

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
COECI - COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

GABRIEL RONSONI WOINARSKI TEIXEIRA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE BAIXAS TEMPERATURAS NA  
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II

TOLEDO

2017

GABRIEL RONSONI WOINARSKI TEIXEIRA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE BAIXAS TEMPERATURAS NA  
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, do curso de Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Boabaid Ibrahim

TOLEDO  
2017



Ministério da Educação  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Câmpus Toledo  
Coordenação do Curso de Engenharia Civil



---

## TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso de Nº 064

### **Análise da Influência de Baixas Temperaturas na Resistência à Compressão do Concreto**

por

**Gabriel Ronsoni Woinarski Teixeira**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 9:10 h do dia **08 de Junho de 2017** como requisito parcial para a obtenção do título **Bacharel em Engenharia Civil**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

---

Prof Dr. Gustavo Savaris  
(UTFPR – TD)

---

Prof Me. Rodnny Jesus Mendoza Fakhye  
(UTFPR – TD)

---

Prof Dr. Lucas Boabaid Ibrahim  
(UTFPR – TD)  
Orientador

---

Visto da Coordenação  
Prof<sup>a</sup>. Me. Silvana da Silva Ramme  
Coordenadora da COECI

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

## RESUMO

TEIXEIRA, Gabriel Ronsoni Woinarski. Análise da influência de baixas temperaturas na resistência à compressão do concreto. 57f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Civil - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2017.

A ação das intempéries sobre as edificações não pode ser evitada, pois estas estarão frequentemente expostas ao calor, frio, chuva, vento, entre outros fatores que afetam a vida útil desses edifícios. Contudo, existem maneiras de reduzir os efeitos causados por estes fatores climáticos quando se conhece o comportamento do material diante da condição a qual ele é submetido. Em diversas cidades do Brasil, assim como em países de clima temperado, deparar-se com baixas temperaturas não é uma tarefa difícil, sendo assim, no presente trabalho, amostras do material mais utilizado na construção civil, o concreto, foram submetidas, durante seu período de cura, ao frio constante de 5°C. Avaliando-se os resultados do experimento realizado, verificou-se que o frio é capaz de retardar o processo de desenvolvimento da resistência à compressão do material, e esta ação pode ser claramente identificada ao realizar os testes de compressão no concreto em suas idades iniciais. Ao ensaiar o concreto com três dias de idade, foi possível observar que a sua resistência à compressão era aproximadamente 15 % menor quando comparada com concreto curado em temperatura ambiente. Depois de ensaiar as amostras com 28 dias de idade, outro fato interessante do concreto exposto às baixas temperaturas em idades iniciais, é que o material que foi exposto apenas em sua idade inicial ao frio, seja três ou sete dias, e transferido para a cura em temperatura ambiente, obteve uma resistência à compressão 9% maior que aquele curado apenas em temperatura ambiente. Dessa forma, compreende-se que seguir as recomendações das normas que alertam para o cuidado com a exposição do concreto às baixas temperaturas durante sua idade inicial, é realmente necessário, seja para prevenir baixa resistência à compressão em idades iniciais, ou esperar maior resistência à compressão aos 28 dias de idade.

**Palavras-chave:** Baixas temperaturas. Concreto. Resistência à compressão.

## ABSTRACT

The action of the weather on the buildings cannot be avoided, as these will be frequently exposed to heat, cold, rain, wind, and other factors that affect the useful life of the buildings. However, there are many ways to reduce the effects caused by these climatic factors when the behavior of the material that faces these conditions is known. In several cities in Brazil, as well as in temperate countries, finding low temperatures is not a difficult task, therefore, samples of the most used material in the construction site, concrete, were submitted during their curing period, at a constant temperature of 5°C. It was verified that the cold is able to delay the development process of the compressive strength of the material, and this action can be clearly identified when carrying out the concrete compression tests in its early ages. When testing the concrete at three days of age, it was possible to observe that its compressive strength was approximately 15% lower, comparing to concrete cured at ambient temperature. After testing the samples with 28 days of age, another interesting fact is that the concrete exposed to low temperatures, only at its initial ages, either three or seven days, and transferred to the curing at ambient temperature, developed a compressive strength approximately 9% higher than those cured only at ambient temperature. Thus, it is understood that it's really necessary to follow the recommendations of the standards that alert to the caution with the exposure of the concrete to the low temperatures during its initial age, either to prevent low compressive strength at its early ages, or to expect higher compressive strength at 28 days of age.

**Keywords:** Low temperatures. Concrete. Compressive Strength

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Pantheon – Roma.....	12
Figura 2 - Curva de Gauss para a resistência do concreto à compressão.....	15
Figura 3 – Curva de Abrams.....	17
Figura 4 – Temperaturas médias observadas em 2016.....	21
Figura 5 – Conservador Horizontal FRICON – HCED411.....	25
Figura 6 – Equipamento utilizado para retificação das bases dos corpos de prova...26	
Figura 7 - Prensa Universal EIMC DL30000N.....	26
Figura 8 – Agitador mecânico para agregado graúdo.....	29
Figura 9 – Agitador mecânico para agregado miúdo.....	30
Figura 10 – Frasco de Le Chatelier.....	31
Figura 11 – Curva de Abrams com o fator água/cimento 0,43 determinado para a dosagem.....	33
Figura 12 – Equipamentos para a realização do “ <i>Slump test</i> ”.....	35
Figura 13 – Abatimento do tronco de cone de 10 cm (100mm) .....	35
Figura 14 – Corpos de prova desmoldados.....	36
Figura 15 - Corpo de prova após realização do ensaio de compressão uniaxial.....	39
Figura 16 - Desenvolvimento da resistência à compressão do concreto curado à 5°C até completar 3 dias de idade com concreto curado inteiramente em temperatura ambiente.....	45
Figura 17 - Desenvolvimento da resistência à compressão do concreto curado à 5°C até completar 7 dias de idade com concreto curado inteiramente em temperatura ambiente.....	46
Figura 18 - Desenvolvimento da resistência à compressão do concreto curado à 5°C com concreto curado em temperatura ambiente.....	46
Figura 19 – Comparação da resistência à compressão dos CPs curados a 5°C com CPs curados na temperatura ambiente.....	47
Figura 20 - Teste de Tukey para 3 tratamentos ( CPs com 7 dias de idade).....	48
Figura 21 – Teste de Tukey para 4 tratamentos ( CPs com 28 dias de idade).....	49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Consumo de água aproximado.....	18
Tabela 2 – Teor de agregado graúdo.....	19
Tabela 3 – Características do agregado miúdo.....	31
Tabela 4 – Características do agregado graúdo.....	32
Tabela 5 – Características do cimento.....	32
Tabela 6 – Quantidade total e por período de corpos de prova produzidos no primeiro dia. ....	37
Tabela 7 – Quantidade total e por período de corpos de prova produzidos no segundo dia. ....	38
Tabela 8 – Avaliação do nível de qualidade do ensaio em função do coeficiente de variação.....	41
Tabela 9 – Comparação da resistência à compressão dos CPs expostos por 3 dias a 5°C com CPs expostos a temperatura ambiente.....	44
Tabela 10 – Comparação da resistência à compressão dos CPs expostos por 7 dias a 5°C com CPs expostos a temperatura ambiente.....	45
Tabela 11 – Comparação da resistência à compressão dos CPs expostos por 28 dias a 5°C com CPs expostos a temperatura ambiente.....	45
Tabela 12 - Classificação das Resistências .....	47
Tabela 13 - Continuação da Classificação das Resistências.....	47

