

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL

TIAGO FERREIRA CAMPOS NETO

**EFEITOS DA TEMPERATURA DO CONCRETO  
FRESCO NA SUA TRABALHABILIDADE**

Goiânia  
2015

TIAGO FERREIRA CAMPOS NETO

**EFEITOS DA TEMPERATURA DO CONCRETO  
FRESCO NA SUA TRABALHABILIDADE**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Estruturas e Materiais de Construção da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, como exigência para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

**Área de concentração:** Materiais de Construção.

**Orientador:** Prof. Dr. André Luiz Bortolacci Geyer.

Goiânia

2015



**Termo de Ciência e de Autorização para Disponibilizar as Teses e Dissertações Eletrônicas (TEDE) na Biblioteca Digital da UFV**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás-UFV a disponibilizar gratuitamente através da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações – BDTD/UFV, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico:  Dissertação  Tese

**2. Identificação da Tese ou Dissertação**

Autor(a): Tiago Ferreira Campos Neto			
CPF:	020.260.351-21	E-mail:	tiagocampos.eng@gmail.com
Seu e-mail pode ser disponibilizado na página? <input checked="" type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não			
Vínculo Empregatício do autor	Aluno bolsista		
Agência de fomento:	Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal do Nível Superior	Sigla:	CAPES
País:	Brasil	UF:	GO
CNPJ:			
Título: Efeitos da temperatura do concreto fresco na sua trabalhabilidade			
Palavras-chave:	concreto fresco; temperatura; manutenção do abatimento; aditivos superplastificantes; nano-silica.		
Título em outra língua:	Effect of fresh concrete temperature on its workability		
Palavras-chave em outra língua:	fresh concrete; temperature; slump maintenance; superplasticizer admixtures; nano-silica.		
Área de concentração:	Estruturas e Materiais de Construção		
Data defesa: (dd/mm/aaaa)	12/06/2015		
Programa de Pós-Graduação:	Curso de Mestrado em Engenharia Civil – CMEC		
Orientador(a):	André Luiz Bortolacci Geyer		
CPF:	393.352.590-04	E-mail:	andre.geyer@hotmail.com
Co-orientador(a):	-----	E-mail:	-----
CPF:	-----	E-mail:	-----

**3. Informações de acesso ao documento:**

Liberação para disponibilização?<sup>1</sup>  total  parcial

Em caso de disponibilização parcial, assinale as permissões:

Capítulos. Especifique: \_\_\_\_\_

Outras restrições: \_\_\_\_\_

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF ou DOC da tese ou dissertação. O Sistema da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações garante aos autores, que os arquivos contendo eletronicamente as teses e ou dissertações, antes de sua disponibilização, receberão procedimentos de segurança, criptografia (para não permitir cópia e extração de conteúdo, permitindo apenas impressão) usando o padrão do Acrobat.

Assinatura do(a) autor(a) \_\_\_\_\_ Data: 20 / 10 / 2015

<sup>1</sup> Em caso de restrição, esta poderá ser mantida por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Todo resumo e metadados ficarão sempre disponibilizados.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a), sob orientação do Sibi/UFV.

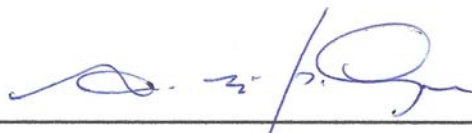
CAMPOS NETO, TIAGO FERREIRA  
EFEITOS DA TEMPERATURA DO CONCRETO FRESCO NA SUA  
TRABALHABILIDADE [manuscrito] / TIAGO FERREIRA CAMPOS  
NETO. - 2015.  
XV, 132 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. ANDRÉ LUIZ BORTOLACCI GEYER.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de  
Engenharia Civil (EEC) , Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Civil, Goiânia, 2015.  
Bibliografia. Apêndice.  
Inclui lista de figuras, lista de tabelas.

1. concreto fresco. 2. temperatura. 3. manutenção do abatimento. 4.  
aditivos superplastificantes. 5. nano-silica. I. GEYER, ANDRÉ LUIZ  
BORTOLACCI, orient. II. Título.

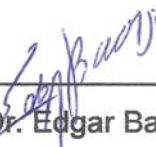
## FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação intitulada **EFEITOS DA TEMPERATURA DO CONCRETO FRESCO NA SUA TRABALHABILIDADE**, de autoria do mestrando **TIAGO FERREIRA CAMPOS NETO**, defendida e aprovada em 15 de junho de 2015, pela banca examinadora constituída pelos seguintes professores:



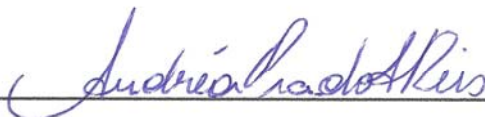
---

Prof. Dr. André Luiz Bortolacci Geyer – UFG  
(ORIENTADOR)



---

Prof. Dr. Edgar Bacarji – UFG  
(EXAMINADOR INTERNO)



---

Prof.ª Dr.ª Andréa Prado Abreu Reis Liserre – UNB  
(EXAMINADOR EXTERNO)

*À minha mãe.  
Meu maior exemplo.*

## AGRADECIMENTOS

Tenho certeza de que não teria alcançado o fim deste trabalho sem o apoio dos meus familiares e amigos que, com paciência em incentivaram a nunca desistir deste sonho. Um obrigado especial aos meus amigos, Ariana, Inês Janaína, Ana Cláudia, Giovana, Priscila, Iuri, Vinícius, Luiza e Elva, que sempre me aconselharam ser paciente e seguir em frente.

Ao meu orientador, professor Dr. André Geyer, a minha admiração e carinho por sua dedicação, paciência e disposição em me guiar nessa jornada. Obrigado por todo o conhecimento que tens compartilhado comigo.

Aos professores do CMEC, em especial aos professores Dr. Orlando Ferreira e Dr. Edgar Bacarji, meu respeito e admiração. À professora Dra. Andréa Prado, pela disponibilidade e confiança. Obrigado a todos por acreditarem no meu potencial e na minha força de vontade. À professora Janaína Araújo, pela confiança e amizade que levarei para toda minha vida.

Aos técnicos do laboratório, professor Deusair, Manoel e Agnaldo, pela assistência na realização dos ensaios e conversas bem humoradas.

Ao engenheiro Rodrigo, pelas dicas e materiais com os quais não seria possível realizar esse trabalho.

Ao professor Dr. Bernardo Tutikian, pelo apoio e disponibilidade. Obrigado por ter me assistido mesmo à distância.

À minha avó, Maria Aparecida, pelo carinho e quitandas que me prepara sempre que vou visita-la. Sem a senhora ao lado da minha mãe, eu não conseguiria chegar ao final dessa etapa.

À minha primeira e melhor professora, Helena Campos, pelo amor, compreensão, confiança e dedicação. Obrigado por sempre me apoiar em todos os momentos da minha vida. Sem a senhora, eu não conseguiria realizar nenhum dos meus sonhos e não seria metade do que sou hoje. Eu te amo!

À Deus, pelo dom da vida.

## RESUMO

As propriedades reológicas do concreto podem ser influenciadas pela sua temperatura no estado fresco. Este trabalho tem o objetivo de estudar os efeitos da temperatura na manutenção do abatimento de concretos frescos incorporados com aditivos superplastificantes. Escolhidas com base nos valores de períodos determinados pelas principais normas que tratam de dosagem de concretos em climas quentes e frios; Comissões 305 (ACI, 2013), 306 (ACI, 2010) e 318 (ACI, 2014); as temperaturas das misturas estudadas variaram foram fixadas em 15°C, 32°C e 38°. A temperatura ambiente e a umidade relativa do ar foram mantidas dentro de períodos de variação de 2°C e 4%, respeitando às solicitações da NBR 10342 (ANBT, 2012). Os concretos foram divididos em dois grandes grupos de dosagem, sendo o Grupo 1 composto por concretos produzidos com aditivo superplastificante sem nano-sílica e o Grupo 2 com a adição mineral em suspensão coloidal. Cada grupo era composto por três concretos, sendo um concreto com os materiais em temperatura ambiente, um concreto com materiais aquecidos e um concreto com materiais resfriados. No presente estudo, os resultados mostraram que os concretos com temperaturas acima de aproximadamente 38°C, confeccionados em condições de clima quente, apresentaram maior taxa de perda de abatimento, atingindo no máximo 120 minutos de trabalhabilidade aceitável para a pesquisa; enquanto que os concretos com temperaturas abaixo de 24°C apresentaram menor taxa de perda de consistência, alcançando até 165 minutos. Os resultados ainda mostraram que os concretos dosados com aditivo incorporado com nano-sílica apresentaram maiores taxas de perda de consistência e menores abatimentos iniciais, no entanto atingiram maiores resistências à compressão, salvo caso do concreto dosado com elevada temperatura, que apresentou acelerada perda de abatimento e menor valor de resistência em longo prazo.

*Palavra-Chave: concreto fresco, temperatura, manutenção do abatimento, aditivos superplastificantes, nano-sílica.*

## ABSTRACT

The rheological properties of concrete can be influenced by its temperature in fresh status. This work aims to assess the effects of temperature on slump maintenance of fresh concretes incorporated with superplasticizer admixtures. Chosen based on main normative values determined by concreting in hot and cold weather norms; Committee 305 (ACI, 2013), 306 (ACI, 2010) and 318 (ACI, 2014); the analyzed concretes temperatures were fixed in 15°C, 32°C and 38°C. The ambient temperature and air moisture did not vary more than 2°C and 4%, meeting the requests of the norm NBR 10342 (ABNT, 2012). The concretes were divided into two large groups, where Group 1 was consisted of concretes produced with superplasticizer admixture without nano-silica and, Group 2 with the nano-silica. Each group consisted of three concretes, namely with one concrete produced with materials in normal temperatures, one with heated materials and one with cooled materials. In this study, the results showed that the concretes with temperatures over 38°C, mixed under hot weather conditions, presented higher rate of slump loss, reaching a maximum of 120 minutes of workability; while the concretes at temperatures below 24°C presented lower rate of slump loss, reaching to 165 minutes. The results also showed that concretes incorporated with superplasticizer admixtures containing nano-silica presented higher rate of slump loss and lower initial slump, however they reached higher compressive strengths, except the concrete produced with a high temperature, which expressed an accelerated rate of slump loss and lower long term strength.

*Keywords: fresh concrete, temperatures, slump maintenance, superplasticizer admixtures, nano-silica.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Períodos de temperatura do ambiente conforme Comissão 306 (ACI, 2010) .....	23
Figura 2.2 – Efeito das temperaturas do concreto e do ar, umidade relativa, e velocidade do vento na taxa de evaporação da umidade superficial do concreto (Adaptado de KOSMATKA; KERKHOFF; PANARESE, 2003).....	27
Figura 2.3 – Efeito da temperatura do concreto no abatimento e na demanda de água necessária para manutenção do abatimento (Adaptado de KLIEGER, 1958 <i>apud</i> ACI Committee 305, 2013).....	30
Figura 2.4 – Efeito da temperatura do concreto no tempo de início e fim de pega (Adaptado de BURG, 1996 <i>apud</i> KOSMATKA; KERKHOFF; PANARESE, 2003)....	31
Figura 2.5 – Efeitos do aumento de temperatura na demanda de água de amassamento do concreto (Adaptado de SOROKA; RAVINA, 1998).....	33
Figura 2.6 – Curva de evolução do fluxo de calor na hidratação do cimento Portland CP II-F, observado em calorímetro de condução, durante as primeiras 72 horas (LABORATÓRIO DE MICROESTRUTURA, 2011 <i>apud</i> CINCOTTO, 2011).....	35
Figura 2.7 – Evolução do fluxo de calor liberado na hidratação do cimento Portland em função da temperatura, determinado por calorimetria isotérmica (LABORATÓRIO DE MICROESTRUTURA, 2011 <i>apud</i> CINCOTTO, 2011).....	37
Figura 2.8 – Resultados dos testes de evolução de temperatura de concretos com diferentes teores de nano-sílica (Adaptado de SAID <i>et al</i> , 2012).....	41
Figura 2.9 – Fluxograma simplificado do conceito de Schmidt <i>et al</i> (2014) .....	42
Figura 2.10 – Preparação da sub-base para recebimento do concreto fresco (KOSMATKA; KERKHOFF; PANARESE, 2003).....	44
Figura 2.11 – Influência da temperatura dos materiais na temperatura do concreto fresco (KOSMATKA; KERKHOFF; PANARESE, 2003) .....	46
Figura 2.12 – Efeitos da água gelada na temperatura do concreto (Adaptado de NRMCA, 1962 <i>apud</i> ACI Committee 305, 2013).....	47
Figura 2.13 – Usina Hidrelétrica de Itumbiara .....	49
Figura 2.14 – Influência da temperatura dos ingredientes do concreto na temperatura da mistura calculada de acordo com a Equação 2.1 (Adaptado de ACI Committee 305, 2013).....	51

Figura 2.15 – Obra do Centro de Radioterapia de São José do Rio Preto e detalhe de adição do gelo à mistura do concreto utilizado na obra (FERRO, 2015).....	52
Figura 2.16 – Gelo raspado utilizado na fundação do edifício Villa Serena Residence (FREITAS JÚNIOR, 2013).....	53
Figura 2.17 – Nitrogênio líquido sendo adicionado diretamente dentro do caminhão betoneira (FREITAS JÚNIOR, 2013).....	53
Figura 2.18 – Esquema de injeção de nitrogênio líquido (FREITAS JÚNIOR, 2013)	54
Figura 2.19 – Relação entre: (a) tensão de escoamento e abatimento; e (b) viscosidade e abatimento (NEHDI; AL-MARTINI, 2009) .....	56
Figura 2.20 – Microestrutura de amostras de argamassa de cimento Portland hidratadas por 91 dias a (A) 40°C e (B) 5°C (Adaptado de LOTHENBACH <i>et al</i> , 2007) .....	57
Figura 2.21 – Resistência à compressão do concreto em função do tempo (Adaptado de LOTHENBACH <i>et al</i> , 2007) .....	58
Figura 2.22 – Ilustração computacional da aglomeração das partículas de cimento de uma pasta isenta de aditivo (esquerda) e com aditivo adsorvido na superfície (direita) (Adaptado de LaFarge Group <i>apud</i> ROMANO; CARDOSO; PILEGGI, 2011) .....	61
Figura 2.23 – Efeito do tipo de aditivo na fluidez de concretos e na potencial redução da quantidade de água para manutenção da consistência (ROMANO; CARDOSO; PILEGGI, 2011).....	62
Figura 2.24 – Efeito de aditivos multifuncionais na perda de abatimento de misturas com abatimento inicial de 95-115 mm a 30°C (SOROKA; RAVINA, 1998) .....	65
Figura 2.25 – Esquema de ação dos aditivos: a) repulsão eletrostática; b) repulsão estérica (Adaptado de HARTMANN <i>et al</i> , 2011) .....	66
Figura 2.26 – Evolução das resistências à compressão dos concretos (Adaptado de SAID <i>et al</i> , 2012).....	69
Figura 2.27 – Representação esquemática da estrutura bifásica de uma argamassa (ROMANO; CARDOSO; PILEGGI, 2011).....	71
Figura 2.28 – Ilustração esquemática do concreto abrangente de trabalhabilidade (ROMANO; CARDOSO; PILEGGI, 2011).....	72
Figura 2.29 – Ensaio de abatimento do tronco cone executado em canteiro .....	73

Figura 2.30 – Representação esquemática do processo de mistura em função da quantidade de água (PILEGGI, 2001 <i>apud</i> ROMANO; CARDOSO; PILEGGI, 2011) .....	78
Figura 2.31 – Fluidez das argamassas (Adaptado de EL-BAKY; YEHA; KHALIL, 2013) .....	79
Figura 3.1 – Fluxograma de atividades da etapa prática da pesquisa .....	82
Figura 3.2 – Termômetros utilizados na pesquisa.....	89
Figura 3.3 – Verificações da temperatura (a) e do abatimento do concreto fresco (b) .....	91
Figura 3.4 – Corpos-de-prova antes (a) e durante (b) o ensaio de resistência à compressão axial .....	92
Figura 4.1 – Fluxograma simplificado do efeito da temperatura dos concretos antes da adição do aditivo superplastificante.....	94
Figura 4.2 – Tempo de trabalhabilidade das misturas.....	94
Figura 4.3 – Relação temperatura e abatimento das misturas do Grupo 1 .....	95
Figura 4.4 – Relação temperatura e abatimento das misturas do Grupo 2 .....	96
Figura 4.5 – Evolução das temperaturas dos concretos nas primeiras horas .....	96
Figura 4.6 – Evolução dos abatimentos dos concretos .....	97
Figura 4.7 – Resistência à compressão aos 28 dias .....	102
Figura A.1 – Equipamentos utilizados no ensaio de determinação de massa unitária .....	117
Figura A.2 – Série de peneiras utilizadas na caracterização das areias .....	119
Figura A.3 – Curva granulométrica da areia grossa .....	120
Figura A.4 – Curva granulométrica da areia fina .....	120
Figura A.5 – Material submerso (a) e em secagem (b) ao lado dos equipamentos de ensaio.....	121
Figura A.6 – Areia grossa (a) e fina (b) em condições de saturado com superfície seca.....	121
Figura A.7 – Soluções filtradas das areias fina (a) e grossa (b).....	123
Figura A.8 – Curvas granulométricas dos agregados graúdos.....	126

Figura A.9 – Brita em estado saturado com superfície seca ..... 127

Figura B.1 – Condições de umidade de uma partícula de agregado..... 129

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Limites de temperatura ambiente e do concreto conforme normatizações .....	21
Tabela 2.2 – Lista de possíveis problemas causados pela temperatura ambiente e procedimentos que podem minimizá-los (ACI Committee 305, 2013).....	25
Tabela 2.3 – Relação entre temperaturas do concreto e umidades relativas críticas (ACI Committee 305, 2013).....	26
Tabela 2.4 – Possíveis problemas causados pela elevada temperatura de uma mistura de concreto (ACI Committee 305, 2013) .....	29
Tabela 2.5 – Efeito da temperatura dos materiais na temperatura inicial do concreto (KOSMATKA; KERKHOFF; PANARESE, 2003) .....	48
Tabela 2.6 – Efeito do gelo na temperatura do concreto (KOSMATKA; KERKHOFF; PANARESE, 2003).....	50
Tabela 2.7 – Classes de resistência de concretos estruturais (Adaptado de NBR 8953, ABNT 2015).....	59
Tabela 2.8 – Consumos de cimento, sílica ativa e aditivo superplastificante e temperatura do concreto (Adaptado de BURG; OST, 1994) .....	60
Tabela 2.9 – Benefícios obtidos com o uso de aditivos plastificantes (HEWLETT; RIXOM, 1978 <i>apud</i> MEHTA; MONTEIRO, 2014).....	64
Tabela 2.10 – Proporções dos materiais por metro cúbico de concreto (Adaptado de SAID <i>et al</i> , 2012) .....	68
Tabela 2.11 – Índices referentes à permeabilidade e porosidade dos concretos (Adaptados de SAID <i>et al</i> , 2012).....	70
Tabela 2.12 – Classes de consistência (Adaptado de NBR 8953, ABNT 2015).....	75
Tabela 3.1 – Especificações dos concretos investigados .....	85
Tabela 3.2 – Consumo dos materiais em kg por m <sup>3</sup> de concreto .....	87
Tabela 3.3 – Temperaturas dos materiais aferidas imediatamente antes das dosagens.....	89
Tabela 4.1 – Abatimentos e temperaturas dos concretos sem adição do superplastificante .....	93

Tabela 4.2 – Diferenças de trabalhabilidade e temperatura inicial dos concretos do Grupo 1 .....	99
Tabela 4.3 – Diferenças de trabalhabilidade e temperatura inicial dos concretos do Grupo 2 .....	100
Tabela A.1 – Exigências de norma e especificações do cimento.....	116
Tabela A.2 – Massas unitárias das areias.....	117
Tabela A.3 – Massas específicas das areias .....	118
Tabela A.4 – Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo (Adaptado de NBR 7211, ABNT 2009) .....	118
Tabela A.5 – DMC e MF das areias .....	119
Tabela A.6 – Especificações dos equipamentos e índices de absorção das areias	122
Tabela A.7 – Massas unitárias das britas.....	123
Tabela A.8 – Massas específicas das britas .....	124
Tabela A.9 – Limites da composição granulométrica do agregado graúdo (Adaptado de NBR 7211, ABNT 2009) .....	125
Tabela A.10 – DMC e MF das britas .....	125
Tabela A.11 – Capacidades de absorção das britas .....	126
Tabela A.12 – Características físicas da sílica ativa .....	127
Tabela A.13 – Especificações dos aditivos .....	128
Tabela B.1 – Teor de umidade dos agregados .....	130
Tabela C.1 – Determinações dos abatimentos e temperaturas dos concretos em função do tempo.....	131

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	<b>5</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>6</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>7</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>11</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
1.1. OBJETIVO GERAL.....	18
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	19
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>20</b>
2.1. O FATOR TEMPERATURA.....	20
2.1.1. Condições climáticas.....	23
2.1.2. Temperatura do concreto.....	27
2.1.3. Materiais componentes do concreto e a temperatura.....	32
2.1.3.1. Água.....	32
2.1.3.2. Cimento.....	34
2.1.3.3. Agregados.....	38
2.1.3.4. Sílica ativa e nano-sílica.....	39
2.1.3.5. Aditivos.....	41
2.1.4. Problemas e precauções existentes na produção do concreto.....	43
2.1.5. Métodos de controle da temperatura do concreto.....	44
2.1.5.1. Resfriamento dos materiais.....	45
2.1.5.2. Substituição parcial da água de amassamento por gelo.....	50
2.1.5.3. Injeção de nitrogênio líquido.....	53
2.2. CONCRETO E A TEMPERATURA.....	54
2.2.1. Aditivos químicos.....	60
2.2.1.1. Aditivos plastificantes.....	62
2.2.1.2. Aditivos superplastificantes à base de policarboxilatos.....	65

2.2.2. Nano-sílica .....	67
2.3. CONCRETO NO ESTADO FRESCO.....	70
2.3.1. Trabalhabilidade e consistência .....	72
2.3.2. Ensaio de abatimento do tronco de cone .....	74
2.3.3. Perda de abatimento e fatores que afetam a trabalhabilidade .....	75
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>81</b>
3.1. ESTRUTURA DA PESQUISA .....	81
3.1.1. Fases da pesquisa .....	82
3.2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	83
3.2.1. Cimento.....	83
3.2.2. Agregados miúdos .....	83
3.2.3. Agregados graúdos .....	84
3.3. PRODUÇÃO DOS CONCRETOS .....	84
3.3.1. Metodologia de produção dos concretos.....	84
3.3.2. Traço e classe dos concretos.....	86
3.3.3. Condições climáticas e temperaturas de ensaio .....	87
3.4. PERDA DE ABATIMENTO.....	90
3.4.1. Procedimento de avaliação do abatimento e temperatura .....	90
3.5. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	92
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>93</b>
4.1. ABATIMENTOS E TEMPERATURAS ANTES DO SUPERPLASTIFICANTE.....	93
4.1.1. Análise dos resultados .....	93
4.2. ABATIMENTOS E TEMPERATURAS APÓS O SUPERPLASTIFICANTE .....	94
4.2.1. Análise dos resultados .....	97
4.3. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	102
4.3.1. Análise dos resultados .....	102
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>104</b>
<b>6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>106</b>

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>107</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>116</b>
<b>APÊNDICE B .....</b>	<b>129</b>
<b>APÊNDICE C .....</b>	<b>131</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto fresco enrijece com o tempo, especialmente se for misturado continuamente. O resultado de uma mistura prolongada está associado à perda de abatimento acelerada do concreto. A perda de trabalhabilidade do concreto pode criar uma série de problemas incluindo dificuldade de lançamento e adensamento, resultando em um concreto mais poroso e com baixa resistência mecânica e durabilidade. Em condições de temperaturas moderadas, o enrijecimento do concreto fresco, e sua associação à perda de abatimento, não apresentam problemas, pois na prática, o concreto se mantém trabalhável por período suficiente a permitir sua manipulação, ou seja, seu transporte, lançamento, adensamento e acabamento, sem quaisquer dificuldades. No entanto, em condições de temperaturas elevadas, pode ser diferente, pois as taxas de enrijecimento e perda de abatimento são aceleradas, e os tempos de início e fim de pega são reduzidos com o aumento da temperatura (SOROKA; RAVINA, 1998).

As propriedades relacionadas à trabalhabilidade incluem consistência, segregação, exsudação, mobilidade, bombeamento e acabamento. A consistência é considerada um indicador mais próximo da trabalhabilidade, isto é, é um parâmetro que mensura a facilidade de escoamento e coesão da mistura. O abatimento é usado como uma medida da consistência do concreto (KOSMATKA; KERKHOFF; PANARESE, 2003)

Elevadas temperaturas do ambiente podem criar problemas durante a mistura, lançamento, adensamento e cura do concreto, além de afetarem adversamente suas propriedades e manutenção. A maior parte dos problemas causados está relacionada ao aumento da velocidade da reação de hidratação do cimento e da taxa de evaporação da água de amassamento (ACI Committee 305, 2013).

O Código de Requisitos de Construção em Concreto Estrutural reportado pela Comissão 318 (ACI, 2014) alerta que quando a temperatura ambiente atinge valores menores que 4°C ou maiores que 35°C, um registro das temperaturas do concreto e da técnica de proteção realizada durante o lançamento e a cura deve ser mantido. As temperaturas da superfície do concreto devem ser determinadas através de

sensores em contato com a superfície do concreto ou em juntas secas ou entre a cobertura usada para a cura e o concreto.

Uma das maneiras mais comuns de aliviar os problemas recorrentes das elevadas temperaturas é aumentar a quantidade de água da mistura, mas esta prática cria obstáculos para a resistência e durabilidade do concreto. Aditivos químicos têm sido largamente utilizados para reduzir a perda de abatimento seja aumentando a fluidez inicial do concreto e/ou induzindo a efeitos de retardamento da pega (NEHDI; AL-MARTINI, 2009).

Os aditivos superplastificantes, um dos mais utilizados pela indústria do concreto, são responsáveis por garantir alta fluidez às misturas, no entanto Tutikian e Dal Molin (2008) afirmam que a maior dificuldade de uso desses aditivos é a taxa relativamente alta de perda de consistência com o tempo em comparação aos concretos convencionais, dificultando sua utilização em obras. Porém, nos casos em que um maior tempo de transporte e lançamento faz-se necessário, é indicada a especificação de abatimentos iniciais mais altos, que podem ser obtidos com o uso de aditivos plastificantes.

Em condições de elevadas temperaturas, quando não é possível reduzir o tempo entre transporte e acabamento do concreto, é importante que a temperatura da mistura seja controlada e, em alguns casos extremos, reduzida por resfriamento dos materiais ou da mistura como um todo. A Comissão 305 (ACI, 2013) afirma que temperaturas máximas do concreto são comumente especificadas como uma tentativa de controlar as taxas de endurecimento, resistência, durabilidade, retração plástica, fissuração térmica e retração por secagem. Logo, a produção de concretos em climas quentes é muito complexa para ser solucionada através da determinação de uma temperatura máxima do concreto durante a produção e transporte.

Vários pesquisadores investigaram a causa da perda de resistência mecânica do concreto em longo prazo devido às elevadas temperaturas iniciais. O alto grau de hidratação inicial causado pela alta temperatura retarda a hidratação subsequente e produz uma distribuição não uniforme dos produtos hidratados. A razão é que, em casos de acelerado grau de hidratação inicial, não há tempo disponível suficiente para difusão dos produtos hidratados em relação às partículas de cimento e para precipitação uniforme deles nos espaços intersticiais (MITTELACHER, 1983 *apud* GHANI; SHABBIR; KHAN, 2006).

Acredita-se que a nanotecnologia é um dos campos de pesquisa mais promissores que deve melhorar, significativamente, o projeto das misturas, assim como o desempenho e produção de materiais à base de cimento. Resultados experimentais têm indicado melhoras no desempenho de concretos produzidos com nano-sílica (LI, YUAN, OU, 2004 *apud* SAID *et al*, 2012).

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Da dosagem ao lançamento do concreto em condições de clima quente são encontrados vários problemas devido à rápida hidratação do cimento e à acelerada evaporação da água da mistura. Esses problemas podem prejudicar a entrega de concretos dosados em centrais, mas podem ser evitados através do controle dos impactos da temperatura na manutenção da consistência da mistura.

De forma a estudar tais impactos, sabendo que a temperatura e os aditivos redutores de água podem influenciar na manutenção de consistência dos concretos frescos, esta dissertação tem como objetivo geral analisar os efeitos da temperatura na manutenção do abatimento de concretos frescos incorporados com diferentes aditivos.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a. Analisar a influência da adição de nano-sílica em solução na evolução da temperatura e da trabalhabilidade das misturas;
- b. Avaliar o impacto da temperatura inicial no abatimento inicial dos concretos;
- c. Estabelecer relação da influência do diferencial entre a temperatura ambiente e a temperatura das misturas na manutenção da consistência;
- d. Analisar a influência da temperatura inicial das misturas na resistência à compressão axial aos 28 dias.

### 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está dividida em sete capítulos. Estes capítulos são abrangentes e tratam de assuntos que conversam entre si e facilitam a leitura e compreensão do trabalho.

O primeiro capítulo apresenta a introdução da pesquisa, incluindo justificativa do tema e seus objetivos principal e secundários. Já no segundo capítulo, é lançada toda a revisão bibliográfica utilizada como fundamentação para realização do trabalho prático. Nesse capítulo, são trazidos temas relacionados ao concreto, incluindo suas propriedades e materiais componentes; às adições minerais e aditivos químicos; e, os efeitos da temperatura das misturas nas suas propriedades reológicas.

No terceiro capítulo tem-se a estruturação da pesquisa, onde todo o procedimento prático é discriminado conforme foi realizado. Neste capítulo ainda estão apresentados os materiais e métodos, que por sua vez, detalham todos os processos de preparação dos materiais, produção dos concretos e realização dos ensaios.

O quarto capítulo fica destinado à apresentação dos resultados obtidos no procedimento experimental e as análises sobre os valores encontrados. As considerações finais estão inseridas no quinto capítulo seguidas das propostas de trabalhos futuros apresentadas no sexto capítulo.

Por fim, são apresentados as referências bibliográficas e os apêndices com dados levantados durante a pesquisa.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 O FATOR TEMPERATURA

Produções de concreto em temperaturas muito altas ou muito baixas causam, frequentemente, efeitos adversos sobre algumas propriedades da mistura, tais como, trabalhabilidade e resistências mecânicas (MOINI; LAKIZADEH; MOHAQEQL, 2012). O efeito da temperatura nas diferentes propriedades do concreto é considerável e é um assunto que aparece em pesquisas de vários pesquisadores, no entanto, no que trata das propriedades do concreto no estado fresco, não existem muitos estudos sobre os efeitos da temperatura. A maioria das pesquisas é voltada para os impactos deste fator nas resistências mecânicas, pois estas foram consideradas como critério primordial de avaliação do desempenho do concreto (NAIK; KRAUS, 2002).

Ortiz *et al* (2005) afirmam que o concreto de cimento Portland dosado em central sob condições climáticas adversas, envolvendo baixas e altas temperaturas, influenciam diretamente no desempenho do concreto durante a mistura, transporte, lançamento, adensamento e cura, tanto no aspecto físico como mecânico. Se as devidas precauções não são efetivamente tomadas nas primeiras idades, o concreto pode ser danificado e, uma vez danificado, o material não poderá ser completamente recuperado.

Os efeitos da temperatura no concreto podem ter sua origem tanto externa como interna no concreto. Do ponto de vista externo, as condições climáticas, como o calor e o frio, juntamente com a baixa umidade relativa do ar e a ação dos ventos, são fatores que geram ou potencializam os problemas no concreto. Já do ponto de vista interno, o calor liberado nas reações de hidratação do aglomerante, quando o concreto ainda encontra-se no estado fresco, é uma das principais fontes que provocam variações volumétricas na estrutura, desde seu estágio inicial de cura até em idades avançadas quando ocorre o equilíbrio térmico com o ambiente (SANTOS; BITTENCOURT; GRAÇA, 2011). Essas situações são contornáveis através da escolha dos tipos e quantidades de materiais que serão utilizados na dosagem, de cuidados com a relação água/cimento ( $a/c$ ) a ser utilizada, da análise das condições climáticas no local de dosagem e lançamento do concreto, do procedimento de cura

utilizado, das dimensões das peças a serem concretadas e das características isolantes das formas.

As elevadas temperaturas atingem todas as fases do concreto causando efeitos na pasta de cimento, agregados e zona de transição e, ainda altera o processo de hidratação das partículas de cimento, silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) e  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  formadas após a mistura (AREL; YAZICI, 2014). Aumento do grau de hidratação do cimento e da velocidade de evaporação da água de amassamento do concreto fresco são alguns dos problemas mais associados à elevadas temperaturas das misturas (GURLEY, 2008).

