metálica para nivelar o conteúdo do recipiente (agregado) com a borda superior deste. O conjunto foi pesado e os dados obtidos inseridos na Equação 2 a seguir.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad (2)$$

Onde:

$\rho_{ap}$  = massa unitária do agregado (kg/m<sup>3</sup>)

$m_{ar}$  = massa do recipiente mais agregado ( $\text{kg/m}^3$ )

$m_r$  = massa do recipiente vazio ( $\text{kg/m}^3$ )

$V$  = volume do recipiente ( $\text{m}^3$ )

A massa unitária compactada do agregado graúdo também é determinada pela NBR NM 45 (ABNT, 2006), mas através dos procedimentos descritos no “método A”. Neste, um recipiente, com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura interna foi pesado e posteriormente enchido de agregado graúdo até um terço da sua altura total. O agregado foi compactado através de 25 golpes com uma haste metálica – de 600 mm de comprimento, 16 mm de diâmetro e extremidade arredondada. As duas camadas subsequentes, também com um terço de altura do recipiente, foram compactadas da mesma forma que a primeira. O conjunto recipiente-agregado é pesado e a massa unitária compactada se dá a partir da mesma fórmula utilizada para cálculo da massa unitária de agregado solto (Equação 2).

Os resultados obtidos nos referidos ensaios foram os seguintes:

- a) Massa específica:  $2635,60 \text{ kg/m}^3$
- b) Massa unitária solta:  $1255,25 \text{ kg/m}^3$
- c) Massa unitária compactada:  $1375,78 \text{ kg/m}^3$

Já para determinação do diâmetro máximo característico do agregado graúdo faz-se necessária a caracterização granulométrica do mesmo. Para isso, foi adotada a metodologia indicada pela norma NBR NM 248 (ABNT, 2003), onde duas amostras de material – de 10 kg cada – devem ser ensaiados (FIGURA 12). Foram utilizadas peneiras da série normal (19 mm, 9,5 mm, 4,75 mm, 2,36 mm e 1,18 mm) e da série intermediária (31,5 mm, 25 mm, 12,5 mm e 6,3 mm).

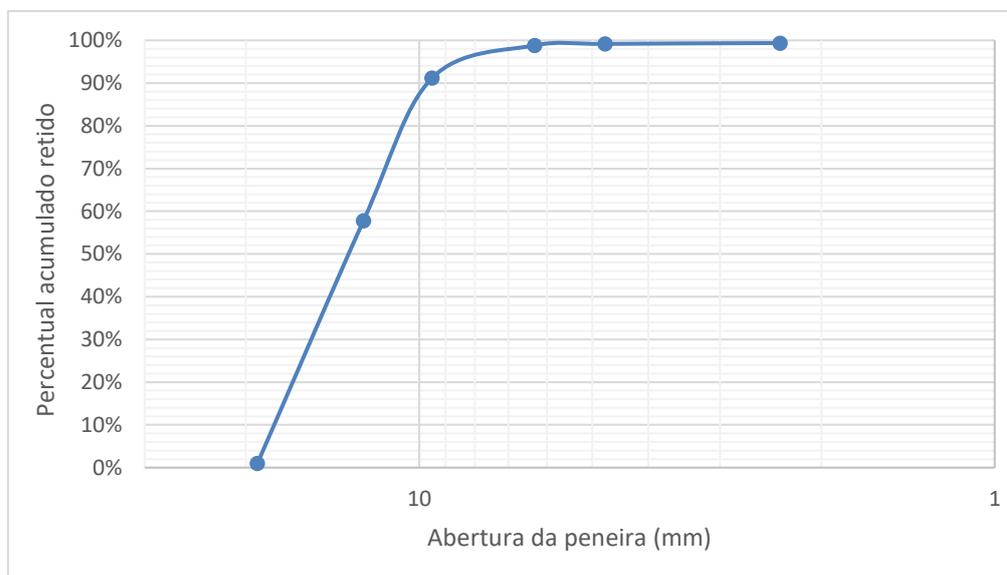
Figura 12 – Caracterização granulométrica do agregado graúdo



Fonte: do autor (2018).

A curva granulométrica gerada a partir dos resultados do ensaio pode ser conferida na Figura 13 a seguir.

Figura 13 – Curva granulométrica da brita



Fonte: do autor (2018).

O módulo de finura (MF) e a dimensão máxima característica ( $D_{mc}$ ) do agregado graúdo são obtidos a partir do ensaio de granulometria. Conforme definido pela NBR NM 248 (ABNT, 2003), MF é correspondente à soma das porcentagens retidas acumuladas em massa, nas peneiras da série normal, dividida por 100. Já  $D_{mc}$  é definido pela mesma norma como “a grandeza correspondente à abertura nominal,

em mm, da malha da peneira da série normal ou intermediária, na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa”. Desta forma, a  $D_{mc}$  calculada foi de 19,1 mm e o MF foi de 0,029.

### **3.1.6 Agregado miúdo**

No presente trabalho, foi empregada uma areia média disponível no LATEC, proveniente do município de Lajeado. As propriedades do material que se necessita conhecer são: a massa unitária; a massa específica, que será determinada pelo método do frasco de Chapman; a curva granulométrica, para verificação de conformidade com a zona utilizável preconizada pela NBR NM 248 (ABNT, 2003); o módulo de finura, calculado a partir da curva granulométrica; e o percentual de material pulverulento, uma vez que a NBR 7211 (ABNT, 2009) estabelece o limite de 5% desse material como máximo permitido presente no concreto.

A massa unitária do agregado miúdo foi verificada através do mesmo método empregado para o agregado graúdo, a NBR NM 45 (ABNT, 2006). Ou seja, adotando-se os procedimentos indicados no “método C” da referida norma, foi despejado o agregado dentro de um recipiente de massa e volumes já conhecidos, a uma altura igual ou inferior a 5 cm da abertura do mesmo, até este transbordar. Após, utilizou-se uma régua metálica para nivelar o conteúdo do recipiente com a borda superior deste. O conjunto foi pesado e os dados obtidos inseridos na equação 2 já apresentada.

Já para obtenção da massa específica, foi adotada a metodologia do frasco de Chapman (FIGURA 14), normatizada pela NBR 9776 (ABNT, 1987). Neste ensaio, um frasco de vidro composto de dois bulbos e de um gargalo graduado é enchido com água até a marca de 200 cm<sup>3</sup>, permanecendo em repouso durante alguns minutos. Em seguida, 500 g de agregado miúdo seco são introduzidos no frasco, executando-se uma agitação do mesmo para que as bolhas de ar possam ser expulsas. Procedese, então, à leitura do gargalo do frasco, sendo este valor correspondente ao volume ocupado pelo conjunto agregado-água. O valor da massa específica se dará a partir

da equação 3:

$$\gamma = \frac{500}{L-200} \quad (3)$$

Onde:

$\gamma$  = massa específica do agregado miúdo ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$L$  = volume do frasco ocupado pelo conjunto agregado-água

Figura 14 – Ensaio do frasco de Chapman, para obtenção da massa específica da areia



Fonte: do autor (2018).

Com relação à granulometria da areia, também foi adotada a metodologia indicada pela NBR NM 248 (ABNT, 2003), assim como na brita. As peneiras adotadas foram da série normal (2,36 mm, 1,18 mm, 600  $\mu\text{m}$ , 300  $\mu\text{m}$ , 150  $\mu\text{m}$  e 75  $\mu\text{m}$ ). O módulo de finura é obtido através de simples análise da curva granulométrica elaborada (FIGURA 15).

Por fim, foi verificado o percentual de material pulverulento presente no agregado miúdo, pois, segundo a NBR 7211 (ABNT, 2005), 5% (em relação à massa de areia) é a quantidade máxima desse material que pode estar contida em concretos – se protegidos do desgaste superficial. Neste ensaio, uma amostra de 100 g de

agregado miúdo – previamente seca – é colocada em um recipiente e recoberta com água, agitando-se vigorosamente para separação das partículas. Em seguida, a mistura é passada pelas peneiras de malhas 1,18 mm e 75 µm. Mais água deve ser adicionada à amostra e o processo deve ser repetido até que a agitação da areia não mais “suje” a água. Após isso, o material retido nas peneiras é reunido e secado até que atinja massa constante. A massa final desse material foi pesada. O material pulverulento se dará a partir da Equação 4.

$$m = \frac{m_i - m_f}{m_i} \quad (4)$$

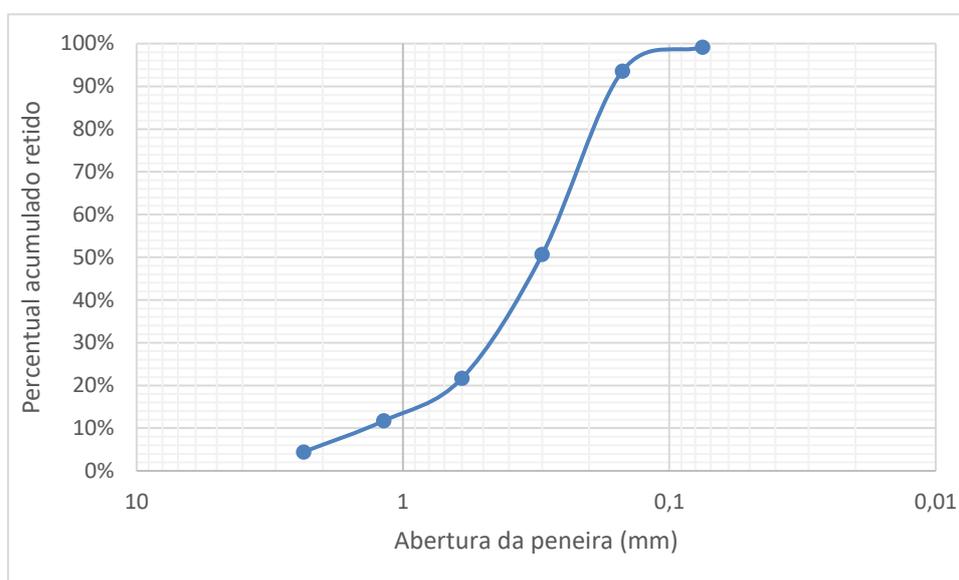
Onde:

$m$  = porcentagem de material pulverulento

$m_i$  = massa original da amostra seca

$m_f$  = massa da amostra seca após lavagem

Figura 15 – Curva granulométrica da areia.



Fonte: do autor (2018).

Os parâmetros encontrados nos ensaios, em relação à areia utilizada, foram:

- a) Massa específica: 2631,58 kg/m<sup>3</sup>
- b) Massa unitária solta: 1696,8 kg/m<sup>3</sup>
- c) Presença de material pulverulento: 3,69%

d) Módulo de finura: 2,3

### 3.2 Dosagem do concreto

A definição do traço de concreto a ser moldado foi realizada através do método da Associação Brasileira de Concreto Portland – ABCP. Essa técnica, de autoria de Publio Penna Firme, foi publicada pela ABCP em 1984 e corresponde a uma variação mais simples, moderna e atualizada do método de dosagem americano, especificado pelo ACI 211 (TUTIKIAN; HELENE, 2011).

A metodologia requer o prévio conhecimento de algumas características técnicas dos materiais que serão utilizados no concreto, como as suas massas específicas, dimensão máxima característica do agregado graúdo e módulo de finura do agregado miúdo. Com exceção das propriedades já conhecidas do cimento – fornecidas pelo fabricante (item 3.1.1) –, tais dados foram encontrados através dos ensaios já mencionados (itens 3.1.5 e 3.1.6). Além disso, requer-se a definição da resistência característica do concreto, a qual foi estipulada em 55 MPa. A consistência, avaliada pelo ensaio de *slump test*, foi fixada em  $100 \pm 2$  mm, de acordo com indicações de El Debs (2000) para elementos pré-moldados.

O primeiro passo do método é o cálculo da resistência de dosagem do concreto, através da Equação 5, definida pela NBR 12655 (ABNT, 2015). Neste caso – onde o cimento, água e agregados foram medidos em massa – adotou-se um desvio-padrão ( $S_d$ ) igual a 4,0, conforme condições prescritas na norma supramencionada. Assim, a resistência média do concreto calculada é de 61,6 MPa.

$$f_{cm28} = f_{ck28} + 1,65 \times S_d \quad (5)$$

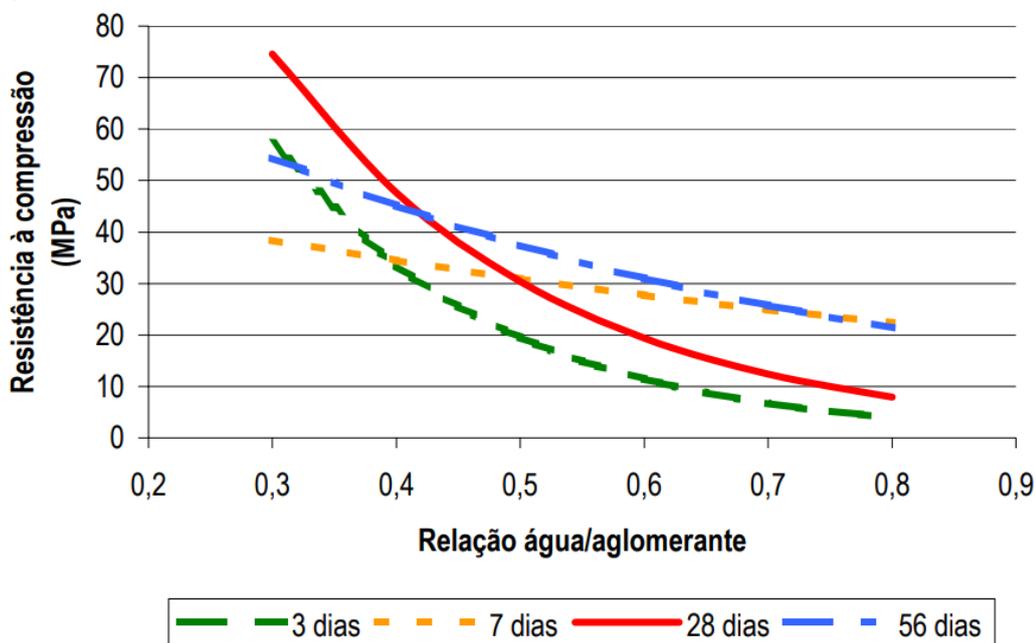
Onde:

$f_{cm28}$  = resistência média do concreto à compressão aos 28 dias (MPa)

$f_{ck28}$  = resistência característica do concreto à compressão aos 28 dias (MPa)

$S_d$  = desvio-padrão da dosagem (Mpa)

Figura 16 – Curvas de Abrams



Fonte: Tiecher *et al.* (2004).

Com o valor da resistência de dosagem em mãos, utiliza-se as curvas de Abrams (FIGURA 16), elaboradas por Tiecher *et al.* (2004) a partir de dosagens experimentais, para ponderar a relação água/cimento do concreto. Este valor é apenas uma estimativa inicial e, geralmente, pode ser ajustado durante a mistura do concreto, de acordo com os resultados de consistência obtida. No caso do presente trabalho, não foi adicionada água além daquela encontrada através das curvas, para que se mantenha uma relação a/c baixa e, conseqüentemente, resistências maiores nas primeiras idades. Desta forma, a relação a/c considerada neste estudo foi de 0,34.