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>9</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	9
1.2 OBJETIVO GERAL .....	10
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	10
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>11</b>
2.1 CONCRETO .....	11
2.1.1 História do Concreto .....	11
2.2 COMPONENTES DO CONCRETO .....	12
2.2.1 Cimento .....	12
2.2.2. Agregados .....	13
2.2.3 Água .....	14
2.3 PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO .....	14
2.4 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO .....	14
2.4.1 Massa Específica .....	14
2.4.2 Resistência à Compressão .....	15
2.5 DOSAGEM DE CONCRETO .....	17
2.5.1 Método de Dosagem da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) ..	17
2.6 HETEROGENEIDADE CLIMÁTICA NO BRASIL .....	20
2.7 O CONCRETO CURADO EM BAIXA TEMPERATURA .....	22
2.8 DEFINIÇÃO DA TEMPERATURA DE CURA DO CONCRETO .....	24
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>25</b>
3.1 MATERIAIS .....	25
3.2 MÉTODOS .....	26
3.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS .....	27
3.3.1 Ensaio para Determinação da Massa Unitária do Agregado Graúdo .....	27
3.3.2 Ensaio para Determinação da Massa Específica Aparente do Agregado Miúdo e Graúdo .....	27
3.3.3 Ensaio de Granulometria .....	29
3.3.4 Ensaio para Determinação da Massa Específica do Cimento .....	30
3.4 DEFINIÇÃO DO TRAÇO E PRODUÇÃO DO CONCRETO .....	32
3.4.1 Determinação da Dosagem .....	32
3.5 PRODUÇÃO DO CONCRETO .....	34
3.5.1 Ensaio de Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone .....	34



3.5.2 Disposição dos Lotes de Concreto.....	36
3.5.3 Manejo dos Corpos de Prova .....	38
3.6 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA O ENSAIO .....	39
3.7 ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL .....	39
3.8 METODOLOGIA DE ANÁLISE.....	40
3.8.1 Dispersão de Resultados .....	40
3.8.2 Análise de Variância (ANOVA).....	42
<b>4. ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>43</b>
4.1 TRAÇO DE REFERÊNCIA.....	43
4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO.....	43
4.2.1 Análise da Dispersão dos Resultados.....	46
4.2.2 Teste da Análise de Variâncias .....	47
4.3 SÍNTESE DOS RESULTADOS .....	48
4.3.1 Lote 1 - Três Dias de Exposição à Temperatura de 5°C .....	48
4.3.2 Lote 2 – Sete Dias de Exposição à Temperatura de 5°C .....	50
4.3.3 Lote 3 – 28 Dias de Exposição à Temperatura de 5°C .....	50
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>52</b>
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	52
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>54</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com a intensificação das mudanças climáticas em todo o planeta, e o modo como essas mudanças podem afetar os setores de maior importância para o desenvolvimento das sociedades, profissionais de cada área têm mostrado um alto nível de preocupação e interesse em pesquisas que levantem possíveis alternativas para lidar com alterações climáticas antes não previstas.

De acordo com o 5º Relatório sobre Mudanças Climáticas (Copenhague, 2014) lançado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), que inclui mais de 1.300 cientistas de diversos países, os efeitos das alterações climáticas serão diferentes para cada região, dependendo da capacidade de cada sistema social e ambiental para mitigar ou se adaptar às mudanças.

Como consequência da intensa atividade humana, principalmente na era industrial, ondas de calor e de frio, furacões, tempestades, e outros fenômenos, têm afetado diferentes partes do planeta e produzido enormes perdas para a sociedade.

Com todos esses fatores climáticos, a preocupação com as edificações também se faz necessária. Portanto, saber como o concreto, material mais utilizado na construção civil, se comporta diante de tais adversidades, é de fundamental importância para que se consiga dar continuidade ao desenvolvimento de comunidades, construindo com segurança.

Assim, a análise do comportamento do concreto em situações climáticas não rotineiras pode se mostrar significativa, e particularmente neste trabalho, será estudado o seu comportamento diante de baixas temperaturas.

### 1.1 JUSTIFICATIVA

Como as propriedades do concreto podem ser afetadas por diversos fatores, sejam esses agentes presentes em sua composição ou agentes externos, é interessante que se tenha conhecimento de como o concreto se comporta diante de baixas temperaturas. Segundo Leonhardt e Mönning (1977), temperaturas abaixo de 18°C já são capazes de retardar o endurecimento e quando abaixo de 5°C já é necessário adotar medidas contra o perigo de congelamento. O estudo se faz ainda mais importante pela ocorrência de baixas temperaturas no município de Toledo-PR,

que segundo o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a temperatura mínima média no município nos meses de inverno fica em torno de 12°C com uma temperatura mínima absoluta de -2,7°C. Esses registros climáticos apontam que temperaturas fora da margem ideal para concretagem estipulada pelo item 4.5.4 da NBR 7212 (ABNT, 2012) podem ocorrer com certa frequência.