Diante dessa problemática, algumas normas brasileiras e internacionais especificam os valores de temperaturas do ambiente e do concreto admissíveis para produção e uso dos concretos, seja direta ou indiretamente. As determinações das principais normas que tratam do assunto estão listadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Limites de temperatura ambiente e do concreto conforme normatizações

Dados	NBR 6118 (2014)	NBR 7212 (2012)	NBR 14931 (2004)	ACI 305 (2013)	ACI 306 (2010)	ACI 318 (2014)	NCh 170 (1985)
Temperatura do concreto (°C)	Fixa	Fixa	Fixa	24 a 38	≥ 7	≤ 32*	≤ 35**
Temperatura ambiente (°C)	0 a 40	5 a 30	5 a 35	≤ 35	≤ 30	4 a 35	≥ 5

\* Valor estabelecido pela Designação C 94 (ASTM, 2015) e NTP 339.184 (INDECOPE, 2013);

\*\* Esta temperatura deve ser reduzida para valores menores que 16°C caso alguma das dimensões da peça a ser concretada seja maior que 80 cm;

As normas brasileiras não estipulam um período de temperatura aceitável para os concretos, no entanto fazem algumas ressalvas quantos às variações que podem vir a ocorrer. Por exemplo, a NBR 6118 (ABNT, 2014), afirma que as variações de temperatura dentro uma mesma peça não podem exceder 5°C quando medidas nas faces mais distantes e a temperatura do concreto não pode diferir mais de 15°C com relação à temperatura ambiente. Já a NBR 14931 (ABNT, 2004), atesta que a umidade do ar deve ser maior que 50% e a velocidade do vento menor que 30

m/s. Esta norma ainda exige que as concretagens devam ser suspensas caso a temperatura ambiente reduza a menos que 0°C ou exceda 40°C, ou, ainda, caso a velocidade do vento ultrapasse os 60 m/s.

A Comissão 306 do Instituto Americano do Concreto (ACI, 2010) determina os valores mínimos de temperatura do concreto em função das temperaturas do ar e das dimensões mínimas das peças a serem concretadas. Por exemplo, em temperaturas superiores a -1°C, a temperatura mínima do concreto deve ser 7°C para peças com dimensão mínima maior que 1800 mm, enquanto que para peças com dimensão menor que 300 mm, o limite de temperatura sobe para 16°C.

A norma técnica chilena NCh 170 (INN, 1985) ainda estabelece limites de temperatura de produção e lançamento de concretos em dias quentes e secos. Neste caso, a temperatura de produção do concreto deve estar entre 10°C e 16°C para elementos correntes e entre 5°C e 10°C para concreto massa, ao passo que a temperatura no momento do lançamento não deve exceder os 30°C para elementos correntes e 16°C para concreto massa.

Além das normatizações já citadas, a Designação C 94 (ASTM, 2015) expõe que durante a produção e transporte do concreto fresco, em condições de clima quente, a temperatura da mistura deve ser mantida a menor possível, não excedendo 32°C. Quando a temperatura do concreto se aproxima desse valor podem surgir dificuldades para manuseio, gerando problemas posteriormente. A Designação C 94 ainda é referenciada pela NTP 339.184 (INDECOPI, 2013) quando a segunda trata do limite de temperatura aceitável para concretos em condições de clima quente, estabelecendo os mesmos 32°C como valor máximo admissível.

Esta pesquisa é voltada para o estudo do impacto de diferentes temperaturas dos concretos nas suas propriedades do estado fresco produzidos na cidade de Goiânia, ou seja, produzidos em condições de temperaturas moderadas a elevadas. Portanto, este capítulo apresentará informações, exigências normativas e constatações de outros autores sobre as condições de produção e utilização de concretos em climas quentes.

### 2.1.1 Condições climáticas

Mesmo que a condição climática não seja uma variável de análise nesta pesquisa, alguns dados básicos devem ser mencionados para possibilitar a formulação de uma analogia da influencia da temperatura ambiente com a temperatura do concreto. Essa aproximação permitirá maior clareza quanto aos impactos da variação de temperatura das misturas nas suas propriedades reológicas.

A Comissão 305 (ACI, 2013) define clima quente como sendo uma ou a combinação das seguintes condições: elevada temperatura ambiente, elevada temperatura do concreto, baixa umidade relativa do ar e elevada velocidade do vento. Essas condições tendem a afetar negativamente a qualidade do concreto fresco e endurecido.

Para a dosagem do concreto, entende-se temperatura ambiente normal como sendo aquela que acima de 10°C e menor que 35°C, conforme indicado na Figura 2.1 (ACI Committee 306, 2010). Em casos de elevadas temperaturas, maiores que 35°C, a durabilidade do concreto e da argamassa decresce, pois sua permeabilidade aumenta devido à fissuração (MOHD ZAIN; YUSOF; MATSUFUJI, 1999).

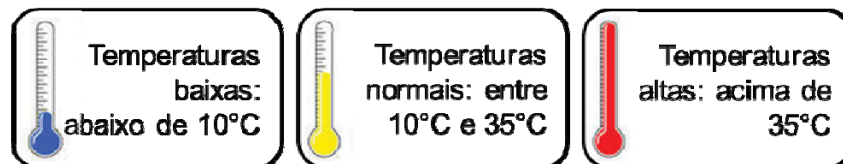


Figura 2.1 – Períodos de temperatura do ambiente conforme Comissão 306 (ACI, 2010).

Em condição de clima quente, é preciso ser dada a devida atenção aos ingredientes, métodos de confecção, manutenção, lançamento, proteção, e cura do concreto a fim de prevenir temperaturas excessivamente elevadas do concreto e/ou evaporação da água que, por sua vez, poderiam comprometer a resistência mecânica e durabilidade de uma estrutura (ACI Committee 318, 2014).

Geralmente, em condições de temperatura elevada é imprescindível estipular uma temperatura máxima para o ambiente ou para o concreto, por exemplo, se a umidade relativa do ar e a velocidade do vento estão baixas, maiores serão as temperaturas admissíveis para o ambiente ou para o concreto. A manutenção da temperatura do concreto entre 24 e 38°C, em ensaios laboratoriais, pode ser a

condição favorável a se obter melhores resultados em operações em dias quentes. A Designação C 192 (ASTM, 2014) exige que a dosagem e os ensaios laboratoriais do concreto devem ser realizados em temperaturas entre 20 e 30°C, mas a Comissão 305 (ACI, 2013) afirma que é melhor que sejam realizados com temperaturas mais próximas das reais.

Concretos produzidos em elevadas temperaturas tendem a formar produtos hidratados mais rapidamente que os concretos em condições de temperaturas moderadas e, conseqüentemente, perde sua trabalhabilidade de maneira acelerada reduzindo o tempo disponível para cumprimento das etapas iniciais de produção. É importante citar que, quando um concreto está submetido a elevada temperatura ambiente, é possível que a mistura esteja a uma temperatura ainda maior (NEHDI; AL-MARTINI, 2007).

A Comissão 305 (ACI, 2013) lista os possíveis problemas gerados no concreto fresco produzidos em condições de elevadas temperaturas e ainda traça um plano de práticas que podem reduzir os impactos da temperatura na mistura. A Tabela 2.2 apresenta esses dados.

As elevadas temperaturas causam aumento na taxa de evaporação da água do concreto fresco, resultando em uma menor efetividade da água da mistura e, conseqüentemente, reduzindo a trabalhabilidade do concreto (MOURET; BASCOUL; ESCADEILLAS, 1997 *apud* ORTIZ *et al*, 2005). Os problemas relacionados às taxas de evaporação são praticamente eliminados quando a umidade do ar atinge valores superiores a 80%. A Tabela 2.3 mostra, para várias umidades relativas do ar, as temperaturas do ambiente e do concreto que podem resultar em taxas de evaporação críticas.

Tabela 2.2 – Lista de possíveis problemas causados pela temperatura ambiente e procedimentos que podem minimizá-los (ACI Committee 305, 2013)

Problemas que podem ocorrer no concreto no estado fresco	Práticas que podem minimizar a incidência destes problemas
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Aumento na demanda de água;</li> <li>▪ Elevada taxa de perda de abatimento e consequente tendência a adicionar água no canteiro de obras;</li> <li>▪ Elevada taxa de enrijecimento, resultando em uma maior dificuldade de manejar, compactar, e finalizar, e maior risco de surgimento de juntas frias;</li> <li>▪ Elevada tendência à fissuração plástica;</li> <li>▪ Elevada dificuldade de controle da quantidade de ar incorporado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Selecionar os materiais do concreto e suas respectivas proporções com especificações satisfatórias para condições de clima quente;</li> <li>▪ Reduzir e controlar a temperatura dos materiais e do concreto no estado fresco;</li> <li>▪ Usar um abatimento que permita um rápido adensamento e um eficaz endurecimento do concreto;</li> <li>▪ Minimizar o tempo de transporte, lançamento, adensamento e acabamento do concreto;</li> <li>▪ Programar concretagens para horários do dia ou da noite quando as condições climáticas forem favoráveis;</li> <li>▪ Proteger o concreto da perda de umidade durante o período de concretagem e cura;</li> <li>▪ Programar uma reunião para discutir os requisitos a serem respeitados durante concretagens em dias quentes.</li> </ul>

Segundo Neville e Brooks (2013), após o lançamento, deve-se evitar a evaporação da água da mistura. Taxas de evaporação superiores a  $0,25 \text{ kg/m}^2/\text{h}$  devem ser evitadas para garantir uma cura satisfatória e prevenir a retração plástica. Os valores da taxa de evaporação podem ser estimados a partir do nomograma ilustrado na Figura 2.2. Kosmatka, Kerkhoff e Panarese (2003) afirmam que as misturas de concreto que contêm pozolanas, a taxa de evaporação se torna preocupante quando extrapola  $0,50 \text{ kg/m}^2/\text{h}$ .

Lerch (1957 *apud* ACI Committee 305, 2013) afirma que ao usar o nomograma a velocidade do vento deve ser medida a aproximadamente  $0,50 \text{ m}$  da acima da superfície do concreto. A temperatura do ar e umidade relativa devem ser medidas de  $1,20$  a  $1,80 \text{ m}$  de altura da superfície do concreto.

Tabela 2.3 – Relação entre temperaturas do concreto e umidades relativas críticas  
(Adaptado de ACI Committee 305, 2013)

Temperatura do concreto (°C)	Temperatura do ar (°C)	Taxa de evaporação			
		1,0 kg/m <sup>2</sup> /h	0,75 kg/m <sup>2</sup> /h	0,5 kg/m <sup>2</sup> /h	0,25 kg/m <sup>2</sup> /h
		Umidade relativa (%)*			
41	35	85	100	100	100
38	32	80	95	100	100
35	29	75	90	100	100
32	27	60	85	100	100
29	24	55	80	95	100
27	21	35	60	85	100
24	19	20	55	80	100

\*Umidade relativa, percentual para cada taxa de evaporação, assumindo a temperatura do ar 6°C a menos que a temperatura do concreto e, velocidade do vento de 16 km/h, medida a 50 cm acima da superfície de evaporação.

Tomando um caso específico como exemplo de estimativa da taxa de evaporação com auxílio da Figura 2.2, observa-se que um concreto com temperatura de 27°C, lançado nas fôrmas a uma temperatura ambiente de 30°C, umidade relativa do ar de 40% e velocidade média do vento de 16 km/h, terá uma taxa de evaporação quatro vezes maior que um concreto lançado nas fôrmas sem influência do vento.

A NCh 170 (INN, 1985) estabelece que quando a taxa de evaporação da água for maior que 1 kg/m<sup>2</sup>/h, a temperatura da mistura de concreto deve ser mantida abaixo dos 30°C.

Uma maneira de minimizar os efeitos da elevada temperatura na mistura é controlar a temperatura do concreto fresco. Ao reduzir a temperatura do concreto, a perda de abatimento é desacelerada, o consumo de água reduzido e a manutenção da consistência prolongada. Além disso, o uso de aditivos pode ajudar a compensar os efeitos das altas temperaturas, não alterando a composição dos produtos hidratados (OTOKO, 2014).

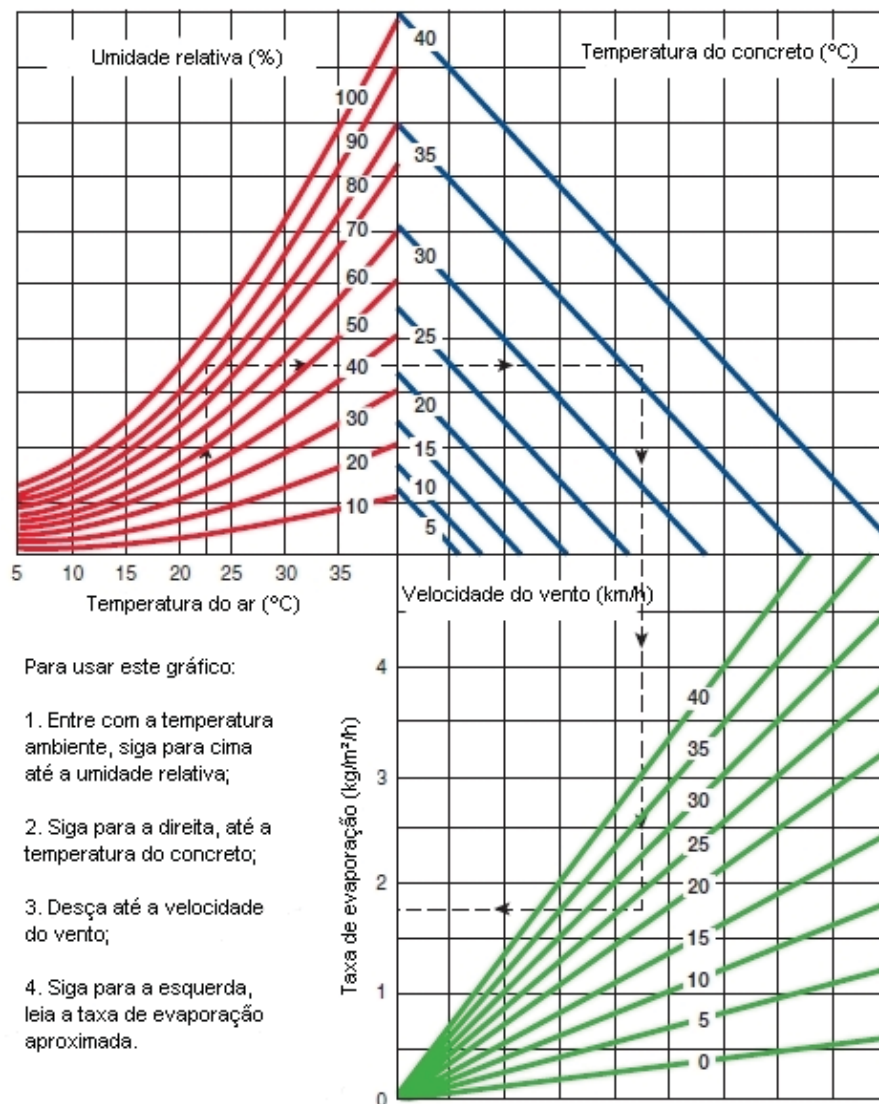


Figura 2.2 – Efeito das temperaturas do concreto e do ar, umidade relativa, e velocidade do vento na taxa de evaporação da umidade superficial do concreto. Este gráfico apresenta um método de estimativa da perda de umidade superficial para várias condições climáticas. Para usá-lo, siga os quatro passos listados ao lado do gráfico. A velocidade média do vento deve ser medida a aproximadamente 0,50 m acima da superfície do concreto. A temperatura do ar e umidade relativa devem ser medidas de 1,20 a 1,80 m de altura da superfície do concreto (Adaptado de KOSMATKA; KERKHOFF; PANARESE, 2003).

### 2.1.2 Temperatura do concreto

Neville e Brooks (2013) alegam que a qualidade do concreto depende mais da sua temperatura do que da temperatura ambiente, visto que é possível controlar a

primeira a fim de se reduzir os efeitos negativos do clima quente na produção do concreto.

As propriedades do concreto, que fazem dele um excelente material de construção, podem ser afetadas quando a temperatura da mistura ultrapassa 38°C. Perda de consistência, resistência mecânica, permeabilidade, fissurações e resistência a ataques químicos dependem da seleção e controle dos materiais e suas respectivas proporções na mistura; da temperatura inicial do concreto fresco; velocidade do vento; temperatura ambiente; e umidade relativa durante os processos de produção e concretagem (ACI Committee 305, 2013). A Tabela 2.4 lista os possíveis problemas causados por elevadas temperaturas das misturas.

Klieger (1958 *apud* ACI Committee 305, 2013) estudou os efeitos da temperatura do concreto na perda de consistência de concretos dosados com cimento Portland e o resultado é apresentado na Figura 2.3. À medida que a temperatura do concreto aumenta, o abatimento é reduzido ao passo em que a quantidade de água necessária para manter a consistência aumenta. Para uma mesma relação a/c, um concreto produzido a 50°C atinge abatimento próximo a 25 mm, enquanto que um concreto de mesmo traço e produzido a 20°C, pode atingir abatimento igual a 75 mm.

Elevadas temperaturas do concreto fresco aumentam a taxa de endurecimento e reduzem o prazo total para transporte, lançamento e acabamento do concreto. O tempo de endurecimento pode ser reduzido em duas ou mais horas com um aumento de 10°C na temperatura do concreto (KOSMATKA; KERKHOFF; PANARESE, 2003).

A Figura 2.4 ilustra o efeito da temperatura da mistura no tempo de início e fim de pega para concretos com mesmo traço e composição dos materiais. Quanto maior a temperatura de lançamento do concreto fresco, menor será seu tempo de início e fim de pega, portanto, menos trabalhável será o concreto.

Tabela 2.4 – Possíveis problemas causados pela elevada temperatura de uma mistura de concreto (ACI Committee 305, 2013)

Problemas possivelmente encontrados em misturas de concreto com elevada temperatura
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ A quantidade de água necessária para garantir a consistência do concreto aumenta à medida que o tempo entre a dosagem e o lançamento aumenta;</li> <li>▪ A quantidade de água elevada causa uma queda na resistência e durabilidade, se a quantidade de aglomerante não for elevada proporcionalmente;</li> <li>▪ O tempo de perda de abatimento é evidentemente menor, gerando dificuldades nas operações de lançamento e adensamento;</li> <li>▪ Em climas áridos, a tendência à fissuração plástica é elevada;</li> <li>▪ Em seções de grandes dimensões (concreto massa), existem elevados graus de hidratação e calor gerado que aumentam a diferença de temperatura entre o interior e o exterior do concreto. Isto pode causar fissuração térmica;</li> <li>▪ Aplicação dos processos de cura é crítica. A falta de cura apropriada é cada vez mais prejudicial em elevadas temperaturas.</li> </ul>

Heikal *et al* (2005 *apud* POLESELLO *et al*, 2013) afirmam que o concreto fresco, sujeito a altas temperaturas, tem seus tempos de início e fim de pega reduzidos em função do aumento da taxa de hidratação do cimento com a temperatura, principalmente nos primeiros instantes. Além disso, em concretos expostos a essas condições, existe uma elevada tendência à fissuração seja no estado fresco ou endurecido. A rápida evaporação da água do concreto fresco pode causar fissuras por retração plástica antes de a superfície endurecer. As fissuras também se desenvolvem no concreto endurecido devido a elevada retração por secagem que, por sua vez, é resultado da grande quantidade de água ou das variações de volume de origem térmica à medida que o concreto resfria (KOSMATKA; KERKHOFF; PANARESE, 2003).

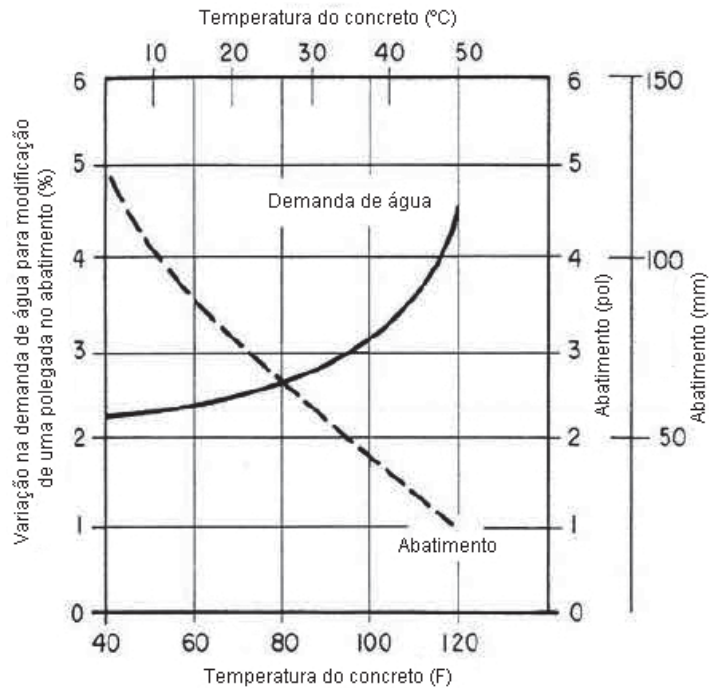


Figura 2.3 – Efeito da temperatura do concreto no abatimento e na demanda de água necessária para manutenção do abatimento (Adaptado de KLIEGER, 1958 *apud* ACI Committee 305, 2013).

Mindess e Young (1981) afirmam que em condições normais de temperatura, as propriedades térmicas de um concreto podem ser consideradas constantes, pressupondo que não haja nenhuma alteração na umidade. Entretanto, em condições de clima quente, essas propriedades são afetadas em função das mudanças nos teores de umidade dos materiais que compõem o concreto e devido à deterioração progressiva da pasta e, em alguns casos, dos agregados. Estes processos dependem das condições às quais o concreto está exposto: a taxa de aumento da temperatura, a temperatura máxima, e o período decorrido sob condições de elevadas temperaturas. A resposta do concreto dependerá das suas propriedades iniciais. Portanto, a previsão do comportamento do concreto a elevadas temperaturas é um problema complexo.

A temperatura do concreto tem influência significativa na relação entre a saturação dos poros e a umidade da mistura. Para uma determinada relação  $a/c$ , quanto maior for a temperatura, menor será a saturação dos poros correspondente à umidade do concreto. Quanto menor for a relação  $a/c$ , mais significativo será o efeito da temperatura na relação entre a saturação dos poros e a umidade (JIANG; YUAN, 2013).

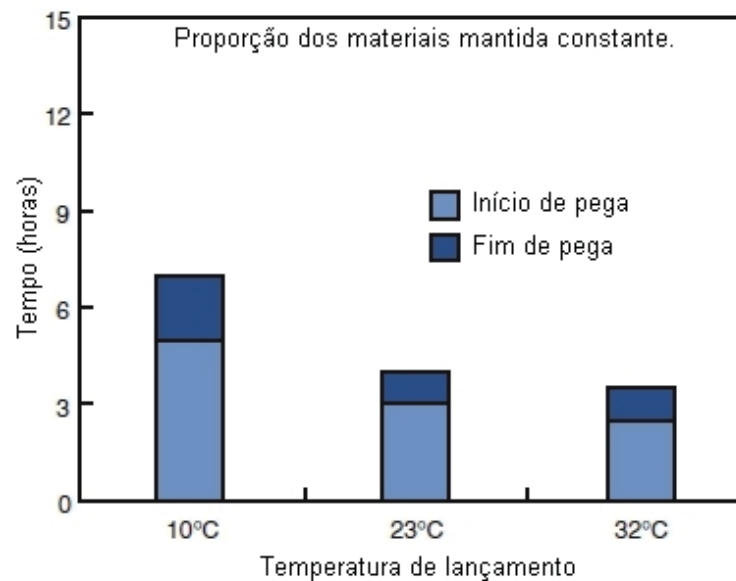


Figura 2.4 – Efeito da temperatura do concreto no tempo de início e fim de pega  
(Adaptado de BU, 1996 *apud* KOSMATKA; KERKHOFF; PANARESE, 2003).

Ainda é possível calcular a temperatura do concreto no estado fresco a partir da temperatura dos seus materiais constituintes, usando a Equação 2.1 (ACI Committee 305, 2013), onde os dados devem ser lançados conforme Sistema Internacional de Unidades.

$$T = \frac{0,22 (T_a W_a + T_c W_c) + T_w W_w + T_a W_{wa}}{0,22 (W_a + W_c) + W_w + W_{wa}} \quad (\text{Equação 2.1})$$

Onde: T = temperatura do concreto;  
 T<sub>a</sub> = temperatura dos agregados;  
 T<sub>c</sub> = temperatura do cimento;  
 T<sub>w</sub> = temperatura da água de amassamento;  
 W<sub>a</sub> = massa do agregado seco;  
 W<sub>c</sub> = massa de cimento;  
 W<sub>w</sub> = massa de água de amassamento;  
 W<sub>wa</sub> = massa de água livre e absorvida pelos agregados.

O valor de 0,22 trata-se da relação aproximada do calor específico dos ingredientes secos em relação à água, e o resultado pode ser diferente da temperatura real. A temperatura real do concreto será um pouco maior que a indicada pela expressão em função do trabalho mecânico produzido na mistura e ao

desenvolvimento inicial do calor de hidratação do cimento (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Tomando por base a fórmula apresentada na Equação 2.1, a temperatura do concreto pode ser reduzida de 0,5°C se uma das medidas a seguir for tomada:

- 4°C de redução na temperatura do cimento;
- 2°C de redução na temperatura da água;
- 1°C de redução na temperatura dos agregados.

### **2.1.3 Materiais componentes do concreto e a temperatura**

#### **2.1.3.1 Água**

Outro aspecto que deve ser considerado em condições de elevadas temperaturas é o aumento da quantidade de água de amassamento necessário para garantir um determinado abatimento da mistura (SOROKA; RAVINA, 1998). Este efeito pode ser observado na Figura 2.5 e é atribuído ao grau de hidratação do cimento. Como existe um período de tempo entre o momento em que a água é adicionada à mistura e o momento em que as determinações de abatimento são realizadas, a mistura enrijece, e esse enrijecimento é mais pronunciado a temperaturas mais altas. Assim, como forma de contornar esse enrijecimento precoce, mais água é adicionada à mistura, ou seja, o consumo de água aumenta. Dessa forma, fica evidente que de maneira a reduzir efeitos indesejáveis causados pelo aumento de água na mistura, aditivos plastificantes e superplastificantes devem ser considerados.

Kosmatka, Kerkhoff e Panarese (2003) também afirmam que à medida que a temperatura do concreto aumenta ocorre uma perda de consistência que é incorretamente compensada pela adição de água no concreto antes do lançamento. A elevada temperatura, uma maior quantidade de água é requerida para manter o abatimento constante se comparada a temperaturas mais baixas. Adicionar água sem adicionar cimento resulta em uma maior relação a/c e, conseqüentemente, reduz as resistências mecânicas em todas as idades. Adicionar cimento para compensar o uso extra de água pode não ser suficiente para atingir as propriedades

desejadas do concreto, pois o cimento adicional aumentará a temperatura do concreto e a demanda de água. Para Basham (1992), de modo geral, uma redução de 3% a 7% na resistência à compressão pode ser esperada a cada acréscimo de 4,90 kg de água por metro cúbico de concreto.

A Figura 2.5 ilustra a variação da temperatura do concreto em função da quantidade de água para manutenção de uma mesma consistência. Um metro cúbico de concreto fresco produzido a 30°C demandará um consumo de aproximadamente 173 kg/m<sup>3</sup> de água para atingir abatimento de 75 mm, enquanto que o mesmo concreto, produzido a 20°C, demandará 166 kg/m<sup>3</sup>, logo, ao aumentar 10°C na temperatura de produção do concreto será preciso adicionar aproximadamente 7 kg de água com temperatura constante para manter o mesmo abatimento.

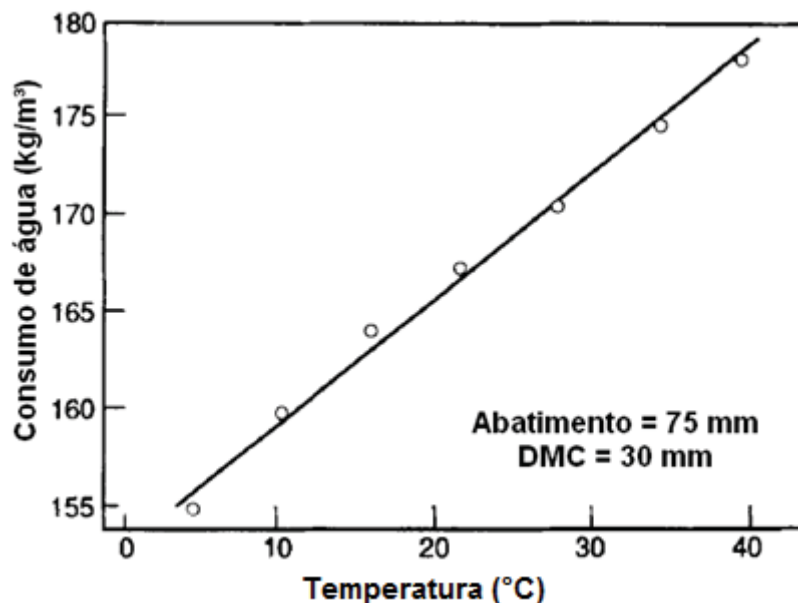


Figura 2.5 – Efeito do aumento de temperatura na demanda de água de amassamento do concreto (Adaptado de SOROKA; RAVINA, 1998).

Por possuir um calor específico de cerca de quatro a cinco vezes maior que o do cimento ou dos agregados, a temperatura da água de amassamento tem o maior efeito por unidade de peso na temperatura do concreto, além de ser o material usado em menores quantidades do que os outros materiais. Água com elevada temperatura provoca aumento na temperatura do concreto e, à medida que a temperatura do concreto aumenta, mais água é necessária para manutenção do

mesmo abatimento (ACI Committee 305, 2013). A água gelada pode ser utilizada para reduzir a temperatura do concreto, assim como o gelo, que por sua vez, tem sua quantidade limitada a 75% da quantidade de água total do traço e, ele deve ser lançado na mistura em forma de raspas pequenas.

Ao se tratar de aquecimento da água, a Comissão 306 (ACI, 2010) e a Designação C 94 (ASTM, 2015) afirmam que o contato prematuro da água muito quente com quantidades elevadas de cimento tem causado enrijecimento instantâneo e formado bolas de cimento nos caminhões betoneira. Quando a água acima de 80°C é utilizada, é preciso ajustar a ordem em que os materiais são misturados para que a mistura não seja prejudicada.

O processo de hidratação do cimento resulta na secagem da mistura. A água evapora gradualmente e a ordem com que ela é removida do concreto quente depende da energia liberada da reação. Assim, a água livre evapora primeiro, seguida da água dos poros capilares e, por fim a água da zona de transição. O processo de perda de água que está quimicamente ligado com os hidratos do cimento é o último a ser iniciado. As propriedades mecânicas da pasta de cimento são fortemente afetadas pelas ligações químicas e coesão das forças existentes entre as camadas de gel de silicato de cálcio hidratadas (HAGER, 2013).

### 2.1.3.2 Cimento

Segundo Alves (2006), a evolução do processo de hidratação do cimento pode ser medida por vários métodos, sendo um deles a avaliação do calor de hidratação desenvolvido na mistura. A Figura 2.6 apresenta o acompanhamento da evolução do calor liberado nas primeiras 72 horas de um cimento Portland CP II-F com diferentes relações a/c.

A etapa 'a' representa a queda do fluxo de calor intenso liberado pela molhagem das partículas, início da solubilização dos silicatos e formação superficial de cristais de etringita e monossulfoaluminatos. A etapa 'b' indica diminuição de reação causada por dois fatores: i) pelo aumento da concentração de cálcio em relação à do silicato, o que diminui a dissolução dos silicatos; ii) à adsorção dos íons sulfato na superfície do  $C_3A$ , dificultando sua dissolução. A etapa 'c' apresenta uma

rápida elevação na temperatura em função da nucleação e crescimento do C-S-H e retomada da dissolução do  $C_3A$ , visto que parte do sulfato é consumida na solução. A etapa 'd' representa a continuação da formação da etringita, que acaba sendo um processo mais lento em função da liberação dos sulfatos para a solução. Não havendo mais sulfatos, o aluminato que se dissolve transforma a etringita em monossulfoaluminatos, liberando calor indicado pela etapa 'e'.