Todos os consumos de material foram definidos a partir do consumo aproximado da água, dado a partir da dimensão máxima característica do agregado graúdo ( $D_{mc}$ ) e do abatimento requerido, conforme Tabela 7. Portanto, sendo a  $D_{MC}$  da brita igual a 9,5 e o abatimento requerido de  $\pm 100$  mm, o consumo de água do concreto fica estabelecido em  $230 \text{ kg/m}^3$ .

Tabela 7 – Consumo de água no concreto (kg/m<sup>3</sup>)

Abatimento (mm)	Dimensão máxima característica do agregado graúdo D <sub>mc</sub> (mm)				
	9,5	19	25	32	38
40 a 60	220	195	190	185	180
60 a 80	225	200	195	190	185
80 a 100	230	205	200	195	190

Fonte: Rodrigues, 1990 (*apud* Boggio, 2000).

Em seguida, através de uma relação entre o consumo de água e a relação a/c (equação 6), obteve-se o consumo de cimento da mistura, igual a 676,47 kg/m<sup>3</sup>.

$$C_c = \frac{C_a}{a/c} \quad (6)$$

Onde:

C<sub>c</sub> = consumo de cimento por m<sup>3</sup> (kg)

C<sub>a</sub> = consumo de água por m<sup>3</sup> (kg/m<sup>3</sup>)

a/c = relação água-cimento

Para a definição do consumo de agregado graúdo (C<sub>b</sub>) do concreto, utilizou-se a Equação 7. Como pode ser observado, é necessário o prévio conhecimento da massa unitária compactada (item 3.1.5) e o volume compactado seco do agregado graúdo por m<sup>3</sup> (V<sub>cs</sub>). Em observações experimentais, a ABCP desenvolveu relações diretas entre o módulo de finura da areia (MF), a dimensão máxima característica da brita (D<sub>mc</sub>) e o volume compactado seco do agregado graúdo (V<sub>cs</sub>), conforme elencado na Tabela 8.

$$C_b = V_{cs} \times M_C \quad (7)$$

Onde:

C<sub>b</sub> = consumo de agregado graúdo por m<sup>3</sup> (kg)

V<sub>cs</sub> = volume compactado seco de agregado graúdo (m<sup>3</sup>)

M<sub>C</sub> = massa unitária compactada do agregado graúdo (kg/m<sup>3</sup>)

Tabela 8 – Volume compactado seco do agregado graúdo

Módulo de finura da areia	Dimensão máxima característica do agregado graúdo $D_{mc}$ (mm)				
	9,5	19	25	32	38
<b>MF</b>	<b>Volume compactado seco (Vcs) de agregado graúdo por m<sup>3</sup> de concreto</b>				
1,8	0,645	0,77	0,795	0,82	0,845
2,0	0,625	0,75	0,775	0,8	0,825
2,2	0,605	0,73	0,755	0,78	0,805
2,4	0,585	0,71	0,735	0,76	0,785
2,6	0,565	0,69	0,715	0,74	0,765
2,8	0,545	0,67	0,695	0,72	0,745
3,0	0,525	0,65	0,675	0,7	0,725
3,2	0,505	0,63	0,655	0,68	0,705
3,4	0,485	0,61	0,635	0,66	0,685
3,6	0,465	0,59	0,615	0,64	0,665

Fonte: Rodrigues, 1990 (*apud* Boggio, 2000).

Assim, o consumo de agregado graúdo no concreto foi calculado em 1375,78 kg/m<sup>3</sup>

Para a determinação do consumo de agregado miúdo, primeiramente deve ser calculado o volume de areia através da Equação 8, que relaciona o consumo dos demais materiais e suas respectivas massas específicas. Em seguida, o consumo de agregado miúdo é obtido pela Equação 9, chegando-se a 516,49 kg/m<sup>3</sup>.

$$V_m = 1 - \left( \frac{C_c}{\gamma_c} + \frac{C_b}{\gamma_b} + \frac{C_a}{\gamma_a} \right) \quad (8)$$

Onde:

$V_m$  = volume de areia (m<sup>3</sup>)

$C_c$  = consumo de cimento por m<sup>3</sup> (kg)

$\gamma_c$  = massa específica do cimento (kg/m<sup>3</sup>)

$C_b$  = consumo de agregado graúdo por m<sup>3</sup> (kg)

$Y_b$  = massa específica do agregado graúdo (kg/m<sup>3</sup>)

$C_a$  = consumo de água por m<sup>3</sup> (kg)

$Y_a$  = massa específica da água (kg/m<sup>3</sup>)

$$C_m = \gamma_m \times V_m \quad (9)$$

Onde:

$C_m$  = consumo de agregado miúdo por m<sup>3</sup> (kg)

$Y_a$  = massa específica do agregado miúdo (kg/m<sup>3</sup>)

$V_m$  = volume de agregado miúdo (m<sup>3</sup>)

Por fim, ajusta-se o consumo de cada material em função de 1 kg de cimento, adotando-se a Equação 10. Desta forma, de acordo com a quantidade de concreto que será necessária para a moldagem dos CPs, basta multiplicar o consumo dos demais materiais pela massa de cimento que será empregada.

$$\frac{C_c}{C_c} : \frac{C_m}{C_c} : \frac{C_b}{C_c} : \frac{C_a}{C_c} \quad (10)$$

Como já foi mencionado anteriormente, serão adotados teores de 0 e 10% de sílica ativa no concreto a ser preparado. Como tais taxas se referem à massa de cimento empregada no traço, para saber a quantidade de sílica a ser adicionada na mistura – quando o teor for de 10% – basta multiplicar o consumo de cimento por 0,1. Assim, os dois traços de concreto utilizados no presente trabalho são os seguintes:

- 1 : 0,76 : 1,36 : 0,34 (sem sílica)
- 1 : 0,76 : 1,36 : 0,34 : 0,1 (com sílica)

### 3.2 Ensaio de abatimento de tronco de cone (*slump test*)

Após misturados todos os componentes do concreto, foram procedidos os ensaios para análise da consistência do material, a fim de cumprir com o abatimento requerido (10±2 cm). Para isso, foi realizado um ensaio comum para análise dessa propriedade: o abatimento de tronco de cone, ou *slump test*. Tal verificação tem seus

procedimentos descritos na NBR NM 67 (ABNT, 1998).

Esta norma estabelece o uso de um cone de  $300\pm 2$  cm de altura, com uma abertura inferior de  $200\pm 2$  mm e uma abertura superior de  $100\pm 2$  mm; uma haste metálica de 16 mm de diâmetro, 600 mm de comprimento e extremidades arredondadas; e uma base metálica de dimensões mínimas de 500 cm por 500 cm. O procedimento de execução do ensaio compreende em posicionar a abertura maior do cone sobre o centro da base metálica (ambos previamente umedecidos), preenchendo o cone com concreto em três camadas, cada uma com altura de aproximadamente um terço do total. Cada camada é compactada através de 25 golpes com a haste metálica, sendo que estes devem ser bem espaçados e não devem atingir as camadas inferiores. Estando o molde cheio, o concreto é nivelado com uma desempenadeira e o cone é puxado lentamente para cima. O abatimento é definido pela diferença entre a altura do molde e a altura do eixo do corpo-de-prova.

Realizado o ensaio, o abatimento do concreto não ficou dentro do limite de  $100\pm 2$  mm apenas com a água de amassamento. Assim, foi procedida à incorporação de aditivo superplastificante na mistura. De acordo com as orientações do fabricante do produto, o aditivo deve ser utilizado em dosagens entre 0,2 e 1,0% sobre a massa de cimento, sendo que a dosagem mínima foi suficiente para o traço sem sílica ativa atingir abatimento de 95 mm, enquanto que para o traço com sílica foi necessária uma dosagem de aditivo de 0,35% para que este atingisse um abatimento de 100 mm.

### **3.4 Programa experimental**

Conforme discorrido anteriormente, o objetivo do presente estudo é a avaliação do impacto que a cura térmica gera no concreto produzido, em termos de desenvolvimento de resistência e das características físicas adquiridas pelo material após a cura (porosidade, massa específica e absorvidade).

Desta forma, o programa experimental do presente trabalho possui três variáveis principais: o tipo de cura, o teor de sílica empregado e a idade do concreto.

Para cada valor/categoria das variáveis, foram moldados três corpos de prova, a fim de possibilitar a análise do resultado dos ensaios com seus respectivos desvios-padrão. Como os ensaios de compressão e tração são destrutivos, faz-se necessário moldar corpos de prova para cada idade.

### **3.4.1 Moldagem dos corpos de prova**

A moldagem dos corpos de prova seguiu os preceitos da NBR 5738 (ABNT, 2003), sendo que todos eles são do tipo cilíndricos, com dimensões de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura. Estando a mistura de concreto bem homogeneizada, os moldes dos CPs foram previamente preparados com uma fina película de óleo mineral nas suas paredes internas, a fim de facilitar o desmolde do corpo-de-prova após a cura do concreto. Utilizando uma concha de seção U, o concreto foi colocado dentro dos moldes em 2 camadas, sendo que cada uma foi adensada com 12 golpes, utilizando-se uma haste metálica – de 600 mm de comprimento, 16 mm de diâmetro e extremidade arredondada (FIGURA 18). Foi tomado o devido cuidado para que os golpes atingissem toda a seção transversal do molde e para que os golpes do adensamento da camada superior não chegassem à camada inferior. Considerando que, na segunda camada, é colocado concreto em quantidade além daquela necessária para preencher o molde, após procedido o adensamento o excesso foi rasado com uma colher de pedreiro.

### **3.4.2 Métodos de cura**

Com todos os corpos-de-prova moldados, foi procedida à cura dos mesmos, de acordo com o programa experimental proposto. Assim como a moldagem, não foi realizada a cura de todos os CPs conjuntamente, mas sim em lotes. A primeira concretagem foi das amostras submetidas à cura térmica em estufa; a segunda foi dos corpos-de-prova curados no vapor; e a última foi daqueles curados ao ambiente (cura úmida).

Importante lembrar que as curas térmicas do concreto só foram iniciadas com o fim da pega do cimento, sendo que não foi possível dar início à cura com o início da pega em função do tempo necessário para a realização das tarefas predecessoras (mistura do concreto, verificação do abatimento e moldagem dos corpos-de-prova). Conforme descrito anteriormente (item 3.1.1), o tempo de fim de pega do cimento utilizado é de aproximadamente 4 horas e 05 minutos, tempo este que inicia ao se misturar a água de amassamento ao cimento. Válido também frisar que o aditivo utilizado não altera o tempo de pega, conforme informações do fabricante. Desta forma, as curas foram executadas conforme descrição dos itens 3.6.1 a 3.6.3 a seguir.

#### 3.4.2.1 Cura térmica em estufa seca

A cura térmica sem vapor foi realizada em estufa da marca Quimis, a qual possui volume interno de 336 litros e potência de 3500 W, com controlador de temperatura que possibilita uma regulagem entre 15 e 300°C (FIGURA 19). Conforme exigido pela NBR 9062 (ABNT, 2017), no tratamento térmico isento de vapor as peças de concreto devem ser protegidas contra a secagem das superfícies não cobertas pelo molde, devendo estas serem mantidas úmidas ou serem cobertas com material impermeável. Assim, todos os corpos de prova submetidos a este tipo de cura foram cobertos com plástico filme na superfície exposta do concreto (FIGURA 20).

Figura 17 – Estufa utilizada na cura sem vapor dos corpos-de-prova



Fonte: do autor (2018).

Figura 18 – Corpos-de-prova moldados, com a face protegida por plástico filme

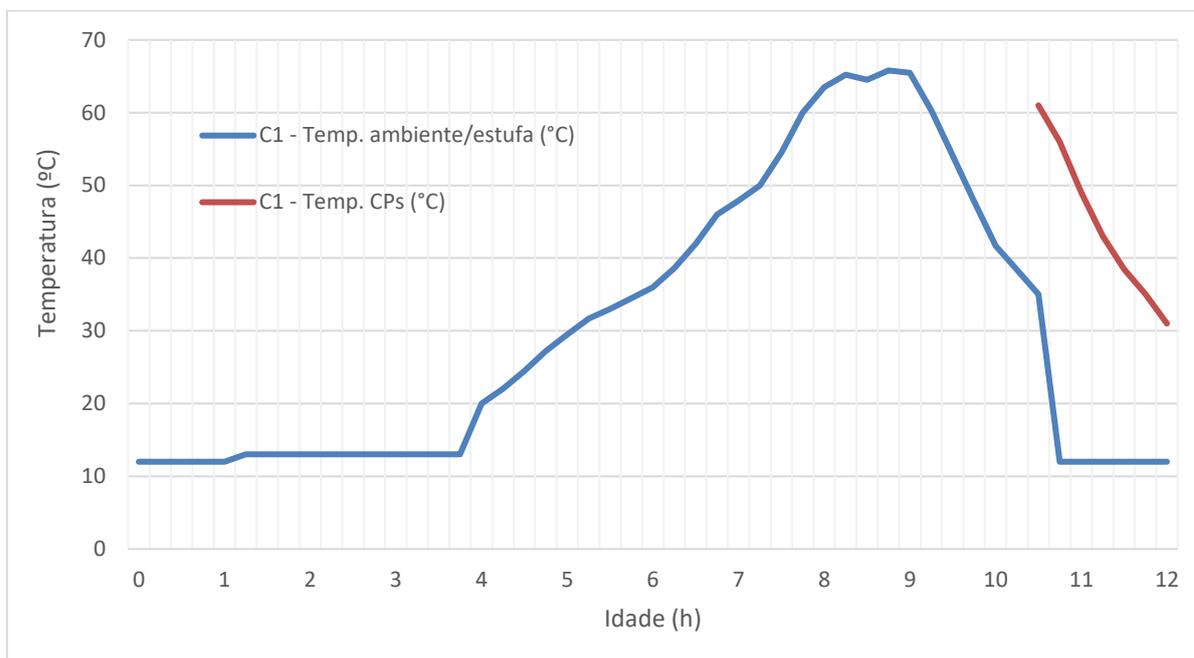


Fonte: do autor (2018).

Inicialmente, a estufa esteve desligada a fim de que sua temperatura interna fosse igual à temperatura ambiente externa na qual o concreto foi moldado – aproximadamente 13° no dia da concretagem. O termômetro digital do próprio equipamento foi utilizado para monitoramento da temperatura interna da estufa. O tratamento térmico iniciou com aproximadamente 4 horas de idade (tempo iniciado a partir da adição de água ao cimento), coincidindo com o tempo de fim de pega do cimento utilizado, conforme Tabela 3 apresentada anteriormente, o que se deu em função do longo tempo necessário para a realização do ensaio de abatimento e moldagem dos 42 corpos-de-prova.

O ciclo térmico de cura executado é baseado naquele demonstrado por El Debs (2000) e nas determinações da NBR 9062 (ABNT, 2017) (item 2.2.3), conforme Figura 21. Assim, dentro do possível, procurou-se elevar a temperatura da estufa progressivamente ( $\leq 20^{\circ}\text{C/h}$ ) até, aproximadamente 65°C, mantendo-se nesse patamar por cerca de 1,5 horas.

Figura 19 – Ciclo da cura térmica executada em estufa sem vapor



Fonte: do autor (2018).

O decréscimo de temperatura, segundo El Debs (2000), deve seguir o mesmo gradiente do aquecimento, o que não foi possível neste caso em função do tempo disponível, uma vez que os primeiros rompimentos deveriam ser executados com 12 horas. Por isso, reduziu-se a temperatura da estufa até cerca de 35°C, com 10,5 horas de idade, quando então os CPs foram retirados do equipamento. Um termômetro a laser foi utilizado para monitoramento da temperatura da superfície dos corpos-de-prova até o momento dos rompimentos (FIGURA 22).