Segundo esta norma, a temperatura ambiente para lançamento do concreto deve estar entre 5°C e 30°C. A NBR 14931 (ABNT, 2004) retrata que salvo quando houver liberação do responsável, a concretagem deve ser adiada sempre que estiver prevista uma redução na temperatura para abaixo de 0°C nos dois dias que sucedem a concretagem, e que não se deve realizar concretagens em dias com temperatura inferior a 0° C. Entretanto, essa condição climática é inevitável em diversos países e inclusive nos estados do sul do Brasil.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) também traz restrições de lançamento do concreto em temperaturas inferiores a 10°C. Dadas tais condições, o presente trabalho avaliou se a exposição ao clima frio interfere, e quantificou essa interferência no ganho da resistência aos 28 dias.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

Analisar a influência que baixas temperaturas, durante o período de cura do concreto, podem causar na sua resistência à compressão.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar como o ganho de resistência do concreto, quando submetido à temperatura de 5°C nos períodos de 3, 7 e 28 dias, se comporta quando comparado ao concreto curado em temperatura ambiente.
- Demonstrar como o fator tempo de exposição ao frio pode influenciar na resistência à compressão do concreto.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CONCRETO

Segundo a NBR 12655 (ABNT, 2015), o concreto de cimento Portland é resultante da mistura homogênea do próprio cimento, agregados miúdo e graúdo e água, e que pode ou não ter a incorporação de outros componentes minoritários. O concreto por sua vez, desenvolve suas propriedades com o endurecimento da pasta de cimento (nome dado à combinação de cimento e água).

#### 2.1.1 História do Concreto

A história do concreto deve ser remetida à do cimento, o qual é o principal componente da mistura e produz a reação química de formação da pasta aderente, o que faz com que o concreto tenha tamanha eficiência. Portanto, pode-se considerar que o concreto surgiu por volta do século II a.C, simultaneamente ao surgimento do primeiro aglomerante conhecido (CARVALHO, 2008).

Este aglomerante era um tipo especial de areia vulcânica encontrado na região de Nápoles, próximo a Pozzuoli, e por isso era chamada de pozolana. A principal característica dele é a capacidade de reagir quimicamente com cal e água, formando uma espécie de pedra artificial. A construção mais antiga que se tem notícia é o Pórtico Amélia, construído em 193 a.C. Segundo Branco e Pieretti (2012), esse material foi largamente utilizado como aglomerante para obtenção de argamassa de assentamento de alvenaria e também para unir pedras de diferentes tamanhos na obtenção de materiais resistentes (o concreto), como é o caso dos alvéolos da cúpula do edifício histórico de Roma, Pantheon (Figura 1).



**Figura 1 - Pantheon – Roma**  
**Fonte: Del Zotto – Products of Florida, Inc.**

Para Carvalho (2008), o cimento foi fundamental para a obtenção de um material impermeável, estanque, resistente e de fácil conformação que foi muito usado pelos romanos na construção civil, o concreto.

## 2.2 COMPONENTES DO CONCRETO

### 2.2.1 Cimento

A *American Society for Testing and Materials* (ASTM) C150 define o cimento Portland como sendo um aglomerante hidráulico produzido pela moagem do clínquer, que consiste essencialmente de silicatos de cálcio hidráulicos, usualmente com uma ou mais formas de sulfato de cálcio como um produto de adição, e o diâmetro médio entre 5 e 25 mm. As matérias primas utilizadas na fabricação do cimento Portland são misturas de materiais calcários e argilosos na devida proporção para se obter composições químicas adequadas para o cozimento.

Bauer (2000) afirma que antes da produção em larga escala, os cimentos eram fabricados segundo as especificações dos consumidores, os quais encomendavam das fábricas, o produto com as características necessárias para determinado trabalho. A partir de 1904, após o surgimento das primeiras especificações da ASTM, é que a indústria limitou-se a produzir alguns tipos de cimento.

O cimento Portland é atualmente produzido em indústrias de grande porte, localizadas junto às jazidas que se encontram em situação favorável para o transporte final aos centros consumidores.

Em cada país, a indústria produz os cimentos padronizados pelo órgão normalizador nacional e alguns outros fora de normas, mas sempre um número limitado de variedades. No Brasil são produzidos vários tipos de cimento oficialmente normalizados, como por exemplo, o cimento Portland composto com Escória (CP II – E) e o cimento Portland composto com Fíler (CP II-F), porém as variedades de cimentos de usos especiais não são facilmente encontradas no mercado, estas geralmente são obtidas mediante encomenda.

### 2.2.2. Agregados

Petrucci (1998) define agregado como “material granular sem forma ou volume definidos, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para uso em obras de engenharia”.

A NBR 7211 (ABNT, 2009) define areia ou agregado miúdo como agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira de 150 µm (peneiras definidas pela ABNT NBR NM ISO 3310-1) no ensaio realizado de acordo com a NBR 248 (ABNT,2003). Define ainda o agregado graúdo como pedregulho ou brita proveniente de rochas estáveis, ou a mistura de ambos, cujos grãos passam por uma peneira de malha quadrada com abertura nominal de 75 mm e ficam retidos na peneira de 4,75 mm em ensaio realizado pela mesma NBR NM 248 (ABNT, 2003).

### 2.2.3 Água

A razão entre a quantidade de água e a quantidade de cimento na dosagem do concreto é crucial para se determinar a resistência final do concreto.

A água é um importante componente do concreto e as suas duas principais finalidades são: causar a reação de hidratação dos compostos do cimento, e aumentar a trabalhabilidade do concreto para que assim seja possível preencher as fôrmas sem a ocorrência de vazios ou nichos (AOKI, 2013).

## 2.3 PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO

O concreto é considerado fresco até o início da pega do aglomerante. Após o fim desse processo, considera-se o estado endurecido. Alves (1987) define as principais propriedades do concreto fresco como sendo a segregação, a homogeneidade e a trabalhabilidade. Porém pode-se considerar que segregação e homogeneidade fazem parte da propriedade trabalhabilidade, uma vez que todas elas estão diretamente relacionadas.

A trabalhabilidade é um termo para distinguir a facilidade do concreto em ser manuseado. A ASTM C 125 define trabalhabilidade como sendo a propriedade que determina o esforço necessário para manipular uma quantidade de concreto fresco com uma perda mínima de homogeneidade.

É importante salientar que quando as propriedades do concreto fresco são rigorosamente controladas, é muito provável que suas propriedades no estado endurecido continuem controladas (AÏTCIN, 2000).

## 2.4 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

### 2.4.1 Massa Específica

A massa específica do concreto utilizada normalmente é a massa da unidade de volume, incluindo os vazios. Pode-se considerar para efeito de cálculo, quando a massa específica real não for conhecida, o valor de 2.400 kg/m<sup>3</sup> para o concreto simples e de 2.500 kg/m<sup>3</sup> para o concreto armado NBR 6118 (ABNT, 2014).