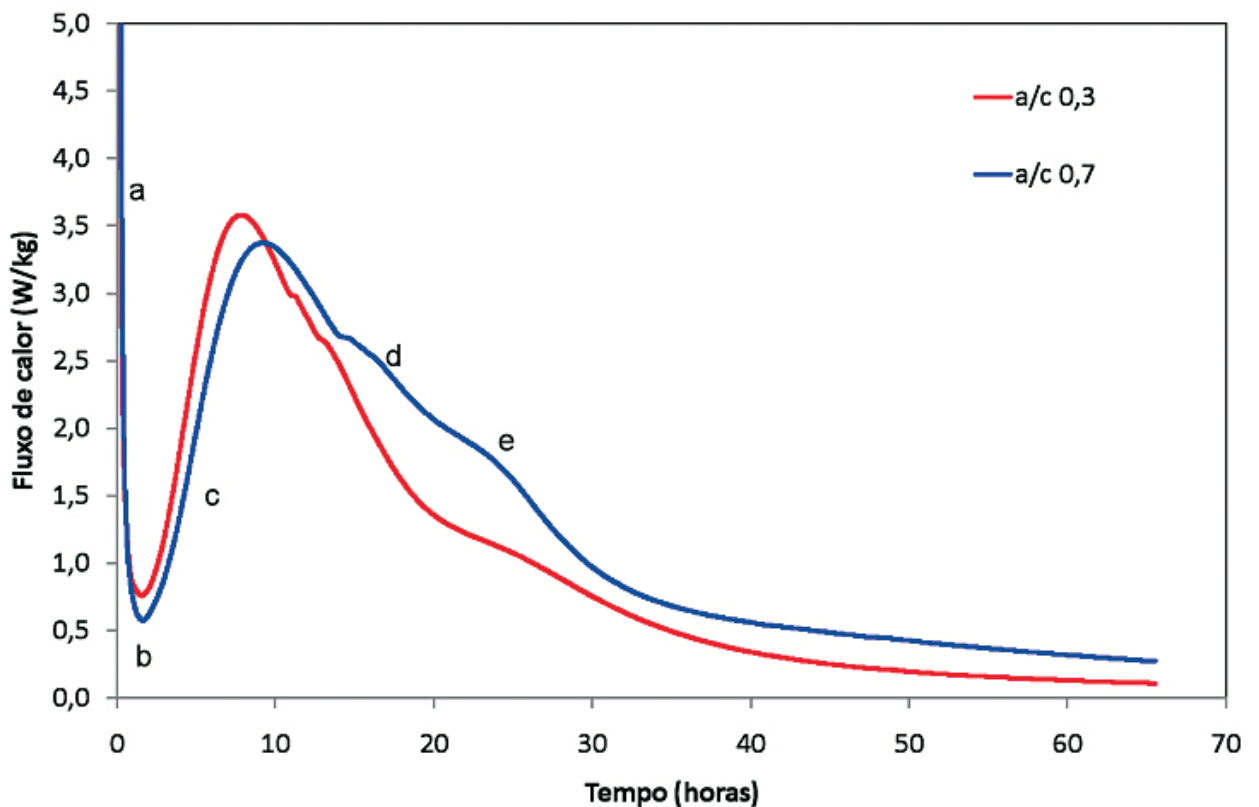


Figura 2.6 – Curva de evolução do fluxo de calor na hidratação do cimento Portland CP II-F, observado em calorímetro de condução, durante as primeiras 72 horas: a) efeito exotérmico de dissolução inicial do  $C_3A$  e  $C_3S$ , e neutralização de cargas superficiais; b) um breve período de indução (dormência); c) curva de aceleração da reação por formação de C-S-H, etringita e portlandita; d) período de desaceleração e retomada da formação da etringita; e) liberação de calor pela transformação da etringita em monossulfoaluminato

(LABORATÓRIO DE MICROESTRUTURA, 2011 *apud* CINCOTTO, 2011).

Em se tratando de consistência, Mehta e Monteiro (2014) afirmam que o concreto tem seu início de pega, isto é, a mistura começa a enrijecer, antes de atingir o ápice entre as etapas 'c' e 'd' registradas na Figura 2.6, sendo esse ápice correspondente à pega final, ou seja, momento em que a mistura solidifica

completamente e entra na fase do endurecimento. Portanto, esta pesquisa se limita a avaliar o comportamento do concreto até a etapa 'c', onde a mistura começa a formar novamente os cristais de C-S-H, etringita e portlandita.

A Figura 2.6 ainda ilustra a relação existente entre evolução de calor de hidratação do cimento e a relação a/c da mistura. Uma relação a/c maior implica em uma maior quantidade de água de amassamento e, conseqüentemente, maior será o fluxo de calor final e menor será a velocidade de liberação de calor e o pico de calor que antecede o período de desaceleração. O fluxo de calor final é maior em função da existência de água na mistura após horas depois da molhagem das partículas, o que possibilita a reação dos compostos anidros. Já o pico de calor e velocidade de liberação serão menores em função do controle da temperatura exercido pela quantidade maior de água existente.

A quantidade de cimento da mistura controla a quantidade total de calor liberado, portanto quanto maior for o consumo na dosagem maior será a influência do calor na questão térmica; enquanto que a finura do cimento é responsável pelo controle da taxa de liberação, logo quanto mais fino for o cimento, mais rápidas serão as reações de hidratação, tanto em função da maior superfície específica como da maior reatividade das partículas menores (SANTOS; BITTENCOURT; GRAÇA, 2011). Além da finura, a temperatura em que ocorre a hidratação também afeta fortemente na velocidade de desenvolvimento de calor, que para fins práticos é mais importante que o calor total de hidratação. Para Alves (1993), a quantidade de calor produzida por um volume unitário de concreto depende do tipo de cimento e do consumo do mesmo no traço, mas a velocidade de geração do calor depende das características dos agregados e da temperatura inicial do concreto, que também depende da temperatura ambiente.

O calor gerado durante o processo de hidratação do cimento eleva a temperatura do concreto para uma maior ou menor extensão dependendo das dimensões dos elementos estruturais, das condições do ambiente entorno e do conteúdo de cimento do concreto. Em via de regra, um aumento de 5°C para 9°C na temperatura para cada 45 kg de cimento Portland pode ser esperado em função do calor de hidratação (ACI Committee 211, 1997 *apud* KOSMATKA; KERKHOFF; PANARESE, 2003).

Além das proporções das fases do cimento e da relação a/c, um fator que altera a taxa de liberação de calor de hidratação é a temperatura ambiente. Conforme apresentado por Cincotto (2011), a temperatura ambiente afeta as reações iniciais, onde um aumento da temperatura favorece a dissolução das fases anidras e diminui a solubilidade da portlandita. A Figura 2.7 mostra o efeito do deslocamento do pico da etapa de aceleração-desaceleração que se dá em menor tempo e com maior liberação de calor, reduzindo drasticamente o período de indução para misturas de mesmo traço.

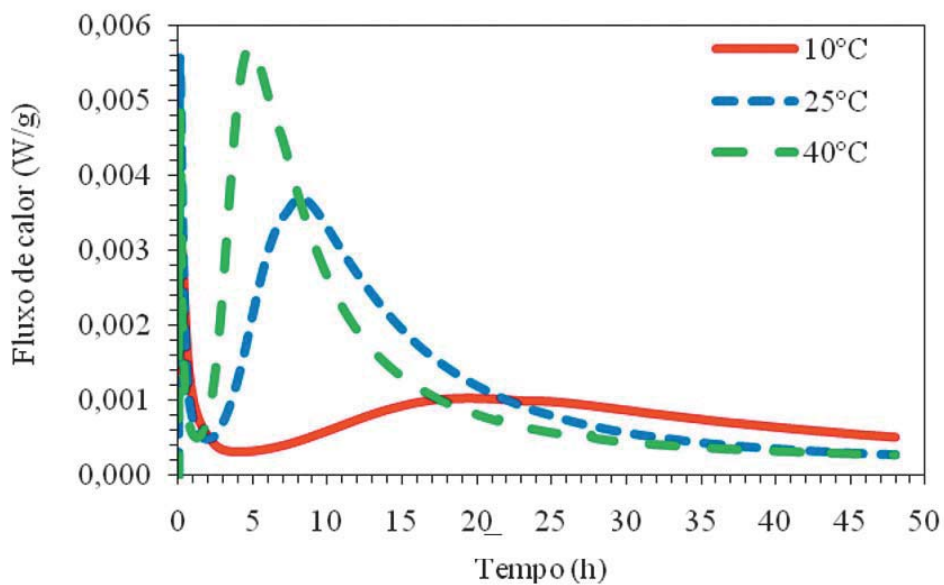


Figura 2.7 – Evolução do fluxo de calor liberado na hidratação do cimento Portland em função da temperatura, determinado por calorimetria isotérmica (LABORATÓRIO DE MICROESTRUTURA, 2011 *apud* CINCOTTO, 2011).

Kjellsen e Detwiler (1992 *apud* LOTHENBACH *et al*, 2007) afirmam que no caso de temperatura elevada, a rápida hidratação inicial causa uma rápida precipitação dos produtos hidratados durante as primeiras horas e dias, o que aumenta a resistência inicial do concreto. Essa rápida hidratação nas primeiras idades leva a uma distribuição mais heterogênea dos produtos hidratados, pois os produtos precipitam em torno das partículas de cimento e criam uma densa concha entre os grãos. Já em baixa temperatura, a hidratação começa lentamente, o que permite aos íons dissolvidos mais tempo para difusão antes os produtos hidratados

precipitem, leva à formação de C-S-H menos denso, garante uma distribuição mais uniforme dos produtos de hidratação e uma menor porosidade.

Uma menor velocidade de desenvolvimento do calor de hidratação e uma lenta dissipação desse calor resultam em menores picos de temperatura, logo haverá menor expansão térmica, e o risco de retração térmica após o resfriamento do concreto é reduzido (ACI Committee 305, 2013).

O grau de hidratação do cimento acelera com o aumento da temperatura, por exemplo, um aumento na temperatura de 20°C para 40°C, aumenta, nas primeiras horas, o grau de hidratação na ordem de 2,41, provando que o efeito da elevação da temperatura no processo de hidratação do cimento é significativo. Conseqüentemente, a elevação da temperatura implicará em um menor tempo de trabalhabilidade e maior taxa de perda de abatimento (SOROKA; RAVINA, 1998).

Nesta pesquisa foi utilizado o cimento do tipo CP II-F-40, que por sua vez, é rico em silicatos tricálcicos e aluminatos tricálcicos, pois não possuem quantidades significativas de materiais pozolânicos ou escória de alto forno. Portanto, este tipo de cimento leva a mistura a atingir maiores picos de fluxo de calor liberado, e como solução para este efeito, foi inserida sílica ativa na composição, a fim de se reduzir a quantidade de cimento e, conseqüentemente, reduzir a taxa de calor de hidratação.

### 2.1.3.3 Agregados

Os agregados ocupam de 70% a 80% do volume total do concreto e, portanto têm influência no seu comportamento térmico. Considerando um concreto a elevada temperatura, o agregado ideal seria aquele que apresentasse baixo coeficiente de deformação térmica (KHOURY, 1992 *apud* HAGER, 2013).

Por serem os materiais em maior quantidade no concreto, os agregados têm efeito considerável nas temperaturas do concreto. Por exemplo, uma redução na temperatura do agregado graúdo entre 0,8 a 1,1°C irá reduzir a temperatura do concreto em aproximadamente 0,5°C. Resfriar os agregados é uma forma efetiva de atingir temperaturas reduzidas dos concretos (ACI Committee 305, 2013).

Uma redução na temperatura dos agregados pode reduzir consideravelmente a temperatura do concreto, conseqüentemente alguns esforços extras devem ser

realizados para manter os agregados resfriados (GURLEY, 2008). As características físicas dos agregados, como forma, textura e graduação, afetam na quantidade de água necessária para produzir uma mistura de concreto com determinado abatimento, por exemplo, agregados graúdos lamelares exigem mais água do que os cúbicos. Combinando dois ou mais agregados de vários tamanhos é possível reduzir a demanda de água de amassamento e aumentar a trabalhabilidade.

Outra forma de evitar problemas recorrentes a climas quentes é atentar-se para as propriedades térmicas dos agregados. No caso de concretos que não serão refrigerados é importante utilizar agregados com alta condutividade, baixo calor específico, baixa densidade e, portanto, maior difusividade. Quanto maior a difusividade, maior será a facilidade de dissipação e transmissão do calor de hidratação do cimento (ALVES, 1993), portanto menores as chances de surgirem fissurações de origem térmica.

#### 2.1.3.4 Sílica ativa e nano-sílica

Além do controle da temperatura, o desenvolvimento do concreto tem trazido à tona a necessidade do uso de adições minerais e aditivos químicos. Adições minerais são materiais silicosos com ou sem alumina que possuem pouco ou nenhum valor cimentício, mas se finamente moídos e na presença de umidade, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio a temperaturas normais para formar compostos com propriedades cimentícias (ACI SP 19, 1988 *apud* MOHD ZAIN; RADIN, 2000).

Em geral, a sílica ativa concorre para retardar a reação exotérmica do cimento, além de reduzir a permeabilidade do concreto. Concretos com sílica ativa têm o processo de hidratação retardado devido às partículas em hidratação estarem mais separadas pela presença da adição mineral e, o fluxo de calor é mais baixo, sendo proporcional ao teor de clínquer presente. Mas Dal Molin (2011) afirma que, dependendo da superfície específica das partículas da pozolana e da sua composição química, as reações pozolânicas podem ser lentas ou rápidas. Além disso, Maage (1987 *apud* DAL MOLIN, 2011) assegura que a temperatura também influi no início da reação pozolânica, onde aos 20°C, a reação se inicia por volta do

sétimo dia e, para temperaturas mais elevadas, em torno de 35°C, a contribuição química já pode ser notada aos dois dias de idade.

O principal produto de hidratação do cimento que compõe aproximadamente 67% do produto hidratado do concreto é o C-S-H. Sabe-se que o C-S-H pode ser alterado pela incorporação de nano partículas. Desenvolvimentos em nanotecnologia ao longo dos últimos anos abriram vários caminhos para desenvolvimento de novos materiais que podem alterar as propriedades do concreto (KIM *et al*, 2013). Poucos estudos foram realizados com o objetivo de se verificar a eficiência da nano-sílica (nS) submetida a diferentes temperaturas e a maioria tem focado na análise dos efeitos da nano partícula nas propriedades do concreto endurecido.

Kim *et al* (2013) analisaram os efeitos da nano sílica na composição de concretos curados sob diferentes condições de temperatura. Foram analisados três concretos com diferentes teores de nano sílica (0%, 1% e 3%), curados por sete dias em diferentes condições de temperatura (20°C e 80°C). O objetivo foi analisar o grau de hidratação do cimento e reatividade pozolânica relativa da adição mineral. Segundo os autores, ficou evidente que a hidratação do cimento é mais acelerada em condições de elevada temperatura e que a fração de nano sílica que participou ativamente na reação pozolânica é maior quando a pasta de cimento é submetida a altas temperaturas.

Said *et al* (2012) não só avaliaram a resistência mecânica, permeabilidade, porosidade de concretos com diferentes teores de nano-sílica, como também as evoluções das temperaturas desses concretos nas primeiras 32 horas após a mistura inicial dos materiais. Essas evoluções de temperatura estão registradas na Figura 2.8. Em todas as misturas, a elevada temperatura inicial atingida no momento da mistura dos materiais foi constatada, assim como a queda subsequente em função do período de dormência.

De modo geral, o pico de temperatura foi maior nas misturas que continham nS, como no caso apresentado na Figura 2.8, onde os concretos contendo teores de 3 e 6% apresentam pico de temperatura 20% maior que foram atingidos até quatro horas antes do concreto sem nS. Este aumento no pico da temperatura, 15 horas após a mistura, indica uma aceleração na taxa de hidratação devido à presença de nano-sílica. Este aumento não pode ser vinculado ao efeito pozolânicos da nS, visto que a reação pozolânica frequentemente ocorre depois da formação adequada da

portlandita (CH). Logo, esse processo deve ser atribuído à elevada superfície específica das partículas de nS, aproximadamente  $80 \text{ m}^2/\text{g}$ , que atuam como pontos de nucleação para as reações de hidratação. Portanto, estes resultados atestam que a atuação da nano-sílica não se limita a efeitos de filler e pozolânicos, mas também acelera o mecanismo de hidratação devido à sua natureza ultrafina (SAID *et al*, 2012).

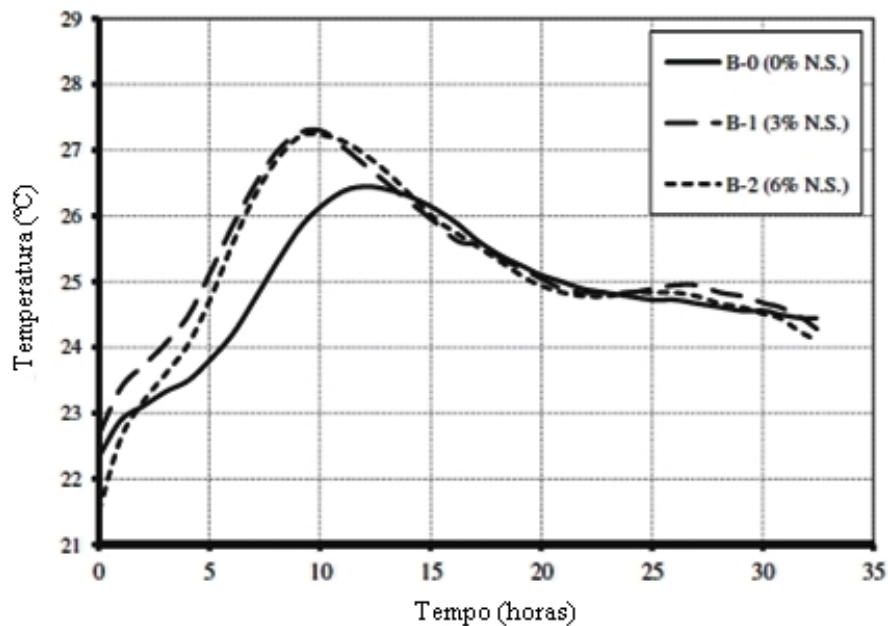


Figura 2.8 – Resultados dos testes de evolução de temperatura de concretos com diferentes teores de nano-sílica (Adaptado de SAID *et al*, 2012).

### 2.1.3.5 Aditivos

Um dos conselhos chave para a compreensão das interações entre as partículas de cimento e os aditivos, como os superplastificantes, é a influência da temperatura ambiente nas primeiras idades da evolução das pastas de cimento (FERNÁNDEZ-ALTABLE; CASANOVA, 2006).

É comum que centrais de dosagem confeccionem concretos com abatimento maior que o necessário ou adicionem água à mistura no canteiro de obras, pois estas são medidas tomadas frequentemente, a fim de se recuperar a consistência perdida devido às elevadas temperaturas do ambiente (GHAFOORI; DIAWARA,



misturas foi preparado, duas sem adição de aditivos e com relação a/c de 0,54, enquanto o restante das misturas com aditivo tinha relação a/c variando de 0,35 a 0,45. Três aditivos foram utilizados, incluindo dois plastificantes à base de lignossulfatos e naftaleno sulfonatos e um superplastificante à base de carboxilatos. O abatimento inicial foi fixado em 200 mm. Para garantir agitação contínua, uma betoneira foi utilizada em baixa velocidade. As misturas de concreto foram ensaiadas ao longo de um intervalo de 100 minutos. Verificou-se que as propriedades reológicas de resistência ao escoamento e viscosidade aumentaram com o tempo, enquanto que o abatimento reduziu. A manutenção do abatimento das misturas de concreto submetidas à agitação contínua foi maior que as misturas similares sem agitação.

#### **2.1.4 Problemas e precauções existentes na produção do concreto**

Um planejamento preestabelecido e bem executado minimiza os impactos da elevada temperatura no concreto, entretanto algumas práticas de campo indesejáveis, como adição de água para compensar a perda de abatimento, não são incomuns. Para minimizar os problemas da temperatura no concreto fresco, controlar a temperatura da mistura e usar aditivos é a solução mais eficaz (BASHAM, 1992).

Antes de o concreto ser lançado, algumas precauções devem ser tomadas durante climas quentes a fim de se controlar e/ou reduzir a temperatura do concreto. Fôrmas, armações e sub-base devem ser levemente umedecidas com água gelada imediatamente antes do lançamento do concreto. Esse procedimento não só resfriar as áreas de contato e o ar, mas também aumenta a umidade relativa no local. Isto reduz o aumento da temperatura do concreto e minimiza a taxa de evaporação da água da mistura após o lançamento (KOSMATKA; KERKHOFF; PANARESE, 2003). A Figura 2.10 mostra um operário umedecendo a sub-base que irá ser concretada.

Enquanto o concreto está dentro do caminhão betoneira, a hidratação do cimento, o aumento da temperatura, perda de consistência, e mudança no ar incorporado ocorrem com o passar do tempo; portanto, o transporte e o lançamento do concreto devem ser realizados o mais rápido possível (ACI Committee 305, 2013). Prolongar o tempo de mistura deve ser evitado, mas caso ocorra atraso, parar

o misturador e agitar intermitentemente pode reduzir a quantidade de calor gerado pela mistura.



Figura 2.10 – Preparação da sub-base para recebimento do concreto fresco (KOSMATKA; KERKHOFF; PANARESE, 2003).

Controlar a temperatura de lançamento do concreto é uma das melhores formas de se evitar fissuração térmica. O pré-resfriamento do concreto é um método comumente utilizado para controlar a queda de temperatura subsequente. Frequentemente se especificam agregados resfriados e/ou escamas de gelo para a produção de misturas de concreto massa nas quais a temperatura do concreto fresco fica limitada a 10°C ou menos. Durante a operação de mistura, o calor latente necessário para a fusão do gelo é retirado de outros componentes da mistura de concreto, proporcionando uma forma muito eficiente de baixar a temperatura (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

### **2.1.5 Métodos de controle da temperatura do concreto**

Ao controlar a temperatura do concreto é possível minimizar e, até mesmo, eliminar os problemas resultantes das altas temperaturas, seja do concreto ou do ambiente. Em regiões como Goiânia, de clima quente, o controle da temperatura do concreto é fundamental para se garantir que a mistura não atinja temperaturas muito altas. A temperatura ambiente é um fator que está limitado ao monitoramento, já a temperatura do concreto pode ser facilmente regulada através de diversas maneiras:

resfriamento agregados, pintura do misturador, serpentinas com água resfriada, resfriamento por nitrogênio líquido, substituição da água por gelo, dentre outros.

Vários pesquisadores apresentam alternativas de controle da temperatura do concreto no estado endurecido ou após o lançamento nas fôrmas, como por exemplo, Neville e Brooks (2013) apresentam algumas alternativas secundárias de redução da temperatura do concreto utilizando diferentes materiais nas fôrmas:

- Resfriar a superfície do concreto (em seções menores que 500 mm) utilizando fôrmas que ofereçam pouco isolamento, como, por exemplo, de aço;
- Isolar toda a superfície do concreto (em seções maiores que 500 mm) utilizando fôrmas de materiais apropriados de modo que o gradiente de temperatura seja minimizado.

Por outro lado, pouco se fala sobre as alternativas de controle da temperatura do concreto ainda fresco, isto é, do momento da dosagem à entrega na obra. . A seguir serão tratados os métodos discutidos entre as referências bibliográficas estudadas.

#### 2.1.5.1 Resfriamento dos materiais

É imprescindível que se tenha certo controle da temperatura do concreto, o que pode ser realizado controlando-se as temperaturas dos materiais que o compõem. Resfriar ou aquecer os materiais é um método efetivo de controlar a temperatura do concreto e pode ser realizado de forma que os agregados sejam mantidos livres da alteração de umidade, caso ocorra, a relação a/c do concreto deve ser corrigida. Segundo Mouret, Basoul e Escadeillas (1999), um aumento da temperatura dos agregados de 20°C para 70°C implica em um aumento considerável na demanda de água de amassamento.

Resfriar os materiais do concreto é o método mais usado para reduzir a temperatura da mistura fresca. Um ou mais materiais podem ser resfriados. Para condições de elevadas temperaturas, os agregados e a água de amassamento devem ser mantidos o mais frio possível, pois estes são os materiais com maior influência na temperatura do concreto (KOSMATKA; KERKHOFF; PANARESE, 2003). A Figura 2.11 mostra graficamente o efeito da temperatura dos materiais na

temperatura do concreto fresco. É evidente que a temperatura do concreto depende primeiramente da temperatura do agregado e, resfriar a água de amassamento, também pode ser uma técnica eficaz.

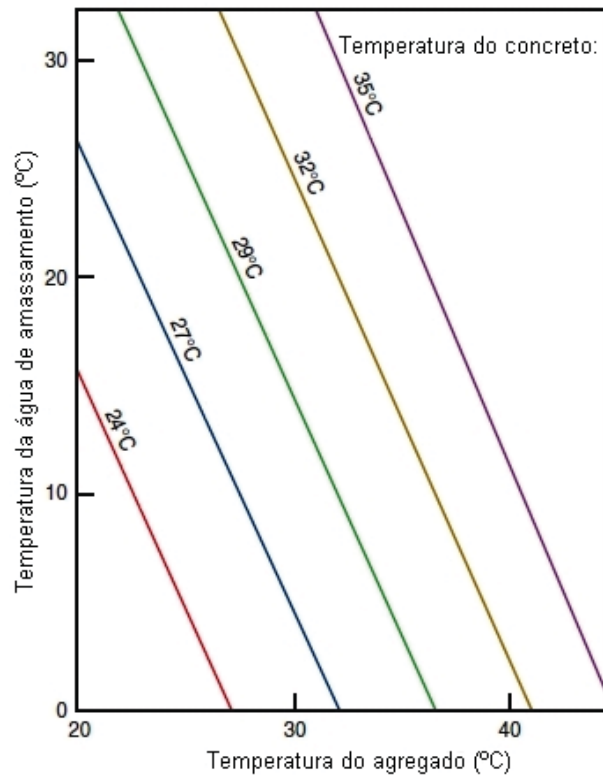


Figura 2.11 – Influência da temperatura dos materiais na temperatura do concreto fresco. Gráfico baseado em concreto com seguinte traço: 256 kg/m<sup>3</sup> de cimento Portland a 66°C; 1360 kg/m<sup>3</sup> de agregado; 109 kg/m<sup>3</sup> de água; e, 27 kg/m<sup>3</sup> referente à umidade dos agregados (Adaptado de KOSMATKA; KERKHOFF; PANARESE, 2003).

De todos os materiais, água é o mais fácil de ser resfriado. Apesar de ser utilizada em quantidades menores que as dos outros materiais, a água gelada produzirá uma redução moderada na temperatura do concreto. A água pode ser resfriada por refrigeração, nitrogênio líquido ou gelo. Devido ao fato de ser o material em menor quantidade, é difícil reduzir a temperatura do concreto mais que 4,5°C apenas com a água gelada. A água gelada deve ficar reservada em tanques fora da incidência solar sendo interessante que estes tanques e o sistema por onde a água irá correr estejam enterrados, isolados, em locais sombreados ou pintados de branco para manter a água o mais resfriada possível. (ACI Committee 305, 2013).

A Figura 2.12 apresenta as reduções nas temperaturas de concretos produzidos com águas em diferentes temperaturas substituídas parcialmente por água a 7°C. Quanto maior for a temperatura de confecção do concreto, mais será a eficácia de substituição da água de amassamento por água gelada, como por exemplo, em um concreto produzido com água a 38°C, há uma redução da temperatura de 3,3°C, quando 54 kg de água gelada a 7°C substituem a água de amassamento; enquanto que, para um mesmo concreto produzido com água a 16°C, a redução da temperatura é de 0,8°C; quando a mesma quantidade de água gelada substituem a água de amassamento.

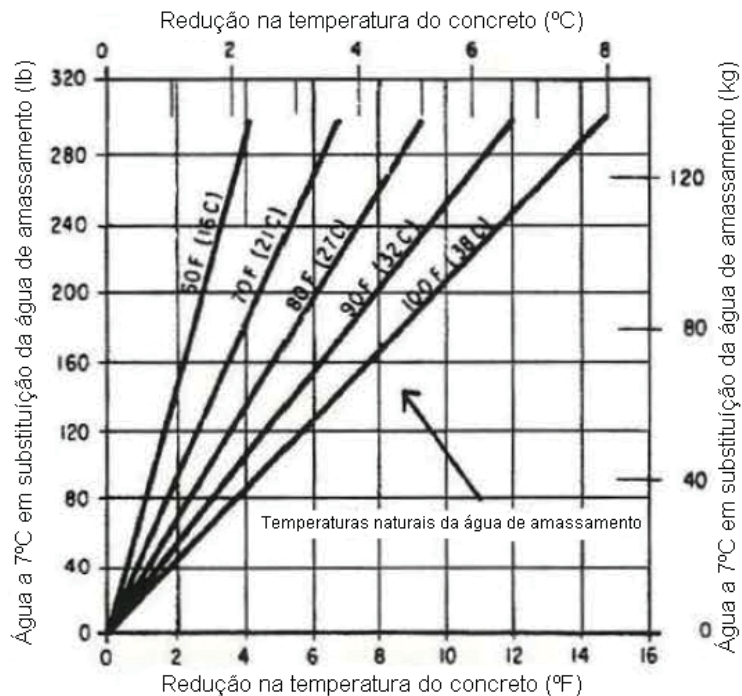


Figura 2.12 – Efeitos da água gelada na temperatura do concreto  
(Adaptado de NRMCA, 1962 *apud* ACI Committee 305, 2013).

Em condições de elevadas temperaturas, existem alguns métodos práticos que podem ser empregados para manter os agregados o mais resfriados possível. Os agregados graúdos e miúdos podem ser apenas armazenados, protegidos do sol e mantidos na condição de secos ao ar. Estes estados já garantem redução da temperatura do agregado, no entanto, quando necessário, eles podem ser refrigerados. A refrigeração pode ser realizada através da imersão dos agregados em água fria ou ao ar, dentro de refrigeradores (KOSMATKA; KERKHOFF; PANARESE, 2003). Na condição de refrigerados, os agregados devem estar

ensacados a fim de não terem seus teores de umidade alterados ou, caso não sejam ensacados, estes devem ter seus teores de umidade determinados antes da dosagem, assim como quando estes são mantidos apenas protegidos do sol.

Além das condições já citadas, para o agregado graúdo é permitido que seja efetuada irrigação controlada mantendo-o no estado de saturado com superfície seca. Este processo reduz sua temperatura causando resfriamento direto através da evaporação da água. Em condições de climas tropicais, estes agregados podem ser jateados com ar frio, o que auxiliará na redução da sua temperatura (ACI Committee 305, 2013).

A contribuição dos ingredientes da mistura na temperatura do concreto fresco está relacionada à temperatura, calor específico e quantidade de cada material. A Tabela 2.5 apresenta um exemplo de cálculo para estimativa da temperatura inicial do concreto. A contribuição da água é significativa devido ao seu elevado calor específico, visto que os agregados têm maior poder de alteração da temperatura devido à sua proporção na mistura.

Tabela 2.5 – Efeito da temperatura dos materiais na temperatura inicial do concreto  
(KOSMATKA; KERKHOFF; PANARESE, 2003)

Material	Massa (kg)	Calor específico (kJ/kg.K)	Joules para variar 1°C na temperatura	Temperatura inicial do material (°C)	Total de joules no material
	(1)	(2)	(3) (1) x (2)	(4)	(5) (3) x (4)
Cimento	335	0,92	308	66	20.328
Água	123	4,184	515	27	13.905
Agregados totais	1.839	0,92	1.692	27	45.684
Somatório total			2.515		79.917

Temperatura inicial do concreto =  $79.917 / 2.515 = 31,8^{\circ}\text{C}$ .

Para reduzir 1°C na temperatura inicial do concreto:

- A temperatura do cimento deve ser reduzida em =  $2.515 / 308 = 8,2^{\circ}\text{C}$ ;
- Ou a temperatura da água deve ser reduzida em =  $2.515 / 515 = 4,9^{\circ}\text{C}$ ;
- Ou a temperatura do agregado deve ser reduzida em =  $2.515 / 1.692 = 1,5^{\circ}\text{C}$ .

A Usina Hidrelétrica de Itumbiara localizada no rio Paranaíba em Goiás pode ser citada como exemplo de obra realizada com concretos que tiveram sua temperatura controlada através do resfriamento dos agregados. As obras correrão entre 1973 e 1980 e foram utilizados 2.080.789 m<sup>3</sup> de concreto. Segundo especificações dos responsáveis, o concreto fresco devia apresentar temperatura de 19,7°C no momento do lançamento e, para tanto, adotou-se o pré-resfriamento do concreto por meio do sistema de refrigeração dos agregados graúdos. Os agregados graúdos eram colocados na galeria de refrigeração e submetidos a um banho de água fria à temperatura aproximada de 2°C. Após o banho, os agregados passavam por uma calha vibratória para drenagem da água, sendo transportado para as centrais de concreto com temperaturas entre 12°C e 14°C. Em intervalos de três horas eram coletadas amostras dos agregados graúdos para determinação dos teores de umidade, assim como feito com os agregados miúdos, para correção da quantidade de água de amassamento (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 1989).

Para produção do concreto, a água de mistura tinha sua temperatura em torno de 4°C e a intervalos de trinta minutos eram realizados ensaios para determinação da consistência, massa unitária, teor de ar incorporado e temperatura do concreto fresco, de modo a assegurar condições uniformes para sua aplicação. A Figura 2.13 retrata a Usina Hidrelétrica de Itumbiara.



Figura 2.13 – Usina Hidrelétrica de Itumbiara (Fonte:

[http://www.furnas.com.br/arcs/pdf/RelatorioSocioAmbiental/2011/codigos/textos/perfil\\_empresa.html](http://www.furnas.com.br/arcs/pdf/RelatorioSocioAmbiental/2011/codigos/textos/perfil_empresa.html),  
acessado dia 19/03/2015).

### 2.1.5.2 Substituição parcial da água de amassamento por gelo

O concreto pode ser resfriado substituindo-se parte da água de amassamento por gelo e a queda da temperatura está limitada à quantidade de água do traço que pode ser substituída por gelo. O gelo não pode substituir mais que 75% da água de amassamento e, na maioria dos concretos, a redução máxima na temperatura é de aproximadamente 11°C. Para determinação da proporção correta, o gelo deve ser pesado e, para isso, o gelo precisa estar em raspas como deve ser lançado na mistura. Este é um dos fatores que limitam o uso de gelo para resfriamento da mistura de concreto, pois eleva o custo do processo (ACI Committee 305, 2013).