A desmoldagem foi realizada com aproximadamente 11 horas de idade, sendo executada a retificação das peças e os seus respectivos rompimentos com 12 horas, conforme será detalhado adiante. Os CPs ensaiados em idades posteriores foram mantidos em câmara úmida até o momento de execução dos ensaios.

Figura 20 – Monitoramento da temperatura dos CPs com termômetro a laser



Fonte: do autor (2018).

#### 3.4.2.2 Cura térmica a vapor

A cura térmica a vapor foi procedida da mesma forma que a cura térmica em estufa no que se refere ao ciclo térmico. No entanto, ao invés da estufa seca, foi utilizada uma estufa a vapor, na qual a temperatura foi elevada pela ebulição de água. Neste caso, como a umidade do ar é muito alta – em decorrência do vapor – não foi necessário cobrir os CPs com plástico filme.

Tendo em vista que o LATEC não possui tal equipamento em seu parque, foi necessário a elaboração e montagem de uma estufa a vapor própria. Para isso, utilizando-se um reservatório de água fabricado em fibra de vidro e com capacidade para 500 litros, o qual foi preenchido com aproximadamente 100 litros de água (FIGURA 23). Um aquecedor elétrico, com potência de 3000 W, foi utilizado para aquecimento do líquido, sendo que a temperatura interna do reservatório foi monitorada com dois termômetros analógicos (FIGURA 24). Sobre um suporte de madeira foram posicionados os corpos-de-prova – ainda dentro dos seus respectivos moldes. Durante todo o tempo de cura, o reservatório foi mantido fechado, a fim de que evitar a fuga de calor do seu interior.

Figura 21 – Estufa a vapor montada para cura dos corpos-de-prova



Fonte: do autor (2018)

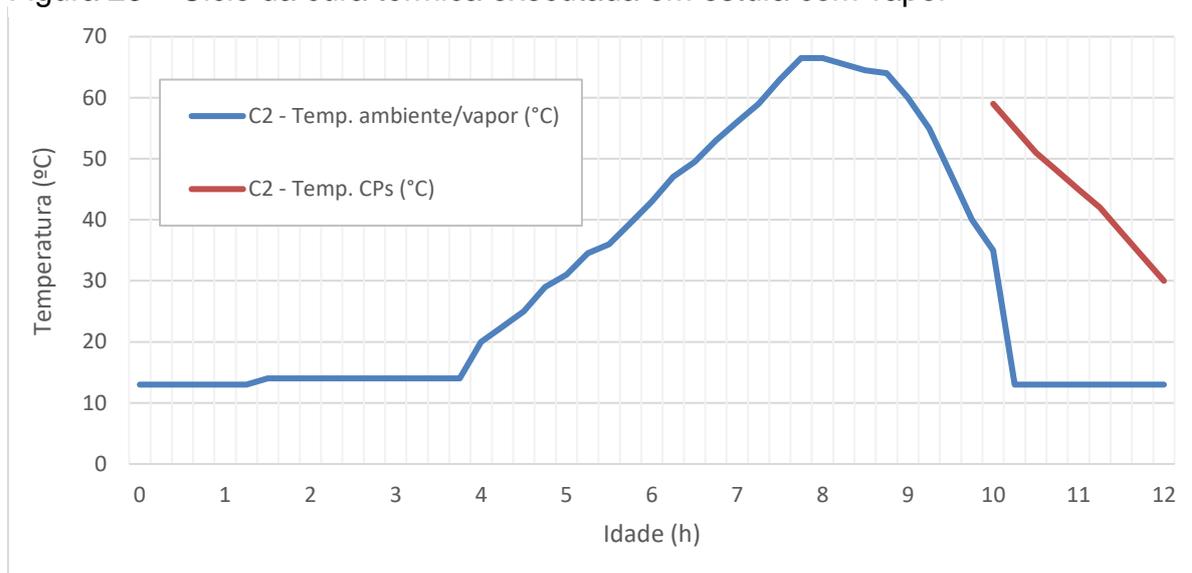
Figura 22 – Estufa fechada com termômetros monitorando a sua temperatura interna



Fonte: do autor (2018).

Buscou-se executar a cura com o mesmo período e gradientes térmicos da cura térmica em estufa. No entanto, a elevação da temperatura com vapor foi mais constante e uniforme, atingindo os 65°C cerca de 30 minutos antes que a estufa seca. Por isso, a redução da temperatura também foi iniciada 30 minutos mais cedo em relação ao método anterior. O ciclo térmico pode ser conferido no gráfico da Figura 25.

Figura 23 – Ciclo da cura térmica executada em estufa com vapor



Fonte: do autor (2018)

Assim como no método anterior, a retirada dos CPs da estufa ocorreu com 10,5 horas de idade, sendo que a temperatura das superfícies destes foi monitorada com um termômetro a laser. Os tempos de desmoldagem, retificação e rompimento também seguiram o mesmo padrão da cura em estufa sem vapor, sendo que os CPs rompidos em idades posteriores foram igualmente mantidos em câmara úmida entre a desmoldagem e o momento dos ensaios.

### 3.4.2.3 Cura ambiente

Após moldados os corpos-de-prova, estes permaneceram em local fechado, protegido do sol, vento e demais intempéries. No dia da moldagem desses CPs, a temperatura ambiente estava, em média, 14°C. Assim como foi executado nas curas anteriores, a desmoldagem ocorreu com aproximadamente 11h de idade, sendo então procedidas a retificação das peças e a execução dos ensaios de compressão e tração.

Os demais corpos-de-prova, ensaiados em datas posteriores, foram armazenados e mantidos em câmara úmida após a desmoldagem, a qual é mantida em temperatura de  $23 \pm 2$  °C, durante todo o período até os seus rompimentos. A umidade relativa do ar dentro da referida câmara é mantida acima de 95%, sendo que

os CPs são protegidos de água em movimento ou gotejamento, conforme estabelecido na NBR 5738 (ABNT, 2003).

### **3.4.3 Ensaio no estado endurecido**

Resumidamente, foram procedidos 3 tipos de ensaio do concreto no estado endurecido: compressão axial, tração por compressão diametral e os ensaios preconizados pela NBR 9778 (ABNT, 2005), os quais fornecem alguns parâmetros físicos do concreto endurecido, como índice de vazios, absorvidade e massa específica. Tais testes vão ser realizados em diversas idades, a fim de avaliar o desenvolvimento das propriedades de cada concreto, de acordo com a presença ou ausência de sílica ativa e do tipo de cura empregado. A relação completa de CPs submetidos aos respectivos ensaios está na Tabela 11 apresentada adiante.

Como pôde ser visto no ciclo térmico do Figura 25, o período entre a adição de água ao cimento e a finalização das curas iniciais – tanto a úmida como as térmicas – tem duração de aproximadamente 10,5 horas. Desta forma, realizada a desmoldagem, os corpos-de-prova ensaiados na idade de 12 horas ficaram expostos ao ambiente por aproximadamente 30 a 60 minutos, quando, então, foram rompidos.

#### **3.4.3.1 Compressão axial**

A avaliação da resistência à compressão do concreto foi realizada conforme procedimentos estabelecidos na NBR 5739 (ABNT, 2007), utilizando-se uma prensa hidráulica da marca EMIC, com capacidade de compressão de 2000 kN (FIGURA 26). No total, 45 corpos-de-prova cilíndricos de dimensões de 10 x 20 cm, foram submetidos a este ensaio, sendo 3 para cada teor de sílica e tipo de cura, em cada uma das três idades (TABELA 9).

Figura 24 – Ensaio de compressão axial dos corpos-de-prova de concreto



Fonte: do autor (2018).

Tabela 9 – CPs submetidos a compressão axial

	Compressão			
	Teor Sílica	12h	7 dias	28 dias
Cura térmica a vapor	0%	3	3	3
	10%	3	3	3
Cura térmica a seco	0%	3	3	3
	10%	3	3	3
Cura ambiente	0%	3	3	3
TOTAL				45

Fonte: do autor (2018).

Respeitando o que preconiza a norma, as superfícies nas quais a prensa aplica a força devem estar totalmente regularizadas, condição esta que não é satisfeita apenas com a desmoldagem das peças. Assim, anteriormente ao ensaio em si, os CPs tiveram suas faces superior e inferior regularizadas através de máquina retificadora.

### 3.4.3.2 Tração por compressão diametral

Já a análise da resistência à tração dos concretos foi realizada a partir de compressão diametral das peças, seguindo o que determina a NBR 7222 (ABNT, 2011). Neste ensaio, também foram utilizados 45 corpos de prova, na mesma distribuição de curas e idades que aquela apresentada no item anterior (TABELA 10).

O equipamento utilizado é a mesma prensa hidráulica da compressão axial. Neste ensaio, no entanto, o corpo-de-prova é posicionado horizontalmente dentro de um suporte que distribui a força aplicada pelo equipamento em uma pequena faixa ao longo da peça ensaiada (FIGURA 27).

Tabela 10 – CPs submetidos a tração por compressão diametral

Tração por compressão diametral				
	Teor Sílica	10h	7 dias	28 dias
Cura térmica a vapor	0%	3	3	3
	10%	3	3	3
Cura térmica a seco	0%	3	3	3
	10%	3	3	3
Cura úmida	0%	3	3	3
TOTAL				45

Fonte: elaborado pelo autor (2018).

Figura 25 – Ensaio de tração por compressão diametral.



Fonte: do autor (2018).

### 3.4.3.3 Absorção, índice de vazios e massa específica

Por fim, aos 28 dias, foram realizados os procedimentos preconizados pela NBR 9778 (ABNT, 2005), através dos quais podem ser obtidos uma série de parâmetros físicos do concreto no estado endurecido. Aqueles de maior interesse no presente trabalho são o índice de vazios, a absorvidade e a massa específica do concreto.

Primeiramente, os CPs foram secados em estufa a  $105\pm 5^{\circ}\text{C}$  durante um período de 72 horas, sendo então pesados e mantidos resfriando ao ambiente por aproximadamente 18 horas. Em seguida, estes foram submersos em água por um período de 72 horas, após o qual foram novamente pesados. Na sequência, os CPs foram submetidos à fervura, por um período de 5 horas, sendo posteriormente deixados resfriando à temperatura ambiente até aproximadamente  $23^{\circ}\text{C}$ . Por fim, foram pesados em balança hidrostática.

Os cálculos dos parâmetros são realizados através das Equações 10 a 12 a seguir.

$$Ab = \frac{(B-A)}{A} * 100 \quad (11)$$

$$i = \frac{(B-A)}{(B-D)} * 100 \quad (12)$$

$$\gamma = \frac{A}{(A-D)} \quad (13)$$

Onde:

Ab = Absorção de água após 72h de imersão (%)

i = índice de vazios (%)

$\gamma$  = massa específica real ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

A = massa da amostra seca em estufa (g)

B = massa da amostra saturada em água e superfície seca (g)

D = massa da amostra saturada, submersa (g)

### 3.5 Análise de variância (ANOVA)

A fim de verificar a relevância estatística das variáveis impostas às amostras da pesquisa, será realizada a análise de variância (ANOVA) dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão axial e de tração por compressão diametral. De acordo com Anjos (2009), essa técnica estatística busca aferir a ocorrência de diferenças significativas entre as médias de cada grupo analisado, bem como se as variáveis desempenham alguma influência nos resultados.

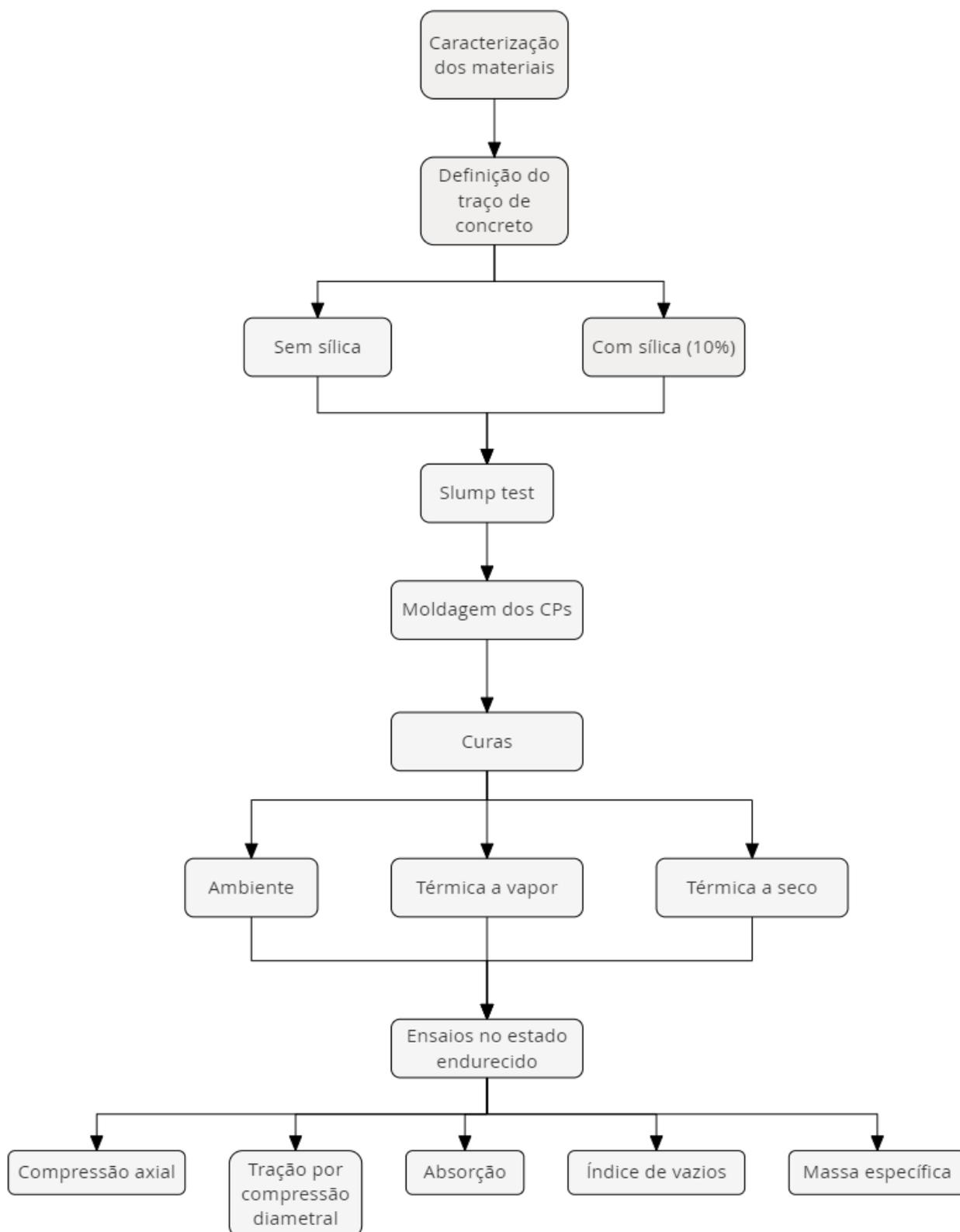
Resumidamente, a ANOVA se utiliza da soma dos quadrados de cada tratamento (conjunto amostral) e dos quadrados médios para a realização do teste F. Quando F calculado é superior a F crítico, considera-se que há diferenças significativas entre pelo menos duas médias de amostras, ou seja, o fator tem influência estatisticamente relevante nos resultados. Outra forma de realizar essa avaliação é utilizando-se o fator valor-P – quando este é inferior ao erro admissível ( $\alpha$ ), há diferenças significativas entre médias. Nesta pesquisa,  $\alpha$  foi definido em 0,05.