### 2.4.2 Resistência à Compressão

A resistência à compressão simples, denominada  $f_c$ , é a característica mais importante de um concreto. Para se determinar a resistência à compressão de um lote de concreto, corpos de prova padronizados são moldados de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015) e ensaiados de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007).

Os valores da resistência de cada corpo de prova está sujeito a dispersões pelas mais variadas causas, sejam de fatores internos ou externos. Sendo assim, essas dispersões podem ser representadas pelo diagrama de frequência, com os valores obtidos de  $f_c$  dispostos no eixo horizontal e a quantidade de corpos de prova relativos a determinado valor de  $f_c$ , também denominada densidade de frequência, no eixo vertical. Segundo Pinheiro, Muzardo e Santos, a curva encontrada é denominada Curva Estatística de Gauss ou Curva de Distribuição Normal para a resistência do concreto à compressão, representada na Figura 2.

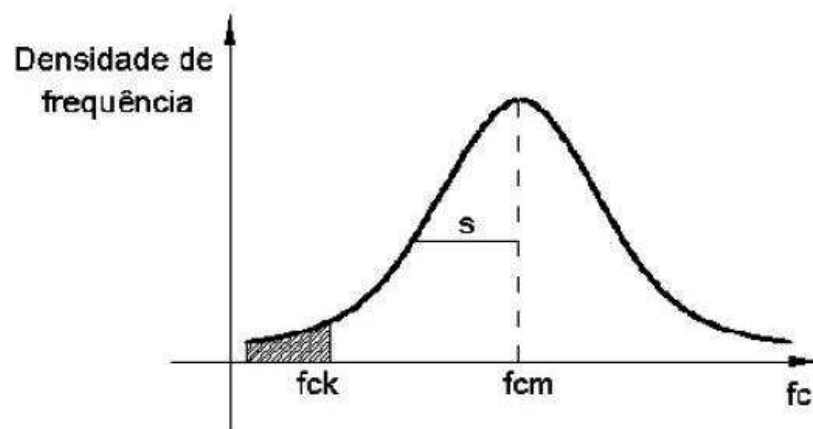


Figura 2 - Curva de Gauss para a resistência do concreto à compressão

Fonte: Pinheiro, Muzardo e Santos (2004).

Neste gráfico, encontram-se dois valores de fundamental importância: a Resistência Média do concreto à Compressão ( $f_{cm}$ ) e a Resistência Característica do concreto à Compressão,  $f_{ck}$ . O valor  $f_{cm}$  é a média aritmética dos valores de  $f_c$  para o conjunto de corpos de prova ensaiados, e é utilizado na determinação da resistência característica através da Equação 1:

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,65 s \quad (1)$$



Na equação 1, “s” é o desvio-padrão da amostragem e o valor 1,65 corresponde ao quantil de 5%, ou seja, apenas 5% dos corpos de prova possuem  $f_c < f_{ck}$ .

A resistência de um material é dada como a capacidade de resistir à tensão sem se romper. No concreto, a resistência está relacionada à tensão necessária para causar a ruptura, definida como tensão máxima que a amostra do concreto pode suportar (METHA e MONTEIRO, 1994).

O concreto é um material não inerte e que está sujeito às várias interações entre seus componentes e agentes externos. Para Ribeiro, Pinto e Starling (2006) “um concreto durável é aquele que resiste às condições para o qual foi projetado, sem deterioração, por muitos anos”.

A água é um dos principais agentes do processo de deterioração do concreto, e o fato deste material sofrer pouca deterioração quando exposto a ela, se comparado com outros materiais, contribuiu para sua intensa utilização em estruturas de armazenamento e transporte de água. A qualidade potencial do concreto depende da relação água/cimento e do grau de hidratação.

O fato de o concreto ser um material que no seu estado fresco pode ser moldado em diversas formas e após endurecido, possui uma resistência semelhante à das rochas naturais, fazem do concreto um material largamente utilizado na composição de elementos estruturais de uma edificação

Ainda existem outras várias características que o torna um material construtivo tão utilizado, como por exemplo, o fato de seus elementos constituintes estarem disponíveis de forma abundante ao redor do mundo e serem de baixo custo.

Segundo Forti (2009), “Em termos de sustentabilidade, o concreto armado consome muito menos energia do que o alumínio, o aço, o vidro, e também emite proporcionalmente menos gases e partículas poluentes”.

Quando se trata das propriedades mecânicas do concreto, destacam-se como principais as resistências à compressão e à tração, e também o módulo de elasticidade. Essas propriedades são determinadas por meio de ensaios, que são executados em condições específicas, e que geralmente objetivam o controle da qualidade e atendimento às especificações.

## 2.5 DOSAGEM DE CONCRETO

### 2.5.1 Método de Dosagem da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland)

Para se determinar a dosagem através do método ABCP, deve-se realizar a caracterização dos materiais necessários para a produção do concreto. Ainda antes de se iniciar os cálculos para a obtenção da dosagem, deve-se conhecer ou fixar as características que se deseja no desempenho do concreto, como a plasticidade e a resistência mecânica (RODRIGUES, 1983).

O primeiro passo depois de fixar o valor de  $f_{ck}$  e conhecendo o cimento a ser utilizado, é obter o parâmetro água/cimento ( $a/c$ ), que é estimado com base na curva de Abrams.

Partindo do valor de  $f_{ck}$ , é possível, através da Equação 2, obter-se o valor de  $f_{cmj}$  ou também conhecido como  $f_{cj}$  (resistência de dosagem). Segundo a NBR 12655 (ABNT, 2015), este valor corresponde à resistência média à compressão do concreto prevista para a idade de  $j$  dias, considerando as condições de variabilidade, medida pelo desvio-padrão ( $S_d$ ), prevalentes durante a execução da obra.

$$F_{cj} = F_{ck} + 1,65S_d \quad (2)$$

Com  $F_{cj}$  determinado e a resistência normal do cimento aos 28 dias conhecida, pode-se buscar na curva de Abrams (Figura 3) o fator água/cimento.