Tabela 2.6 – Efeito do gelo na temperatura do concreto  
(KOSMATKA; KERKHOFF; PANARESE, 2003)

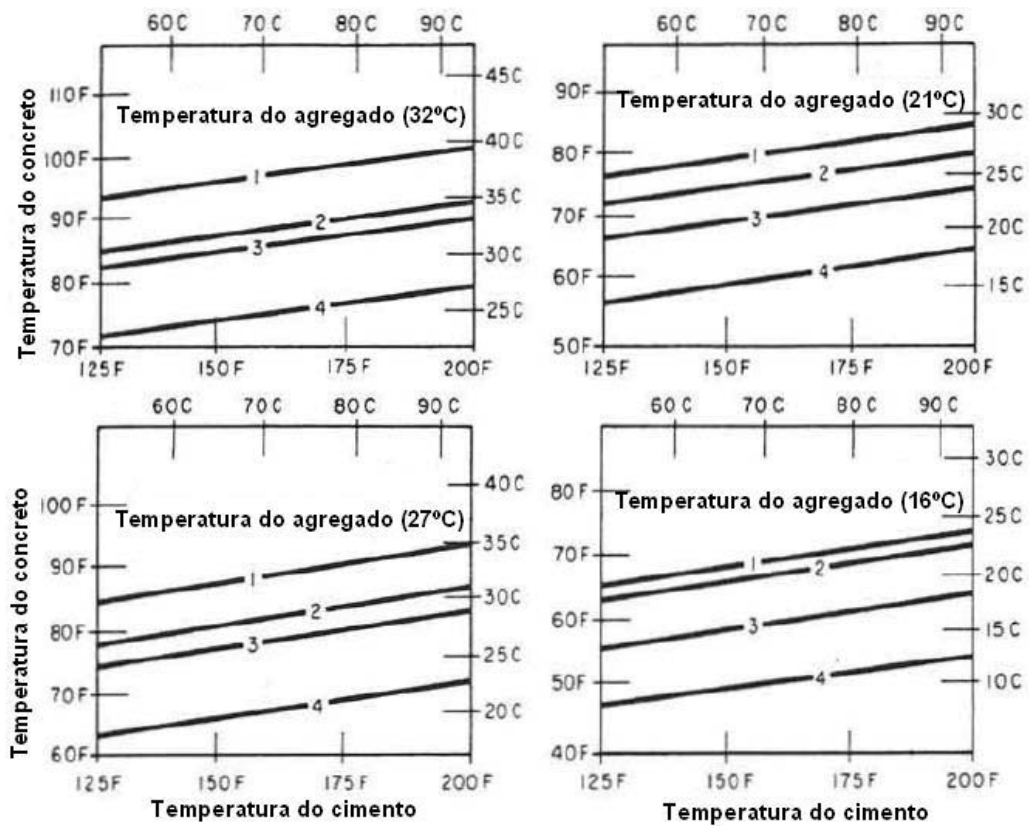
Material	Massa (kg)	Calor específico (kJ/kg.K)	Joules para variar 1°C na temperatura	Temperatura inicial do material (°C)	Total de joules no material
	(1)	(2)	(3) (1) x (2)	(4)	(5) (3) x (4)
Cimento	335	0,92	308	66	20.328
Água	123	4,184	515	27	13.905
Agregados totais	1.839	0,92	1.692	27	45.684
Gelo	44	4,184	184	0	0
Calor de fusão	44 kg x 335 kJ/kg =				- 14.740
Somatório total	2.699				65.177

Temperatura inicial do concreto =  $65.177 / 2.699 = 24,1^{\circ}\text{C}$ .

Para alcance da máxima eficiência desse procedimento, o gelo não deve derreter antes de ser colocado na mistura, no entanto deve ser completamente fundido após ser adicionado. Ao adicioná-lo, é preciso verificar a existência de blocos maiores, pois podem prejudicar o concreto, reduzindo sua resistência e

aumentando a porosidade e permeabilidade. Ao derreter, o gelo absorve o calor do concreto, reduzindo o pico de temperatura da mistura (GURLEY, 2008).

Kosmatka, Kerkhoff e Panarese (2003) afirmam que quando adicionado o gelo como parte da água de amassamento, o efeito do seu calor de fusão deve ser considerado em cálculo. São necessárias oitenta calorias (335 J) para fundir um grama de gelo sem elevar sua temperatura e partindo desse conceito, a Tabela 2.6 mostra o efeito do gelo na temperatura do concreto.



- Curva (1) - Água de amassamento na temperatura do agregado  
 Curva (2) - Água de amassamento a 10°C  
 Curva (3) - Água de amassamento na temperatura do agregado com 25% da sua massa total substituída por gelo  
 Curva (4) - Água de amassamento na temperatura do agregado com 50% da sua massa total substituída por gelo

Figura 2.14 – Influencia da temperatura dos ingredientes do concreto na temperatura da mistura calculada de acordo com a Equação 2.1 (Adaptado de ACI Committee 305, 2013)

De forma mais detalhada, a Figura 2.14 mostra a influencia da temperatura dos ingredientes do concreto na temperatura da mistura. Os agregados têm maior

impacto na determinação da temperatura do concreto, seguidos da água e, por fim, o cimento.

O Centro de Radioterapia de São José do Rio Preto é um exemplo de obra recente executada com concreto resfriado com gelo. As paredes externas da edificação são em concreto e possuem 1,25 metros de espessura, já as paredes internas que separam as salas de tratamento possuem 2,50 metros. Foram adicionados cem quilogramas de gelo para cada metro cúbico de concreto, totalizando 61,50 toneladas de gelo para controle da temperatura do concreto. Ainda na central de dosagem, os caminhões betoneira recebiam cimento, água, agregado miúdo, aditivos e, posteriormente, eram adicionados o agregado graúdo e o gelo. O concreto foi entregue na obra com 18°C, tendo seu pico de temperatura registrado em 49°C. A Figura 2.15 apresenta uma imagem da obra do centro radioterápico e um detalhe da adição de gelo à mistura do concreto.



Figura 2.15 – Obra do Centro de Radioterapia de São José do Rio Preto e detalhe de adição de gelo à mistura do concreto utilizado na obra (FERRO, 2015).

A Figura 2.16 mostra o gelo raspado utilizado no resfriamento do concreto dos blocos de fundações do edifício Villa Serena Residence em Camboriú – SC construído no ano de 2007. Foram utilizadas 55 toneladas de gelo respeitando a proporção de 100 kg por metro cúbico de concreto (FREITAS JUNIOR, 2013).



Figura 2.16 – Gelo raspado utilizado na fundação do edifício Villa Serena Residence (FREITAS JUNIOR, 2013).

### 2.1.5.3 Injeção de nitrogênio líquido

Se uma grande redução da temperatura é necessária, isto é, em casos de grandes volumes de concreto ou de clima extremamente quente, a injeção de nitrogênio líquido pode ser a melhor alternativa. O nitrogênio líquido pode ser adicionado diretamente dentro da betoneira ou caminhão betoneira, conforme mostrado na Figura 2.17. É importante que o nitrogênio líquido não entre em contato com o metal do equipamento de mistura, pois o seu poder de refrigeração pode trincar o equipamento. A adição de nitrogênio líquido não afeta a quantidade de água da mistura exceto que ao reduzir a temperatura do concreto, a demanda de água pode ser reduzida consequentemente (KOSMATKA; KERKHOFF; PANARESE, 2003).



Figura 2.17 – Nitrogênio líquido sendo adicionado diretamente dentro do caminhão betoneira (FREITAS JUNIOR, 2013).

No 49º Congresso Brasileiro do Concreto realizado no ano de 2007, a Linde AG, empresa do setor de gases industriais e medicinais, apresentou o sistema de resfriamento de concreto com nitrogênio líquido como sendo um processo aplicado em construções com exigência de alta qualidade, garantindo menores riscos de fissuras resultantes do calor de hidratação do cimento. Segundo a empresa, o concreto resfriado minimiza a formação de tensões térmicas, enquanto ao mesmo tempo, assegura estabilidade e, com o uso do nitrogênio líquido, o processo de resfriamento torna-se efetivo, de maneira homogênea. A Figura 2.18 apresenta um esquema de injeção de nitrogênio líquido diretamente no concreto dentro do caminhão betoneira.



Figura 2.18 – Esquema de injeção de nitrogênio líquido (FREITAS JUNIOR, 2013).

## 2.2 CONCRETO E A TEMPERATURA

Quanto mais a tecnologia aplicada ao concreto avança, mais sensível o material se torna, seja às inovações na composição ou às modificações durante a produção e concretagem. Variações nas temperaturas dos materiais e do ambiente, na umidade dos materiais ou na granulometria dos agregados e imprecisão da quantidade de material fino contido nos agregados são alguns dos problemas encontrados na produção do concreto (GHAFoori; DIAWARA, 2010).

Para Mehta e Monteiro (2014), as relações estrutura-propriedade no concreto podem ainda não estar bem desenvolvidas. No que trata da estrutura a nível

macroscópico, o concreto pode ser considerado com um material bifásico, consistindo de partículas de agregado dispersas em uma matriz de cimento. Já a nível microscópico, existem as fases agregado, pasta de cimento endurecida e a zona de transição. Esta última é a zona que circunda os agregados e é comumente muito diferente da estrutura da matriz de pasta ou argamassa do sistema. Devido ao filme de água que se forma em volta das partículas grandes, a relação água/cimento da região pode ser maior, levando a formação de cristais de hidratação maiores constituindo uma estrutura mais porosa que a matriz de pasta de cimento. Cada uma das fases microscópicas do concreto são multifásicas e têm poder de influência direta nas propriedades dos concretos.

Quando os concretos são expostos ou misturados a elevadas temperaturas, mudanças nas suas propriedades reológicas, mecânicas e durabilidade podem ocorrer. A não linearidade dos materiais e as alterações nas propriedades físicas e mecânicas podem decorrer das variações de temperatura do ambiente ou da mistura (NAUS, 2005).

Existe uma grande variedade de fatores que têm papéis significativos na reologia do concreto, o que aumenta a dificuldade de se comparar conjuntos de resultados de diferentes pesquisadores e, conseqüentemente, dificulta estabelecer métodos padronizados para quantificação das propriedades reológicas do concreto no estado fresco (FERNÁNDEZ-ALTABLE; CASANOVA, 2006). Esta dissertação foca no estudo do efeito da temperatura do concreto fresco na manutenção do seu abatimento.

Em um concreto convencional, que não contém aditivo superplastificante, as propriedades reológicas são controladas principalmente pela quantidade de água de amassamento, sulfato de cálcio e a reatividade das partículas de cimento. Portanto, problemas de perda de abatimento são relativamente raros e acidentais. Por outro lado, em um concreto contendo superplastificante e com baixa relação  $a/c$ , as propriedades reológicas são controladas principalmente pelo teor de aditivo e também pela interação entre o cimento e o aditivo (JIANG; KIM; AİTCIN, 2000).

Nehdi e Al-Martini (2009) estudaram a evolução da tensão de escoamento e da viscosidade de concretos frescos em condições diferentes de temperatura. As temperaturas analisadas foram 22°C, 35°C e 45°C e a relação  $a/c$  das misturas foi mantida em 0,38. Diferentes aditivos superplastificantes (SP) fizeram parte da base

de estudos, sendo utilizados SP à base de policarboxilatos (PC), melanina (ML) e naftaleno sulfonato (NS), todos enquadrados na Classe F da Designação C 494 (ASTM, 2013). Um reômetro rotacional foi utilizado para mensurar as propriedades reológicas dos concretos. Como resultado, descobriu-se que o PC é um agente dispersivo eficaz porque foi capaz atingir baixos valores de tensão de escoamento com dosagens relativamente reduzidas. Esse aditivo deve ser utilizado em dosagens próximas ao nível de saturação para garantir comportamento reológico adequado do concreto a elevada temperatura e tempo de mistura prolongado, entretanto a níveis próximos da saturação, o PC pode reduzir ligeiramente a trabalhabilidade. Os resultados ainda mostraram que a perda de abatimento teve uma correlação inversa com a tensão de escoamento em um modo curvilíneo logarítmico, ao passo que nenhuma correlação foi encontrada entre a perda de abatimento e a viscosidade, conforme apresentado na Figura 2.19.

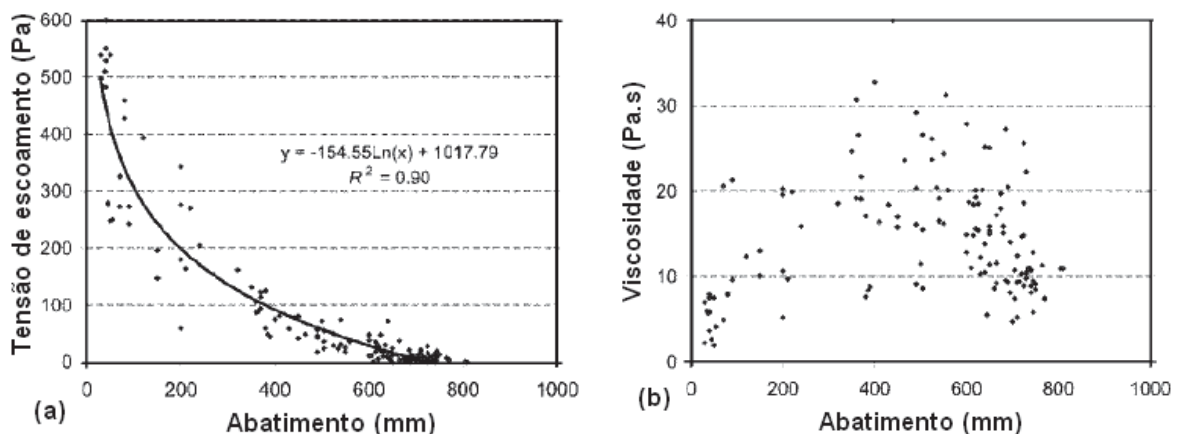


Figura 2.19 – Relação entre: (a) tensão de escoamento e abatimento; e (b) viscosidade e abatimento (NEHDI; AL-MARTINI, 2009).

A operação da indústria do concreto não está imune aos efeitos adversos causados por condições climáticas extremas. Os processos de dosagem, mistura, transporte, lançamento, adensamento e cura do concreto são especialmente prejudicados. Uma elevada temperatura do concreto fresco resulta na rápida hidratação do cimento levando a uma acelerada taxa de perda de abatimento e a uma menor resistência em longo prazo. Quando a elevada temperatura é acompanhada da baixa umidade relativa, pode ocorrer uma rápida evaporação de parte da água de amassamento, causando perda adicional de trabalhabilidade (GHAFOORI; DIAWARA, 2010).

Lothenbach *et al* (2007) estudaram os efeitos da temperatura na hidratação de argamassas e na resistência à compressão de concretos de cimento Portland. Imagens de amostras de argamassa hidratadas por 91 dias, obtidas por um microscópio eletrônico de varredura (MEV), mostram a presença plaquetas hexagonais, portlandita, C-S-H e etringita. Análises qualitativas de espectroscopia de raios X por dispersão em energia realizadas nas plaquetas hexagonais mostraram que além do cálcio e alumínio, foram encontrados carbono e pequenas quantidades de magnésio e silício, indicando a presença monocarboaluminato de cálcio misturado aos outros produtos hidratados. As plaquetas hexagonais são mais proeminentes nas amostras hidratadas entre 20°C e 40°C do que nas de 5°C. No geral, os produtos hidratados são mais facilmente detectáveis nas amostras hidratadas a elevadas temperaturas devido à sua distribuição mais heterogênea. Em baixas temperaturas, os produtos precipitados estão mais intimamente misturados e, uma distribuição mais uniforme dos hidratos leva a uma diminuição dos poros da microestrutura. A Figura 2.20 apresenta as imagens obtidas por MEV de amostras de argamassas hidratadas em diferentes temperaturas.

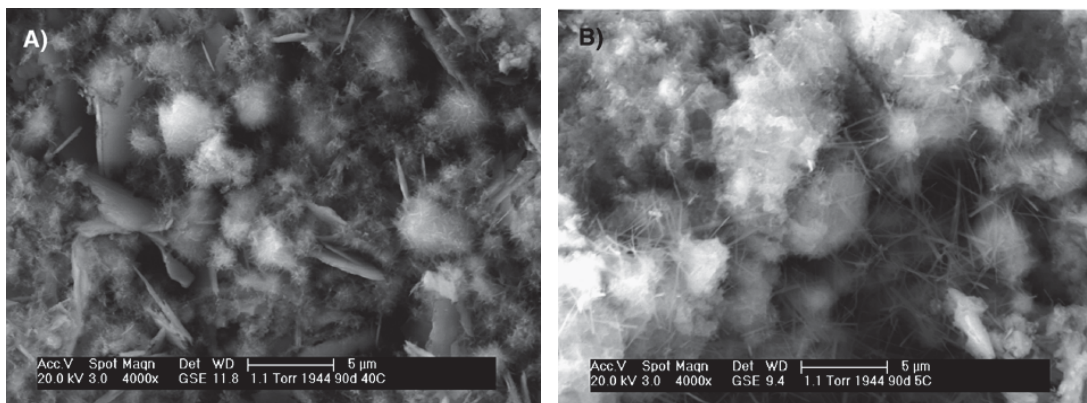


Figura 2.20 – Microestrutura de amostras de argamassa de cimento Portland hidratadas por 91 dias a (A) 40°C e (B) 5°C (Adaptado de LOTHENBACH *et al*, 2007).

No que trata de resistência, o desenvolvimento da resistência mecânica a 5°C é inicialmente muito lento, enquanto que a elevadas temperaturas, foi observado um rápido ganho de resistência. As resistências das amostras de concreto produzidas a 40°C aumentaram apenas um pouco após os dois primeiros dias. Em contrapartida, as resistências das amostras produzidas a 5°C aumentaram continuamente de tal modo que, após 28 e 91 dias, as amostras produzidas a esta temperatura exibiram

maiores resistências à compressão. A Figura 2.21 mostra o desenvolvimento da resistência à compressão das amostras de concreto com diferentes temperaturas.

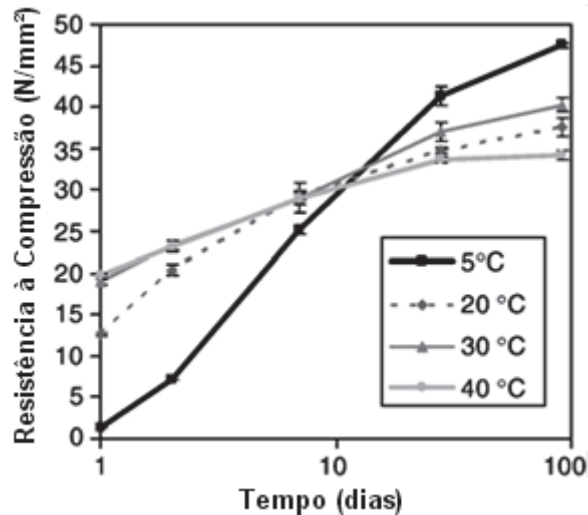


Figura 2.21 – Resistência à compressão do concreto em função do tempo (Adaptado de LOTHENBACH *et al*, 2007).

Tutikian, Isaia e Helene (2011), afirmam ser comum confundir o concreto de alto desempenho (CAD) com o concreto de alta resistência (CAR). Concretos auto-adensáveis com relação água/aglomerante ( $a/ag$ ) de 0,40 e resistência à compressão menor que ou igual a 50 MPa, pode ser enquadrado como um CAD, mas não como um CAR. Da mesma forma que um concreto de 80 MPa e abatimento de 20 mm pode não ser enquadrado como um CAD, e sim como CAR, caso seja destinado a uma peça densamente armada, possibilitando o surgimento de falhas de concretagem.

A NBR 8953 (ABNT, 2015) classifica os concretos de cimento Portland pela massa específica, grupos de resistência mecânica e consistência, conforme apresentado na Tabela 2.7. Concretos de alta resistência são concretos estruturais que apresentam resistências características à compressão maiores que 55 MPa, no entanto esta classificação se limita apenas ao concreto de alta resistência (CAR), não definindo especificações diretas para o concreto de alto desempenho (CAD).

Tabela 2.7 – Classes de resistência de concretos estruturais (Adaptado de NBR 8953, ABNT 2015)

Classe de resistência Grupo I	Resistência característica à compressão (MPa)	Classe de resistência Grupo II	Resistência característica à compressão (MPa)
C20	20	C55	55
C25	25	C60	60
C30	30	C70	70
C35	35	C80	80
C40	40	C90	90
C45	45		
C50	50	C100	100

Como o CAD é um material com maior densidade e maior teor de material cimentante que o concreto convencional (CC), ele está mais suscetível aos efeitos da temperatura da mistura. Pouca bibliografia pode ser encontrada no que concerne ao estudo do impacto da temperatura da mistura na manutenção da consistência do concreto de alto desempenho. A maioria dos pesquisadores têm usado as propriedades de resistência mecânica e permeabilidade do concreto como critérios para avaliação do seu desempenho, voltando as pesquisas dos impactos da temperatura para concretos no estado endurecido.

Naik e Kraus (2002), afirmam que à elevadas temperaturas, a microestrutura do concreto é muito prejudicada. A formação de uma pobre microestrutura está associada com o desenvolvimento de uma configuração indesejada dos cristais de C-S-H e com a redução do grau de hidratação do cimento. Geralmente, os cristais de C-S-H crescem longos e finos/estreitos e ocupam menos espaço da matriz em condições de elevadas temperaturas, resultando em uma menor densidade da microestrutura. A hidratação total é reduzida em elevadas temperaturas e ocorre como resultado da rápida perda de água por evaporação, deixando partículas de cimento anidro dentro da matriz do concreto. Deste modo, a homogeneidade e densidade da microestrutura do concreto são prejudicadas.

Segundo Ryell e Bickley (1987 *apud* KOSMATKA; KERKHOFF; PANARESE, 2003), que estudaram o uso do CAD para estruturas tipo arranha-céus, especificam que concretos com resistências exigidas entre 70 e 80 MPa devem ter a mistura transportada a uma temperatura máxima de 18°C. Em condições de clima mais

quente, como no verão, é possível que este limite de temperatura só possa ser atingido através do método de resfriamento por injeção de nitrogênio líquido.

Em estruturas de concreto de grande porte, as peças podem ser grandes o suficiente para serem consideradas como concreto massa. Normalmente, o excessivo calor de hidratação gerado nessas estruturas é controlado pelo uso de menores teores de cimento. Quando misturas de CAD são utilizadas nesses casos, mais de um método de resfriamento pode ser fazer necessário. Burg e Ost (1994) estudaram a variação de temperatura de cubos de CAD com 1220 mm de lado e registraram um aumento de 9,4°C para 11,7°C para cada 100 kg de cimento por metro cúbico de concreto.

Ainda neste estudo, foi apresentado que concretos com maiores teores de sílica ativa e aditivo superplastificante podem atingir menores temperaturas, conforme apresentado na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 – Consumos de cimento, sílica ativa e aditivo superplastificante e temperatura do concreto  
(Adaptado de BURG; OST, 1994)

Dados	Número da mistura	
	1	2
Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	564	564
Sílica ativa (kg/m <sup>3</sup> )	-	89
Aditivo superplastificante (litros)	11,60	20,11
Temperatura do concreto (°C)	24	17

### 2.2.1 Aditivos químicos

A NBR 11768 (ABNT, 2011) define aditivo como sendo o produto adicionado durante o processo de preparação do concreto, em quantidade não maior que 5% da massa de material cimentício contida no concreto, com o objetivo de modificar propriedades do concreto no estado fresco e/ou no estado endurecido, exceto pigmentos inorgânicos para o preparo de concreto colorido.

De acordo com Mohd Zain e Radin (2000), os aditivos plastificantes e superplastificantes causam dispersão dos grãos de cimento e este é o processo pelo qual os grãos de cimento em suspensão na água podem recuperar suas dimensões originais. A incorporação de superplastificantes leva a uma significativa redução na

quantidade de água de amassamento porque grande parte dessa água não estará mais aprisionada nos pontos vazios existentes entre os grãos de cimento. Essa propriedade, em conjunto com adições minerais, particularmente sílica ativa, permite o concreto atingir alta resistência sem perder trabalhabilidade. A Figura 2.22 mostra a forma de atuação destes aditivos. À esquerda está apresentado o processo de aglomeração das partículas de cimento em misturas sem aditivo e à direita está apresentada a mistura com aditivo adsorvido na superfície das partículas.

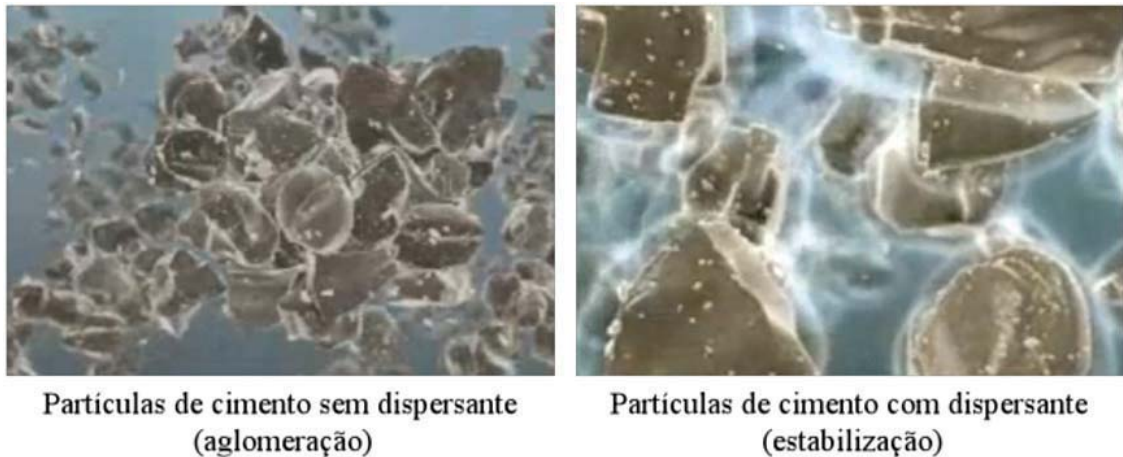


Figura 2.22 – Ilustração computacional da aglomeração das partículas de cimento de uma pasta isenta de aditivo (esquerda) e com aditivo adsorvido na superfície (direita) (Adaptado de Lafarge Group *apud* ROMANO; CARDOSO; PILEGGI, 2011).

Segundo Hartmann (2002 *apud* TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008), os aditivos plastificantes e superplastificantes podem ser agrupados em quatro categorias, de acordo com sua composição química:

- Lignossulfatos ou lignossulfatos modificados (LS);
- Sais sulfonatos de policondensado de naftaleno e formaldeído, usualmente denominados de naftaleno sulfonato ou apenas de naftaleno (NS);
- Sais sulfonatos de policondensado de melamina e formaldeído, usualmente denominados de melamina sulfonato ou apenas de melamina (MS);
- Policarboxilatos (PC).

A Figura 2.23 apresenta uma ilustração do efeito de cada composição química de cada aditivo na fluidez de concretos e redução da quantidade de água para manutenção do abatimento.

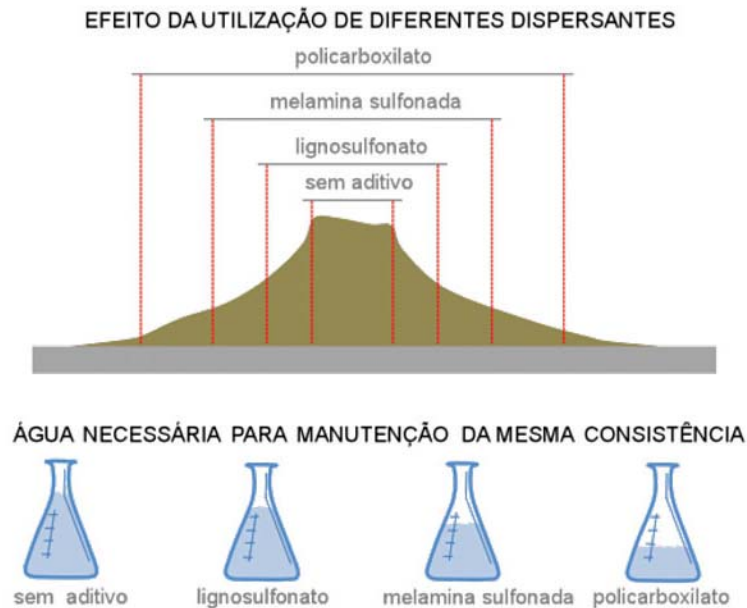


Figura 2.23 – Efeito do tipo de aditivo na fluidez de concretos e na potencial redução da quantidade de água para manutenção da consistência (ROMANO; CARDOSO; PILEGGI, 2011).

Hartmann *et al* (2011) ainda afirmam que assim que o cimento e a água entram em contato, as partículas de cimento em hidratação tendem a flocular devido à natureza polar da molécula de água e em consequência das forças de atração de Van der Waals entre as partículas (forças eletrostáticas entre regiões de cargas elétricas opostas na superfície do cimento). Os aditivos redutores de água têm como função dispersar as partículas de cimento em hidratação, liberando a água aprisionada entre os grãos de cimento, aumentando, a fluidez da mistura. O polímero adsorve na superfície das partículas do cimento em hidratação, produzindo uma repulsão entre grãos adjacentes devido a uma combinação de forças eletrostáticas e/ou estéricas, resultando na defloculação.

#### 2.2.1.1 Aditivos plastificantes

Os aditivos plastificantes ou simplesmente redutores de água são produtos que, sem modificar a consistência do concreto no estado fresco, permitem reduzir o conteúdo de água; ou que, sem alterar a quantidade de água, modificam a

consistência do concreto, aumento o abatimento e a fluidez; ou, ainda, que produzam esses dois efeitos simultaneamente (NBR 11768, ABNT 2011).

Geralmente são à base de lignossulfonatos (agentes tensoativos) que são adsorvidos pelas partículas de cimento, dando a elas cargas negativas, que causam a repulsão eletrostática entre as partículas de cimento, resultando na estabilização de sua dispersão (NEVILLE; BROOKS, 2013). A Figura 2.25 apresenta o mecanismo de repulsão eletrostática.

Hewlett e Rixom (1978 *apud* MEHTA; MONTEIRO, 2014) dosaram concretos considerando diferentes finalidades para a aplicação de aditivos plastificantes. O concreto referência sem qualquer aditivo, Série A, apresentava consumo de cimento de 300 kg/m<sup>3</sup> e relação a/c de 0,62. O concreto da Série B foi dosado com uma pequena quantidade de aditivo a fim de aumentar a consistência da mistura; a Série C foi dosada com a mesma quantidade de aditivo da Série B, o que possibilitou uma redução de 10% no consumo de água (de 186 kg/m<sup>3</sup> para 168 kg/m<sup>3</sup>), isto é, nessa série o aditivo teve a função de aumentar a resistência; por fim, na Série D, a adição do aditivo possibilitou uma redução de 10% no consumo de cimento sem comprometimento da consistência e nem da resistência de referência. Além da redução do custo do concreto, a economia de cimento pode ser importante quando a redução do aumento da temperatura do concreto massa se faz necessária. A Tabela 2.9 apresenta os resultados obtidos por Hewlett e Rixom.

Existem aditivos plastificantes que além de terem efeitos de redução de água, possuem a função secundária de aumentar os tempos de início e fim de pega (NBR 11768, ABNT 2011). Esses aditivos são bastante utilizados em regiões de clima quente. Eles podem ser adicionados no concreto em várias proporções e também combinados com outros aditivos de forma que, quanto maior for a temperatura do concreto, maiores serão as dosagens deste tipo de aditivo a fim de se obter o tempo de pega desejado (ACI Committee 305, 2013). Estes aditivos também conhecidos como multifuncionais podem estender a trabalhabilidade do concreto em até mais de duas horas, sem prejudicar o ganho de resistência inicial da mistura.

Tabela 2.9 – Benefícios obtidos com o uso de aditivos plastificantes  
(HEWLETT; RIXOM, 1978 *apud* MEHTA; MONTEIRO, 2014)

Série de ensaio	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Relação água/cimento	Abatimento (mm)	Resistência à compressão (MPa)	
				07 dias	28 dias
A – Concreto de referência (sem aditivo)	300	0,62	50	25	37
Adição de aditivo plastificante com a finalidade de:					
B – Aumentar a consistência	300	0,62	100	26	38
C – Aumentar a resistência	300	0,56	50	34	46
D – Economizar cimento	270	0,62	50	25,5	37,5

Soroka e Ravina (1998) investigaram a eficiência dos aditivos plastificantes e retardadores de pega em função da perda de abatimento de concretos dosados a 30°C com mistura contínua, simulando situações de concretos dosados em centrais. Esperava-se que o uso de aditivos retardadores reduzisse a taxa de perda de consistência e, portanto fosse ideal para combater o efeito acelerador causado pela elevada temperatura. Entretanto, foi constatado que a presença desse aditivo, dependendo do seu tipo e dosagem, na verdade mais acelerou do que reduziu a perda de abatimento. Duas teorias podem explicar este fenômeno. A primeira é a teoria da adsorção, que sugere que o aditivo é adsorvido pelos grãos de cimento anidros e, conseqüentemente, previne a reação deles com a água. A segunda é a teoria da precipitação, que sugere que a formação de uma camada insolúvel de sais de cálcio do retardador em torno dos produtos de hidratação. A agitação contínua do concreto fresco resulta no efeito de moagem, que além de outras coisas, pode ser considerada a causa da separação da camada de aditivo adsorvida ou da camada de sais de cálcio precipitada da superfície das partículas de cimento. Assim, quando o concreto é mantido em constante agitação, o mecanismo retardador falha. Por fim, o efeito acelerador da perda de abatimento causado pelo aditivo retardador de pega pode ser explicado pela redução da quantidade de água de amassamento e, por conseqüência, com a maior proximidade dos grãos de cimento, os produtos de

hidratação formados tendem a atuar como pontes entre as partículas ainda não hidratadas, acelerando o endurecimento da mistura. Os pesquisadores também estudaram a influência de pozolanas e aditivos superplastificantes na perda de abatimento do concreto e indicam o uso conjunto de pozolanas, aditivos superplastificantes e multifuncionais.

A Figura 2.24 ilustra o efeito do aditivo plastificante e retardador de pega na perda de abatimento de concretos.