Como não é o objetivo do presente estudo o detalhamento dessa metodologia, foi utilizado o módulo de Análise de Dados do software Microsoft Excel, o qual calcula prontamente todos esses parâmetros através dos resultados individuais das amostras.

### 3.6 Resumo da pesquisa

Como pode ser observado no fluxograma da Figura 28 e na descrição dos ensaios realizados, o programa experimental possui três variáveis principais: a presença de sílica ativa, o tipo de cura empregado e a idade de ensaio dos corpos-de-prova de concreto. No que se refere ao aditivo superplastificante, cuja quantidade variou conforme o abatimento em cada traço, considerando que a relação água/cimento permaneceu constante em todos os traços e que o aditivo não acelera e nem retarda a pega, a presença do superplastificante não é considerada uma variável. Desta forma, se buscará a avaliação do desempenho do concreto em cada tipo de cura e, concomitantemente, com as adições de sílica ativa e aditivo.

Figura 26 – Fluxograma da pesquisa



Fonte: do autor (2018).

Assim, considerando todos os ensaios realizados ao longo do estudo, as quantidades de CPs que foram necessários moldar estão elencadas na Tabela 11.

Tabela 11 – CPs moldados para os ensaios

	Teor Sílica	Compressão			Tração			Absorção / massa esp. / índice vazios
		12h	7 dias	28 dias	12h	7 dias	28 dias	28 dias
Cura térmica a vapor	0%	3	3	3	3	3	3	3
	10%	3	3	3	3	3	3	3
Cura térmica a seco	0%	3	3	3	3	3	3	3
	10%	3	3	3	3	3	3	3
Cura úmida	0%	3	3	3	3	3	3	3
Total CPs								105

Fonte: do autor (2018).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Realizados todos os ensaios do programa experimental, parte-se para a apresentação dos resultados e, conjuntamente, a discussão a respeito dos mesmos. Primeiramente, será realizada uma breve análise comparativa entre os ciclos térmicos aplicados em cada uma das curas executadas, a fim de verificar se a comparação entre os protótipos é válida. Em seguida, serão apresentados os resultados dos ensaios de resistência mecânica (compressão axial e tração por compressão diametral) e de índice de vazios, absorção e massa específica.

Concomitantemente, os resultados da pesquisa serão comparados com estudos semelhantes – como aqueles já mencionados ao longo do capítulo 3 – com o objetivo de identificar semelhanças e/ou discrepâncias, bem como os motivos e variáveis que originaram eventuais alterações.

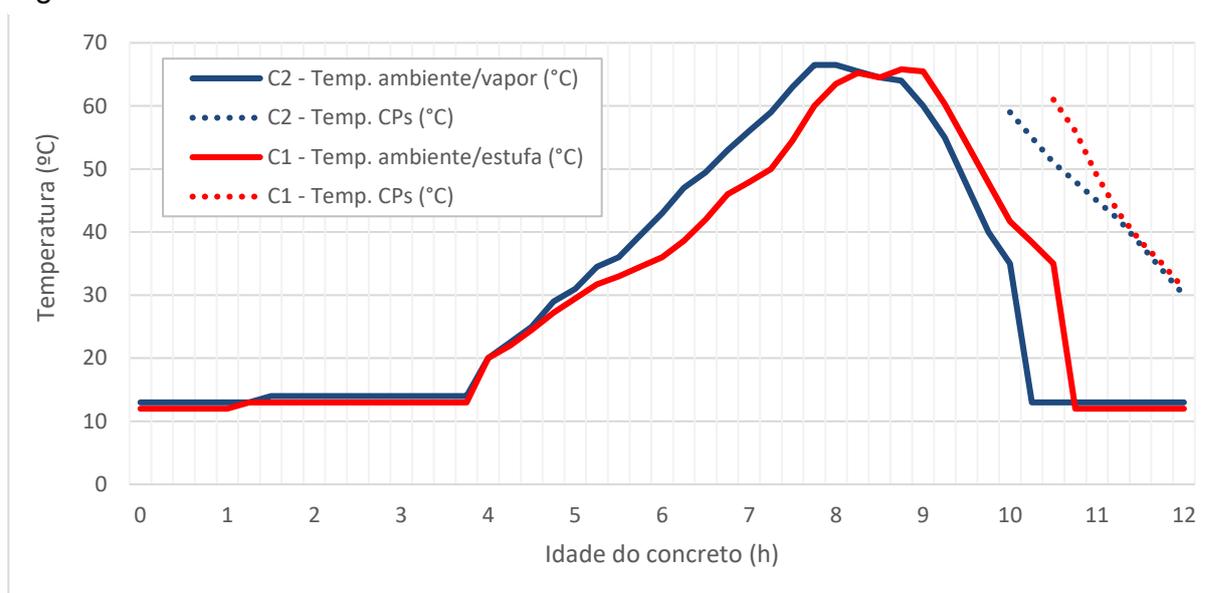
### 4.1 Análise dos ciclos térmicos

No gráfico da Figura 29, estão expressos o ciclo térmico executado na cura em estufa seca e o ciclo térmico executado na cura em estufa a vapor. Como pode ser observado, o tratamento térmico, em ambos os casos, foi iniciado cerca de 4 horas após a adição de água ao cimento, período durante o qual as temperaturas foram muito semelhantes e estáveis – entre 12°C e 14°C. Esse tempo de pré-cura ( $t_0$ ) coincide com o tempo de fim de pega do CPV-ARI utilizado na pesquisa, ficando no

limite do tempo recomendado pelas diversas bibliografias mencionadas no Capítulo 3 (início e fim de pega).

Da mesma forma, a elevação da temperatura ( $t_1$ ) foi em ritmos muito semelhantes nos dois casos – aproximadamente  $14^\circ\text{C/h}$  no vapor e  $12,5^\circ\text{C/h}$  na estufa. Como o ritmo de aquecimento no vapor foi mais constante e atingiu o patamar de  $60\text{-}65^\circ\text{C}$  ( $t_2$ ) cerca de 30 minutos mais cedo, o período de esfriamento ( $t_3$ ) também foi iniciado 30 minutos antes no vapor, sendo que a diminuição de temperatura foi de aproximadamente  $42^\circ\text{C/h}$  em ambas as curas. Tal arrefecimento mais brusco foi necessário em função do pouco tempo restante até a idade dos primeiros rompimentos (12h).

Figura 27 – Ciclos térmicos das curas térmicas



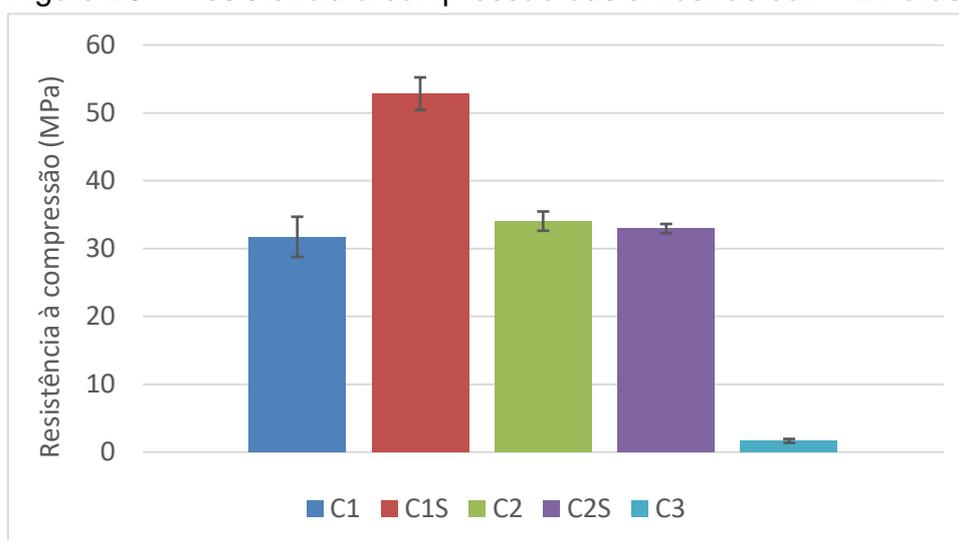
Fonte: do autor (2018).

Desta forma, fica claro que, apesar das duas curas térmicas terem sido procedidas em dias distintos e utilizando técnicas diferentes, os ciclos térmicos foram consideravelmente semelhantes entre si em todas as suas fases –  $t_0$ ,  $t_1$ ,  $t_2$  e  $t_3$  – bem como as temperaturas superficiais dos corpos-de-prova no momento da execução dos ensaios na idade de 12 horas foram similares – aproximadamente  $31^\circ\text{C}$ . É válido, portanto, o comparativo de resultados entre as duas curas térmicas e a cura ambiente.

## 4.2 Resistência à compressão

No gráfico da Figura 30, estão apresentados os resultados médios das resistências mecânicas obtidas no ensaio de compressão axial de cada conjunto de amostras do programa experimental, na idade de 12 horas, onde C1 é o traço sem sílica curado em estufa, C1S é o traço com sílica curado em estufa, C2 é o traço sem sílica curado no vapor, C2S é o traço com sílica curado no vapor e C3 é o traço sem sílica curado ao ambiente. Os traços presentes na parte superior de cada barra representam o desvio-padrão calculado para os conjuntos amostrais. Os dados individuais de cada amostra podem ser conferidos no Apêndice A, ao final deste trabalho.

Figura 28 – Resistência à compressão das amostras com 12 horas



Fonte: do autor (2018).

A primeira análise que pode ser feita a partir dos resultados apresentados na Figura 30 é quanto à eficiência da cura térmica em termos de desenvolvimento de resistência mecânica nas primeiras horas. Como pode ser verificado, ambos os traços, curados tanto em estufa como a vapor, superaram a resistência mínima indicada para desforma e manuseio de pré-moldados – 15MPa, de acordo com El Debs (2000). Enquanto isso, a cura ambiente não chegou nem perto desse valor, evidenciando que, de fato, o tratamento com altas temperaturas foi o fator determinante no rápido desenvolvimento de resistência. Lembrando que a temperatura ambiente no dia da

concretagem do grupo C3 estava relativamente baixa – cerca de 14°C – o que contribuiu para o baixo desenvolvimento de resistência do concreto nas primeiras 12 horas.

Embora a idade do primeiro rompimento e os traços de concreto tenham sido diferentes, Martins (2001) obteve resultados semelhantes. Com 24 horas de idade, relação a/c igual a 0,42 e utilizando um patamar de temperatura de 60°C, as amostras da autora atingiram resistências de 35 MPa, utilizando CPV-ARI-RS. Stein (2014), de forma análoga, obteve resistências médias de 26,4 MPa, utilizando o mesmo tipo de cimento, relação a/c igual a 0,50 e um patamar de temperatura de 60°C. Dos Santos (2016), utilizando relação a/c de 0,44, ciclos mais longos de cura térmica (cerca de 11 horas) e temperaturas entre 60 e 70°C, atingiu valores entre 55 e 61 MPa às 24 horas com cura térmica e 28 MPa com cura ambiente (28°C).

Em segundo lugar, percebe-se que o resultado do traço com sílica curado em estufa (C1S) destoou totalmente das demais amostras curadas sob altas temperaturas. Inicialmente, pressupôs-se que essa discrepância de resultados entre C1 e C1S se devesse a algum efeito da sílica ativa utilizada no concreto, uma vez que esta era a única variável que diferenciava esses dois grupos. Tal hipótese, no entanto, foi descartada, uma vez que os mesmos dois traços, quando curados a vapor (C2 e C2S) e sob ciclo térmico muito semelhante ao da estufa – conforme já demonstrado no gráfico da Figura 29 – não apresentaram tamanha disparidade.

Nesse sentido, algumas informações importantes a respeito da configuração física da estufa e de como os corpos-de-prova foram posicionados no seu interior devem ser esclarecidas, posto que a solução para essa questão foi obtida a partir da análise desses fatos: primeiramente, a estufa possui as resistências elétricas instaladas na sua parte inferior, logo abaixo da primeira bandeja. Em contrapartida, o seu termômetro fica instalado no topo do equipamento, acima da última bandeja e distante cerca de 80 centímetros do fundo. Por questões de espaço e distribuição de peso, os corpos-de-prova sem sílica ativa (C1) foram posicionados na bandeja superior – próximos ao termômetro – e os corpos-de-prova com sílica (C1S) foram posicionados na bandeja inferior – próximos às resistências elétricas. Desta forma,

optou-se por realizar testes para a verificação de eventuais variabilidades agudas de temperatura entre as diferentes bandejas do equipamento, o que poderia ser a causa da diferença de resultados. Posicionando um termômetro eletrônico no topo da estufa e outro no fundo do equipamento, as temperaturas foram monitoradas durante cerca de trinta minutos. Nesse processo constatou-se que, de fato, ocorre um gradiente térmico considerável entre as extremidades inferior e superior do equipamento. No patamar de temperatura, quando o termômetro da própria estufa marcava cerca de 72°C e o termômetro posicionado no topo indicava 70°C, o dispositivo instalado na bandeja inferior informava uma temperatura de até 95°C. Ou seja, o traço C1S foi, provavelmente, submetido a temperaturas 20 a 25°C superiores às aquelas apresentadas no gráfico da Figura 29. Sendo assim, torna-se inválida a comparação direta de C1S com os demais grupos, no que se refere às duas variáveis em análise – tipo de cura e presença de sílica ativa – uma vez que foi imposta uma nova variável (temperatura) a esse grupo. O que não impede, no entanto, de serem feitas análises dos impactos que a temperatura ainda mais elevada gerou nas amostras, principalmente no caso de as curas térmicas a seco e a vapor vierem a apresentar resultados semelhantes entre si, dado que os grupos C2 e C2S não sofreram com o mesmo problema.

A análise de variância (ANOVA) foi realizada para verificar a influência estatística do tipo de cura térmica nos resultados de resistência à compressão com 12 horas de idade. Na Tabela 12 estão elencados os resultados da análise entre C1 e C2, de forma que o valor de F deve ser menor que F crítico e valor-P deve ser maior que o erro admissível (neste estudo adotado 0,05) para que o fator (tipo de cura) não represente, estatisticamente, efeito sobre a resistência mecânica do concreto.

Tabela 12 – ANOVA entre C1 e C2 às 12 horas de idade, onde o fator é o tipo de cura

<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>F crítico</b>
Entre grupos	8,027	1	8,027	1,489	0,289	7,709
Dentro dos grupos	21,564	4	5,391			
<b>Total</b>	<b>29,591</b>	<b>5</b>				

Onde: SQ = soma quadrada; gl = graus de liberdade; MQ = média quadrada

Fonte: do autor (2018).

Da mesma forma, a análise de variância entre C2 e C2S (TABELA 13) buscou verificar a influência da presença de sílica ativa na resistência mecânica do concreto na idade de 12 horas. Igualmente à análise anterior, para que o fator (neste caso, a presença de sílica) não tenha interferência estatística nos resultados, F deve ser inferior a F crítico e valor-P superior ao erro admissível (0,05).