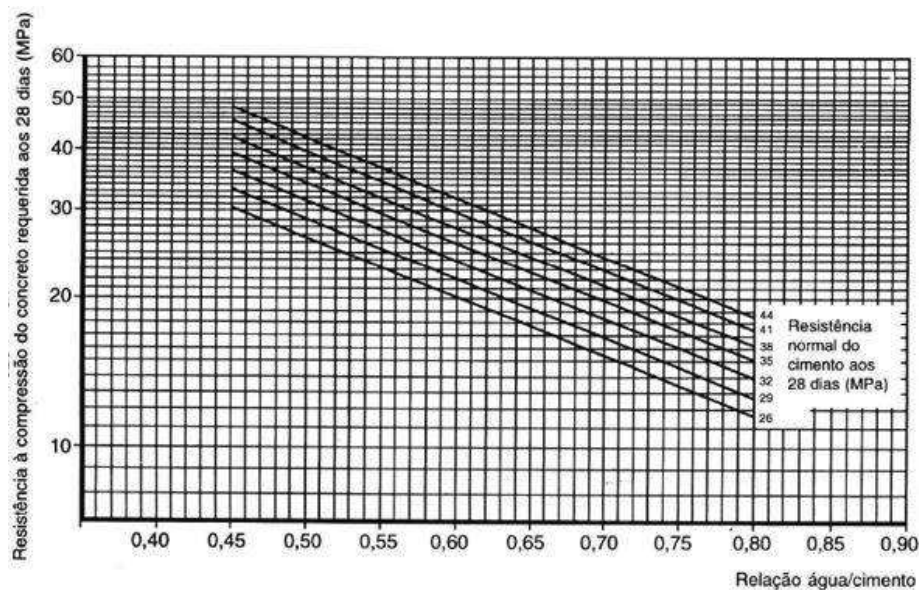


Figura 3 – Curva de Abrams  
Fonte: BUCHER (1989)

Depois de definir o valor de  $a/c$ , o próximo passo é determinar a estimativa do consumo de água. Para isso deve-se ter em mente qual a consistência, ou trabalhabilidade do concreto desejada no seu estado fresco, a qual é medida pelo abatimento do tronco de cone no *Slump Test*.

A estimativa do consumo de água é determinada através da Tabela 1, em que entra-se com os valores de diâmetro máximo do agregado graúdo e o abatimento do tronco de cone, ambos em milímetros, e obtém-se o consumo de água em  $l/m^3$ .

<b>Tabela 1 – Consumo de água aproximado</b>				
<b>Consumo de água aproximado (<math>l/m^3</math>)</b>				
<b>Abatimento (mm)</b>	<b>D<sub>máx</sub> agregado graúdo (mm)</b>			
	9,5	19	25	32
<b>40 a 60</b>	220	195	190	185
<b>60 a 80</b>	225	200	195	190
<b>80 a 100</b>	230	205	200	195

**Fonte: Rodrigues (1998)**

Realizada a estimativa do consumo de água, determina-se a estimativa do consumo de cimento ( $C_c$ ), dividindo-se o consumo de água em litros por metro cúbico pelo fator água/cimento, dado pela Equação 3:

$$C_c = \frac{C_a}{a/c} \quad (3)$$

Para se determinar o consumo de agregado graúdo ( $C_b$ ), o método de dosagem da ABCP fornece os volumes compactados a seco ( $V_{cp}$ ) desse material por metro cúbico de concreto, em função do Diâmetro Máximo característico do agregado graúdo e do Módulo de Finura do agregado miúdo. Cruzando-se estes dados na Tabela 2, obtém-se o volume compactado a seco do agregado.

**Tabela 2 – Teor de agregado graúdo**

**Volume Compactado Seco ( $V_{cp}$ )/m<sup>3</sup> de concreto**

Módulo de Finura da Areia	D <sub>máx</sub> característica do agregado graúdo			
	9,5	19	25	32
1,8	0,645	0,77	0,795	0,82
2,0	0,625	0,75	0,775	0,8
2,2	0,605	0,73	0,755	0,78
2,4	0,585	0,71	0,735	0,76
2,6	0,565	0,69	0,715	0,74
2,8	0,545	0,67	0,695	0,72
3,0	0,525	0,65	0,675	0,7
3,2	0,505	0,63	0,655	0,68
3,4	0,485	0,61	0,635	0,66

Fonte: Rodrigues (1998)

Determinado o volume compactado a seco do agregado graúdo, e conhecida a massa unitária compactada do mesmo, o consumo de agregado graúdo pode ser obtido através da Equação 4:

$$Cb = V_{cp} \cdot MU_c \quad (4)$$

Onde:

$Cb$ : Consumo de agregado graúdo por m<sup>3</sup> de concreto (Kg/m<sup>3</sup>)

$V_{cp}$ : Volume compactado seco do agregado graúdo por m<sup>3</sup> de concreto

$MU_c$ : Massa unitária compactada da brita por m<sup>3</sup> de concreto (Kg/m<sup>3</sup>)

Para a obtenção do consumo de agregado miúdo, utiliza-se dos valores obtidos para todos os outros materiais. Como o consumo dos agregados foi determinado em relação a 1 m<sup>3</sup> de concreto, a soma dos volumes absolutos de todos os componentes deve resultar em 1 m<sup>3</sup>, portanto a porção faltante resultará no volume do agregado miúdo por metro cúbico de concreto ( $V_a$ ). Dessa forma, tem-se a Equação 5:

$$V_a = 1 - \left( \frac{C}{\gamma_c} + \frac{C_b}{\gamma_b} + \frac{C_{ag}}{\gamma_{ag}} \right) \quad (5)$$

Onde:

$V_a$ : Volume do agregado miúdo por metro cúbico de concreto ( $m^3$ )

$\gamma_c, \gamma_b, \gamma_{ag}$ : Massa específica do cimento, agregado graúdo e da água, respectivamente.

Determinado o volume de agregado miúdo por metro cúbico de concreto, o seu consumo é obtido pela Equação 6:

$$C_a = \gamma_a \cdot V_a \quad (6)$$

Onde:

$C_a$ : Consumo de agregado miúdo por metro cúbico de concreto ( $Kg/m^3$ )

$\gamma_a$ : Massa específica do agregado miúdo ( $Kg/m^3$ )

Após realizar a determinação do consumo de todos os componentes da mistura, a representação do traço se dá através da Equação 7:

$$1,0 : \frac{c_a}{c} : \frac{c_b}{c} : (a/c) \quad (7)$$

## 2.6 HETEROGENEIDADE CLIMÁTICA NO BRASIL

Devido a sua configuração geográfica, a diversificação climática no Brasil é muito ampla. Por possuir grande extensão territorial e também uma expressiva extensão costeira, o país apresenta diferentes domínios climáticos.