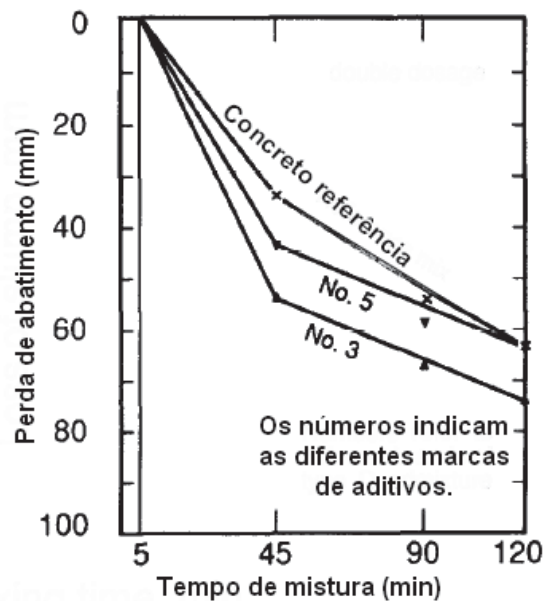


Figura 2.24 – Efeito de aditivos multifuncionais na perda de abatimento de misturas com abatimento inicial de 95-115 mm a 30°C (SOROKA; RAVINA, 1998).

### 2.2.1.2 Aditivos superplastificantes à base de policarboxilatos

A NBR 11768 (ABNT, 2011) define aditivo superplastificante como aquele que, sem modificar a consistência do concreto no estado fresco, permite elevada redução no conteúdo de água de um concreto; ou que, sem alterar a quantidade de água, aumenta consideravelmente o abatimento e a fluidez do concreto; ou, ainda, que produz esses dois efeitos simultaneamente.

Diferentemente dos aditivos superplastificantes à base de naftaleno sulfonato e melamina sulfonato, a estrutura dos aditivos à base de policarboxilato-poliésteres (PC) pode se apresentar de várias formas diferentes dependendo da aplicação. As

propriedades do PC são definidas por parâmetros moleculares, como o comprimento da cadeia molecular e a frequência, o tamanho e a composição das cadeias laterais anexadas à cadeia principal. Com o PC, os efeitos estéricos são as principais forças de repulsão. A repulsão estérica resulta da adsorção da cadeia do polímero na superfície do cimento e da extensão das cadeias laterais do polímero a partir da superfície do cimento. Esses aditivos ainda podem proporcionar mais tempo de retenção de abatimento, pois as cadeias laterais continuam salientes durante a formação dos produtos iniciais de hidratação (LEIDHODT *et al*, 2000 *apud* HARTMANN *et al*, 2011). A Figura 2.25 apresenta o mecanismo de repulsão estérica e o esquema de ação desempenhado pelo PC.

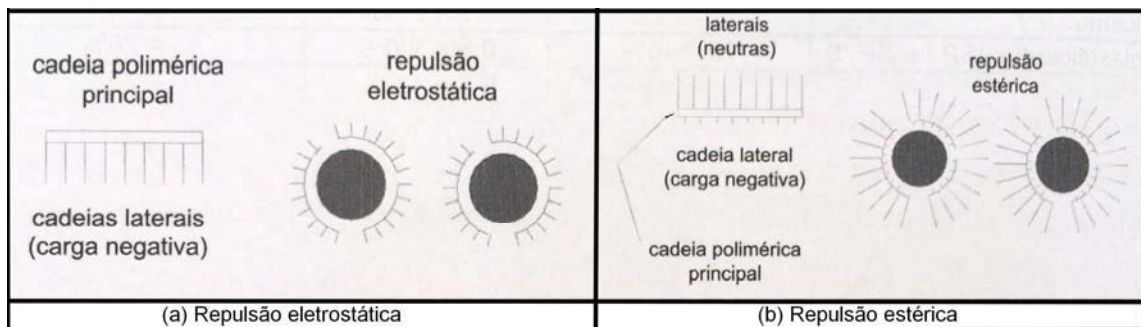


Figura 2.25 – Esquema de ação dos aditivos: a) repulsão eletrostática; b) repulsão estérica (Adaptado de HARTMANN *et al*, 2011).

Aditivos superplastificantes à base de policarboxilatos com nano-sílica na composição têm sido largamente produzidos e os fabricantes afirmam que estes produtos são capazes garantir maior fluidificação e redução da água de amassamento, maior permeabilidade, maior a resistência mecânica, menor incidência de segregação e exsudação e melhor acabamento e textura da superfície do concreto. Sua dosagem deve respeitar os limites de 1% a 2% sobre a massa de aglomerante da mistura e são indicados para CAD, concretos auto-adensáveis, concretos usinados convencionais e bombeados, concretos para pisos e para pavimentos rígidos de rodovias.

### 2.2.2 Nano-sílica

O desenvolvimento de novas tecnologias para concreto resulta da emergência de uma nova ciência dos materiais cimentícios, uma nova ciência de aditivos e adições e uso de equipamentos científicos sofisticados para caracterizar a microestrutura e até a nanoestrutura. Para Zhu, Bartos e Porro (2004 *apud* GLEIZE, 2011), a utilização de nano-materiais ao concreto permite não só um melhor controle de sua microestrutura, o que não permitem as tecnologias atuais, como também a produção de materiais mais duráveis e resistentes.

Said *et al* (2012) enunciam que a nano-sílica pode se apresentar de duas formas: grãos secos compactados ou em suspensão coloidal. A nano-sílica em grãos secos deve passar por um procedimento de preparação especial antes de ser inserida na mistura do concreto a fim de se garantir completa dispersão na água de amassamento ou qualquer outro aditivo. Por outro lado, a nano-sílica em suspensão coloidal, produzida como uma suspensão estabilizada por um agente dispersor é uma forma já pronta para uso. Campillo, Dolado e Porro (2003 *apud* SAID *et al*, 2012) estudaram as propriedades de argamassas dosadas com as duas diferentes formas da nS e concluíram que o comportamento das argamassas dosadas com nano-sílica em suspensão coloidal foi melhor e, atribuíram tal resultado à melhor dispersão da nS em suspensão com alta redução da aglomeração em comparação à sílica em grãos secos compactados.

Diferentes efeitos são produzidos pela adição de nS ou sílica ativa no concreto. Esta adição reduz a quantidade de cimento necessária na dosagem, um efeito que é mais pronunciado no caso da nano-sílica. O principal mecanismo de ação é a grande área específica da nano-sílica, que age como uma nucleação local para a precipitação do gel de C-S-H (QUERCIA; BROUWERS, 2010). Ao ser inserida na dosagem do concreto como adição mineral, altas concentrações de nS podem causar retração plástica, resultando em um elevado potencial de fissuração. Para contornar este efeito, pesquisadores têm adicionado elevadas concentrações de superplastificantes e água e aplicado métodos de cura apropriados. Jo *et al* (2007 *apud* BASTAMI; BAGHBADRANI; ASLANI, 2014) estudaram as características de argamassas com partículas de nS e mostraram que o SiO<sub>2</sub> em escala nano

comportou-se como um fíler que beneficiou a microestrutura da mistura e como um ativador das reações pozolânicas.

Belkowitz e Armentrout (2009 *apud* SAID *et al*, 2012) investigaram os efeitos da nano-sílica no processo de hidratação do cimento e afirmaram que o pequeno tamanho das suas partículas fornece uma maior superfície de contato, que acelera a taxa de hidratação do cimento e as reações pozolânicas. Tratando-se de desempenho mecânico, Said *et al* (2012) estudaram concretos dosados com diferentes teores de nano-sílica (0%, 3% e 6%) em suspensão coloidal seguindo os valores de consumo dos materiais listados na Tabela 2.10. Três concretos foram dosados sem cinza volante e três concretos foram dosados com cinza volante classe F, conforme especificado pela ASTM C 618. O consumo de material cimentício foi mantido constante (390 kg/m<sup>3</sup>), assim como a relação água/materiais cimentícios (0,40). Foram avaliadas as propriedades de resistência mecânica, permeabilidade e porosidade dos concretos. Os resultados mostraram que os corpos-de-prova com adição de nano-sílica obtiveram os maiores valores de resistência à compressão aos 28 dias, conforme apresentado na Figura 2.26, que ilustra a evolução das resistências à compressão dos concretos estudados.

Tabela 2.10 – Proporções dos materiais por metro cúbico de concreto (Adaptado de SAID *et al*, 2012)

Mistura	Cimento (kg)	Cinza volante (kg)	Nano-sílica coloidal (kg)	Água* (kg)	Aditivo superplastificante (mL/100 kg de aglomerante)	Agregado graúdo (kg)	Agregado miúdo (kg)
A-0	390	-	-	156	326	1184	789
A-1	390	-	23,4	144,3	457	1175	783
A-2	390	-	46,8	132,6	914	1162	774
B-0	273	117	-	156	261	1163	775
B-1	273	117	23,4	144,3	326	1154	769
B-2	273	117	46,8	132,6	653	1143	762

\*A quantidade de água de amassamento foi ajustada de acordo com a quantidade de água existente na solução da nano-sílica.

A permeabilidade foi analisada por meio do ensaio de penetração a cloretos por imersão, que determina a profundidade da penetração dos cloretos por meio do método do colorímetro regulamentado pela ASTM C 1202. Por sua vez, a

porosidade foi analisada por meio do ensaio de porosimetria por injeção de mercúrio, que determina a porosidade total aparente do concreto e os diâmetros limiares dos poros. Os resultados de ambos os ensaios estão inseridos na Tabela 2.11.

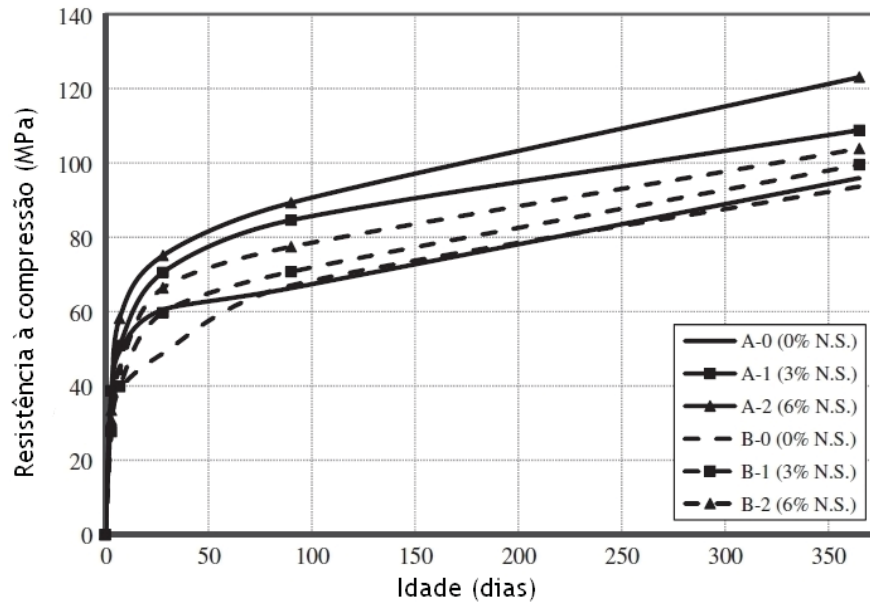


Figura 2.26 – Evolução das resistências à compressão dos concretos (Adaptado de SAID *et al*, 2012).

Os concretos do grupo A incorporados com nS apresentaram menor índice de penetração a cloretos, chegando a reduzir em aproximadamente 70% esse valor se comparado ao concreto sem a adição mineral. Já os concretos do grupo B, por serem acrescidos de cinza volante e nS, apresentaram uma redução menor e próxima a 60% do concreto sem nS. Já no que se trata de porosidade, os concretos dos dois grupos apresentaram menor porosidade aparente e menor diâmetro limiar dos poros quando incorporados com nS. Esses resultados constataam que a nano-silica atua não só como material pozolânicos, mas também como fíler nas misturas.

Tabela 2.11 – Índices referentes à permeabilidade e porosidade dos concretos  
(Adaptado de SAID *et al*, 2012)

Mistura	Permeabilidade		Porosidade	
	Profundidade média de penetração (mm)	Classe de penetrabilidade (ASTM C 1202)	Porosidade total aparente (%)	Diâmetro limiar dos poros ( $\mu\text{m}$ )
A-0	10,2	Baixa	10,13	0,100
A-1	3,1	Muito baixa	6,91	0,075
A-2	4,6	Muito baixa	6,44	0,060
B-0	8,1	Muito baixa	12,56	0,144
B-1	4,1	Muito baixa	9,30	0,092
B-2	3,3	Muito baixa	8,21	0,075

### 2.3 CONCRETO NO ESTADO FRESCO

A seleção dos materiais apropriados e a dosagem são passos importantes para produzir um concreto que atenda às especificações de resistência e durabilidade na estrutura. Esse objetivo, no entanto, pode não ser atingido se uma atenção adequada não for dada às operações às quais o concreto é submetido nas primeiras idades. O termo primeiras idades abrange apenas um insignificante intervalo de tempo, por exemplo, os dois primeiros dias após a produção, no total da expectativa de vida útil do concreto, mas durante esse período numerosas operações são realizadas, tais como mistura, transporte até o local de aplicação, lançamento nas fôrmas, adensamento, acabamento, cura, e desmoldagem. Estas operações são influenciadas pelas características do concreto fresco, por exemplo: trabalhabilidade, tempo de pega e maturidade ou taxa de crescimento da resistência. Evidentemente, o controle simultâneo das operações nas primeiras idades e das propriedades do concreto fresco é essencial para assegurar que o elemento de concreto acabado seja estruturalmente adequado para a finalidade para a qual foi projetado (MEHTA; MONTEIRO, 2014). O período da primeira idade na vida do concreto é insignificamente pequeno se comparado ao total de sua expectativa de vida, mas durante esse período ele está sujeito a muitas operações que não somente são afetadas pelas propriedades do material, mas também as influenciam.

Por exemplo, um concreto com pouca trabalhabilidade pode ser difícil de misturar; por outro lado, um tempo de mistura excessivo pode reduzir a trabalhabilidade.

Em seu estado fluido anterior à cura, os concretos podem ser compreendidos como suspensões bifásicas, compostas por uma fração de partículas grosseiras (agregados graúdos e miúdos), imersas em uma matriz de partículas finas reativas (cimento Portland e pozolanas) e água em teor suficiente para que essas partículas sejam aplicadas no estado fluido (HU; LARRARD, 1995 *apud* ROMANO; CARDOSO; PILEGGI, 2011). Em alguns casos, finos inertes (calcário moído e argilominerais), aditivos químicos e fibras são ainda incorporados às composições. A necessidade de adequação e manutenção da consistência dos concretos tem provocado problemas como fissuração, retração, entre outros. A Figura 2.27 representa esquematicamente a estrutura bifásica de uma argamassa composta por cimento, material inerte, água e agregado.

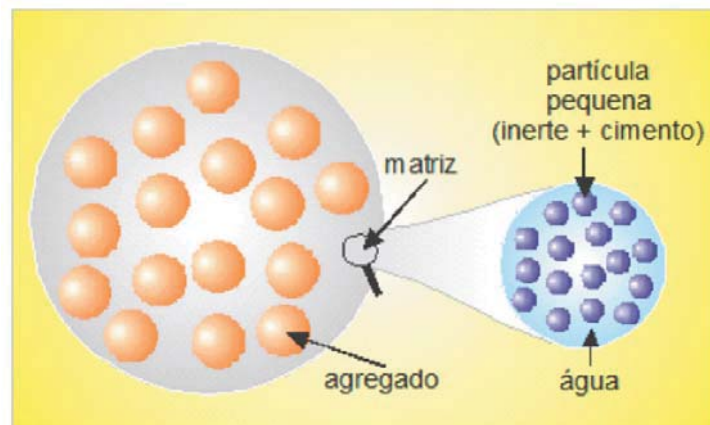


Figura 2.27 – Representação esquemática da estrutura bifásica de uma argamassa (ROMANO; CARDOSO; PILEGGI, 2011).

As propriedades do concreto no estado fresco são afetadas por um grande número de parâmetros, incluindo não só o conteúdo do cimento e composição, tipo e dosagem de aditivos químicos, como também composição, morfologia e distribuição dos agregados, condições ambientais, bem como a energia e sequência de mistura (FERNÁNDEZ-ALTABLE; CASANOVA, 2006).

Concretos dosados em centrais são submetidos a uma mistura constante e a agitações por diferentes períodos de tempo durante o transporte até as obras. Geralmente, busca-se reduzir o tempo e a distância de transporte por razões

econômicas e, na maioria dos casos, este objetivo não pode ser atingido devido a fatores com tráfego intenso, longas distâncias da central de dosagem à obra e, atrasos no lançamento do concreto (RAVINA, 1975 *apud* NEHDI; AL-MARTINI, 2009).

### 2.3.1 Trabalhabilidade e consistência

Para Romano, Cardoso e Pileggi (2011), os conceitos de trabalhabilidade e consistência surgem da necessidade de explicitar, de forma sensorial, as características desejáveis dos concretos durante as etapas de mistura, transporte, lançamento, adensamento e acabamento, conforme ilustrado na Figura 2.28.



Figura 2.28 – Ilustração esquemática do conceito abrangente de trabalhabilidade, envolvendo as etapas de mistura, transporte, lançamento e acabamento (ROMANO; CARDOSO; PILEGGI, 2011).

Trabalhabilidade pode ser definida como a quantidade de trabalho interno útil necessário à obtenção do adensamento total. O trabalho interno útil é uma propriedade física inerente do concreto e é o trabalho ou energia necessário para vencer o atrito interno entre as partículas individuais do concreto. Esta energia deve ser suficiente de forma que permita a execução das etapas de mistura, transporte, lançamento, adensamento e acabamento com êxito (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Para Bauer (2009), a noção de trabalhabilidade é mais subjetiva que física, tendo como componente físico mais importante a consistência que, por sua vez, traduz propriedades intrínsecas da mistura fresca relacionadas com a mobilidade da

massa e coesão entre os componentes, tendo em vista a homogeneidade e compacidade do concreto. A trabalhabilidade, no seu todo, não é uma característica inerente apenas ao próprio concreto, como a consistência; envolve também considerações relativas à natureza das obras e aos métodos de execução adotados. Kosmatka, Kerkhoff e Panarese (2003) afirmam que o grau de trabalhabilidade exigido para determinado concreto é controlado pelo método de lançamento, tipos de estrutura e tipo de concreto.

É importante se atentar para a trabalhabilidade, pois é uma propriedade básica que deve ser atendida, caso contrário um concreto que não possa ser lançado facilmente ou adensado apresentará resistências e durabilidade abaixo do estimado pelos profissionais. Projetos de estrutura devem conter valores referentes à consistência do concreto a ser moldado e ensaios de consistência devem ser realizados nas obras para aprovação do recebimento do concreto conforme ilustrado na Figura 2.29.



Figura 2.29 – Ensaio de abatimento do tronco cone executado no canteiro  
(Fonte: <http://www.ufrgs.br/eso/content/?m=201205>, acessado dia 10/12/2014).

A trabalhabilidade é medida pela determinação da consistência ao longo do período em que o concreto se apresenta no estado fresco e, diante da preocupação em se manter o controle tecnológico do concreto nesse estado, os conceitos de trabalhabilidade e consistência são convertidos em grandezas reológicas mensuráveis.

A técnica aplicável a alguns tipos de concreto e mais utilizada para quantificação dos parâmetros reológicos dos concretos frescos é o teste de fluxo livre denominado ensaio de abatimento do tronco de cone, prescrito, no Brasil, pela NBR NM 67 (ABNT, 1998). A Figura 2.29 ilustra o ato de preenchimento do tronco

de cone com concreto para verificação de sua consistência momentos antes de ser lançado nas fôrmas.

Em termos gerais, a trabalhabilidade está voltada para a necessidade de obtenção de uma mistura estável e que não segregue e/ou exsude facilmente. É essencial que a segregação e a exsudação sejam evitadas, pois dessa forma é possível obter a compactação mais conveniente da mistura, sem perda ou desperdício de material (BAUER, 2009).

Um concreto com menor abatimento tem a consistência mais firme. Se a consistência estiver muito seca e dura, haverá maior dificuldade de se lançar e adensar e as partículas maiores de agregado poderão se separar da mistura. Entretanto, não pode-se assumir que uma mistura mais úmida e mais fluida é necessariamente mais trabalhável, pois se o concreto estiver muito úmido, a segregação e exsudação podem ocorrer. De modo geral, a consistência deve ser a mais seca possível, respeitando os parâmetros de execução e atendendo aos requisitos mínimos de projeto (KOSMATKA; KERKHOFF; PANARESE, 2003).

### **2.3.2 Ensaio de abatimento do tronco de cone**

Este é o ensaio mais empregado em concretos da construção civil em função da simplicidade de execução e dos equipamentos utilizados. A NBR NM 67 (ABNT, 1998) apresenta o procedimento detalhado e os equipamentos de ensaio que consistem de uma haste de socamento metálica de 600 mm de comprimento e 16 mm de diâmetro; um tronco de cone metálico de 300 mm de altura,  $100 \pm 2$  mm de diâmetro superior (topo) e  $200 \pm 2$  mm de diâmetro inferior (base); um funil metálico de 181 mm de diâmetro superior e 97 mm de diâmetro inferior e, por fim, uma base metálica para regularização da superfície de ensaio.

Resumidamente, antes de o ensaio ser realizado, a superfície interna do molde e a base devem ser umedecidas a fim de se reduzir a influência do atrito superficial no resultado. Logo após, o tronco de cone deve ser preenchido com três camadas de concreto, aplicando-se 25 golpes com a haste em cada camada, e depois lentamente suspenso com o auxílio das alças do molde. O concreto sem

suporte abate-se pelo seu próprio peso e a diminuição da altura do tronco de cone é chamada de abatimento do concreto (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Os concretos ainda podem ser classificados de acordo com o abatimento desejado em cada caso específico. As normas brasileiras NBR 7212 (ABNT, 2012) e NBR 8953 (ABNT, 2015) apresentam as classes de consistência dos concretos e suas respectivas aplicações típicas e, a segunda norma ainda especifica que podem ser criadas classes especiais de consistência conforme acordado entre as partes envolvidas. A Tabela 2.12 apresenta os valores de abatimento e suas respectivas classes e aplicações indicadas.

Tabela 2.12 – Classes de consistência (Adaptado de NBR 8953, ABNT 2015)

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

NOTA 1 De comum acordo entre as partes, podem ser criadas classes especiais de consistência, explicitando a respectiva faixa de variação do abatimento.

NOTA 2 Os exemplos desta Tabela são ilustrativos e não abrangem todos os tipos de aplicações.

### 2.3.3 Perda de abatimento e fatores que afetam a trabalhabilidade

Durante o período de fluidez haverá uma perda estável de abatimento com o passar do tempo que, por sua vez, será causada parcialmente pela hidratação do  $C_3S$  e do  $C_3A$ ; que continua lentamente mesmo durante o período de dormência; e parcialmente pela perda de água livre da mistura de concreto através do consumo pelas reações de hidratação, por adsorção nas superfícies dos produtos hidratados e por evaporação (MINDESS; YOUNG, 1981). A perda de abatimento é aproximadamente linear com o tempo, no entanto o período de maior reatividade está entre a primeira meia hora e a primeira hora após a mistura dos materiais. Concretos com dosagens inapropriadas podem precisar passar por um reamassamento com adição de uma quantidade extra de água imediatamente antes

do lançamento para restaurar a consistência adequada. Esse procedimento aumenta a relação a/c e pode ser prejudicial para as propriedades do concreto a menos que também seja adicionada uma determinada quantidade de cimento a fim de reestabelecer a relação a/c original.

Para Mehta e Monteiro (2014), o volume de produtos resultantes da hidratação do cimento é pequeno durante a primeira meia hora após a adição da água ao cimento, portanto a perda de abatimento é insignificante. Deste ponto em diante, o concreto começa a perder consistência a uma determinada taxa que é função, principalmente, do tempo, da temperatura, da composição do cimento e dos aditivos e adições presentes na mistura. Como a medida de abatimento no momento do lançamento é a mais importante, a perda de abatimento deve ser considerada na dosagem do concreto. Geralmente, as mudanças na consistência do concreto até o momento do lançamento são perfeitamente controladas, podendo ser realizados ajustes adequados para se garantir uma consistência suficiente para o lançamento e operações subsequentes.

A consistência pode ser facilmente afetada devido a pequenas mudanças nas propriedades dos materiais e do concreto. Por exemplo, uma mudança indetectável de apenas 1,0% no teor de umidade do agregado gráudo e miúdo poderia alterar o abatimento de 25 a 50 mm (ACI Committee 211, 1997 *apud* ACI Committee 305, 2013). Um erro de aproximadamente 0,5% na determinação do teor de umidade do agregado dificulta o controle da umidade da mistura.

No Brasil, a NBR 10342 (ABNT, 2012) estabelece o método de ensaio para determinação da perda de abatimento do concreto fresco ao longo do tempo, contemplando a aparelhagem necessária, os pré-requisitos e procedimentos a serem atendidos.

Ao afirmar que a trabalhabilidade do concreto é prejudicada por alguns fatores, vários parâmetros podem ser implícitos ao contexto como, inviabilidade de execução da estrutura em função da falta de planejamento quanto à dosagem do concreto com padrões ideais. No entanto, neste trabalho, foram apresentados os fatores que afetam a perda de abatimento em função do tempo, ou seja, que atingem a trabalhabilidade do concreto apenas neste quesito.

Existe uma série de fatores que impactam indiretamente a trabalhabilidade e, conseqüentemente, na consistência e coesão dos concretos no estado fresco. Cada

propriedade, consistência e/ou coesão, pode ser afetada de maneira diferente pela mudança de uma variável específica. No geral, os fatores que afetam estas propriedades são: quantidade de água da mistura, teor e características do cimento, proporção e características dos agregados, aditivos, adições minerais, tempo e velocidade de mistura, temperaturas do concreto e do ambiente.

O fator mais importante e determinante da trabalhabilidade do concreto é o consumo de água. Ao aumentar a quantidade de água, a capacidade de fluidez e facilidade de compactação também serão aumentadas, entretanto além da redução da resistência mecânica, o concreto pode apresentar segregação e exsudação. Em geral, todas as partículas da mistura exigem certa quantidade de água para alcançar plasticidade suficiente para tornar o concreto trabalhável. A água deve ser suficiente para adsorver nas superfícies das partículas, preencher os espaços entre as partículas, criando um 'filme' entre as partículas, e reagir com o aglomerante (MINDESS; YOUNG, 1981).

Estudos em concretos refratários utilizando um reômetro rotacional capaz de quantificar a energia transmitida ao sistema durante a mistura demonstraram que a forma de adição de água altera significativamente o processo e o comportamento reológico do concreto (PILEGGI, 2001 *apud* ROMANO; CARDOSO; PILEGGI, 2011). A adição lenta de água ou fracionada aumenta a resistência do sistema ao cisalhamento devido ao surgimento de forças capilares durante a mistura. Essa é a quantidade de água suficiente para recobrir todas as partículas e preencher os vazios, ponto no qual as forças capilares são máximas e, conseqüentemente, a resistência ao cisalhamento. Qualquer adição a mais de água pode causar a redução repentina das forças capilares, bem como, da resistência ao cisalhamento do concreto, conforme ilustrado na Figura 2.30.

Aditivos superplastificantes podem aumentar o teor de ar incorporado de um concreto se comparado a um teor de um concreto convencional. Este ar incorporado aumenta o volume de pasta e melhora a consistência do concreto para uma determinada quantidade de água. A coesão também é aumentada pela redução da segregação e exsudação (KOSMATKA; KERKHOFF; PANARESE, 2003).

A Designação C 494 (ASTM, 2013) classifica os aditivos superplastificantes utilizados nesta pesquisa como sendo do tipo F, ou seja, de alta redução de água, e a Comissão 305 (ACI, 2013) afirma que este tipo de aditivo, em dosagens

convencionais, não retarda o tempo de pega significativamente. Em altos teores, estes aditivos podem reduzir a quantidade de água de amassamento, com aumento expressivo do tempo de pega.

O aditivo plastificante utilizado nesta pesquisa é classificado como sendo do tipo D pela Designação C 494 (ASTM, 2013). Este aditivo é capaz de reduzir a quantidade de água requerida para produzir um concreto com determinada consistência e ainda retarda o tempo de pega da mistura. Além de ter a resistência elevada pela redução de água, o concreto terá sua trabalhabilidade estendida por um período prolongado.

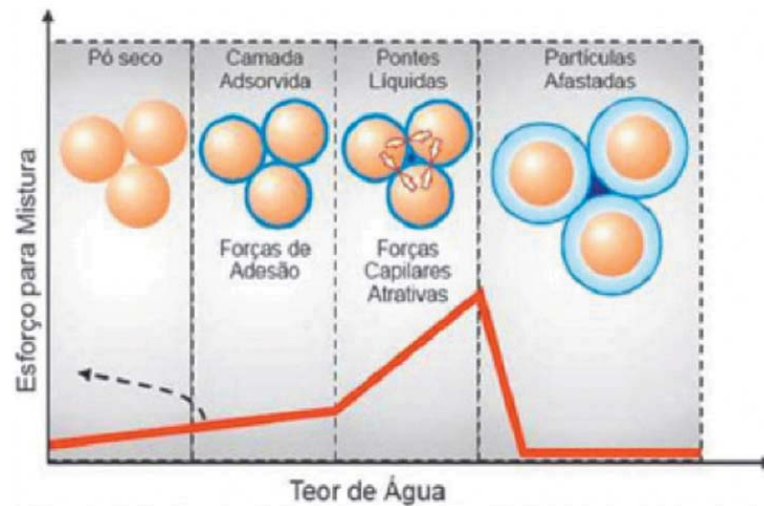


Figura 2.30 – Representação esquemática do processo de mistura em função da quantidade de água.

Camadas adsorvidas de ligação e das pontes líquidas de ligação entre duas partículas (laranja) imersas em um líquido (azul). Azul claro: líquido de recobrimento da superfície e afastamento das partículas; azul escuro: líquido de preenchimento dos vazios (PILEGGI, 2001 apud ROMANO; CARDOSO; PILEGGI, 2011).

Para uma relação  $a/c$  constante, um aumento na relação agregado/cimento irá reduzir a trabalhabilidade e, conseqüentemente, mais cimento será necessário. A deficiência de agregado miúdo resulta em uma mistura mais áspera, propícia à segregação e difícil acabamento, por outro lado, o excesso de agregado miúdo resulta em uma mistura mais permeável e menos econômica e durável, porém mais facilmente trabalhável (MINDESS; YOUNG, 1981). Partículas mais finas requerem mais água para molhagem de sua grande superfície específica, enquanto a forma irregular e textura rugosa de um agregado anguloso demandam mais água que um agregado arredondado. As adições minerais inseridas com o objetivo de substituir

parte do cimento têm pequeno impacto na trabalhabilidade, aumentando a coesão da mistura.

El-Baky, Yehia e Khalil (2013) realizaram ensaios de fluidez conforme ASTM C 1437 em argamassas com diferentes teores de nano-silica, sendo 0, 1, 3, 5, 7 e 10%. Esses teores foram adicionados em substituição ao cimento da composição de cada argamassa e, a relação a/ag foi mantida constante (0,485). A Figura 2.31 mostra que a perda de fluidez foi proporcional ao aumento do teor de nano-silica até 7%, visto que parte da água de amassamento foi utilizada na ativação das partículas da pozolana devido à sua grande superfície específica. No entanto, esse comportamento é mudado quando observado o teor de 10%, onde a fluidez volta a aumentar devido ao excesso de partículas de nano-silica anidras. Portanto, a nano-silica absorve parte da água de amassamento, reduzindo a consistência das argamassas. No entanto, o excesso de nano-silica que não reage, atua como um lubrificante, aumentando novamente a fluidez da mistura.

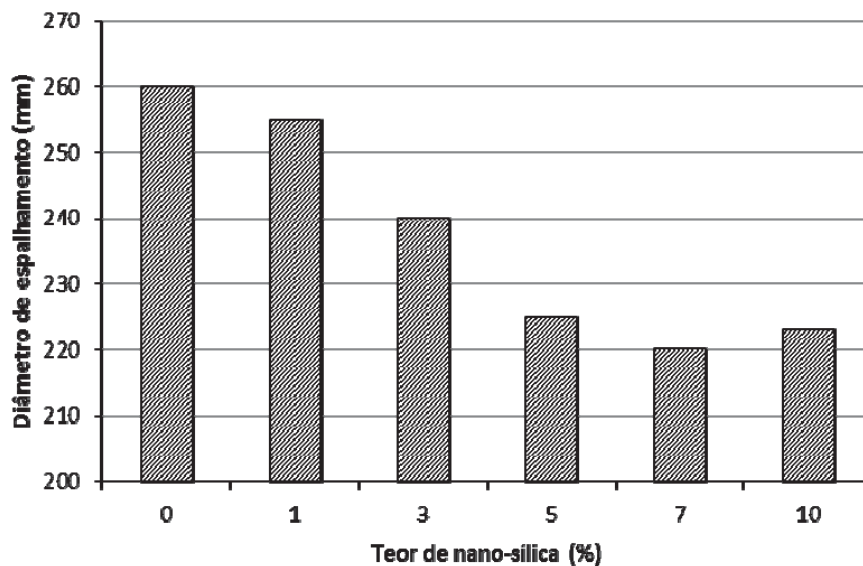


Figura 2.31 – Fluidez das argamassas (Adaptado de EL-BAKY; YEHA; KHALIL, 2013).

O tempo e a velocidade de mistura podem prejudicar a trabalhabilidade de qualquer concreto. A Designação C 94 (ASTM, 2015) afirma que misturar em velocidades elevadas e por longos períodos, aproximadamente uma hora ou mais, pode resultar em perdas de resistência mecânica, aumento de temperatura da mistura, perda excessiva do ar incorporado e perda acelerada de abatimento.