Tabela 13 – ANOVA entre C2 e C2S às 12 horas, onde o fator é a presença da sílica

<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>F crítico</b>
Entre grupos	1,782	1	1,782	1,434	0,297	7,709
Dentro dos grupos	4,973	4	1,243			
<b>Total</b>	<b>6,755</b>	<b>5</b>				

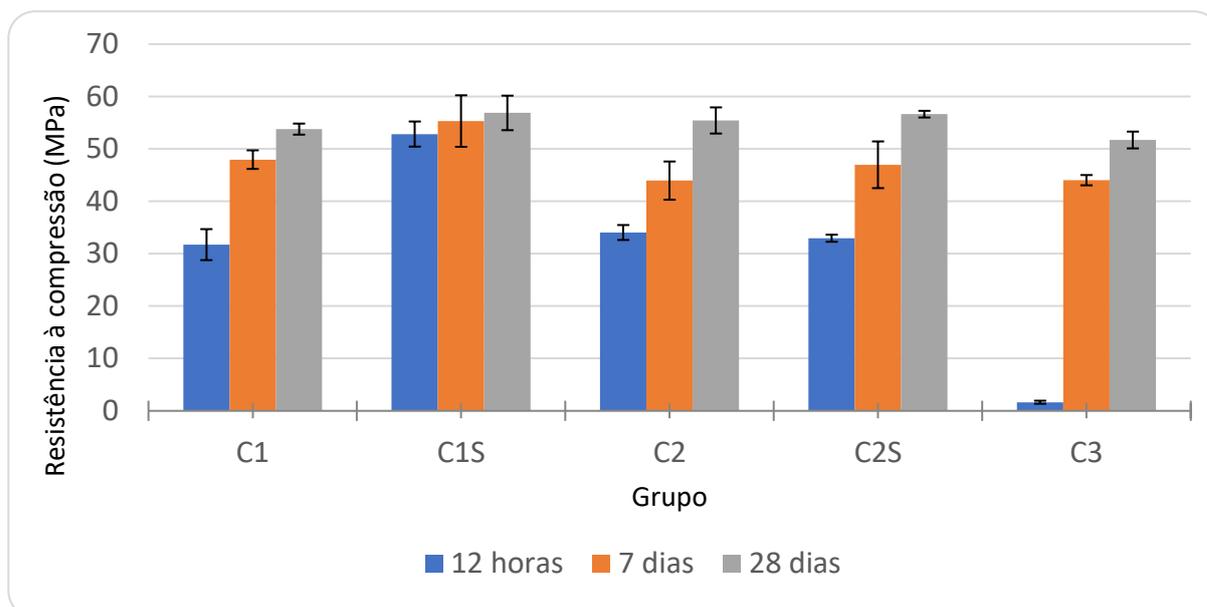
Onde: SQ = soma quadrada; gl = graus de liberdade; MQ = média quadrada

Fonte: do autor (2018).

Através das análises de variância, verifica-se que os resultados de resistência à compressão axial dos grupos curados termicamente – com exceção de C1S – não sofreram influência do tipo de cura térmica e da presença de sílica ativa no traço, considerando-se a idade de 12 horas. Isso indica que, visando apenas o rápido desenvolvimento de resistência nas primeiras horas, qualquer uma das curas térmicas poderia ser empregada.

No gráfico da Figura 31 a seguir, estão apresentados os resultados de resistência à compressão axial em todas as idades ensaiadas – 12 horas, 7 dias e 28 dias. Os resultados individuais estão elencados em tabela no Apêndice A. A partir deles, podem ser desenvolvidas algumas análises e discussões.

Figura 29 – Resistência a compressão axial nas idades de 12 horas, 7 dias e 28 dias



Fonte: do autor (2018).

Primeiramente, nota-se a pouca evolução da resistência mecânica do grupo C1S entre as idades de ensaios. O resultado médio aumentou menos de 5% entre as idades de 12 horas e de 7 dias; e menos de 3% entre 7 e 28 dias. Isso evidencia que a temperatura mais elevada à qual esse grupo foi submetido (cerca de 85 a 90°C em seu patamar) acelerou a hidratação do cimento ao ponto de atingir 93% de  $f_{c28}$  com apenas 12 horas de idade.

Outro ponto que chama a atenção é o grande ganho de resistência do grupo C3 (cura ambiente) entre as idades de 12 horas e 7 dias, cerca de 26 vezes. Embora a utilização de cimento de alta resistência inicial (CPV-ARI) já presumisse um rápido desenvolvimento de resistência mecânica nos primeiros dias, é notável o fato de o concreto curado ao ambiente nas primeiras 12 horas e na câmara úmida no restante do tempo, ter igualado os resultados obtidos pelos grupos curados termicamente.

Nesse sentido, Rohden et al. (2017) obtiveram resultados semelhantes. Com uma relação  $a/c$  igual a 0,45 e um ciclo térmico com temperatura patamar de 70°C, as amostras curadas termicamente obtiveram o dobro de resistência das amostras curadas ao ambiente com 20 horas de idade, mas foram alcançadas na idade de 7 dias.

A análise de variância realizada entre os resultados de 7 dias dos traços sem sílica (C1, C2 e C3), na qual o fator é o tipo de cura – térmica a seco, térmica a vapor ou ambiente – mostra que, nesta idade, o tipo de cura não tem influência estatística sobre a resistência mecânica do concreto (TABELA 14).

Tabela 14 – ANOVA entre C1, C2 e C3 aos 7 dias, onde o fator é o tipo de cura

<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>F crítico</b>
Entre grupos	31,478	2	15,739	2,714	0,145	5,143
Dentro dos grupos	34,800	6	5,800			
<b>Total</b>	<b>66,278</b>	<b>8</b>				

Onde: SQ = soma quadrada; gl = graus de liberdade; MQ = média quadrada

Fonte: do autor (2018).

A mesma análise entre C2 e C2S, cujo fator é a presença de sílica ativa, mostra que a adição dessa pozolana ainda não apresentou influência estatisticamente relevante na resistência mecânica do concreto aos 7 dias. Embora a resistência média de C2S tenha ficado cerca de 7% acima de C2 nesta idade, a dispersão de resultados individuais não permite afirmar que o traço com sílica seja mais resistente aos 7 dias. As indicações de desvio-padrão na Figura 31 e a análise de variância da Tabela 15 demonstram isso.

Tabela 15 – ANOVA entre C2 e C2S aos 7 dias, onde o fator é presença de sílica

<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>F crítico</b>
Entre grupos	13,680	1	13,681	0,825	0,415	7,709
Dentro dos grupos	66,326	4	16,581			
<b>Total</b>	<b>80,006</b>	<b>5</b>				

Onde: SQ = soma quadrada; gl = graus de liberdade; MQ = média quadrada

Fonte: do autor (2018).

Quanto aos resultados de compressão aos 28 dias, percebe-se que todos os grupos mantiveram as evoluções de resistência, ainda que mais tímidas se comparadas à evolução entre 12 horas e 7 dias. A Tabela 16 apresenta os resultados médios na idade de 28 dias, bem como as relações de resistência nas idades

anteriores em relação a  $f_{c28}$ .

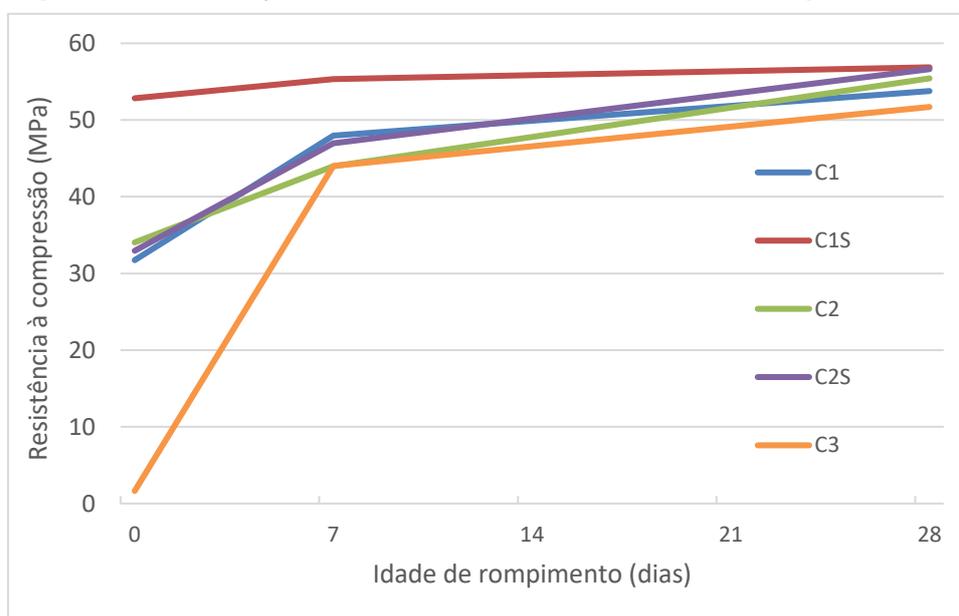
Tabela 16 – Resistências à compressão em relação a  $f_{c28}$

	<b>C1</b>	<b>C1S</b>	<b>C2</b>	<b>C2S</b>	<b>C3</b>
$\frac{f_{c_{0,5}}}{f_{c_{28}}}$	59%	93%	61%	58%	3%
$\frac{f_{c_7}}{f_{c_{28}}}$	89%	97%	79%	83%	85%
$f_{c_{28}}$ (MPa)	53,78	56,87	55,43	56,63	51,70

Fonte: do autor (2018).

A Figura 32 mostra graficamente essas evoluções, sendo possível visualizar a diferença dos ganhos de resistência entre os grupos curados termicamente e o grupo curado ao ambiente, bem como a discrepância gerada pela maior temperatura de cura de C1S. Também é interessante observar a convergência das linhas de resistência de cada grupo para resultados semelhantes aos 28 dias.

Figura 30 – Evolução de resistência à compressão dos grupos

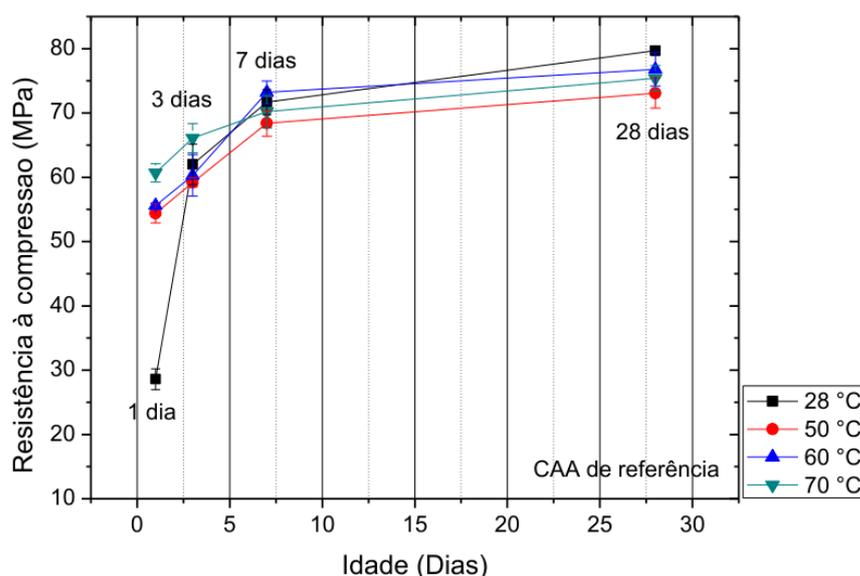


Fonte: do autor (2018).

É interessante a comparação entre os resultados apresentados na Figura 32 com os resultados publicados por dos Santos (2016) na Figura 33. Verifica-se que o autor também obteve resistências altas para os concretos curados termicamente nas

primeiras 24 horas, mantendo um ritmo alto de crescimento até os 7 dias e diminuindo até os 28 dias. Embora a cura ambiente tenha atingido resistências relativamente mais altas já no primeiro rompimento (cerca de 28 MPa), isso se deve, provavelmente, à temperatura ambiente mais alta (28°C) e ao fato de o primeiro ensaio ter sido executado com apenas 24 horas de idade. Chama a atenção, ainda, o fato de os resultados da cura ambiente terem ultrapassado as resistências da cura térmica na idade de 28 dias, o que pode ser explicado pela adoção de um ciclo térmico mais longo (11 horas), uma relação a/c mais alta (0,44) e o tempo de início do tratamento térmico, que correspondeu ao início de pega do cimento utilizado (3 horas).

Figura 31 – Resistências à compressão obtidas por dos Santos (2016)



Fonte: dos Santos (2016).

Em relação aos valores de  $f_{c28}$ , percebe-se que os traços com sílica (C1S e C2S) atingiram resultados médios levemente superiores aos traços sem sílica (C1 e C2) submetidos ao mesmo tipo de cura. Entre os traços sem sílica, a cura térmica a vapor (C2) também apresentou uma leve superioridade de resistência mecânica em relação à cura térmica em estufa (C1). A dispersão dos resultados individuais de cada CP (desvios-padrão), no entanto, representa uma baixa confiabilidade em se afirmar que um tipo de cura térmica é superior ao outro, ou que a adição de sílica ativa represente ganho de resistência aos 28 dias. As análises de variância da Tabela 17 (entre C1 e C2) e da Tabela 18 (entre C2 e C2S), corroboram a fragilidade dessas

correlações no presente estudo.

Tabela 17 – ANOVA entre C1 e C2 aos 28 dias, onde o fator é o tipo de cura

<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>F crítico</b>
Entre grupos	4,117	1	4,117	1,120	0,350	7,709
Dentro dos grupos	14,697	4	3,674			
<b>Total</b>	<b>18,814</b>	<b>5</b>				

Onde: SQ = soma quadrada; gl = graus de liberdade; MQ = média quadrada

Fonte: do autor (2018).

Tabela 18 – ANOVA entre C2 e C2S aos 28 dias, onde o fator é o tipo de cura

<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>F crítico</b>
Entre grupos	2,160	1	2,160	0,650	0,465	7,709
Dentro dos grupos	13,288	4	3,322			
<b>Total</b>	<b>15,448</b>	<b>5</b>				

Onde: SQ = soma quadrada; gl = graus de liberdade; MQ = média quadrada

Fonte: do autor (2018).

Esses resultados vão de encontro com o que foi constatado em estudos análogos a respeito dos impactos que a cura térmica gera no concreto e os benefícios da adição de sílica ativa. Conforme já discorrido no item 2.1.3, diversas dessas pesquisas concluíram que, embora a cura térmica possibilite resistências altas já nas primeiras horas de idade, aos 28 dias os resultados costumam ser inferiores àqueles do concreto curado de forma tradicional. De Melo (2000) também constatou que a eficiência da sílica ativa é melhorada em altas temperaturas e em ciclos térmicos curtos, desta forma compensando as perdas de resistência decorrentes da cura térmica.

Como poderá ser conferido no item 4.4, de fato as porosidades foram maiores nas amostras curadas termicamente, em comparação com aquelas curadas ao ambiente. Em relação à sílica ativa, os traços com essa adição apresentaram índices de vazios inferiores àqueles sem sílica. Apesar disso, as resistências mecânicas apresentaram comportamento adverso daqueles supramencionados, o que, a bem da verdade, é positivo, uma vez que demonstra que a cura térmica pode prover

resistências maiores tanto nas primeiras horas como em idades superiores.