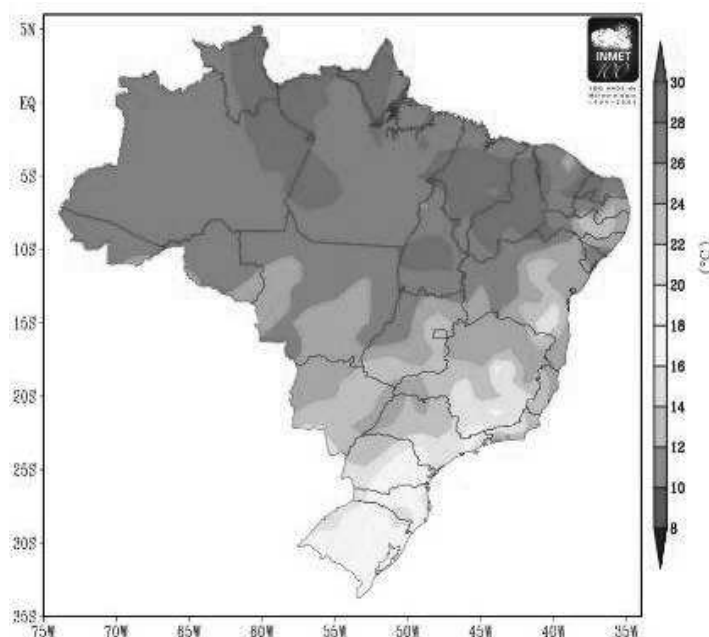
Dentre os fatores condicionantes do clima de uma determinada região, pode-se citar chuvas, umidade do ar, temperatura, ventos e pressão atmosférica, e estes são condicionados por outros fatores, tais como altitude, latitude, condições de relevo, vegetação e continentalidade (OLIVEIRA, 2003).

De acordo com a classificação climática de Arthur Strahler (1951), no Brasil predominam cinco grandes climas: Clima Equatorial Úmido (convergência de alísios), que engloba a região da Amazônia; Clima Tropical Alternadamente Úmido e Seco, abrangendo grande parte da área central do país e litoral do meio-norte; Clima

Tropical Semiárido (tendendo a ser seco pela irregularidade da ação das massas de ar), o qual compreende todo o sertão nordestino e o norte de Minas Gerais; Clima Litorâneo Úmido exposto às massas tropicais marítimas, englobando uma estreita faixa do litoral leste e nordeste; e Clima Subtropical Úmido (costas orientais e subtropicais com domínio da massa tropical atlântica), predominante na Região Sul do Brasil.

Segundo Oliveira (2003) o clima na Região Sul apresenta chuvas bem distribuídas no decorrer do ano e as estações notadamente distinguidas. Neste clima, o inverno é rigoroso, com grandes quedas de temperatura acompanhadas por geadas, e até mesmo a ocorrência de neve em regiões mais altas.

Quanto as variações nas temperaturas, observa-se na Figura 4, que a Região Norte e parte da Região Nordeste, apresentam temperaturas médias anuais ligeiramente superior a 25°C, enquanto na Região Sul e parte da Sudeste as temperaturas médias anuais ficam abaixo de 20°C, podendo até mesmo serem encontrados pontos com médias anuais próximas de 15°C.



**Figura 4 – Temperaturas médias observadas em 2016**  
**Fonte: INMET**

As temperaturas mínimas absolutas são observadas em grande parte da região Sul, e essas geralmente são seguidas de geadas e em eventuais situações, de neve.

Durante o inverno, a temperatura média se mantém consideravelmente baixa, variando de 10° a 15°C, com exceção dos vales dos rios Paranapanema, do rio Paraná e do litoral paranaense e catarinense, onde as médias são de aproximadamente 15° a 18°C. A média das máximas também é baixa, em torno de 20° a 24°C nos grandes vales e no litoral, e de 16° a 20°C no planalto. Já a média das mínimas varia de 6°C a 12°C, sendo que temperaturas próximas a 0°C ou até mesmo negativas são facilmente registradas, como citado anteriormente (NERY, 2005).

## 2.7 O CONCRETO CURADO EM BAIXA TEMPERATURA

Segundo a NBR 14931 (ABNT, 2004), a temperatura da massa de concreto, no momento do lançamento, não deve ser inferior a 5°C. Esta também recomenda que a concretagem seja suspensa sempre que estiver prevista queda na temperatura ambiente para abaixo de 0°C nas 48 h seguintes. Para Andriolo (1984), a durabilidade do concreto pode ser afetada por clima severamente frio, decorrente da ação do gelo-desgelo ou pela ocorrência de grandes diferenças no coeficiente de expansão térmica dos agregados e da argamassa.

Powers (1945) e Powers e Helmuth (1953) desenvolveram experimentos que possibilitaram o entendimento da ação do congelamento sobre concretos, e estabeleceram que a deterioração do material diante de baixas temperaturas ocorre devido à geração da pressão hidráulica e à difusão da água-gel e água capilar, que são classificações do grau de dificuldade da água ser libertada para o exterior da mistura, resultado da condensação do vapor de água nos capilares e nos poros de gel.

A cura é uma das principais etapas na execução de estruturas de concreto, pois é nesta fase que as reações químicas de hidratação dos elementos presentes na pasta de cimento irão ocorrer, desenvolvendo as propriedades características do material. O processo de hidratação é definido como:

Sequência de reações químicas entre o cimento e a água, ocasionando a transformação de compostos anidros mais solúveis em compostos hidratados menos solúveis. Como resultado tem-se a perda da consistência, a pega, o endurecimento e o desenvolvimento da resistência da pasta de cimento. (ISERHARD, 2000).

É através da evolução da hidratação do cimento que a idade influencia na resistência à compressão (GIAMUSSO, 1992). Durante o período de cura do concreto, é de fundamental importância que sejam adotadas medidas que, em termos de umidade e temperatura, sejam capazes de manter um ambiente favorável ao desenvolvimento da sua resistência. Medidas desse caráter são capazes de reduzir a taxa de evaporação da água utilizada na produção do material. Essa água de amassamento no interior do concreto é responsável por vedá-lo, evitando a retração e a fuga de substâncias que viriam a interferir na hidratação (ISERHARD, 2000).