Aconselha-se utilizar rotações de mistura na média de 6 a 18 rpm e, caso seja necessário apenas agitar o concreto, deve-se manter a média de 2 a 6 rpm.

Por fim, existe um fator que também afeta a trabalhabilidade: temperatura do concreto. Hampton (1981 *apud* NEHDI, AL-MARTINI, 2009) estudou a possibilidade de desacelerar a perda de abatimento do concreto causada por elevadas temperaturas usando aditivo superplastificante à base de naftaleno sulfonatos. A temperatura variou de 22°C a 32°C. O concreto foi misturado em temperatura ambiente e um queimador a gás propano foi colocado embaixo da betoneira para garantir a temperatura mais alta. O concreto foi misturado por dois minutos antes da primeira determinação de abatimento. Após 30 minutos de repouso, o concreto foi misturado novamente por mais dois minutos e o abatimento foi novamente determinado. Este procedimento foi repetido por 60 minutos. Foi constatada uma pequena perda de abatimento no concreto misturado em temperatura moderada por 60 minutos. A perda de abatimento foi mais significativa na condição de temperatura mais elevada, 32°C, mas diminuiu depois da adição do superplastificante.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 ESTRUTURA DA PESQUISA**

Diante dos efeitos causados pela temperatura da mistura nas propriedades do concreto fresco, em especial na perda de abatimento, realizou-se um estudo para analisar a velocidade de perda de abatimento em concretos dosados com diferentes temperaturas. Este estudo apresenta bibliografia e ensaios práticos que podem ampliar o conhecimento sobre os fatores que afetam a perda de consistência dos concretos no estado fresco, mostrando que apenas ao variar a temperatura do concreto, a velocidade de perda de abatimento é consideravelmente modificada.

Como objetivo específico, foram selecionados dois aditivos superplastificantes à base de policarboxilatos, um deles contendo nano-sílica na composição, com o intuito de analisar seus respectivos desempenhos na manutenção da consistência dos concretos diante da variação da temperatura da mistura. Em todas as misturas foi utilizado aditivo plastificante multifuncional.

A dosagem dos concretos e os ensaios laboratoriais foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Goiás, em Goiânia. A temperatura ambiente e a umidade relativa do ar foram mantidas dentro de períodos de variações determinados, aceitando-se 2°C para a temperatura e 4% para a umidade, durante os ensaios executados no concreto fresco. Os ensaios seguiram as especificações normativas e foram realizados pelo mesmo operador. Os detalhes sobre os ensaios estão apresentados no programa experimental deste trabalho.

Nesta pesquisa, o método de resfriamento dos agregados e água foi utilizado para reduzir as temperaturas das misturas de concreto. Os materiais tiveram suas temperaturas reduzidas e os teores de umidade determinados para correção da relação a/c no momento da dosagem.

### 3.1.1 Fases da pesquisa

O início desta pesquisa se deu com a definição do problema a ser estudado e sua relevância para a indústria do concreto da região. Posteriormente, foi levantada bibliografia contendo produções e normatizações nacionais e internacionais de forma a contextualizar o conhecimento para realização da pesquisa. A etapa prática foi dividida conforme cronograma de atividades apresentado no fluxograma da Figura 3.1.

Em paralelo à prática laboratorial, foi realizada a produção da dissertação, onde estão inseridas as informações técnicas mais relevantes ao tema; os procedimentos experimentais; os resultados da pesquisa; e as discussões e conclusões encontradas com o realizar do trabalho teórico e prático.

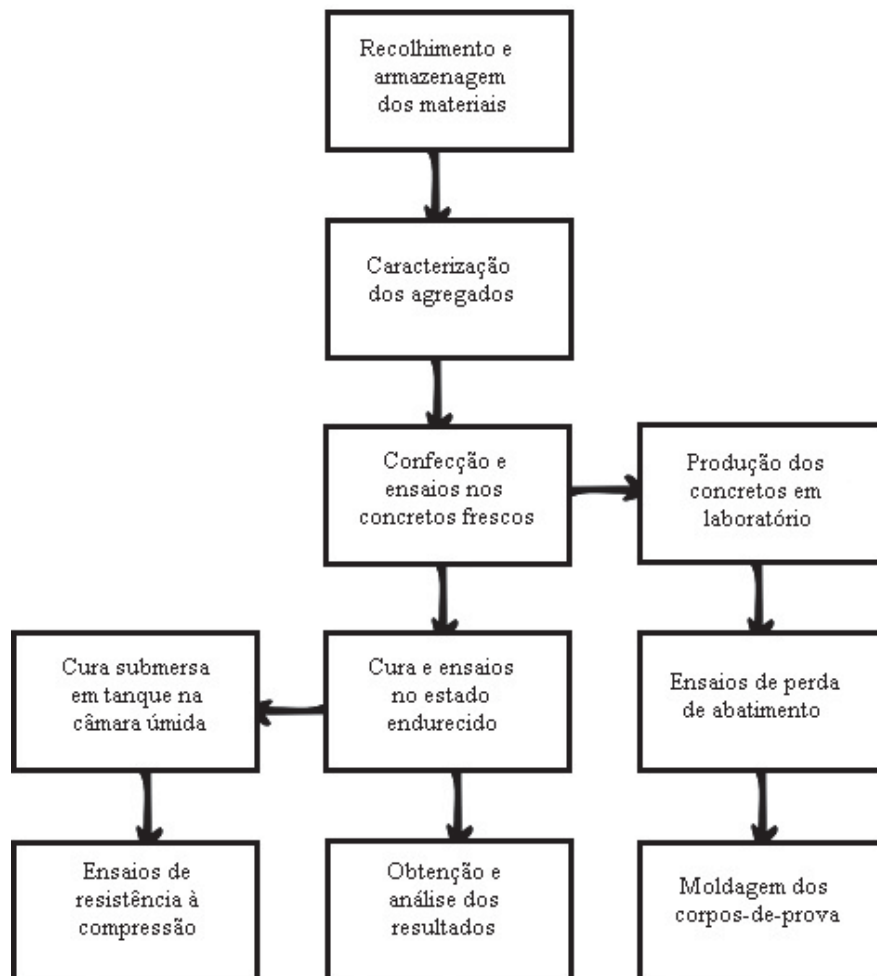


Figura 3.1 – Fluxograma de atividades da etapa prática da pesquisa.

## 3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Todos os dados obtidos nos ensaios de caracterização dos materiais da pesquisa estão disponíveis e detalhados no Apêndice A desta dissertação. Especificações dos aditivos e adições minerais estão apenas apresentados no apêndice.

### 3.2.1 Cimento

O cimento Portland utilizado nesta pesquisa foi do tipo CP-F-40, cujas especificações são regulamentadas pela NBR 11578 (ABNT, 1991).

A NBR 11579 (ABNT, 2012) regulamenta o ensaio de determinação da finura por meio da peneira 75  $\mu\text{m}$  (n° 200) e o cimento apresentou valor igual a 0,28%, atendendo ao requisito da NBR 11578 (ABNT, 1991), isto é, ficando menor que 10%. Já a superfície específica foi determinada pelo método de permeabilidade ao ar, regulamentado pela NBR 16372 (ABNT, 2015), e o cimento apresentou 422,31  $\text{m}^2/\text{kg}$ , ficando acima do limite mínimo de 280  $\text{m}^2/\text{kg}$ , estabelecido pela NBR 11578 (ABNT, 1991).

### 3.2.2 Agregados miúdos

Foram utilizadas duas areias de diferentes composições granulométricas de origem natural, conforme exposto no traço utilizado na pesquisa.

A areia mais fina apresentou massa unitária igual a 1,37  $\text{kg}/\text{dm}^3$ , massa específica de 2,65  $\text{kg}/\text{dm}^3$ , diâmetro máximo característico (DMC) de 0,60 mm e módulo de finura (MF) de 1,77, sendo inserida na zona utilizável inferior. Já a areia grossa apresentou massa unitária de 1,54  $\text{kg}/\text{dm}^3$ , massa específica de 2,60  $\text{kg}/\text{dm}^3$ , DMC de 4,75 mm e MF de 3,08, estando inserida na zona utilizável superior.

Quanto às capacidades de absorção, a areia fina apresentou índice de 0,89%, enquanto a areia grossa apresentou capacidade de 1,39%. No que trata de

quantidade de impurezas orgânicas, as duas areias respeitaram o limite estabelecido em norma.

### 3.2.3 Agregados graúdos

Foram utilizadas duas britas de diferentes composições granulométricas na pesquisa, sendo ambas de granito.

A brita com maior diâmetro característico apresentou massa unitária igual a  $1,67 \text{ kg/dm}^3$ , massa específica de  $2,89 \text{ kg/dm}^3$ , DMC de 25,0 mm e MF de 3,11. Já a brita de menor diâmetro característico apresentou massa unitária de  $1,62 \text{ kg/dm}^3$ , massa específica de  $2,87 \text{ kg/dm}^3$ , DMC de 12,5 mm e MF de 1,94.

As capacidades de absorção foram de 0,30% e 0,65% para as britas de 25,0 mm e 12,5 mm, respectivamente.

## 3.3 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS

### 3.3.1 Metodologia de produção dos concretos

No total foram produzidos seis concretos que foram divididos em dois grandes grupos:

- *Grupo 1:* grupo dos concretos com aditivos Tec-Flow 50N e Tec-Mult 829 nomeados como C32, C15 e C38; produzidos com diferentes temperaturas em mesmas condições de temperatura ambiente e umidade relativa do ar. Sendo, C32 produzido com os materiais em temperatura ambiente, C15 com materiais resfriados e C38 com materiais aquecidos;
- *Grupo 2:* grupo dos concretos com aditivos Silicon NS AD 400 e Tec-Mult 829 nomeados como C32-nS, C15-nS e C38-nS; produzidos com diferentes temperaturas sob as mesmas condições de temperatura ambiente e umidade relativa do ar dos concretos do Grupo 1. Sendo, C32-nS produzido com os materiais em temperatura ambiente, C15-nS com materiais resfriados e C38-nS com materiais aquecidos.

Para cada traço de concreto produzido, fixou-se o volume de concreto em 0,015 m<sup>3</sup>, respeitando o limite de volume da betoneira (120 litros), atendendo ao limite mínimo do volume do tronco de cone do ensaio de abatimento, incluindo possíveis perdas decorrentes da repetição do ensaio, e à moldagem de quatro corpos-de-prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Posteriormente, os agregados foram caracterizados e suas capacidades de absorção determinadas a fim de se corrigir as quantidades de água nas misturas. Em sequência, os concretos foram produzidos seguindo suas respectivas metodologias.

A Tabela 3.1 apresenta os dados específicos dos concretos produzidos em cada grupo.

Tabela 3.1 – Especificações dos concretos investigados

Grupo de dosagem	Concreto	Temperatura esperada da mistura (°C)	Temperatura ambiente (°C)	Umidade relativa do ar (%)	Aditivo superplastificante (PC) utilizado****	Ensaio realizado
1	C32	32**	32,90	38	Tec-Flow 50N	Perda de abatimento
	C15	15***	29	39	Tec-Flow 50N	
	C38	38*	32,70	39	Tec-Flow 50N	
2	C32-nS	32**	31,90	37	Silicon NS AD 400	Perda de abatimento
	C15-nS	15***	29,60	40	Silicon NS AD 400	
	C38-nS	38*	32,50	39	Silicon NS AD 400	

\* Temperatura determinada em função das especificações da Comissão 305 (ACI, 2013);

\*\* Temperatura determinada em função das especificações da Comissão 318 (ACI, 2014);

\*\*\* Temperatura determinada em função das especificações das Comissões 305 (ACI, 2013) e 306 (ACI, 2010);

\*\*\*\* Além destes aditivos superplastificantes, todas as misturas contêm aditivo multifuncional Tec-Mult 829.

Os concretos C32 e C32-nS tiveram os teores de umidade de seus agregados determinados para futuras correções na relação a/c; passou-se para a pesagem dos materiais em balança com precisão de 0,1 kg e aferição das temperaturas de todos os materiais. O lançamento e homogeneização na betoneira e realização dos ensaios de perda de consistência foram realizados posteriormente. Estes concretos

foram dosados no mesmo dia, portanto os valores dos teores de umidade dos agregados são os mesmos e estão apresentados na Tabela B.1 disponível no Apêndice B.

Os concretos C15 e C15-nS tiveram seus agregados secos em estufa, pesados e, posteriormente, protegidos da umidade com sacos plásticos impermeáveis e colocados no refrigerador por 24 horas; no dia seguinte, os outros materiais foram pesados; as temperaturas aferidas. Por fim, todos os materiais foram lançados na betoneira e os ensaios de perda de abatimento foram realizados. Já os concretos C38 e C38-nS tiveram seus agregados secos em estufa por 24 horas a 105°C, pesados e retornados para estufa com temperatura reduzida; os outros materiais foram pesados no dia seguinte e suas as temperaturas aferidas. Os materiais foram lançados na betoneira e os ensaios realizados.

As metodologias de produção dos concretos se diferem apenas até a etapa que antecede o início da mistura, sendo que a partir deste momento o procedimento foi padronizado e é regulamentado pela NBR 10342 (ABNT, 2012).

Como os agregados foram utilizados em diferentes condições de umidade, fez-se necessária a correção das relações a/c dos concretos em função da absorção destes materiais. Os concretos produzidos com agregado na condição seco em estufa tiveram sua relação a/c corrigida em função das capacidades de absorção dos materiais. Os concretos confeccionados com agregados secos ao ar tiveram suas relações a/c corrigidas em função das absorções efetivas dos materiais.

### **3.3.2 Traço e classe dos concretos**

O traço utilizado na dosagem dos concretos foi fornecido por uma das maiores centrais de dosagem da região de Goiânia, sendo um dos mais comercializados pela empresa. Este foi mantido fixo para todas as misturas preparadas a critério de parametrização dos concretos. A ideia de se utilizar um dos traços mais comercializados parte do princípio de se trabalhar com misturas de composição próxima à de mercado, tornando a pesquisa mais aplicável às práticas das centrais de dosagem. Os consumos dos materiais utilizados nas dosagens em quilogramas por metro cúbico de concreto estão dispostos na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Consumo dos materiais em kg por m<sup>3</sup> de concreto

Material	Consumo
Cimento	390,0
Sílica ativa	30,0
Areia fina	220,0
Areia grossa	505,0
Brita 12,5mm	260,0
Brita 25mm	750,0
Aditivo Tec-Mult 829	2,83
Aditivo Tec-Flow 50N	1,10
Silicon NS AD 400	
Água	176,0

Este traço é específico para a obtenção de fck de 50 MPa e abatimento inicial de  $200 \pm 30$  mm, portanto os concretos dessa pesquisa pertencem à classe de resistência C50 e à classe de consistência S160, conforme especificado pelas NBR 7212 (ABNT, 2012) e NBR 8953 (ABNT, 2015) e apresentado nas Tabelas 2.7 e 2.12.

### 3.3.3 Condições climáticas e temperaturas de ensaio

A título de comparação, a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar devem ser mantidas constantes, de forma que seus impactos nos resultados da pesquisa sejam reduzidos. Para tanto, as dosagens foram realizadas no mesmo horário, entre às 12:00 e 17:00 horas, em dias diferentes, a fim de se obter constância nesses quesitos. As temperaturas respeitaram o período de  $31 \pm 2^\circ\text{C}$  e a umidade  $39 \pm 4\%$  durante todo o processo de determinação de abatimento dos concretos, atendendo à solicitação da NBR 10342 (ANBT, 2012), que especifica variações de  $2^\circ\text{C}$  e 5%. Além de atenderem às especificações das variações, as temperaturas do ar estão dentro dos valores aceitáveis por normas brasileiras e norte-americanas. Os valores das temperaturas ambientes e as umidades relativas do ar medidas no momento do início das dosagens estão dispostos na Tabela 3.1.

A escolha das temperaturas iniciais dos concretos foi baseada nas temperaturas máximas e mínimas indicadas em normas internacionais e foram atingidas através do aquecimento ou resfriamento da água e/ou dos agregados.

Os concretos produzidos em temperaturas normais, ou seja, com materiais em temperatura ambiente, tiveram suas temperaturas iniciais determinadas com base nas especificações da Comissão 318 (ACI, 2014) e da Designação C 94 (ASTM, 2015), que limitam a temperatura da mistura de concreto em, no máximo, 32°C. Para atingir tal temperatura de mistura, as dosagens foram realizadas em dias cuja temperatura ambiente se mantivesse abaixo, porém próxima desse valor.

Os concretos resfriados tiveram a temperatura inicial fixada em 15°C, cujo valor corresponde a uma temperatura intermediária estando entre o limite mínimo de 7°C apresentado pela Comissão 306 (ACI, 2010) e o limite mínimo de 24°C apresentado pela Comissão 305 (ACI, 2013). Os concretos aquecidos, por sua vez, tiveram a temperatura estimada em 38°C, que corresponde ao limite máximo aceitável pela Comissão 305 (ACI, 2013).

Para todos os concretos, foram estipulados períodos de aceitação de  $\pm 2^\circ\text{C}$  nas temperaturas iniciais, ou seja, as temperaturas foram consideradas aceitas quando atingiram 15°C, 32°C e 38°C, com variações de até 2°C. No tópico de resultados e discussões estão apresentados os valores obtidos durante a execução das dosagens.

A fim de atingir as diferentes temperaturas dos concretos, os agregados graúdos e miúdos, depois de livres de umidade, foram mantidos em estufa por 24 horas a 50°C; ou resfriados em congeladores por 24 horas a -20°C, mantendo os materiais isolados de forma que suas umidades não fossem alteradas; ou mesmo mantidos ao ar em temperatura ambiente. Os valores das temperaturas dos materiais estão apresentados na Tabela 3.3. Essas temperaturas foram mensuradas com um termômetro digital para alimentos modelo Tp-101, com faixa de medição de temperatura de -45°C a 230°C em aço inoxidável e com um termômetro a laser modelo TTI-812 da marca Titan. As temperaturas apresentadas na Tabela 3.3 foram obtidas por meio de média dos valores mostrados em cada um dos termômetros. Os dois modelos de termômetros são mostrados na Figura 3.2.

Tabela 3.3 – Temperaturas dos materiais aferidas imediatamente antes das dosagens

Material	Temperaturas dos materiais em °C					
	Grupo 1			Grupo 2		
	C32	C15	C38	C32-nS	C15-nS	C38-nS
Cimento	24,67	28,63	28,63	24,67	29,73	27,78
Água	28,80	16,50	29,80	28,80	13,10	29,30
Areia fina	24,90	-6,75	49,20	24,90	-8,88	46,57
Areia grossa	25,03	-8,67	51,81	25,03	-12,07	49,66
Brita 12,5mm	24,42	-13,47	49,53	24,42	-12,63	50,14
Brita 25mm	25,48	-16,82	55,14	25,48	-17,82	58,22

As temperaturas iniciais dos concretos, após determinadas, foram atingidas por método de tentativas, ou seja, os materiais eram submetidos ao resfriamento ou aquecimento em diferentes temperaturas e misturados. As temperaturas das misturas eram aferidas e conforme a necessidade da situação, a mistura era descartada e um novo concreto era dosado seguindo o mesmo método.

Os aditivos e a sílica ativa não tiveram suas temperaturas aferidas, pois conforme especificado pela Comissão 305 (ACI, 2013), suas proporções não são suficientes a ponto de gerar alterações de temperatura consideráveis no concreto.

A água dos concretos frios foi resfriada com auxílio de barras de gelo sendo lançada na betoneira em seu estado líquido nas temperaturas já discriminadas.



Figura 3.2 – Termômetros utilizados na pesquisa.

### 3.4 PERDA DE ABATIMENTO

Os ensaios de avaliação de perda de abatimento dos concretos foram realizados conforme regulamentação da NBR 10342 (ABNT, 2012), que apresenta a aparelhagem necessária, os requisitos e limites de temperatura e umidade do ar e o procedimento de execução do ensaio. A NBR NM 67 (ABNT, 1998) foi utilizada como base para a determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.

A NBR 10342 (ABNT, 2012) regimenta que, quando forem comparativos, os ensaios devem ser realizados no mesmo dia e as temperaturas do ambiente e umidades do ar devem ser aferidas a cada medição do abatimento. No entanto, em função do número de concretos confeccionados nesta pesquisa, os ensaios foram realizados em dias diferentes e as temperaturas do ambiente e umidades do ar foram aferidas em cada determinação de consistência e não se extrapolaram os períodos de variações aceitáveis pela norma que são de 2°C e 5%, respectivamente.

#### 3.4.1 Procedimento de avaliação do abatimento e temperatura

Depois de aferidas as temperaturas dos materiais, o agregado graúdo foi lançado na betoneira com 1/3 da água de amassamento e misturado por dois minutos; seguido pelo agregado miúdo e mais 1/3 da água, novamente misturados por mais dois minutos; o cimento, a sílica ativa e o restante da água foram inseridos subsequentemente e foram misturados por mais três minutos; por fim, o aditivo plastificante multifuncional foi adicionado ao concreto, que foi misturado novamente por mais dois minutos (ASTM C 192, 2014). Imediatamente após a completa homogeneização dos componentes, foi determinado o abatimento inicial. Os valores dos abatimentos obtidos sem o uso dos aditivos superplastificantes estão apresentados no tópico de resultados da pesquisa.

O concreto foi lançado de volta na betoneira, o aditivo superplastificante foi adicionado e a betoneira foi acionada por mais um minuto. A mistura foi deixada em repouso por dez minutos e, posteriormente, misturada por mais dois minutos (NBR 10342, ABNT 2012). O novo abatimento foi determinado e o processo se repetiu em

períodos de quinze minutos em prazos totais independentes e determinados pela trabalhabilidade de cada mistura.

A betoneira utilizada possui capacidade de 120 litros e o espaço utilizado para a pesquisa foi o Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal de Goiás. Durante os momentos de homogeneização da mistura, a betoneira ficou tampada com um tecido sintético umidificado a fim de reduzir quaisquer influências da umidade relativa do ar no ensaio respeitando os limites de norma. As umidades do ar e as temperaturas dos concretos foram mensuradas dentro da betoneira conforme apresentado na Figura 3.3.

A cada determinação de consistência, foram verificadas as temperaturas do concreto com o termômetro digital para alimentos. Os valores obtidos estão apresentados nos resultados da pesquisa. A NBR 10342 (ABNT, 2012) informa que o ensaio pode ser encerrado quando o concreto apresentar abatimento de  $20 \pm 10$  mm ou à critério da obra. Neste caso, em todas as misturas, o ensaio era encerrado quando as mesmas atingiam abatimento de  $50 \pm 10$  mm ou inferior, pois as misturas deveriam apresentar consistência tal que permitisse a moldagem dos corpos-de-prova. A Figura 3.3 retrata o método de verificação de abatimento do concreto fresco.

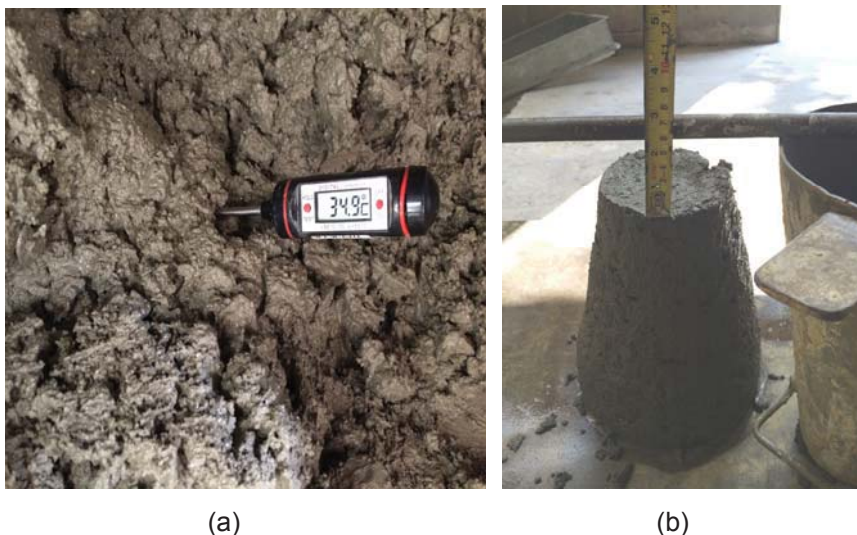


Figura 3.3 – Verificações da temperatura (a) e do abatimento do concreto fresco (b).

### 3.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Depois de finalizados os ensaios de verificação do abatimento, foram moldados corpos-de-prova (CPs) cilíndricos 10 cm de diâmetro 20 cm de altura conforme determinado pela NBR 5738 (ABNT, 2015). Assim que foram moldados, esses CPs foram identificados e transferidos para uma sala reservada protegida de intempéries e cobertos com material sintético, ficando por 24 horas sobre uma superfície horizontal rígida e livre de vibrações.

Decorridas as 24 horas, os corpos-de-prova foram retirados das formas de metal, novamente identificados e transferidos para o tanque de cura na câmara úmida do laboratório. Os CPs foram mantidos no tanque em processo de cura até o dia anterior ao ensaio de resistência à compressão, sendo submetidos ao processo de retificação de topo em máquina especialmente adaptada para essa finalidade, garantindo superfícies lisas e livres de ondulações e abaulamentos. Além da retificação dos topos dos corpos-de-prova, foi utilizado o neoprene a fim de se garantir melhor distribuição de carga durante o ensaio.

Depois que as bases dos corpos-de-prova foram preparadas, eles foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial aos 28 dias conforme estabelecido na NBR 5739 (ABNT, 2007). Os valores de resistência à compressão foram calculados e estão dispostos no tópico de resultados e discussões. A Figura 3.4 mostra os corpos-de-prova identificados antes e durante o ensaio de resistência à compressão axial.

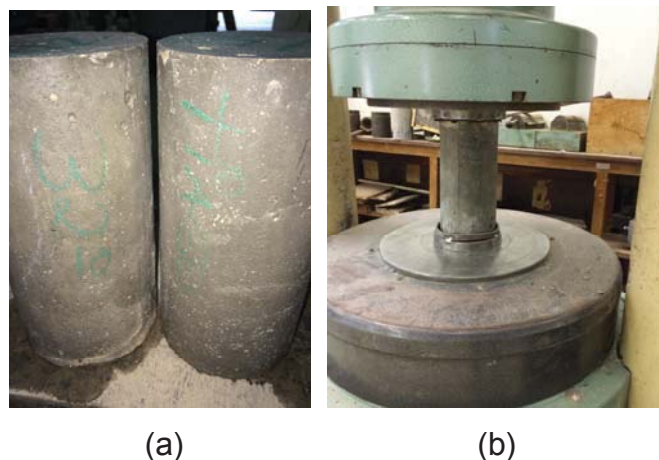


Figura 3.4 – Corpos-de-prova antes (a) e durante (b) o ensaio de resistência à compressão axial.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 ABATIMENTOS E TEMPERATURA ANTES DO SUPERPLASTIFICANTE

Partindo das temperaturas a serem atingidas pelos concretos, foi realizada uma série de testes de confecção dos concretos a fim de se determinar as temperaturas ideais dos materiais inseridos nas misturas.

A Tabela 4.1 apresenta os abatimentos e as temperaturas iniciais dos concretos, isto é, primeiras medidas tomadas após a molhagem das partículas de cimento sem adição do aditivo superplastificante.

Tabela 4.1 – Abatimentos e temperaturas dos concretos sem adição do superplastificante

Concreto	Grupo 1			Grupo 2		
	C32	C15	C38	C32-nS	C15-nS	C38-Ns
Temperatura inicial (°C)	31,10	13,90	38,50	30,20	13,50	37,90
Abatimento (mm)	28	21	29	24	15	25

#### 4.1.1 Análise dos resultados

As misturas foram produzidas com diferentes temperaturas e quanto mais elevadas eram as temperaturas maiores foram os abatimentos iniciais. Uma das possíveis causas deste efeito é o rápido consumo da água pelas reações químicas, formando rapidamente cristais de C-S-H com uma estrutura mais pobre e menos uniforme, portanto, garantindo maior abatimento inicial às misturas mais quentes (GURLEY, 2008; KJELLEN; DETWILER, 1992 *apud* LOTHENBACH *et al*, 2007; NEVILLE; BROOKS, 2013). Para afirmação quanto à origem deste efeito, futuros estudos devem ser realizados com foco na análise deste caso em específico. A Figura 4.1 apresenta um fluxograma simplificado do efeito da temperatura nos concretos antes da adição do aditivo superplastificante.

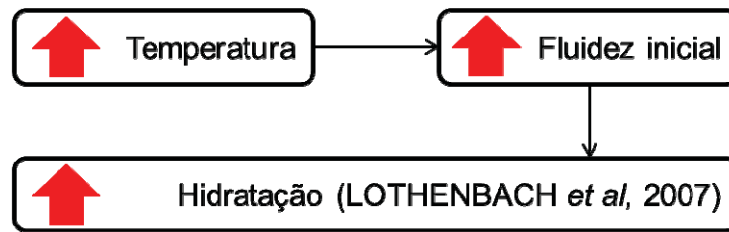


Figura 4.1 – Fluxograma simplificado do efeito da temperatura dos concretos antes da adição do aditivo superplastificante.

#### 4.2 ABATIMENTOS E TEMPERATURAS APÓS SUPERPLASTIFICANTE

Depois de verificados os dados iniciais, foram coletados os dados referentes às perdas de abatimento em função das temperaturas de cada mistura após a adição do aditivo superplastificante. Todos os dados de perda de abatimento e temperatura dos concretos após adição do aditivo superplastificante utilizados para elaboração dos gráficos estão apresentados na Tabela C.1, disponível no Apêndice C.

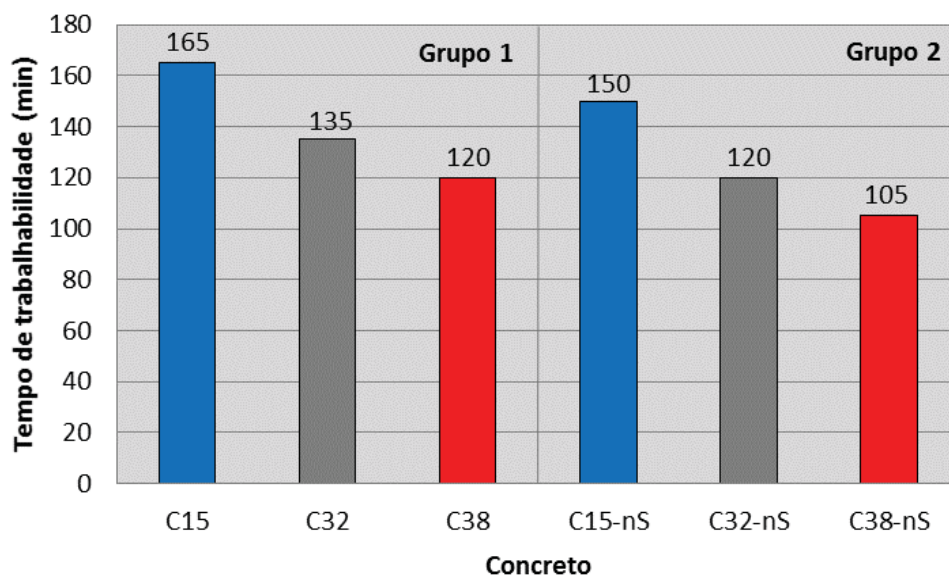


Figura 4.2 – Tempo de trabalhabilidade das misturas.

A Figura 4.2 apresenta os tempos de trabalhabilidade totais obtidos em cada uma das misturas com desvio padrão. Nesta pesquisa, o termo ‘tempo de trabalhabilidade’ refere-se ao período decorrido entre o abatimento inicial, após

adição do aditivo superplastificante, e o momento em que as misturas atingiam abatimento de  $50 \pm 10$  mm, conforme apresentado no tópico de procedimento de avaliação da perda de abatimento.

De forma a avaliar a tendência de estabilização das temperaturas dos concretos nas primeiras horas em função dos abatimentos obtidos, as Figuras 4.3 e 4.4 correlacionam estas duas grandezas para os Grupos de dosagem 1 e 2, respectivamente, apresentando os valores obtidos após a adição do aditivo superplastificante.

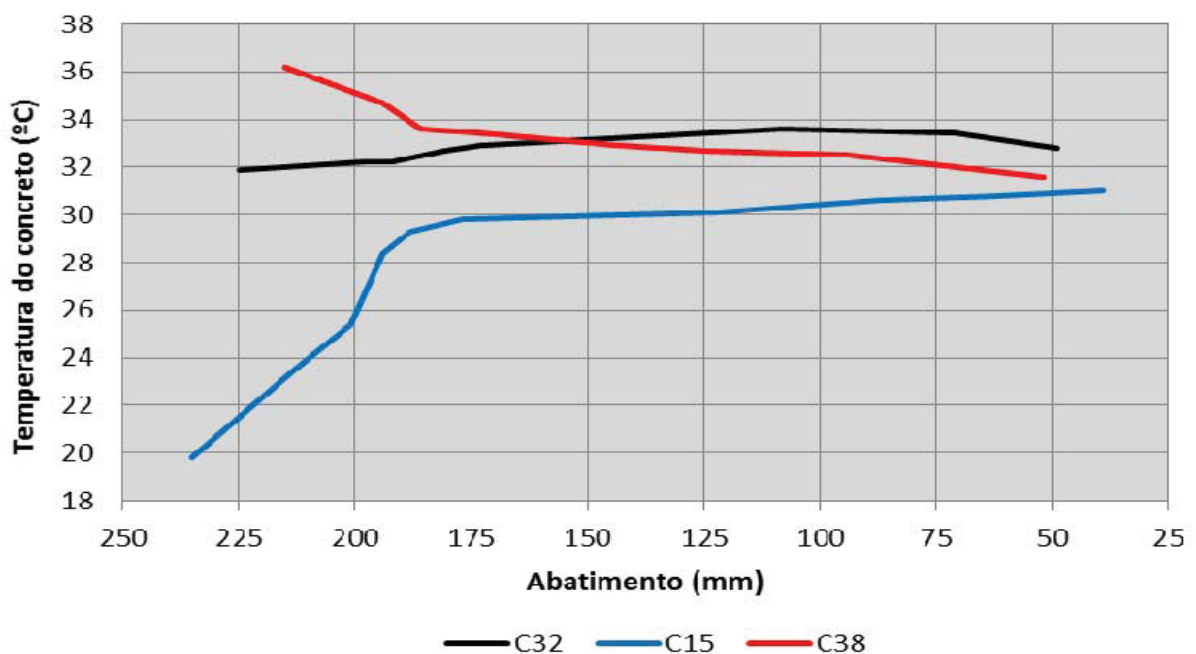


Figura 4.3 – Relação temperatura e abatimento das misturas do Grupo 1.