Algumas hipóteses podem ser levantadas para explicar esses fenômenos. A baixa relação água/cimento pode ser uma das explicações para isso, posto que este é um dos fatores que altera os tempos de pega do cimento e que concretos com relações a/c mais baixas costumam ter um comportamento muito melhor na cura a vapor do que aqueles com relação a/c maior (NEVILLE, 2016). Na pesquisa de Bardella et al. (2005), uma relação a/c não muito superior à utilizada no presente trabalho (0,42) produziu resultados muito semelhantes aos 28 dias, onde os concretos curados termicamente apresentaram resistências à compressão levemente superiores aos concretos curados ao ambiente. Aos 90 e aos 180 dias, porém, a cura ambiente superou as resistências da cura térmica em aproximadamente 5 a 16%, dependendo do traço. Isso pode indicar que, no presente trabalho, rompimentos em idades posteriores poderiam apresentar a superação das resistências da cura ambiente em detrimento da cura térmica.

Outro ponto da metodologia que diferenciou o presente estudo dos demais – e que pode ter tido influência nos resultados – é o tempo de espera antes da aplicação do tratamento térmico no concreto ( $t_0$ ). Conforme já discorrido anteriormente, cada temperatura de cura tem um tempo de espera (período preliminar) adequado, após o qual o rápido incremento de temperatura não afeta negativamente as resistências à compressão do concreto em idades maiores. Isto se deve, segundo Shindeler e Chamberlin *apud* dos Santos (2016), ao fato de que as resistências nas idades finais sofrem grande influência da temperatura do concreto durante o período de pega. Em outras palavras, é aconselhável aguardar o fim do tempo de pega do cimento para que então se proceda à cura térmica.

Nesse sentido, a maioria dos estudos consultados adotaram como  $t_0$  o tempo de início de pega do cimento, enquanto que, no presente estudo, o período preliminar se encerrou com o tempo de fim de pega. Os dados sintetizados por dos Santos (2016) e já apresentados na Tabela 3 demonstram que tempos de pré-cura mais longos produzem efeitos positivos na resistência do concreto curado termicamente. É válido ainda mencionar que, na pesquisa realizada por Bardella *et al.* (2005) e que produziu

resultados semelhantes ao presente estudo, o  $t_0$  adotado também foi coincidente com o tempo de fim de pega do cimento – naquele caso, onde foi utilizado o C-III, 8 horas.

A respeito dos resultados apresentados por C1S (grupo que foi submetido a temperaturas mais elevadas, na ordem de 85-90°C), vê-se que, além de a hidratação ter sido ainda mais acelerada, os resultados de resistência aos 28 dias foram levemente superiores aos demais – sendo praticamente idêntico ao grupo C2S. Isso indica que a temperatura mais elevada não foi prejudicial ao concreto, ao menos em relação à resistência mecânica aos 28 dias.

Por fim, chama a atenção o fato de o grupo C3 (cura ambiente) ter atingido valores médios de resistência inferiores aos grupos curados termicamente, mesmo aqueles sem sílica ativa. A análise de variância entre os três traços sem sílica ativa (TABELA 19) mostra que esses grupos têm uma distribuição de resultados tal que não se pode afirmar que há influência estatística do tipo de cura na resistência mecânica do concreto, aos 28 dias.

Tabela 19 – ANOVA entre C1, C2 e C3 aos 28 dias, onde o fator é o tipo de cura

<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>F crítico</b>
Entre grupos	12,345	2	6,173	2,386	0,173	5,143
Dentro dos grupos	15,520	6	2,587			
<b>Total</b>	<b>27,865</b>	<b>8</b>				

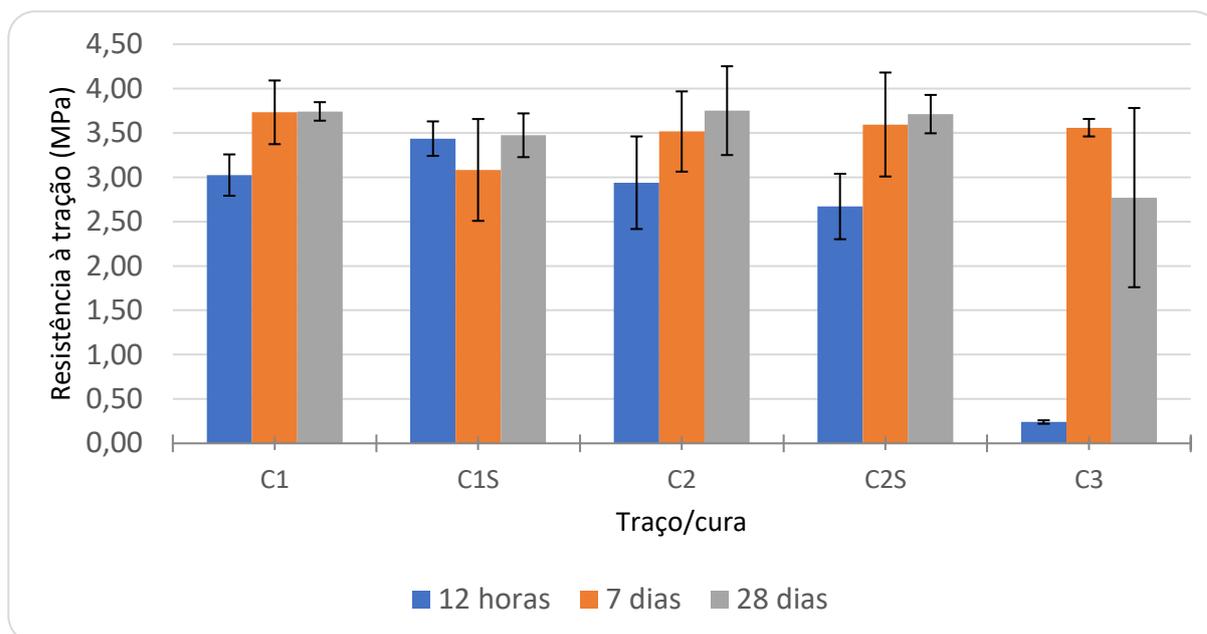
Onde: SQ = soma quadrada; gl = graus de liberdade; MQ = média quadrada

Fonte: do autor (2018).

### **4.3 Resistência à tração por compressão diametral**

No gráfico da Figura 34, estão representados os resultados médios de resistência à tração por compressão diametral dos corpos-de-prova moldados, com os seus respectivos desvios-padrão, em todas as idades de rompimento. Os valores individuais de cada amostra estão elencados no Apêndice A.

Figura 32 – Resistências à tração por compressão diametral dos CPs



Fonte: do autor (2018).

No ensaio de 12 horas, houve algumas semelhanças de resultados com o ensaio de resistência à compressão, em termos comparativos entre os grupos curados termicamente e o grupo curado ao ambiente. Vê-se que as amostras C1, C1S, C2 e C2S desenvolveram boa parte da sua resistência mecânica já nas primeiras horas, atingindo resultados médios entre 2,5 e 3,5 MPa. Enquanto isso, as amostras C3 desenvolveram resistências médias ínfimas nesse mesmo período, cerca de 0,25 MPa.

Um ponto que chama a atenção aqui é que o grupo C1S, que, acidentalmente, foi curado em temperaturas mais altas, não apresentou desenvolvimento de resistência tão mais elevado às 12 horas em relação aos demais grupos, diferentemente do que aconteceu no ensaio de resistência à compressão. Embora a média dos resultados de C1S tenha ficado levemente superior aos grupos C1, C2 e C2S – entre 14 e 29% – nada comparado à diferença constatada no ensaio anterior – cerca de 55 a 66% superior aos demais.

No ensaio de 7 dias, os grupos C1, C2 e C2S apresentaram evoluções semelhantes na resistência, com ganhos entre 19 e 34%. Assim como na resistência à compressão, foi nesse período em que o grupo C3 apresentou a maior evolução de

resultados, neste caso aumentando em quase 15 vezes e igualando aos resultados dos demais grupos. A análise de variância entre os traços sem adição de sílica ativa (TABELA 20) mostra que não há influência estatística do tipo de cura na resistência à tração do concreto nessa idade, entre esses grupos, uma vez que  $F$  é menor que  $F$  crítico e valor- $P$  é superior ao erro admissível (0,05).

Tabela 20 – ANOVA entre C1, C2 e C3 aos 7 dias, onde o fator é o tipo de cura.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,078815	2	0,039407	0,344248	0,72189	5,14325
Dentro dos grupos	0,686844	6	0,114474			
<b>Total</b>	<b>0,765659</b>	<b>8</b>				

Onde: SQ = soma quadrada; gl = graus de liberdade; MQ = média quadrada

Fonte: do autor (2018).

A análise de variância entre C2 e C2S demonstra, igualmente, que a adição de sílica ativa no traço do concreto não produz efeito estatisticamente relevante na resistência mecânica do concreto (TABELA 21).

Tabela 21 – ANOVA entre C2 e C2S aos 7 dias, onde o fator é a presença de sílica.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,009284	1	0,009284	0,033847	0,86298	7,70865
Dentro dos grupos	1,097194	4	0,274299			
<b>Total</b>	<b>1,106478</b>	<b>5</b>				

Onde: SQ = soma quadrada; gl = graus de liberdade; MQ = média quadrada

Fonte: do autor (2018).

Novamente o grupo C1S chama a atenção, mas, desta vez, por ter apresentado diminuição da resistência mecânica em comparação com os resultados de 12 horas. Percebe-se que o desvio-padrão desse conjunto ficou maior do que os dos demais, podendo indicar alguma falha de concretagem e/ou de execução do ensaio de rompimento.

Por fim, aos 28 dias, praticamente todos os grupos apresentaram evoluções

tímidas de resistência, entre 0,2 e 12%. A exceção, no entanto, foi o grupo C3, que obteve resistência média inferior aos valores obtidos aos 7 dias. Novamente, percebe-se um desvio-padrão consideravelmente maior para esse conjunto de amostras, indicando que possa ter havido falhas na moldagem desses CPs ou na execução do ensaio de rompimento.

Ao se analisar o gráfico da Figura 34 e os valores comparativos da Tabela 22, é possível verificar que, no caso da tração, o concreto desenvolve grande parte da sua resistência já nas primeiras horas – no caso da cura térmica. Aos 7 dias, quase todas as amostras já apresentam quase 100% da resistência à tração aos 28 dias ( $f_{t28}$ ), inclusive o concreto curado ao ambiente (C3).

Tabela 22 – Resistências à tração em relação a  $f_{t28}$

	<b>C1</b>	<b>C1S</b>	<b>C2</b>	<b>C2S</b>	<b>C3</b>
$\frac{f_{t0,5}}{f_{t28}}$	81%	99%	78%	72%	9%
$\frac{f_{t7}}{f_{t28}}$	100%	89%	94%	97%	128%
$f_{t28}$ (MPa)	3,74	3,47	3,75	3,71	2,77

Fonte: do autor (2018).

As análises de variância apresentadas nas Tabelas 23, 24 e 25, mostram que, aos 28 dias, o tipo de cura e a presença de sílica ativa no concreto não produziram efeito estatisticamente relevante na resistência à tração das amostras. Tal constatação é coerente, posto que a análise dos mesmos parâmetros na resistência à compressão chegou às mesmas conclusões.

Tabela 23 – ANOVA entre C1, C2 e C3 aos 28 dias, onde o fator é o tipo de cura

<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>F crítico</b>
Entre grupos	1,906474	2	0,953237	2,229486	0,18879	5,14325
Dentro dos grupos	2,565354	6	0,427559			
<b>Total</b>	<b>4,471827</b>	<b>8</b>				

Onde: SQ = soma quadrada; gl = graus de liberdade; MQ = média quadrada

Fonte: do autor (2018).

Tabela 24 – ANOVA entre C1 e C1S aos 28 dias, onde o fator é presença de sílica

<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>F crítico</b>
Entre grupos	0,10838	1	0,10838	3,02074	0,1572	7,70865
Dentro dos grupos	0,143515	4	0,035879			
<b>Total</b>	<b>0,251895</b>	<b>5</b>				

Onde: SQ = soma quadrada; gl = graus de liberdade; MQ = média quadrada

Fonte: do autor (2018).

Tabela 25 – ANOVA entre C2 e C2S aos 28 dias, onde o fator é presença de sílica

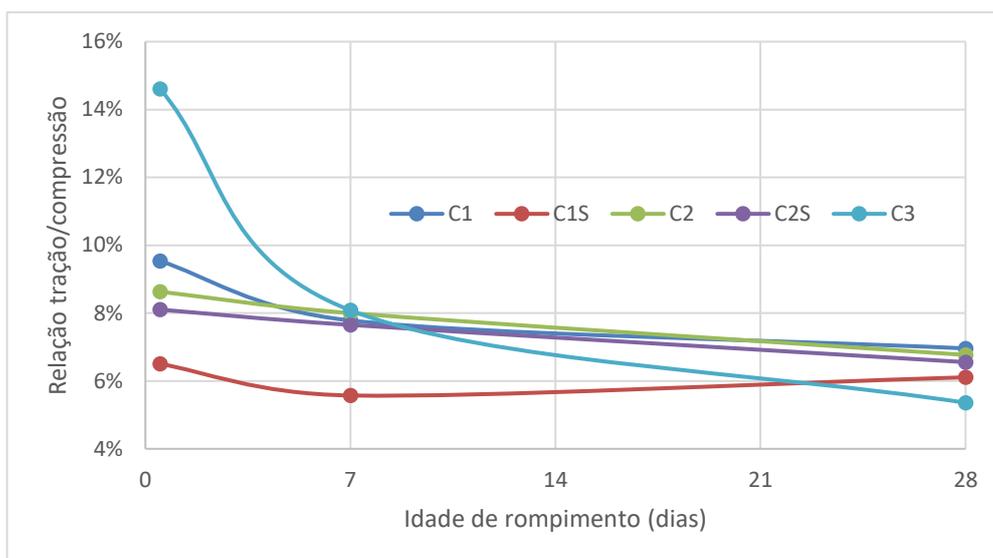
<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>F crítico</b>
Entre grupos	0,002288	1	0,002288	0,015384	0,90727	7,70865
Dentro dos grupos	0,594939	4	0,148735			
<b>Total</b>	<b>0,597228</b>	<b>5</b>				

Onde: SQ = soma quadrada; gl = graus de liberdade; MQ = média quadrada

Fonte: do autor (2018).

Sabe-se que as propriedades do concreto tornam esse material muito mais resistente à compressão do que à tração. A análise comparativa entre os resultados desses dois parâmetros (FIGURA 35) mostra que a relação  $f_t/f_c$  vai diminuindo ao longo do tempo. Ou seja, o ritmo de desenvolvimento da resistência à compressão mantém-se mais constante, enquanto a evolução da resistência à tração praticamente para após 1 dia de idade – no caso dos concretos curdos termicamente. Enquanto as resistências à tração ficaram entre 8,1 e 9,5% das resistências à compressão às 12 horas, essa relação diminuiu para cerca de 6,1 a 6,9% aos 28 dias. Os pontos fora da curva foram o grupo C3 (cura ambiente), que atingiu quase 15% às 12 horas, e o grupo C1S, uma vez que não foi observado um aumento de resistência muito superior aos demais em função da maior temperatura a que foi submetido (como ocorrido na resistência à compressão), fazendo com que a relação  $f_t/f_c$  desse grupo ficasse em apenas 6,5% às 12 horas.