Durante o inverno, o retardamento da pega do concreto pode ocorrer facilmente devido às baixas temperaturas, e este retardamento pode causar uma redução nas resistências em idades iniciais e até mesmo impossibilitar a desforma de peças estruturais. Portanto, a falta de cuidados preventivos pode trazer alguns danos à obra. Para Laguna e Ikematsu (2011), “a má hidratação provocada pela ineficiência do processo de cura pode trazer problemas irreversíveis”.

A maior probabilidade de ocorrência desses problemas é na região Sul do país, onde as mínimas no inverno alcançam temperaturas muito baixas, inclusive com registros de temperaturas negativas. Como nas primeiras idades do concreto as reações de hidratação, que são exotérmicas, são mais intensas e conseqüentemente tem-se uma maior liberação de calor, a ação do frio pode causar uma espécie de choque térmico, o que favorece a origem de fissuras, que primeiramente podem ocorrer de maneira superficial e posteriormente se estender por toda a estrutura. Reginato, Foiato e Piovesan (2013) destacam que a baixa temperatura da cura do concreto pode delongar e até mesmo impedir o desenvolvimento de sua resistência.

Cecconello e Tutikian (2012) mostram em seu estudo que as resistências à compressão dos concretos curados a temperaturas mais elevadas foram significativamente superiores em relação aos concretos curados em temperaturas inferiores durante os sete primeiros dias. O mesmo estudo mostra ainda que a partir do 14º dia houve uma inversão nos resultados, e os corpos de prova que foram submetidos a baixas temperaturas começaram a obter valores de maior resistência nos testes de compressão.

Cecconello e Tutikian (2012) enfatizam ainda que quando a hidratação do cimento Portland ocorrer de forma mais lenta, sua estrutura cristalina será mais bem



formada, justificando assim, um desempenho final superior dos concretos submetidos a baixas temperaturas nas suas primeiras idades, o que desacelera o seu processo de hidratação.

Desse modo, é importante entender os possíveis efeitos da temperatura nas propriedades do concreto em suas primeiras idades. Quando o material está exposto à baixa temperatura de forma que não ocorra o congelamento, uma vez que o concreto congelado não desenvolve nenhum ganho de resistência, ela interfere de forma positiva no processo de hidratação, pois a taxa de evaporação da água contida no concreto é reduzida se comparada com temperaturas mais elevadas.

## 2.8 DEFINIÇÃO DA TEMPERATURA DE CURA DO CONCRETO

De acordo com Neville (1997) o termo tempo frio é definido por duas condições. A primeira quando a média das temperaturas máxima e mínimas em três dias consecutivos for menor que 5°C, e a segunda quando a temperatura do ar durante pelo menos 12h, em qualquer período de 24 horas, for 10°C ou menor. Segundo Mehta e Monteiro (1994), em climas frios, as concretagens são permitidas sem preocupação em peças com grandes seções e volumes, pois o calor de hidratação gerado dissipa-se mais lentamente do que em peças com menores volumes e grandes áreas expostas.

Diante de baixas temperaturas, a água contida no concreto pode congelar, interrompendo o processo de endurecimento e provocando um aumento de volume. Desta forma, tensões internas são produzidas na massa do concreto, ocasionando uma separação dos materiais componentes, uma vez que a sua resistência, neste momento, ainda é insuficiente para impedir tal fenômeno.

Neville (1997) expõe uma preocupação para temperaturas muito baixas, de aproximadamente -10°C. Nessas condições, as reações de hidratação podem ocorrer lentamente, retardando a pega e o endurecimento do concreto, ou nem mesmo ocorrer, devido à falta de água.

Diante de tais definições e principalmente da capacidade de resfriamento e de controle de temperatura do conservador horizontal disponível para a realização da cura do material, a temperatura adotada para a cura do concreto no presente estudo foi de 5°C.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAIS

Para a produção do concreto, foi utilizado o cimento Portland CP II F-32 da marca SUPREMO e os agregados utilizados foram os disponibilizados pela universidade, os quais tiveram suas características determinadas através de ensaios regidos pelas normas da ABNT.

Foram utilizados moldes cilíndricos para a confecção das amostras com diâmetro igual a 10 cm e altura de 20 cm. Também foi necessária a utilização da haste de compactação de seção circular em aço de 16 mm de diâmetro e 600 mm de comprimento, uma colher de pedreiro e, para facilitar o processo de desmolde, aplicou-se óleo de máquina queimado nas faces internas dos moldes.

A cura do concreto em temperatura ambiente foi realizada dentro de um tanque com água que o laboratório da universidade oferece para essa finalidade, sendo que a temperatura média dentro deste tanque foi de 24 °C. Já a cura do concreto em baixas temperaturas, também imerso em água, foi realizada em um conservador horizontal da marca FRICON com capacidade de 411 litros (Figura 5).



Figura 5 – Conservador Horizontal FRICON – HCED411

A retificação dos corpos de prova foi realizada na retífica do laboratório de materiais da universidade (Figura 6), e utilizou-se da prensa universal (Figura 7) para a realização do ensaio de compressão uniaxial do concreto.



**Figura 6 – Equipamento utilizado para retificação das bases dos corpos de prova**



**Figura 7 – Prensa Universal EMIC DL3000N**

### 3.2 MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho, um concreto convencional foi produzido e moldado em conformidade com as normas vigentes. Para a determinação do traço a ser utilizado, seguiu-se o procedimento do método de dosagem da ABCP. Depois de ser submetido a duas condições diferentes de cura, este concreto teve sua resistência testada à compressão e então os resultados obtidos foram analisados, verificando a influência do método de cura proposto quando comparado ao método convencional.

### 3.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS

As características físicas dos componentes do concreto necessárias para a dosagem e que foram obtidas através dos ensaios são: Massa Unitária, Massa Específica Aparente e a granulometria dos agregados.

#### 3.3.1 Ensaio para Determinação da Massa Unitária do Agregado Graúdo

Para atender ao método da ABCP, é necessário se ter o valor da massa unitária compactada da brita utilizada, e este dado foi obtido através do ensaio regido pela NBR NM 45 (ABNT, 2006).