As evoluções das temperaturas dos concretos foram analisadas separadamente com o objetivo de se verificar o impacto da adição de nano-sílica nas variações das temperaturas das misturas. A Figura 4.5 mostra a evolução das temperaturas de todos os concretos nas primeiras horas, após a adição do superplastificante. A região em branco do gráfico representa o período de  $24^{\circ}\text{C}$  a  $38^{\circ}\text{C}$  estabelecido pela Comissão 305 (ACI, 2013) como sendo o período de temperatura admissível para produção e uso dos concretos em condições de clima quente.

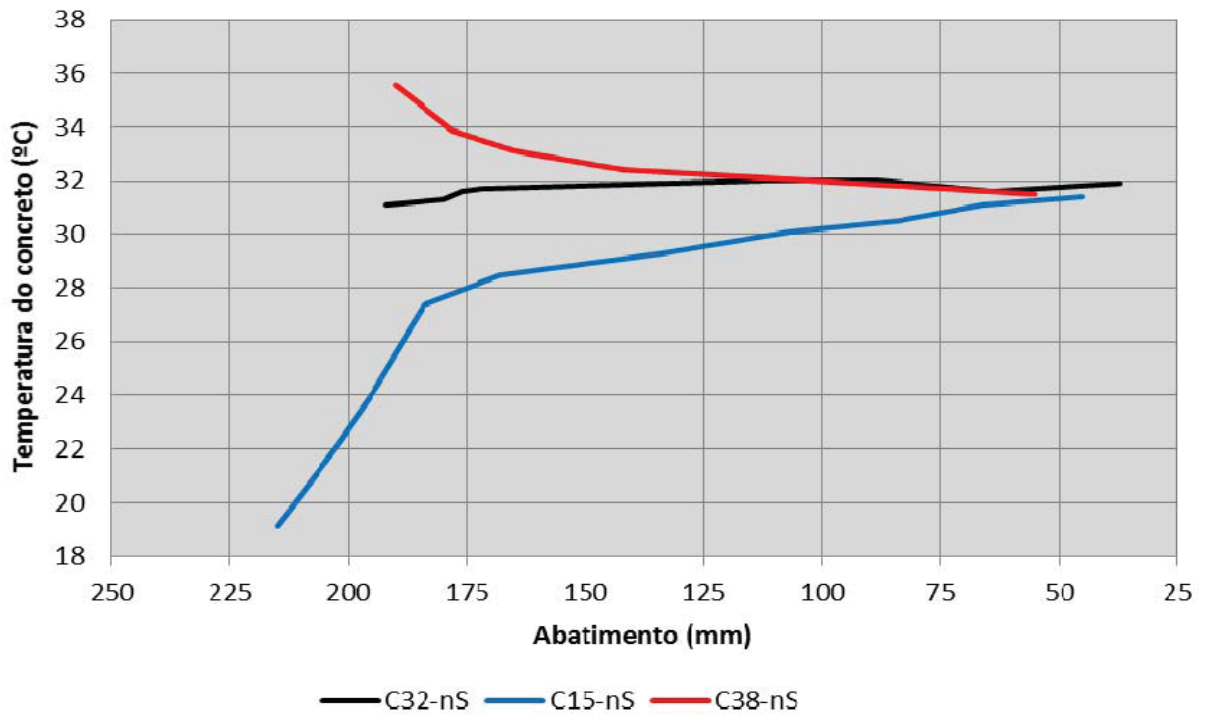


Figura 4.4 – Relação temperatura e abatimento das misturas do Grupo 2.

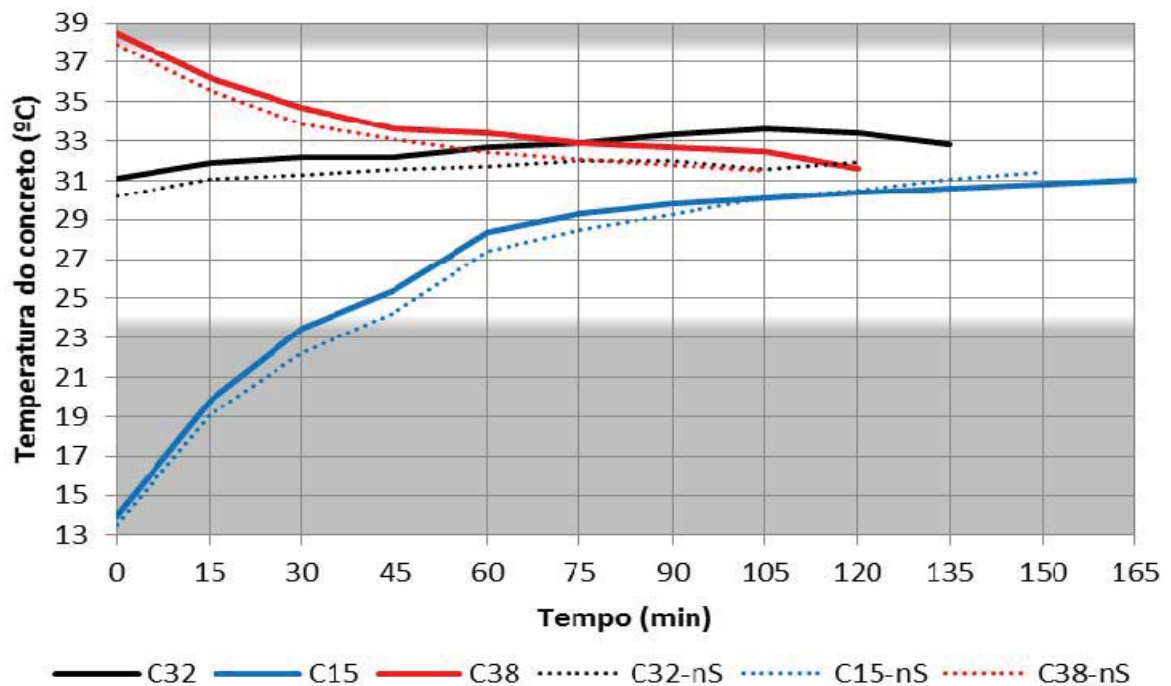


Figura 4.5 – Evolução das temperaturas dos concretos nas primeiras horas.

Por fim, a Figura 4.6 apresenta a evolução da manutenção da consistência de todos os concretos da pesquisa. Sob um aspecto geral pode concluir que todas as misturas com nano-sílica apresentaram perda de abatimento mais acelerada se comparadas às suas respectivas misturas sem nano-sílica na composição e os

concretos com temperaturas mais baixas apresentaram melhor desempenho e mais tempo de trabalhabilidade disponível para manuseio.

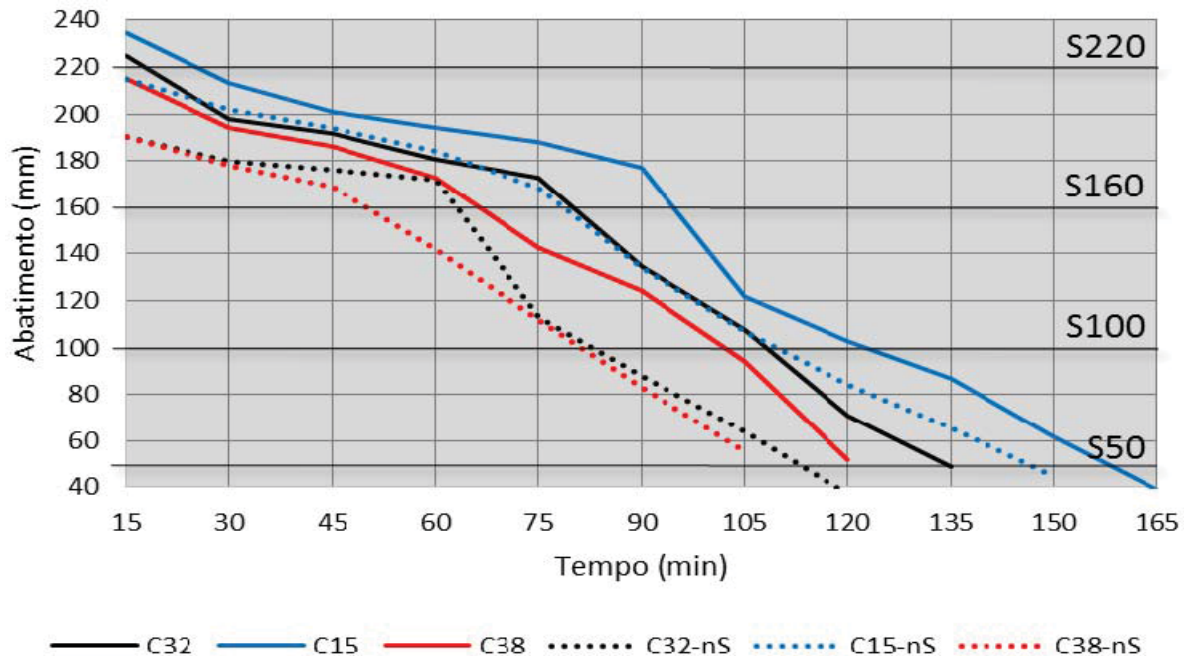


Figura 4.6 – Evolução dos abatimentos dos concretos.

#### 4.2.1 Análise dos resultados

Sob um aspecto mais amplo, os concretos que apresentaram maior tempo de manutenção de abatimentos foram os C15 e C15-nS, já os concretos que obtiveram menores tempos de trabalhabilidade foram os C38 e C38-nS. Os concretos C32 e C32-nS obtiveram tempos intermediários de trabalhabilidade.

Os concretos dosados com os materiais em temperatura ambiente e resfriados apresentaram temperaturas iniciais das misturas dentro dos valores trabalváveis estipulados pelas normas norte americanas, ou seja, não ficaram abaixo de 7°C (ACI Committee 306, 2010) e nem acima de 38°C (ACI Committee 305, 2013). Destes concretos, o C15 e o C15-nS obtiveram maior trabalhabilidade, seguidos de C32 e C32-nS. Já os concretos dosados com os materiais aquecidos, C38 e C38-nS, atingiram temperatura acima dos valores máximo estipulados nas mesmas normas e, de fato, sua manipulação foi dificultada e sua trabalhabilidade reduzida.

Apesar dos abatimentos medidos antes da adição do aditivo superplastificante serem maiores, os concretos dosados com elevadas temperaturas tendem a perder abatimento mais rapidamente conforme apresentado na Figura 4.2. Algumas das possíveis causas deste efeito são: rápida absorção de parte da água pelos agregados, que são lançados na mistura em estado seco; perda da água de amassamento por evaporação, que pode ser potencializada por baixas umidades relativas; e, aumento da taxa de hidratação do cimento. Entretanto, estudos futuros são necessários para se afirmar o impacto de cada fator no comportamento das misturas.

Comparando os concretos do Grupo 1 com os do Grupo 2, as misturas produzidas com nano-sílica, quando comparadas com as misturas produzidas com as mesmas temperaturas sem nano-partículas, apresentaram maiores perdas de abatimento. A inclusão da nano-sílica aumenta a coesão da mistura, fazendo com que a mesma se torne menos trabalhável, resultando em concretos menores prazos para execução de todas as etapas desde a produção até o acabamento. O concreto C32-nS apresentou trabalhabilidade compatível com o concreto C38, portanto, para os concretos com o traço utilizado nesta pesquisa, o uso da nano-sílica deve ser previamente estudado a fim de se evitar problemas com a mistura, transporte e lançamento dos concretos nas obras. Controlar a temperatura do concreto pode ser uma solução para este problema, mantendo-a o mais baixo possível podendo assim, garantir tempos prolongados de trabalhabilidade.

De modo geral, os concretos produzidos com aditivo superplastificante com nano-sílica (Grupo 2) na composição apresentaram perda de quinze minutos na trabalhabilidade se comparados com os respectivos produzidos sem a adição mineral (Grupo 1).

O controle da temperatura do concreto, seja com nano-sílica ou não, proporcionou um ganho de até 45 minutos na trabalhabilidade das misturas resfriadas em relação às aquecidas. Nos concretos do Grupo 1, a diferença de temperatura inicial de 24,6°C proporcionou tal ganho, enquanto que no Grupo 2, o ganho foi proporcionado pela diferença de 24,4°C, ou seja, a adição da nano-sílica tornou a mistura mais coesa resultando em menor abatimento inicial, no entanto não afetou a velocidade da perda de abatimento dos concretos.

Analisando-se os comportamentos dos concretos dos Grupos 1 e 2, à uma temperatura ambiente de  $31 \pm 2^\circ\text{C}$  e umidade relativa do ar de  $39 \pm 4\%$ , uma redução de  $17 \pm 1^\circ\text{C}$  na temperatura inicial do concreto pode prolongar sua trabalhabilidade por até trinta minutos, possibilitando um aumento de tempo de transporte das misturas dosadas em centrais. Já no caso de elevação da temperatura inicial da mistura em  $7 \pm 1^\circ\text{C}$ , o tempo de trabalhabilidade pode ser reduzido em até quinze minutos, reduzindo o tempo disponível para produção, transporte e lançamento do concreto. Os valores das diferenças de trabalhabilidade e temperatura inicial dos concretos dos Grupos 1 e 2 estão dispostos nas Tabelas 4.2 e 4.3, respectivamente.

Partindo do princípio que os comportamentos dos concretos dos Grupos 1 e 2 foram semelhantes, e considerando as perdas de trabalhabilidade lineares em função das variações próximas de temperatura, a elevação de  $1^\circ\text{C}$  na temperatura inicial de uma mistura com estas especificações pode causar uma redução de mais de dois minutos no tempo de trabalhabilidade, enquanto que ao reduzir  $1^\circ\text{C}$  na temperatura inicial, o tempo de trabalhabilidade pode ser estendido em até um minuto e 45 segundos. Isso prova que o concreto, quando submetido a situações de clima quente, é mais sensível às variações de elevação de temperatura, pois sua perda de consistência relativa ao aumento de  $1^\circ\text{C}$  chega a ser 20% maior do que quando sua temperatura é reduzida na mesma proporção.

Tabela 4.2 – Diferenças de trabalhabilidade e temperatura inicial dos concretos do Grupo 1

Coluna	C32	C15	C38	Diferença de trabalhabilidade (min)		Diferença de temperatura ( $^\circ\text{C}$ )	
	(1)	(2)	(3)	(2) - (1)	(1) - (3)	(1) - (2)	(3) - (1)
Tempo de trabalhabilidade total (min)	135	165	120	30	15	-	-
Temperatura inicial da mistura ( $^\circ\text{C}$ )	31,10	13,90	38,50	-	-	17,20	7,40

Os concretos dosados com os materiais em temperatura ambiente, C32 e C32-nS, apresentaram índices de trabalhabilidade mais próximos dos concretos

dosados com os materiais aquecidos, o que mostra que em condições de clima típicos de Goiânia, é fundamental a realização do controle da temperatura das misturas, limitando o valor máximo à aproximadamente 32°C, conforme estabelecido pela Comissão 318 (ACI, 2014) e pela Designação C 94 (ASTM, 2015), pois quando dosados abaixo dessa temperatura, os concretos obtêm considerável ganho na manutenção da consistência.

Tabela 4.3 – Diferenças de trabalhabilidade e temperatura inicial dos concretos do Grupo 2

Coluna	C32- nS	C15- nS	C38- nS	Diferença de trabalhabilidade (min)		Diferença de temperatura (°C)	
	(1)	(2)	(3)	(2) - (1)	(1) - (3)	(1) - (2)	(3) - (1)
Tempo de trabalhabilidade total (min)	120	150	105	30	15	-	-
Temperatura inicial da mistura (°C)	30,20	13,50	37,90	-	-	16,70	7,70

Os concretos dosados em temperatura ambiente não variaram a temperatura mais que 2°C, tendo um ganho inicial e subsequente redução. Todos os concretos tenderam a estabilizar a temperatura no valor próximo ao da temperatura ambiente,  $31 \pm 2^\circ\text{C}$ , reduzindo a possibilidade de surgimento de problemas referentes à retração térmica e respeitando os limites das normas brasileiras referentes à diferenças de temperatura do concreto e do ar.

Os concretos frios de ambos grupos de dosagem, apresentaram comportamento semelhante, sendo que até atingirem abatimento próximo de 170 mm, a velocidade de perda de abatimento se apresentou reduzida e o ganho de temperatura acelerado e, a partir desse ponto, a velocidade de perda de abatimento se igualou à dos concretos produzidos em temperatura ambiente e a temperatura começou a estabilizar. Os concretos quentes, por sua vez, apresentaram velocidade reduzida de perda de abatimento apenas até próximo de 160 mm com redução acelerada da temperatura nesse período. A partir desse ponto, a temperatura começa a cair mais lentamente enquanto que o abatimento começa a sofrer uma

perda mais acelerada. Este efeito também pode ser visualizado nas Figuras 4.3 e 4.4.

Tomando a temperatura como parâmetro, em todos os casos, os concretos tenderam a perder abatimento com maior velocidade a partir do momento em que atingiam o período de diferença de 3°C da temperatura ambiente. Logo, como em todas as dosagens a temperatura do ar era de aproximadamente 31°C, os concretos resfriados tenderam a perder consistência mais rapidamente a partir de 28°C e os concretos aquecidos ao atingir 34°C.

No caso do concreto C15-nS, a partir do momento em que a velocidade de perda de abatimento cresce, a temperatura começa a estabilizar, no entanto, seu período de estabilização é maior em função da presença da nano-sílica na composição da mistura que, possivelmente, controla as reações de hidratação desacelerando a variação da temperatura. Este efeito pozolânico da nano-sílica deve ser devidamente estudado para que seja possível quantificar o efeito da adição no controle da temperatura. Neste concreto, a temperatura começa a se estabilizar aos 27°C, enquanto que no C15 a temperatura começa a se estabilizar a partir dos 29°C, aproximadamente.

De modo geral, todos os concretos do Grupo 2 apresentaram menores valores de temperatura. Este fato pode ser visualizado na Figura 4.5. Ainda na mesma Figura, pode ser visto que em um prazo máximo de aproximadamente 40 minutos, os concretos resfriados atingiram temperaturas dentro do período considerável adequado pela Comissão 305 (ACI, 2013), ou seja, atingiram o limite mínimo de 24°C.

A presença da nano-sílica prejudicou a manutenção do abatimento, conforme mostrado na Figura 4.6. A perda de consistência foi considerável, pois o concreto aquecido sem nano-sílica (C38) apresentou valores de abatimento inicial e final maiores que o concreto C32-nS, com nano-sílica produzido com temperaturas normais.

Analisando a consistência dos concretos dentro do período de abatimentos aceitáveis para a classe destes concretos (S160), a mistura C15 apresentou o maior tempo de trabalhabilidade atingindo cem minutos, seguida das misturas C15-nS e C32 que apresentaram comportamento semelhante e atingiram oitenta minutos de trabalhabilidade total. A mistura C38, mesmo tendo sido dosada com maior

temperatura, apresentou maior tempo de trabalhabilidade que a mistura C32-nS. Por fim, a mistura menos trabalhável foi a C38-nS que atingiu 50 minutos no total. Estes resultados atestam que a temperatura tem efeito sobre a perda de abatimento dos concretos frescos. A Figura 4.6 apresenta todos os abatimentos atingidos em função do tempo com identificação das classes de consistência dos concretos.

### 4.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

As Como objetivo específico, foi estabelecido que as resistências mecânicas dos concretos aos 28 dias seriam mensuradas e analisadas. Tais resultados de resistência à compressão axial estão apresentados na Figura 4.7 com desvio padrão dos valores.

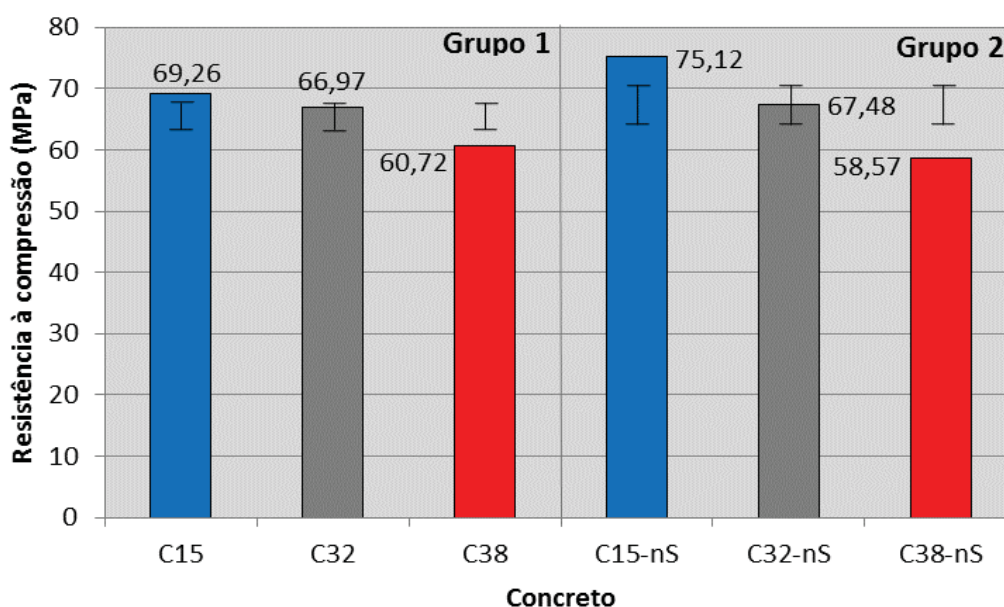


Figura 4.7 – Resistência à compressão aos 28 dias.

#### 4.3.1 Análise dos resultados

Nos dois grupos, os concretos aquecidos atingiram menores valores de resistência e os concretos resfriados atingiram maiores resistências à compressão, ou seja, quanto maior a temperatura do concreto, maior será o desenvolvimento da

resistência inicial, mas menor a resistência mecânica a longo prazo (KJELLEN; DETWILER, 1992 *apud* LOTHENBACH *et al*, 2007). Com a temperatura inicial alta, não há tempo disponível suficiente para que os produtos de hidratação se afastem dos grãos de cimento e para uma precipitação uniforme nos espaços intersticiais. Como resultado, a concentração de produtos hidratados se localiza nas proximidades dos grãos de cimento em hidratação, o que acaba retardando a hidratação subsequente e, com isso, o desenvolvimento da resistência em longo prazo.

Como já esperado, os concretos do Grupo 2 atingiram maiores resistências aos 28 dias devido à existência de nano-sílica na composição das misturas, salvo caso do concreto C38-nS, que apresentou resistência à compressão menor que o concreto C38 do Grupo 1. Esse resultado pode ser explicado pelo ganho de temperatura resultante da aceleração das reações de hidratação causada pela elevada superfície específica da nano-sílica, que atua como ponto de nucleação para hidratação do cimento (SAID *et al*, 2012).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Fundamentando-se na revisão bibliográfica, pesquisa laboratorial, análises e discussões dos resultados, nota-se que os concretos mais quentes perdem abatimento mais rapidamente. Este efeito pode ser causado por uma série de fatores, como por exemplo, aceleração da velocidade de hidratação inicial e aumento das taxas de evaporação e de consumo da água de amassamento pelas reações do cimento. Entretanto, mais estudos devem ser realizados com o objetivo de analisar o impacto de cada fator na evolução da perda de abatimento de concretos frescos.

Concretos dosados com temperaturas reduzidas tendem a apresentar taxas de perda de abatimento prolongadas em relação a concretos dosados com temperaturas mais altas. Esse ganho de tempo permite que as centrais de dosagem alcancem obras mais distantes reduzindo a possibilidade de surgimento de problemas durante o transporte, lançamento e adensamento *in loco* ou, até mesmo, evitando problemas decorrentes de atrasos nas concretagens.

Todos os concretos produzidos com nano-sílica tiveram o tempo de manutenção do abatimento reduzido e apresentaram menores índices de temperatura. Os menores índices térmicos são importantes para o prolongamento do tempo de perda de abatimento e, conseqüentemente, melhora da trabalhabilidade dos concretos, além de colaborar positivamente com a redução dos efeitos adversos causados pelas elevadas temperaturas.

A resistência à compressão em longo prazo de um concreto produzido com elevada temperatura tende a ser reduzida. Todos os pesquisadores que estudaram a causa dessa redução afirmam que o elevado grau de hidratação do cimento acaba formando uma estrutura mais porosa e frágil. Esta estrutura mais heterogênea garante apenas resistências iniciais elevadas, não colaborando com a evolução da resistência ao longo do tempo.

Durante a preparação dos materiais para as dosagens experimentais, foi notado que aquecer apenas a água a fim de elevar a temperatura do concreto só será eficaz até a mistura atingir aproximadamente 35°C, sendo que a partir desta temperatura, a técnica de aquecer apenas a água não alterará a temperatura do concreto de maneira significativa. Esta constatação vai de acordo com a Comissão

305 (ACI, 2013), que afirma que alterar mais que 4,5°C da temperatura do concreto modificando apenas a temperatura da água pode ser complicado em função da sua quantidade.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para próximas pesquisas, sugere-se um estudo de análise da relação existente entre a reatividade pozolânicas das nano-sílicas com a evolução e controle da temperatura das misturas de concreto.

Outro estudo pode ser realizado focando-se em uma análise quantitativa e qualitativa dos efeitos da nano-sílica na trabalhabilidade dos concretos frescos, verificando sua perda de abatimento, tensão de escoamento e viscosidade. Este estudo pode ser aplicado a diferentes tipos de concretos que contenham nano-sílica na composição.

Uma das formas de se estimar a temperatura de uma mistura de concreto é utilizar a Equação 2.1 apresentada pela Comissão 305 (ACI, 2013), lançando dados dos materiais constituintes, como por exemplo, temperatura e massa. Se faz interessante avaliar a aplicabilidade desta equação aos concretos dosados no Brasil, país de clima diferente do país de origem da Comissão. Neste estudo poderia ser proposta uma fórmula adequada para os padrões brasileiros de dosagem.

El-Baky, Yehia e Khalil (2013) avaliaram a fluidez de argamassas com diferentes teores de nano-sílica e constataram que quanto maior o teor de nanopartículas, menor será a fluidez. No entanto, ao atingir teor de 10%, o comportamento da mistura é alterado e a fluidez volta a aumentar. Seria importante avaliar o efeito da adição de nano-sílica em teores acima de 10% na fluidez de argamassas e concretos a fim de constatar tal comportamento. Caso o comportamento seja semelhante ao dos pesquisadores citados, pode ser importante explicar a razão pela qual a fluidez dos concretos frescos oscila com diferentes teores de nano-sílica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, J. D. **Manual de Tecnologia do Concreto**. 3. ed. Goiânia: UFG, 1993.

ALVES, J. D. **Materiais de Construção**. 8. ed. Goiânia: UFG e PUC, 2006.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **COMMITTEE 305**: Guide to Hot Weather Concreting. Farmington Hills, Michigan, 2013.

\_\_\_\_\_. **COMMITTEE 306**: Cold Weather Concreting. Farmington Hills, Michigan, 2010.

\_\_\_\_\_. **COMMITTEE 318**: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. Farmington Hills, Michigan, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Designation C 94**: Standard Specification for Ready-Mixed Concrete. West Conshohocken, Pensilvânia, 2015.

\_\_\_\_\_. **Designation C 494**: Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. West Conshohocken, Pensilvânia, 2013.

\_\_\_\_\_. **Designation C 192**: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. West Conshohocken, Pensilvânia, 2014.

AREL, H. S.; YAZICI, S. Effect of Different Parameters on Concrete-Bar Bond under High Temperature. **ACI Materials Journal**, v. 111, n. 6, p. 633-639, 2014.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 7212**: Execução de concreto dosado em central. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 10342**: Concreto – Perda de abatimento – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 11578**: Cimento Portland composto – Especificação. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 11579**: Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2012.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 14931**: Execução de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 16372**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015.

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

\_\_\_\_\_. **NBR NM 49:** Agregado miúdo – Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52:** Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53:** Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

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

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

\_\_\_\_\_. **NBR NM ISO 3310-1:** Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificação. Rio de Janeiro, 2010.

BASHAM, K. D. Hot weather affects fresh concrete. **The Aberdeen Group**, Publication #C920523, 1992.

BASTAMI, M.; BAGHBADRANI, M.; ASLANI, F. Performance of nano-Silica modified high strength concrete at elevated temperatures. **Cement and Building Materials**, n. 68, p. 402-408, 2014.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção:** Novos Materiais para Construção Civil. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, n. 1, 2009.

BURG, R. G.; OST, B. W. Engineering Properties of Commercially Available High-Strength Concretes (Including Three-Year Data). **Research and Development Bulletin RD104**, Portland Cement Association, 62 p., 1994.

CINCOTTO, M. A. Reações de Hidratação e Pozolânicas. In: ISAIA, G. C. (Ed.) **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, n. 1, p. 381-414, 2011.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais. In: ISAIA, G. C. (Ed.) **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, n. 1, p. 261-309, 2011.

EL-KABY, S. ABD.; YEHA, S.; KHALIL, I. S. Influence of nano-silica addition on properties of fresh and hardened cement mortar. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NANOMATERIALS – RESEARCH AND APPLICATION, 5., 2013, Brno. **Anais eletrônicos...** Brno: Tanger, 2013. Disponível em:

<[http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=10&ved=0CGwQFjAJ&url=http%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Fpublictopics.PublicPostFileLoader.html%3Fid%3D52e3b135d4c1186f678b460e%26key%3D60b7d52e3b135e9bb4&ei=SeEGVcesBsOXgwS5wYGgCA&usg=AFQjCNG7ixVID2NqQ3Yfu2FLoX9Sem\\_sCg&sig2=4gAlujZ0e4fBju1MpFHqwQ](http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=10&ved=0CGwQFjAJ&url=http%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Fpublictopics.PublicPostFileLoader.html%3Fid%3D52e3b135d4c1186f678b460e%26key%3D60b7d52e3b135e9bb4&ei=SeEGVcesBsOXgwS5wYGgCA&usg=AFQjCNG7ixVID2NqQ3Yfu2FLoX9Sem_sCg&sig2=4gAlujZ0e4fBju1MpFHqwQ)>. Acesso em: 16 mar. 2015.

FERNÁNDEZ-ALTABLE, V.; CASANOVA, I. Influence of mixing sequence and superplasticizer dosage on the rheological response of cement pastes at different temperatures. **Cement and Concrete Research**, n. 36, p. 1222-1230, 2006.

FERRO, B. **Diário da Região Online**: Obra do centro radioterápico consome 61 toneladas de gelo. São José do Rio Preto, 23 jan. 2015. Disponível em: <http://www.diariodaregiao.com.br/cidades/obra-de-centro-radioter%C3%A1pico-consome-61-toneladas-de-gelo-1.8601>. Acesso em: 21 maio 2015.

FREITAS JUNIOR, J. A. **Materiais de Construção: Tecnologia em Concreto**. Universidade Federal do Paraná, 2013. Disponível em: [http://www.dcc.ufpr.br/mediawiki/images/a/aa/TC031\\_Novas\\_tecnologiasB\\_.pdf](http://www.dcc.ufpr.br/mediawiki/images/a/aa/TC031_Novas_tecnologiasB_.pdf). Acesso em: 24 maio 2015.

GHAFOORI, N.; DIAWARA, H. Influence of temperature on fresh performance of self-consolidating concrete. **Cement and Building Materials**, n. 24, p. 946-955, 2010.

GHANI, U.; SHABBIR, F.; KHAN, K. M. Effect of Temperature on Different Properties of Concrete. In: *Our World in Concrete & Structures*, 31., 2006, Singapura. **Anais...** Singapura: Singapore Concrete Institute, 2006.

GLEIZE, P. J. P. Nanociência e Nanotecnologia dos Materiais Cimentícios. In: ISAIA, G. C. (Ed.) **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, n. 2, p. 1871-1884, 2011.

GURLEY, E. How to keep on pouring when the temperature's soaring. **Precast Inc. Magazine**, National Precast Concrete Association, 2008.

HAGER, I. Behaviour of cement concrete at high temperature. **Bulletin of the Polish Academy of Sciences**, Technical Sciences, v. 61, n. 1, p. 145-154, 2013.

HARTMANN, C.; JEKNAVORIAN, A.; SILVA, D.; BENINI, H. Aditivos Químicos para Concretos e Cimentos. In: ISAIA, G. C. (Ed.) **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, n. 1, p. 347-380, 2011.