Figura 33 – Relação entre a resistência à tração e resistência à compressão

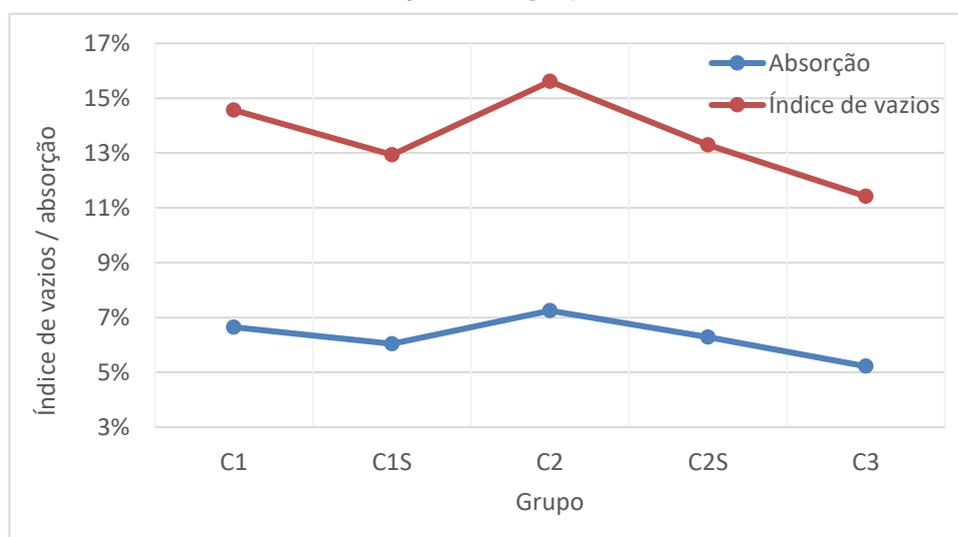


Fonte: do autor (2018).

#### 4.4 Características físicas

O gráfico da Figura 36 apresenta os resultados de índice de vazios e de absorção dos concretos, obtidos através dos ensaios preconizados pela NBR 9778 (ABNT, 2005). Embora não tenha ocorrido grandes variações entre os grupos, é possível verificar um padrão entre eles.

Figura 34 – Índice de vazios e absorção dos grupos de concreto



Fonte: do autor (2018).

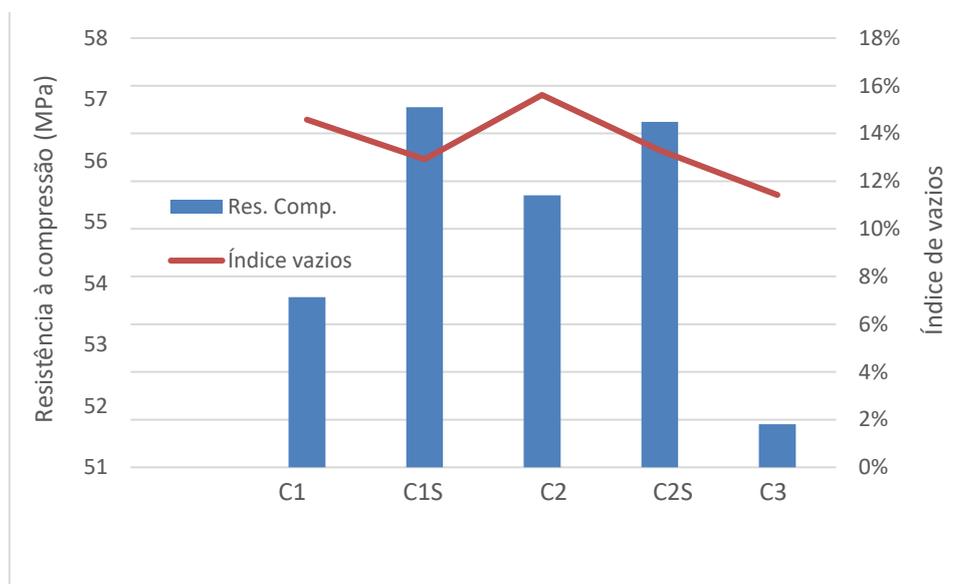
Entre os concretos submetidos ao mesmo tipo de cura, o traço com adição de sílica ativa apresentou índices de vazios inferiores àqueles sem essa adição mineral. Entre todos os grupos, porém, o C3 (cura ambiente) foi o que apresentou menores índices de vazios, mesmo sem a adição de sílica ativa no seu traço. O mesmo padrão se repete, de forma mais discreta, para os índices de absorção, com valores inferiores para traços com sílica ativa e o menor de todos apresentado pelo concreto curado ao ambiente.

Essas constatações são compatíveis com as informações previamente obtidas em bibliografia. Goto e Roy *apud* Neville (2016) demonstraram que os concretos curados termicamente possuem uma quantidade muito mais elevada de poros maiores que 150 nm do que aqueles curados em temperaturas mais baixas. Complementarmente, Cao e Detwiler *apud* Salvador Filho (2001) constataram que a sílica ativa no concreto atua consideravelmente no refinamento dos poros causados pela cura térmica.

Chama a atenção o fato de que, entre os quatro grupos curados termicamente, o C1S foi o que apresentou os menores índices de vazios e de absorção. Ou seja, as temperaturas mais elevadas a que ele foi submetido não foram prejudiciais ao concreto em termos de porosidade.

Ao se comparar a resistência à compressão de cada grupo curado termicamente com os seus respectivos índices de vazios (FIGURA 37), percebe-se que há uma relação entre esses dois parâmetros – concretos com adição de sílica ativa possuem resistências maiores e índices de vazios menores em comparação com os concretos sem essa adição. O grupo curado ao ambiente (C3) apresentou os menores valores para índice de vazios e de resistência à compressão, demonstrando a efetividade da cura térmica em termos de resistência e da sílica ativa na diminuição dos poros causados pelas altas temperaturas.

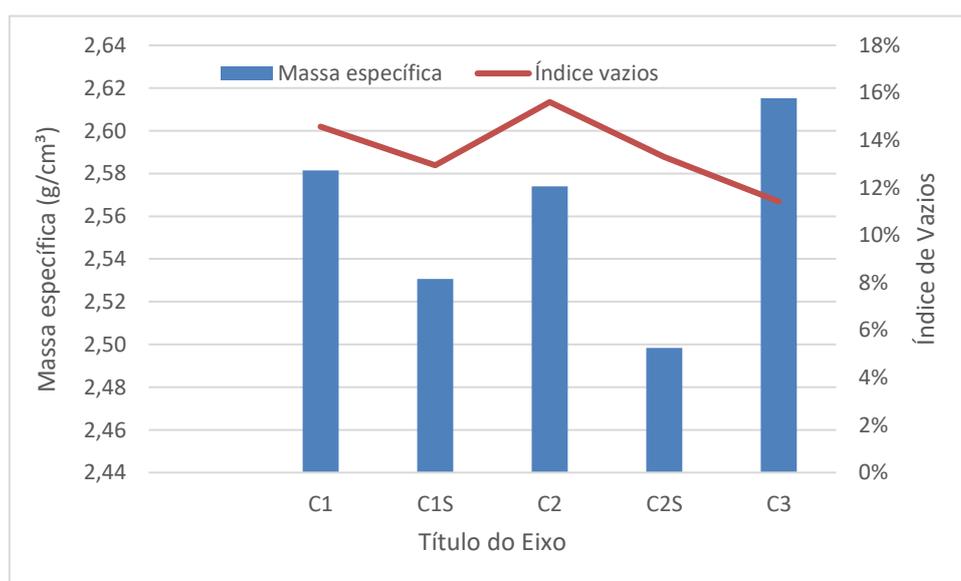
Figura 35 – Relação entre a resistência à compressão e índice de vazios



Fonte: do autor (2018).

Em relação às massas específicas dos concretos, não ocorreram variações significativas entre cada grupo, sendo que a maior diferença foi entre os grupos C2S e C3, com uma discrepância de apenas 4,6%. Ainda assim, porém, pode ser verificado um padrão quando se correlaciona essa propriedade dos concretos com os seus respectivos índices de vazios (FIGURA 38).

Figura 36 – Relação entre a massa específica e índice de vazios



Fonte: do autor (2018).

As maiores massas específicas foram apresentadas pelos grupos sem a adição de sílica ativa, embora esses mesmos concretos fossem os com maiores índices de vazios. Essa constatação, na verdade, é bastante lógica, uma vez que a sílica ativa, embora atue no refinamento dos poros do concreto, possui uma densidade aparente (150 a 700 kg/m<sup>3</sup>) muito menor que a massa específica do cimento utilizado (cerca de 3.090 kg/m<sup>3</sup>). Desta forma, a adição de 10% de sílica no traço (em relação à massa de cimento) faz com que a massa específica e a porosidade do concreto diminuam. O grupo C3, por sua vez, apresentou a maior massa específica e o menor índice de vazios entre todas as amostras, sendo a primeira decorrente da não adição de sílica ativa e o segundo decorrente da não utilização do tratamento térmico para a cura do concreto.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A busca por racionalidade de materiais e por produtividade fez com que a construção civil buscasse na industrialização os caminhos para o aperfeiçoamento dessas questões. A indústria de pré-moldados, por sua vez, encontrou na cura térmica a resposta para o seu principal gargalo produtivo: o tempo de cura do concreto dentro das fôrmas. Com o emprego das diversas técnicas para curar os elementos através do aumento da temperatura, é possível acelerar o desenvolvimento de resistência do concreto, desformar os elementos mais cedo e reutilizar as fôrmas com mais frequência. Dessa forma, diminuem-se os custos com fôrmas, com espaço para estoque e possibilita-se a entrega do produto para o cliente de forma mais veloz.

Neste sentido, o presente trabalho teve como objetivo a avaliação da efetividade de dois tipos de cura térmica em comparação com a cura úmida tradicional, através da análise das resistências mecânicas e das características físicas de cada um, bem como o impacto da adição de sílica ativa nestas propriedades.

### **5.1 Conclusões**

No presente estudo, onde foram avaliados dois métodos de cura térmica – em estufa e a vapor – em comparação com a cura ambiente tradicional, verificou-se que, de fato, a elevação da temperatura proporciona um desenvolvimento de resistência muito mais acelerado. Com 12 horas de idade, os concretos curados termicamente

apresentaram resistência média suficiente para serem desmoldados e manuseados. É importante frisar que o tempo de cura poderia ser reduzido ainda mais, uma vez que o período de elevação da temperatura no presente trabalho foi longo – cerca de 4 horas – em decorrência de limitações técnicas dos equipamentos utilizados.

Comparativamente, verificou-se que não há diferenças significativas entre a cura térmica a seco (estufa) e a cura térmica a vapor, uma vez que os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão axial, tração por compressão diametral e caracterização física (porosidade, absorção e massa específica) foram muito semelhantes entre os concretos curados através dessas duas metodologias. Em ambos os métodos, cujas temperaturas de patamar foram de aproximadamente 65°C por cerca de 1 hora e 30 minutos, foram verificadas resistências médias de 33 MPa às 12 horas de idade, o que representou por volta de 60% da resistência à compressão aos 28 dias.

Embora as bibliografias consultadas fossem praticamente unânimes em afirmar que o concreto curado a altas temperaturas apresentasse resistências mecânicas inferiores ao concreto curado ao ambiente, em idades mais avançadas, no presente estudo esse fato não ocorreu. Mesmo nos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias, os grupos curados termicamente apresentaram resultados cerca de 10% superiores em comparação ao conjunto curado ao ambiente. Acredita-se que a ausência desse efeito colateral (perda de resistência) tenha se dado pela baixa relação água/cimento empregada nos traços (0,34) e pelo longo tempo de espera entre a adição da água ao cimento e o início do tratamento térmico (período de pré-cura), que coincidiu com o tempo de fim de pega do cimento utilizado na pesquisa – cerca de 4 horas.

Ao longo da análise dos resultados, foi constatado que o grupo de corpos de prova com sílica e curados em estufa (C1S) foi submetido a temperaturas sensivelmente mais altas do que os demais grupos – cerca de 20 a 25°C superior. Ou seja, no patamar de cura, esse conjunto de amostras foi exposto a temperaturas da ordem de 85 a 90°C. Através dos ensaios realizados, porém, o único efeito verificado causado por esse desvio de execução foi a aceleração da hidratação do cimento,

posto que, às 12 horas de idade, esse grupo apresentou resistência média à compressão correspondente a 93% de  $f_{c28}$ . A resistência média aos 28 dias desse conjunto de amostras, inclusive, foi a maior entre todos os traços/curas testados na pesquisa.

Em relação à sílica ativa no concreto, as análises de variância (ANOVA) realizadas demonstraram que a adição de 10% desse mineral não produziu efeitos estatisticamente relevantes na resistência mecânica das amostras. Já na caracterização física dos CPs, os traços com sílica apresentaram índices de vazios e de absorção inferiores àqueles sem essa adição, demonstrando que a incorporação dessa pozolana atua no refinamento dos poros causados pelas altas temperaturas da cura térmica. Apesar disso, as amostras curadas ao ambiente apresentaram porosidade e absorção ainda menores.

Em relação ao traço de concreto, acredita-se que possam ser verificados e testados outros métodos de dosagem, posto que o proporcionamento de materiais adotado nesta pesquisa (1 : 0,76: 1,36 : 0,34) pode ser caracterizado como um traço caro, pois possui um alto consumo de cimento. Embora a baixa relação a/c tenha se mostrado vantajosa, bem como obteve-se sucesso no ajuste da consistência através de aditivo superplastificante, os resultados foram bem superiores ao esperado em termos de desenvolvimento de resistência nas primeiras horas. Desta forma, poderiam ser testados traços de concreto economicamente mais viáveis e sustentáveis.

Por fim, pode-se concluir que a cura térmica é uma excelente aliada no processo produtivo dos elementos pré-moldados, por todos os motivos já citados e pelos benefícios proporcionados pelos métodos aqui investigados.

## **5.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Como o processo de cura térmica envolve diversos fatores que influenciam no resultado final, torna-se inviável avaliar todos eles em apenas um estudo. Por isso, sugere-se as seguintes aproximações para estudos futuros envolvendo o mesmo

tema, deste e de outros autores:

- a) testes com diferentes traços de concreto economicamente mais viáveis (baixo consumo de cimento);
- b) avaliação de traços com outras adições minerais, como escória de alto-forno, fíler calcário e metacaulim;
- c) avaliação da cura térmica utilizando outros tipos de cimento;
- d) avaliação de diferentes tempos de pré-cura ( $t_0$ );
- e) avaliação da possibilidade de adoção de patamares de temperatura mais altos, como aquele ao qual o grupo C1S foi submetido no presente estudo, a fim de possibilitar tempos de cura menores;
- f) realização de ensaios de resistência mecânica em mais idades, como 1, 3 e 56 dias, com o propósito de melhor avaliar o desenvolvimento de resistência do concreto curado termicamente em comparação com o concreto curado ao ambiente;
- g) realização de ensaios de retração do concreto, posto que as altas temperaturas da cura térmica tendem a provocar esse efeito colateral no material;
- h) avaliação da viabilidade de adição de fibras ao concreto curado termicamente, bem como do comportamento desse material ante às altas temperaturas;
- i) análise da microestrutura do concreto curado sob altas temperaturas através de microscopia eletrônica de varredura (MEV), com o intuito de verificar diferenças microestruturais entre o concreto curado em estufa e o concreto curado a vapor.