INSTITUTO NACIONAL DE DEFENSA DE LA COMPETENCIA Y DE LA PROTECCIÓN DE LA PROPIEDAD INTELECTUAL. **NTP 339.184**: Hormigón – Método de ensayo normalizado para determinar la temperatura de mezclas de hormigón (concreto). Lima, 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACION. **NCh 170**: Hormigón – Requisitos generales. Santiago, 1985.

JIANG, J.; YUAN, Y. Relationship of moisture content with temperature and relative humidity in concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 65, n. 11, p. 685-692, 2013.

JIANG, S.; KIM, B. G.; AİTCIN, P. C. A Practical Method to Solve Slump Loss Problem in PNS Superplasticized High-Performance Concrete. **Cement, Concrete and Aggregates**, v. 22, n. 1, p. 10-15, 2000.

KIM, J. J.; RAHMAN, M. K.; AL-MAJED, A. A.; AL-ZAHRANI, M. M.; TAHA, M. M. R. Nanosilica effects on composition and silicate polymerization in hardened cement paste cured under high temperature and pressure. **Cement and Concrete Research**, n. 43, p. 78-85, 2013.

KOSMATKA, S. H.; KERKHOFF, B.; PANARESE, W. C. **Design and Control of Concrete Mixtures**. 14. ed. Skokie: Portland Cement Association, 2003.

LOTTHENBACH, B.; WINNEFELD, F.; ALDER, C.; WIELAND, E.; LUNK, P. Effect of temperature on the pore solution, microstructure and hydration products of Portland cement pastes. **Cement and Concrete Research**, n. 37, p. 483-491, 2007.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2014.

MINDESS, S.; YOUNG, J. F. **Concrete**. New Jersey: Prentice-Hall Inc., 1981.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Concreto Massa no Brasil**. Rio de Janeiro: Memória da Eletricidade, 1989.

MOHD ZAIN, M. F.; RADIN, S. S. Physical properties of high-performance concrete with admixtures exposed to a médium temperature range 20°C to 50°C. **Cement and Concrete Research**, n. 30, p. 1283-1287, 2000.

MOHD ZAIN, M. F.; YUSOF, K. M.; MATSUFUJI, Y. The influence of médium temperature environments on the water permeability of high performance mortar. **Cement and Concrete Research**, n. 29, p. 785-788, 1999.

MOINI, M. R.; LAKIZADEH, A.; MOHAQEIQI, M. Effect of mixture temperature on slump flow prediction of conventional concretes using artificial neural networks. **Australian Journal of Civil Engineering**, v. 10, n. 1, p. 87-98, 2012.

MOURET, M.; BASCOUL, A.; ESCADEILLAS, G. Microstructural features of concrete in relation to initial temperature – SEM and ESEM characterization. **Cement and Concrete Research**, n. 29, p. 369-375, 1999.

NAIK, T. R.; KRAUS, R. N. Temperature effects on high-performance concrete. **Center for By-Products Utilization**, n. CBU-2002-07, 2002.

NAUS, D. J. The Effect of Elevated Temperature on Concrete Materials and Structures – A Literature Review. **U.S. Nuclear Regulatory Commission**, 204 p., 2005.

NEHDI, M.; AL-MARTINI, S. Effect of Temperature on Oscillatory Shear Behavior of Portland Cement Paste Incorporating Chemical Admixtures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, n. 19, p. 1090-1100, 2007.

NEHDI, M.; AL-MARTINI, S. Coupled Effects of High Temperature, Prolonged Mixing Time, and Chemical Admixtures on Rheology of Fresh Concrete. **ACI Materials Journal**, v. 106, n. 3, p. 231-240, 2009.

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

POLESELLO, E.; TOHDEN, A. B.; DAL MOLIN, D. C. C.; MASUERO, A. B. O limite de tempo especificado pela NBR 7212, para mistura e transporte do concreto, pode ser ultrapassado? **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 6, n. 2, abr. 2013.

ORTIZ, J.; AGUADO, A.; AGULLÓ, L.; GARCIA, T. Influence of environmental temperatures on the concrete compressive strength: Simulation of hot and cold weather conditions. **Cement and Concrete Research**, n. 35, p. 1970-1979, 2005.

OTOKO, G. R. Minimising hot weather effects on fresh and hardened concrete by use of cassava powder as admixture. **European International Journal of Science and Technology**, v. 3, n. 2, 2014.

QUERCIA, G.; BROUWERS, H. J. H. Application of nano-silica (nS) in concrete mixtures. In: International PhD Symposium in Civil Engineering. 8., 2010, Kongens Lyngby. **Anais eletrônicos...** Kongens Lyngby: [s.n.]. 2010. Disponível em: <[http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCIQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Fpublication%2F228442569\\_Application\\_of\\_nano-silica\\_%2528nS%2529\\_in\\_concrete\\_mixtures%2Flinks%2F0c96052430c5abf699000000&ei=nJuOVOTTNI\\_AgwTLkILAAQ&usg=AFQjCNGPrgaZMBEKIXeRu6pBjIMQcDUlnA&bvm=bv.81828268,d.eXY](http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCIQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Fpublication%2F228442569_Application_of_nano-silica_%2528nS%2529_in_concrete_mixtures%2Flinks%2F0c96052430c5abf699000000&ei=nJuOVOTTNI_AgwTLkILAAQ&usg=AFQjCNGPrgaZMBEKIXeRu6pBjIMQcDUlnA&bvm=bv.81828268,d.eXY)>. Acesso em: 14 jul. 2014.

ROMANO, R. C. O.; CARDOSO, F. A.; PILLEGGI, R. G. Propriedades do Concreto no Estado Fresco. In: ISAIA, G. C. (Ed.) **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, n. 1, p. 453-500, 2011.

SAID, A. M.; ZEIDAN, M. S.; BASSUONI, M. T.; TIAN, Y. Properties of concrete incorporating nano-silica. **Construction and Building Materials**, n. 36, p. 838-844, 2012.

SANTOS, S. B.; BITTENCOURT, R. M.; GRAÇA, N. G. Efeitos da Temperatura sobre o Concreto. In: ISAIA, G. C. (Ed.) **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, n. 1, p. 705-732, 2011.

SCHMIDT, W.; BROUWERS, H. J. H.; KÜHNE, H. C.; MENG, B. Influences of superplasticizer modification and mixture composition on the performance of self-

compacting concrete at varied ambient temperatures. **Cement & Concrete Composites**, [s.l.], n. 49, p. 111-126, 2014.

SOROKA, I.; RAVINA, D. Hot Weather Concreting with Admixtures. **Cement and Concrete Composites**, n. 20, p. 129-136, 1998.

STRUBLE, L. J.; CHEN, C. T. Effect of Continuous Agitation on Concrete Rheology. **Journal of ASTM International**, v. 2, n. 9, p. 1-19, 2005.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho. In: ISAIA, G. C. (Ed.) **Concreto**: Ciência e Tecnologia. 1. ed. São Paulo: IBRACON, n. 2, p. 1283-1325, 2011.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Concreto Auto-Adensável**. São Paulo: Pini, 2008.

## APÊNDICE A

### 1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

#### 1.1 CIMENTO

A NBR 11578 (ABNT, 1991) caracteriza cimento Portland composto como sendo um aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Durante a moagem é permitido adicionar a esta mistura materiais pozolânicos, escórias granuladas de alto-forno e/ou materiais carbonáticos, como é o caso do cimento desta pesquisa, nos teores normatizados.

O cimento Portland utilizado nesta pesquisa foi do tipo CP II-F-40, cujas especificações são regulamentadas pela NBR 11578 (ABNT, 1991). A Tabela A.1 apresenta as exigências físicas e mecânicas da norma e os valores do cimento utilizado.

Tabela A.1 – Exigências de norma e especificações do cimento

Especificações	Resíduo na peneira 75µm (%)	Superfície específica (m <sup>2</sup> /kg)	Tempo de início de pega (min)	Tempo de fim de pega (min)	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)
NBR 11578 (ABNT, 1991)	≤ 10	≥ 280	≥ 60	≤ 600*	≥ 40
Cimento da pesquisa	0,28	422,31	143,15	190,71	50,45

\* Exigência física e/ou mecânica facultativa.

#### 1.2 AGREGADOS MIÚDOS

##### 1.2.1 Massa unitária

Foram utilizadas duas areias de diferentes composições granulométricas de origem natural, conforme exposto no traço utilizado na pesquisa.

Entende-se como massa unitária a relação entre a massa do agregado lançado no recipiente e o volume desse recipiente. As massas unitárias das areias no estado solto foram obtidas através do ensaio regulamentado pela NBR NM 45 (ABNT, 2006) e os resultados são mostrados na Tabela A.2. A Figura A.1 mostra parte dos aparelhos utilizados no ensaio.

Tabela A.2 – Massas unitárias das areias

Determinação	Areia grossa $\bar{\delta}$ (kg/dm <sup>3</sup> )	Areia fina $\bar{\delta}$ (kg/dm <sup>3</sup> )
1	1,5371	1,3662
2	1,5370	1,3663
3	1,5369	1,3661
Média	1,5370	1,3662

### 1.2.2 Massa específica

Massa específica é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, excluindo os poros permeáveis. Nas areias, esses valores foram obtidos através do ensaio regulamentado pela NBR NM 52 (ABNT, 2009) e estão apresentados na Tabela A.3.



Figura A.1 – Equipamentos utilizados no ensaio de determinação de massa unitária.

Tabela A.3 – Massas específicas das areias

Determinação	Areia grossa $\bar{\delta}$ (kg/dm <sup>3</sup> )	Areia fina $\bar{\delta}$ (kg/dm <sup>3</sup> )
1	2,6040	2,6460
2	2,5910	2,6600
Média	2,5980	2,6530

### 1.2.3 Composição granulométrica

A NBR 7211 (ABNT, 2009) especifica que agregado miúdo é aquele cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm, ressalvados os limites estabelecidos em norma, em ensaio realizado de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), com peneiras definidas pela NBR NM ISO 3310-1 (ABNT, 2010). A Tabela A.4 apresenta os limites da distribuição granulométrica dos agregados miúdos e os limites dos módulos de finura referentes à cada zona de utilização.

Tabela A.4 - Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo  
(Adaptado de NBR 7211, ABNT 2009)

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1:2010)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 $\mu$ m	15	35	55	70
300 $\mu$ m	50	65	85	95
150 $\mu$ m	85	90	95	100

NOTA 1 O módulo de finura da zona ótima varia entre 2,20 e 2,90.

NOTA 2 O módulo de finura da zona utilizável inferior varia entre 1,55 e 2,20.

NOTA 3 O módulo de finura da zona utilizável superior varia entre 2,90 e 3,50.

As composições granulométricas das areias grossa e fina foram obtidas através do ensaio regulamentado pela NBR NM 248 (ABNT, 2003) e os resultados estão apresentados na Tabela A.5.

Tabela A.5 – DMC e MF das areias

Material	Dimensão Máxima Característica (DMC)	Módulo de Finura (MF)
Areia grossa	4,75mm	3,019
Areia fina	0,60mm	1,766

A Figura A.2 mostra as peneiras utilizadas na caracterização das areias, regulamentadas pela NBR NM ISO 3310-1 (ABNT, 2010), e as Figuras A.3 e A.4 apresentam as curvas granulométricas das areias grossa e fina, respectivamente, incluindo as curvas com os limites que determinam as zonas de utilização.



Figura A.2 – Série de peneiras utilizadas na caracterização das areias.

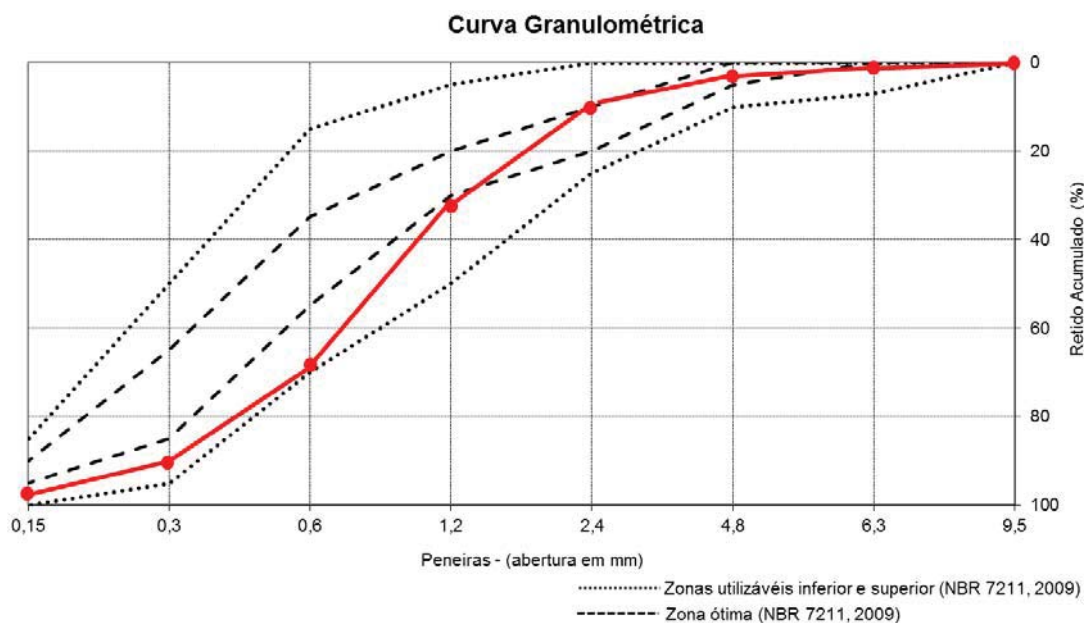


Figura A.3 – Curva granulométrica da areia grossa.

A areia grossa se apresentou na zona utilizável superior conforme provado na Figura A.3 e no valor do seu módulo de finura. Já a areia fina apresentou-se na zona utilizável inferior conforme provado na Figura A.4 e no valor do seu módulo de finura.

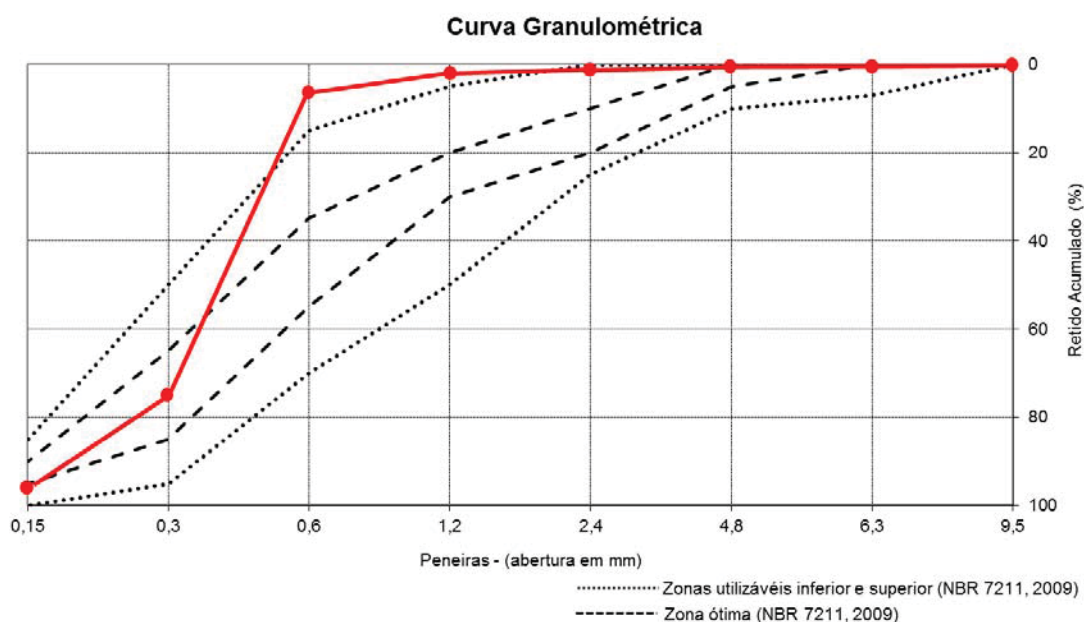


Figura A.4 – Curva granulométrica da areia fina.

### 1.2.4 Absorção

Entende-se absorção como sendo o teor de umidade do agregado no estado saturado com superfície seca. A absorção é o ganho de massa do material em decorrência do preenchimento dos poros com água expressa em porcentagem da sua massa seca em estufa.



Figura A.5 – Material submerso (a) e em secagem (b) ao lado dos equipamentos de ensaio.

As capacidades de absorção das areias grossa e fina foram determinadas através do ensaio regulamentado pela NBR NM 30 (ABNT, 2000) e a Figura A.5 exibe o material submerso depois de corridas as 24 horas solicitadas em norma e as areias durante a secagem ao lados dos equipamentos utilizados nos ensaios, respectivamente.



Figura A.6 – Areia grossa (a) e fina (b) em condição de saturado com superfície seca.

O ensaio de absorção dos agregados miúdos consiste em, primeiramente, determinar a massa do agregado em condição de saturado e de superfície seca e, posteriormente, determinar a massa na condição de seco em estufa. Em posse desses dados, calcula-se a porcentagem de absorção. As especificações dos equipamentos utilizados nos ensaios e os valores de absorção das areias grossa e fina estão apresentados na Tabela A.6. A Figura A.6 mostra os materiais no momento em que os mesmos atingiram a condição de saturado com superfície seca.

Tabela A.6 - Especificações dos equipamentos e índices de absorção das areias

Dimensões e pesos dos equipamentos					
Equipamento	Ø Base superior (mm)	Ø Base inferior (mm)	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	Peso (g)
Molde tronco-cone	38,0	90,0	75,0	-	-
Haste de compactação	-	-	170,0	24,5	346,0
Capacidades de absorção (%)					
Areia grossa			1,389		
Areia fina			0,886		

### 1.2.5 Impurezas orgânicas

A NBR NM 49 (ABNT, 2001) estabelece o método de determinação colorimétrica de impurezas orgânicas presentes em agregados miúdos destinados ao preparo do concreto, exceto óleos, graxas e parafinas.

Os agregados miúdos foram submetidos a este procedimento experimental e as soluções filtradas obtidas de cada material estão apresentadas na Figura A.7. Em substituição à solução padrão de ácido tânico a 2%, foi utilizado um colorímetro com os índices de impurezas orgânicas identificados com suas respectivas colorações.

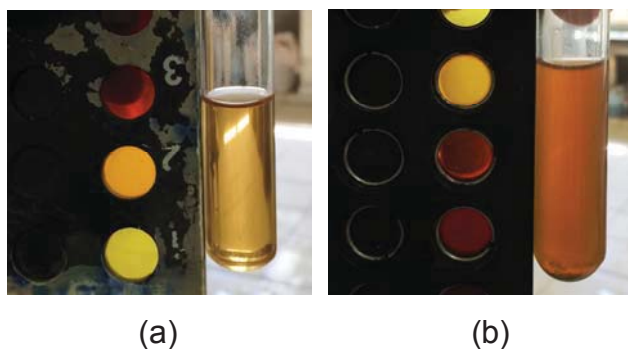


Figura A.7 – Soluções filtradas das areias fina (a) e grossa (b).

Visualizou-se que a areia fina apresentou índice de impurezas orgânicas entre 100 e 200 ppm, enquanto que a areia grossa apresentou-se entre 200 e 300 ppm, assim ambas respeitam o limite normatizado.

### 1.3 AGREGADOS GRAÚDOS

#### 1.3.1 Massa unitária

Foram utilizadas duas britas de diferentes composições granulométricas na pesquisa, sendo ambas de granito. As massas unitárias destes agregados em estado solto foram obtidas através do ensaio regulamentado pela NBR NM 45 (ABNT, 2006) e os resultados são mostrados na Tabela A.7.

Tabela A.7 – Massas unitárias das britas

Determinação	Brita 25mm $\bar{\delta}$ (kg/dm <sup>3</sup> )	Brita 12,5mm $\bar{\delta}$ (kg/dm <sup>3</sup> )
1	1,6690	1,6080
2	1,6690	1,6330
3	1,6740	1,6180
Média	1,6710	1,6200

### 1.3.2 Massa específica

As massas específicas foram obtidas através do ensaio regulamentado pela NBR NM 53 (ABNT, 2009) e os resultados estão apresentados na Tabela A.8.

Tabela A.8 – Massas específicas das britas

Determinação	Brita 25mm $\bar{\delta}$ (kg/dm <sup>3</sup> )	Brita 12,5mm $\bar{\delta}$ (kg/dm <sup>3</sup> )
1	2,9042	2,9039
2	2,8750	2,8428
Média	2,8896	2,8734

### 1.3.3 Composição granulométrica

A NBR 7211 (ABNT, 2009) especifica agregado graúdo como sendo aquele cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm, ressalvados os limites estabelecidos em norma, em ensaio realizado de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), com peneiras definidas pela NBR NM ISO 3310-1 (ABNT, 2010). A Tabela A.9 apresenta os limites da distribuição granulométrica dos agregados graúdos.

As composições granulométricas foram obtidas através do ensaio regulamentado pela NBR NM 248 (ABNT, 2003) com peneiras definida pela NBR NM ISO 3310-1 (ABNT, 2010). Os resultados obtidos para as britas 0 e 1 estão apresentados na Tabela A.10.

Tabela A.9 - Limites da composição granulométrica do agregado graúdo  
(Adaptado de NBR 7211, ABNT 2009)

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1:2010)	Porcentagem, em massa, retida acumulada				
	Zona granulométrica				
	$d/D^a$				
	4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
75 mm	-	-	-	-	0 – 5
63 mm	-	-	-	-	5 – 30
50 mm	-	-	-	0 – 5	75 – 100
37,5 mm	-	-	-	5 – 30	90 – 100
31,5 mm	-	-	0 – 5	75 – 100	95 – 100
25 mm	-	0 – 5	5 – 25 <sup>b</sup>	87 – 100	-
19 mm	-	2 – 15 <sup>b</sup>	65 <sup>b</sup> – 95	95 – 100	-
12,5 mm	0 – 5	40 <sup>b</sup> – 65 <sup>b</sup>	92 – 100	-	-
9,5 mm	2 – 15 <sup>b</sup>	80 <sup>b</sup> – 100	95 – 100	-	-
6,3 mm	40 <sup>b</sup> – 65 <sup>b</sup>	92 – 100	-	-	-
4,75 mm	80 <sup>b</sup> – 100	95 – 100	-	-	-
2,36 mm	95 – 100	-	-	-	-

<sup>a</sup> Zona granulométrica correspondente à menor ( $d$ ) e à maior ( $D$ ) dimensões do agregado graúdo.

<sup>b</sup> Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo cinco unidades percentuais e apenas um dos limites marcados com 2). Essa variação pode também estar distribuída em vários desses limites.

Os limites granulométricos de utilização dos agregados graúdos apresentados na Tabela A.9 estão exibidos nas curvas granulométricas das britas na Figura A.8. Conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009), em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo cinco unidades percentuais em apenas um dos limites marcados e essa variação também pode estar distribuída em vários desses limites.

Tabela A.10 – DMC e MF das britas

Material	Dimensão Máxima Característica (DMC)	Módulo de Finura (MF)
Brita 12,5mm	12,5mm	1,9428
Brita 25mm	25,0mm	3,1136

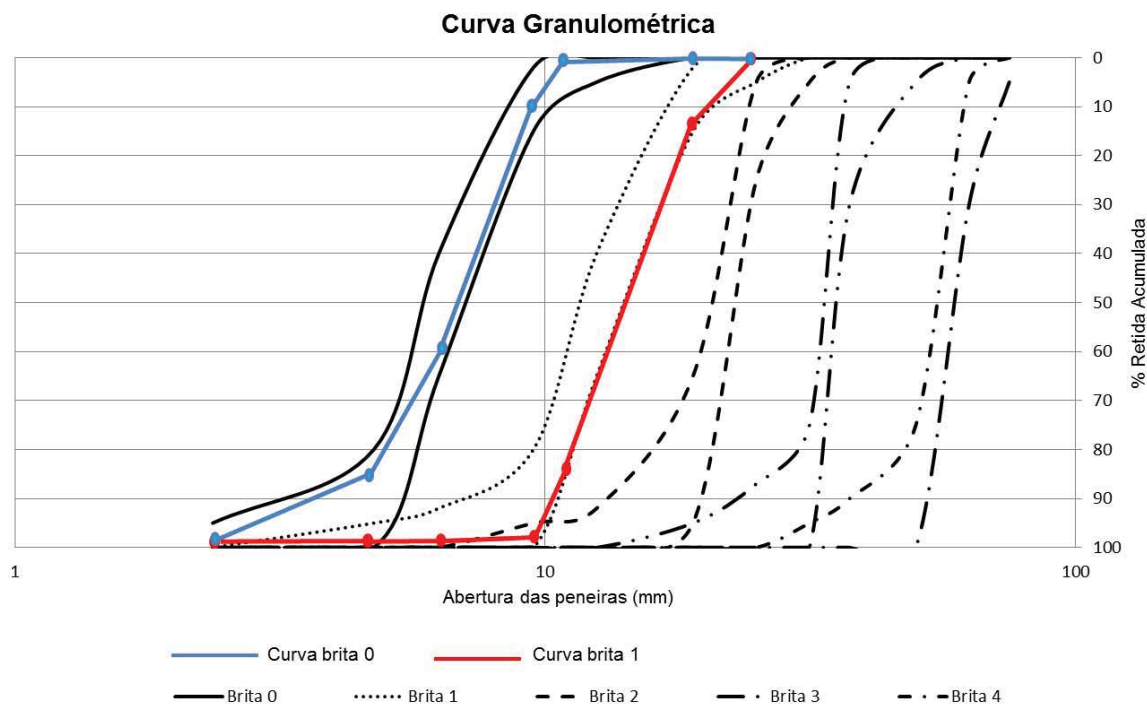


Figura A.8 – Curvas granulométricas dos agregados graúdos.

### 1.3.4 Absorção

As capacidades de absorção das britas foram determinadas através do ensaio regulamentado pela NBR NM 53 (ABNT, 2009) e os resultados estão expostos na Tabela A.11.

Tabela A.11 – Capacidades de absorção das britas

Material	Absorção (%)
Brita 12,5mm	0,653
Brita 25mm	0,304

A capacidade de absorção do agregado graúdo é a relação existente entre sua massa saturada e de superfície seca com sua massa seca em estufa. A Figura A.9 ilustra uma das britas em condição de saturada com superfície seca no momento que antecede sua pesagem.



Figura A.9 – Brita em estado saturado com superfície seca.

#### 1.4 SÍLICA ATIVA

A NBR 13956-1 (ABNT, 2012) especifica sílica ativa como sendo o material decorrente da produção de silício metálico ou ligas de ferro silício em fornos elétricos. Durante o processo é gerado o gás SiO que, ao sair do forno, oxida-se formando partículas de SiO<sub>2</sub>, sendo então captadas por sistemas de filtros coletores. Constitui um tipo de pozolana formada essencialmente por partículas esféricas com diâmetros menores que 10<sup>-6</sup> m de sílica no estado amorfo. As especificações da sílica utilizada neste procedimento experimental estão listadas na Tabela A.12 e atendem aos requisitos exigidos em norma.

Tabela A.12 – Características físicas da sílica ativa

Característica física	Valores
Massa específica	2.220 kg/m <sup>3</sup>
Superfície específica	19.000 m <sup>2</sup> /kg
Formato da partícula	Esférico
Diâmetro médio da partícula	0,20 µm

#### 1.5 ADITIVOS

A NBR 11768 (ABNT, 2011) define aditivo como sendo o produto que adicionado em pequena quantidade a concretos de cimento Portland modificam algumas de suas propriedades, no sentido de melhor adequá-las a determinadas

condições. Os aditivos utilizados nesta pesquisa são do tipo superplastificante e, por sua vez, aumentam o índice de consistência dos concretos reduzindo a quantidade de água de amassamento que seria necessária para manter a mesma consistência.

Em três dos concretos dosados foram utilizados os aditivos multifuncional Tec-Mult 829 e superplastificante Tec-Flow 50N; nos outros concretos, o aditivo multifuncional foi mantido e o superplastificante foi substituído pelo Silicon NS AD 400. Este último é um aditivo orgânico que combina nano-sílica com policarboxilatos que, segundo a fabricante, garante um tempo de consistência de até 240 minutos. As especificações dos aditivos foram fornecidas pelas respectivas fabricantes e estão dispostas na Tabela A.13.

Tabela A.13 – Especificações dos aditivos

Aditivo	Fabricante	Aspecto / cor	pH	Massa específica
Tec-Mult 829	RheoSet	Líquido castanho escuro	$7,5 \pm 1,0$	$1,175 \pm 0,02\text{g/cm}^3$
Tec-Flow 50N	RheoSet	Líquido castanho claro	$6,0 \pm 1,0$	$1,110 \pm 0,02\text{g/cm}^3$
Silicon NS AD 400	Silicon	Líquido mel escuro	$5,6 \pm 1,0$	$1,080 \pm 0,02\text{g/cm}^3$

## APÊNDICE B

No que trata de teor de umidade dos agregados, as partículas podem se apresentar em quatro condições de umidade e cada uma destas condições pode causar alterações na relação a/c real dos concretos dosados. A Figura B.1 apresenta os estados de umidade aos quais uma partícula de agregado pode estar exposta.

O teor de umidade e a capacidade de absorção dos agregados, que são fatores referentes à quantidade de água existente nas partículas, e são invariavelmente necessários para a correção das proporções de água e de agregado em misturas de concreto. A capacidade de absorção de um agregado é definida como sendo a quantidade total de água requerida para trazer um agregado da condição seca em estufa para a condição saturada com superfície seca (SSS); absorção efetiva é definida como a quantidade de água requerida para trazer o agregado da condição seca ao ar para a condição SSS; já a quantidade de água em excesso além da requerida para a condição SSS é referida como umidade superficial.

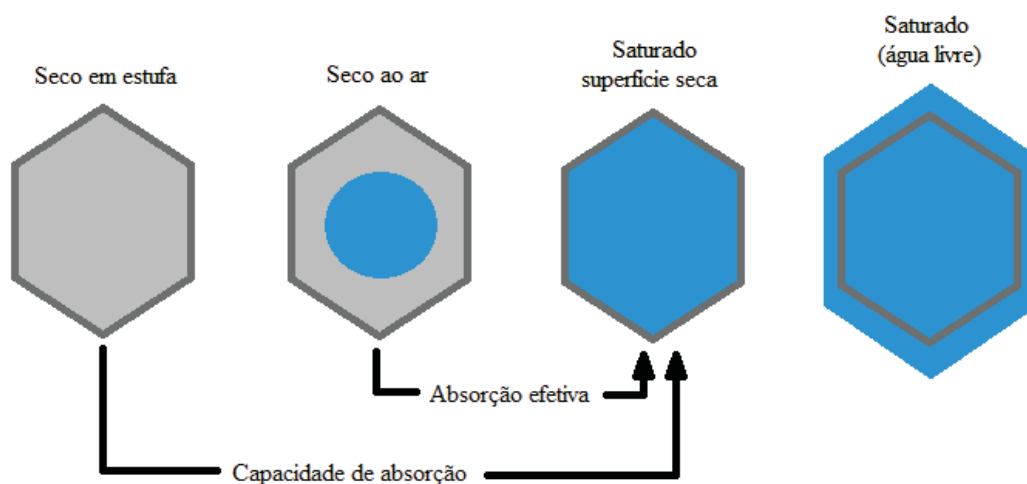


Figura B.1 – Condições de umidade de uma partícula de agregado.

A Tabela B.1 apresenta os teores de umidade existente nos agregados miúdos e graúdos em condição de secos ao ar.

Tabela B.1 – Teor de umidade dos agregados

Agregado	Teor de umidade (%)
Areia fina	0,25
Areia grossa	0,29
Brita 12,5mm	0,16
Brita 25mm	0,12

## APÊNDICE C

Tabela C.1 – Determinações dos abatimentos e temperaturas dos concretos em função do tempo

Determinação (minutos)	Dados coletados	Grupo 1			Grupo 2		
		C32	C15	C38	C32-nS	C15-nS	C38-Ns
15	Temperatura (°C)	31,90	19,80	36,20	31,10	19,10	35,60
	Abatimento (mm)	225	235	215	192	215	190
30	Temperatura (°C)	32,20	23,50	34,70	31,30	22,20	33,90
	Abatimento (mm)	198	213	194	180	202	178
45	Temperatura (°C)	32,20	25,40	33,60	31,60	24,30	33,10
	Abatimento (mm)	192	201	186	176	194	169
60	Temperatura (°C)	32,70	28,40	33,40	31,70	27,40	32,40
	Abatimento (mm)	181	194	173	172	184	142
75	Temperatura (°C)	32,90	29,30	32,90	32,00	28,50	32,10
	Abatimento (mm)	173	188	143	113	168	112
90	Temperatura (°C)	33,30	29,80	32,70	32,00	29,30	31,80
	Abatimento (mm)	135	177	124	88	134	83
105	Temperatura (°C)	33,60	30,10	32,50	31,60	30,10	31,50
	Abatimento (mm)	108	122	94	64	107	55
120	Temperatura (°C)	33,40	30,40	31,60	31,90	30,50	-
	Abatimento (mm)	71	103	52	37	84	-

Tabela C.1 – Determinações dos abatimentos e temperaturas dos concretos em função do tempo  
(Continuação)

135	Temperatura (°C)	32,80	30,60	-	-	31,10	-
	Abatimento (mm)	49	87	-	-	66	-
150	Temperatura (°C)	-	30,80	-	-	31,40	-
	Abatimento (mm)	-	62	-	-	45	-
165	Temperatura (°C)	-	31,00	-	-	-	-
	Abatimento (mm)	-	39	-	-	-	-