## REFERÊNCIAS

ANJOS, A. dos. **Análise de Variância**. In: Departamento de Estatística – UFPR. Estatística II. Notas de Aula. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2009. p. 112-121.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA DE CONCRETO. **Anuário ABCIC 2014**. 2013. Disponível em: <[http://abcic.org.br/Anuario\\_2014/files/assets/common/downloads/publication.pdf](http://abcic.org.br/Anuario_2014/files/assets/common/downloads/publication.pdf)>. Acesso em: 08/04/2018.

\_\_\_\_\_. **Anuário ABCIC 2016**. 2015. Disponível em: <[http://www.abcic.org.br/anuario\\_2016/ANUARIO\\_ABCIC\\_BAIXA\\_2016.pdf](http://www.abcic.org.br/anuario_2016/ANUARIO_ABCIC_BAIXA_2016.pdf)>. Acesso em: 06/04/2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia Básico de Utilização do Cimento Portland**. São Paulo, SP: ABCP 2002. Ebook. Disponível em: <[http://www.abcp.org.br/cms/wp-content/uploads/2016/05/BT106\\_2003.pdf](http://www.abcp.org.br/cms/wp-content/uploads/2016/05/BT106_2003.pdf)>. Acesso em: 15/01/2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739: Concreto – Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

\_\_\_\_\_. **NBR 6023: Informação e documentação – Referências – Elaboração**. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211: Agregados para Concreto – Especificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 7222: Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

\_\_\_\_\_. **NBR 9062: Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Pré-Moldado**. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR 9776: Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman**. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

\_\_\_\_\_. **NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade**. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

\_\_\_\_\_. **NBR 11172: Aglomerantes de origem mineral.** Rio de Janeiro: ABNT, 1990.

\_\_\_\_\_. **NBR 11768: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 12653: Materiais pozolânicos.** Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento.** Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

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

\_\_\_\_\_. **NBR NM 26: Agregados - Amostragem.** Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 43: Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal.** Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

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

\_\_\_\_\_. **NBR NM 46: Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem.** Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 65: Cimento Portland – Determinação do tempo de pega.** Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 67: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento de tronco de cone.** Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248: Agregados – determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de construção.** 5. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2008.

BOGGIO, Aldo J. **Estudo Comparativo de Métodos de Dosagem de Concretos de Cimento Portland.** 2000. 182f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 28 de dezembro de 2000.

BRITO, M. H. G. **Influência da cura térmica a vapor sob pressão atmosférica em características e propriedades de blocos de concreto**. 2013. 219f. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia/GO.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. **Cimento – Consumo, Produção e Valores de Materiais de Construção**. 04/04/2018. Disponível em: <<http://www.cbicdados.com.br/menu/materiais-de-construcao/cimento>>. Acesso em: 08/04/2018.

CAMARINI, G. **Efeito da cura térmica na resistência de argamassas de cimento Portland comum e de alto-forno**. 1995. Tese (doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo/SP.

CHASTRE, Carlos; LÚCIO, Válter. **Estruturas pré-moldadas no mundo – Aplicações e comportamento estrutural**. 1. ed. Guarulhos, SP, 2012.

DAL MOLIN, D. C. C. **Adições Minerais para Concreto Estrutural**. In: ISAIA, Geraldo C. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 345-379.

EL DEBS, Mounir K. **Concreto pré-moldado: Fundamentos e aplicações**. 1. ed. São Carlos, SP: ESC USP, 2000.

FERREIRA, Marcelo de A. **Manual de Sistemas Pré-Fabricados de Concreto**. ABCIC, 2003. Disponível em: <[http://apoioididatico.iau.usp.br/projeto3/2013/manual\\_prefabricados.pdf](http://apoioididatico.iau.usp.br/projeto3/2013/manual_prefabricados.pdf)>. Acesso em: 06/04/2018.

GUIMARÃES, A. T. da C. **Propriedades do Concreto Fresco**. In: ISAIA, Geraldo C. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 473-494.

ISERHARD, J. L. R. de F. **Contribuição ao estudo da viabilidade da cura do concreto por energia solar**. 2000. 181f. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS.

KIHARA, Y., CENTURIONE, S. L. **O Cimento Portland**. In: ISAIA, Geraldo C. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 295-322.

MARTIN, J. F. M. **Aditivos para Concreto**. In: ISAIA, Geraldo C. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 381-406.

MARTINS, A. R. **Efeito da cura térmica e de cimentos com escória granulada de alto-forno na durabilidade do concreto de cobertura**. 2001. 169f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto – Microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo, SP, 2008.

MELO, Aluísio B. de. **Influência da cura térmica (vapor) sob pressão atmosférica no desenvolvimento da microestrutura dos concretos de cimento Portland**. 2000. 296f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 10 de março de 2000.

MILANI, Cleovir J. *et al.* **Processo produtivo de elementos pré-moldados de concreto armado: detecção de manifestações patológicas**. Revista de Pesquisa em Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo, 2012. Disponível em: <<https://www.revistas.usp.br/risco/article/download/49025/53125>>. Acesso em: 25/03/2018.

NATIONAL PRECAST CONCRETE ASSOCIATION. **Precast Forecast: Moderate Growth Ahead in 2017**. NPCA. Disponível em: <<https://precast.org/2017/01/precast-forecast-moderate-growth-ahead-in-2017/>>. Acesso em: 02/04/2018.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre, RS: Bookman, 2011. E-book. Disponível em: <<http://www.univates.br/biblioteca>>. Acesso em: 27/12/2017.

NEVILLE, A. M; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre, RS: Bookman, 2013. E-book. Disponível em: <<http://www.univates.br/biblioteca>>. Acesso em: 27/12/2017.

PIGOZZO, Bruno N. *et al.* **A influência dos pré-fabricados em concreto armado no ciclo de industrialização da construção**. XI Encontro nacional de Tecnologia no Ambiente Construído. 23 a 25 de agosto de 2006. Florianópolis/SC. Disponível em: <[http://www.infohab.org.br/entac2014/2006/artigos/ENTAC2006\\_3265\\_3274.pdf](http://www.infohab.org.br/entac2014/2006/artigos/ENTAC2006_3265_3274.pdf)>. Acesso em: 25/03/2018.

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

ROHDEN, A. B. *et al.* **Análise da cura térmica na resistência de concreto para aplicação na indústria de pré-fabricados**. 59º Congresso Brasileiro do Concreto. Outubro-Novembro de 2017. Bento Gonçalves/RS. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/321012724\\_Analise\\_da\\_cura\\_termica\\_na\\_resistencia\\_de\\_concreto\\_para\\_aplicacao\\_na\\_industria\\_de\\_pre-fabricados\\_Thermal\\_curing\\_analysis\\_on\\_concrete\\_strength\\_for\\_application\\_in\\_the\\_precast\\_industry](https://www.researchgate.net/publication/321012724_Analise_da_cura_termica_na_resistencia_de_concreto_para_aplicacao_na_industria_de_pre-fabricados_Thermal_curing_analysis_on_concrete_strength_for_application_in_the_precast_industry). Acesso em: 13/10/2018.

SALVADOR FILHO, José A. A. **Cura Térmica dos Concretos de Alto Desempenho: Análise das Propriedades Mecânicas Utilizando o Método da Maturidade**. 2001. 105f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira.

SANTOS, A. C. M. B. dos. **Influência da cura térmica nas resistências dos concretos destinados à produção de blocos estruturais**. 2009. 119f. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis/SC.

SANTOS, W. F. dos. **Influência da cura térmica nas propriedades mecânicas e na microestrutura do concreto autoadensável contendo adições de metacaulim e fíler calcário**. 2016. 117f. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RS.

SERRA, S. M. B *et al.* **A evolução da indústria da construção civil em função do uso de pré-fabricados em concreto**. 25f. 20-. Universidade Federal de São Carlos. Disponível em: < <http://www.set.eesc.usp.br/1enpppcpm/downloads/5-5.pdf>>. Acesso em: 01/03/2018.

TIECHER, F. *et al.* **Métodos Experimentais de Dosagem para Concreto Convencional Utilizando Areia Industrial e Demais agregados da região de Passo Fundo**. X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. 18 a 21 de julho de 2004. São Paulo/SP. Disponível em: [ftp://ip20017719.eng.ufjf.br/Public/AnaisEventosCientificos/ENTAC\\_2004/trabalhos/PAP0371d.pdf](ftp://ip20017719.eng.ufjf.br/Public/AnaisEventosCientificos/ENTAC_2004/trabalhos/PAP0371d.pdf). Acesso em: 13/10/2018.

TUTIKIAN, B., HELENE, P. Dosagem dos Concretos de Cimento Portland. In: ISAIA, Geraldo C. (Editor). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 415-451.

## APÊNDICES

## APÊNDICE A – Granulometrias da areia e da brita

### GRAULOMETRIA BRITA 1

Peneira (mm)	Retido (g)	Retido (%)	Retido acumulado (%)
<b>19,1</b>	224,1	1,01%	1,01%
<b>12,5</b>	12588,3	56,76%	57,77%
<b>9,5</b>	7404,9	33,39%	91,16%
<b>6,3</b>	1698,3	7,66%	98,81%
<b>4,75</b>	78,3	0,35%	99,17%
<b>2,36</b>	42,9	0,19%	99,36%
<b>Fundo</b>	141,9	0,64%	100,00%
<b>SOMA</b>	<b>22178,7</b>		

Fonte: do autor (2018).

### GRANULOMETRIA AREIA MÉDIA

Abertura peneira (mm)	Retido (g)	Retido (%)	Retido acumulado (%)
<b>2,36</b>	26,4	4,45%	4,45%
<b>1,18</b>	43,1	7,27%	11,73%
<b>0,6</b>	59,1	9,97%	21,70%
<b>0,3</b>	171,5	28,94%	50,64%
<b>0,15</b>	254,5	42,95%	93,59%
<b>0,075</b>	33,2	5,60%	99,19%
<b>Fundo</b>	4,8	0,81%	100,00 %
<b>SOMA</b>	<b>592,6</b>		

Fonte: do autor (2018).

**APÊNDICE B – Resultados individuais e médios (MPa) dos ensaios de compressão axial e tração por compressão diametral**

ENSAIO		C1	C1S	C2	C2S	C3
COMPRESSÃO	12 horas	33,06	52,09	35,03	32,63	1,31
		28,34	55,52	34,69	32,5	1,81
		33,79	50,9	32,41	33,73	1,82
	<b>MÉDIA</b>	<b>31,73</b>	<b>52,84</b>	<b>34,04</b>	<b>32,95</b>	<b>1,65</b>
	<b>Desvio Padrão</b>	<b>2,96</b>	<b>2,40</b>	<b>1,42</b>	<b>0,68</b>	<b>0,29</b>
	7 dias	46,07	51,86	44,05	50,04	43,76
		49,59	53,15	40,26	49,02	43,22
		48,22	60,95	47,55	41,86	45,12
	<b>MÉDIA</b>	<b>47,96</b>	<b>55,32</b>	<b>43,95</b>	<b>46,97</b>	<b>44,03</b>
	<b>Desvio Padrão</b>	<b>1,77</b>	<b>4,92</b>	<b>3,65</b>	<b>4,46</b>	<b>0,98</b>
	28 dias	54,17	56,24	54,34	55,9	50,44
		52,58	60,44	58,29	57,09	53,51
		54,58	53,94	53,67	56,91	51,16
	<b>MÉDIA</b>	<b>53,78</b>	<b>56,87</b>	<b>55,43</b>	<b>56,63</b>	<b>51,70</b>
	<b>Desvio Padrão</b>	<b>1,06</b>	<b>3,30</b>	<b>2,50</b>	<b>0,64</b>	<b>1,60</b>
TRAÇÃO	12 horas	2,93	3,46	3,54	2,84	0,22
		3,29	3,62	2,62	2,93	0,24
		2,85	3,23	2,66	2,25	0,26
	<b>MÉDIA</b>	<b>3,02</b>	<b>3,44</b>	<b>2,94</b>	<b>2,67</b>	<b>0,24</b>
	<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,23</b>	<b>0,19</b>	<b>0,52</b>	<b>0,37</b>	<b>0,02</b>
	7 dias	4,10	3,74	3,93	3,56	3,53
		3,38	2,67	3,03	3,03	3,67
		3,71	2,84	3,59	4,20	3,48
	<b>MÉDIA</b>	<b>3,73</b>	<b>3,08</b>	<b>3,52</b>	<b>3,59</b>	<b>3,56</b>
	<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,36</b>	<b>0,57</b>	<b>0,45</b>	<b>0,59</b>	<b>0,10</b>
	28 dias	3,85	3,36	3,44	3,78	3,92
		3,75	3,31	4,33	3,47	2,38
		3,64	3,76	3,48	3,89	2,02
	<b>MÉDIA</b>	<b>3,74</b>	<b>3,47</b>	<b>3,75</b>	<b>3,71</b>	<b>2,77</b>
	<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,10</b>	<b>0,25</b>	<b>0,50</b>	<b>0,22</b>	<b>1,01</b>

Fonte: do autor (2018).

**APÊNDICE C – Massas (kg) das amostras, para cálculo da porosidade, absorção e massas específicas**

Grupo	Massa seca		Massa saturada		Massa imersão	
	Individual	Média	Individual	Média	Individual	Média
<b>C1</b>	3500,2		3734,5		2138,7	
	3526,1	3538,7	3791,7	3774,1	2165,5	2159,2
	3589,8		3796		2173,4	
<b>C1S</b>	3414,3		3641,7		2045,3	
	3428,6	3399,1	3648,1	3604,5	2043,9	2016,8
	3354,3		3523,8		1961,3	
<b>C2</b>	3516,9	3487,3	3766,5	3740,2	2138,9	2120,7
	3457,7		3713,8		2102,5	
<b>C2S</b>	3285,9		3523,3		1956,2	
	3365,4	3366,5	3521,2	3578,4	1939,5	1985,5
	3448,2		3690,6		2060,8	
<b>C3</b>	3414,1		3575,1		2007,9	
	3411,6	3439	3617,1	3618,6	2048,7	2046,1
	3491,3		3663,6		2081,7	

Fonte: do autor (2018).

**APÊNDICE D – Valores individuais e médios da porosidade, absorção e massas específicas dos corpos-de-prova**

	Absorção	Média	Índice de vazios	Média	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Média (g/cm <sup>3</sup> )
<b>C1</b>	6,69%	6,66%	14,68%	14,57%	2,586	2,581
	7,53%		16,33%		2,617	
	5,74%		12,71%		2,541	
<b>C1S</b>	6,66%	6,04%	14,24%	12,93%	2,559	2,531
	6,40%		13,68%		2,539	
	5,05%		10,85%		2,494	
<b>C2</b>	7,10%	7,25%	15,34%	15,61%	2,577	2,574
	7,41%		15,89%		2,571	
<b>C2S</b>	7,22%	6,29%	15,15%	13,29%	2,565	2,498
	4,63%		9,85%		2,437	
	7,03%		14,87%		2,493	
<b>C3</b>	4,72%	5,22%	10,27%	11,42%	2,617	2,615
	6,02%		13,10%		2,634	
	4,94%		10,89%		2,595	

Fonte: do autor (2018).



**UNIVATES**

Rua Avelino Talini, 171 | Bairro Universitário | Lajeado | RS | Brasil

CEP 95914-014 | Cx. Postal 155 | Fone: (51) 3714-7000

[www.univates.br](http://www.univates.br) | 0800 7 07 08 09