Para a realização do ensaio foram necessários: balança, haste de adensamento, um recipiente de massa e volume conhecidos, uma pá e amostra de brita selecionada, a qual estava seca. O ensaio consiste em preencher 1/3 do volume do recipiente com brita, compactar a amostra com 25 golpes, e fazer o mesmo para 2/3 e para o enchimento total do recipiente. Ao final determina-se a massa do recipiente com a amostra compactada, sendo a massa unitária dada pela Equação 8.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad (8)$$

Onde:

$\rho_{ap}$ : Massa unitária do agregado (Kg/m<sup>3</sup>)

$m_{ar}$  e  $m_r$ : Massa do recipiente com agregado e massa do recipiente vazio (Kg)

V: Volume do recipiente (m<sup>3</sup>)

#### 3.3.2 Ensaio para Determinação da Massa Específica Aparente do Agregado Miúdo e Graúdo

A NBR NM 52 (ABNT, 2009) define massa específica aparente como a relação da massa seca do agregado pelo volume, incluindo os poros permeáveis. A determinação da massa específica aparente do agregado miúdo foi realizada conforme procedimentos desta mesma norma. Já a massa específica dos agregados

graúdos foi determinada seguindo-se os procedimentos da NBR NM 53 (ABNT, 2009).

A NM 52 (ABNT, 2009) traz como materiais necessários para a realização do ensaio uma balança, frasco, picnômetro com volume de 500 cm<sup>3</sup> e uma estufa. Para a realização do ensaio é necessário secar a amostra na estufa, a uma temperatura de 110°C, até a constância de massa, e na sequência determinar a massa da amostra seca ( $m$ ). A seguir, deve-se preencher e aferir a massa do conjunto frasco e amostra ( $m_1$ ) e depois preencher com água o conjunto e aferir a massa ( $m_2$ ). Assim, a massa específica aparente do agregado miúdo ( $d_1$ ) é dada pela Equação 10, lembrando que  $V$  é o volume do frasco em cm<sup>3</sup>. Porém, como dado de entrada, é necessário o cálculo do volume de água adicionado ao frasco  $V_a$ , que é obtido pela Equação 9:

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{\rho_a} \quad (9)$$

$$d_1 = \frac{m}{V - V_a} \quad (10)$$

Para o agregado graúdo, a NM 53 (ABNT, 2009) traz o seguinte procedimento para a realização do ensaio. Primeiramente realiza-se a secagem da amostra em estufa a uma temperatura de 110°C, afere-se a sua massa, satura-se a amostra, afere-se a massa novamente, e na sequência, afere-se a massa saturada submersa da amostra. Na sequência, a massa específica aparente é calculada na equação 11:

$$d_a = \frac{m}{m_s - m_a} \quad (11)$$

Onde:

$d_a$ : Massa específica aparente (g/cm<sup>3</sup>)

$m$ : Massa da amostra seca (g)

$m_s$ : Massa da amostra saturada (g)

$m_a$ : Massa da amostra saturada submersa (g)

### 3.3.3 Ensaio de Granulometria

A granulometria dos agregados miúdo e graúdo foi determinada através do ensaio de composição granulométrica com uso de peneiras com diferentes aberturas de malhas NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Para se realizar a dosagem do concreto pelo método da ABCP, é necessário o Módulo de Finura (MF) da areia e o Diâmetro Máximo Característico (DMC) da brita, sendo assim a NM 248/2003 define como módulo de finura a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, considerando somente as peneiras da série normal, dividida por 100.

O diâmetro máximo característico é dado pela máxima abertura da peneira, de série normal ou intermediária, onde apresenta uma porcentagem igual ou inferior a 5% da amostra em massa retida (ABNT, 2003).

De acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003) os equipamentos necessários para a realização do ensaio são a balança, estufa, peneiras da série normal e intermediária, agitador mecânico de peneiras e pincel. Nas Figuras 8 e 9 são apresentados o agitador mecânico e o conjunto de peneiras necessárias para o ensaio de composição granulométrica dos agregados. Foram utilizadas as peneiras com abertura de malha 9,5, 6,3, 4,75, 2,36, 1,18, 0,6, 0,3 e 0,15 milímetros para a caracterização do agregado miúdo e 19, 12,5, 9,5 e 6,3 milímetros para a caracterização do agregado graúdo.



**Figura 8 – Agitador mecânico para agregado graúdo**



**Figura 9 – Agitador mecânico para agregado miúdo**

Com o material seco em estufa, colocou-se a amostra nas peneiras e agitou-se com o agitador mecânico. Após a agitação, pesou-se a massa retida em cada peneira. Com estes dados obtidos, foi possível calcular as porcentagens retidas e retidas acumuladas.

O ensaio foi realizado duas vezes, sendo que segundo a norma, a porcentagem em cada peneira não poderia divergir em mais de 4% (em caso de ocorrência, o peneiramento deveria ser realizado novamente). Com os dados da massa retida nas peneiras, obteve-se o módulo de finura da areia e o diâmetro máximo característico da brita.

#### 3.3.4 Ensaio para Determinação da Massa Específica do Cimento

A NBR NM 23 (ABNT, 2001) define como massa específica do cimento Portland a massa de unidade de volume do material.

Os equipamentos necessários para a realização do ensaio são: frasco volumétrico de *Le Chatelier* (Figura 10), balança, recipiente e termômetro.



**Figura 10 – Frasco de Le Chatelier**

A amostra a ser ensaiada foi passada pela abertura da peneira de 150 mm, após isto o frasco de Le Chatelier foi preenchido com querosene até o nível zero indicado no frasco, registrando a primeira leitura ( $V_1$ ). Então, adicionou-se a massa da amostra ( $m$ ) em pequenas porções e após a estabilização, registrou-se a segunda leitura ( $V_2$ ) e procedeu-se para o cálculo através da Equação 12.

$$\rho = \frac{m}{V_2 - V_1} \quad (12)$$

As tabelas 3, 4 e 5 mostram como ficou caracterizado o material ao término dos ensaios:

Agregado miúdo:

**Tabela 3 – Características do agregado miúdo.**

Característica	Valor
Massa específica aparente	2,56 g/cm <sup>3</sup>
Massa específica	2,58 g/cm <sup>3</sup>
Módulo de Finura	1,74



Agregado graúdo:

**Tabela 4 – Características do agregado graúdo.**

Característica	Valor
Massa Específica Aparente	2,88 g/cm <sup>3</sup>
Massa Unitária Compacta	1,52 g/cm <sup>3</sup>
Dimensão Máxima Característica	19 mm

Cimento:

**Tabela 5 – Características do cimento.**

Característica	Valor
Massa Específica Aparente	3,1 g/cm <sup>3</sup>

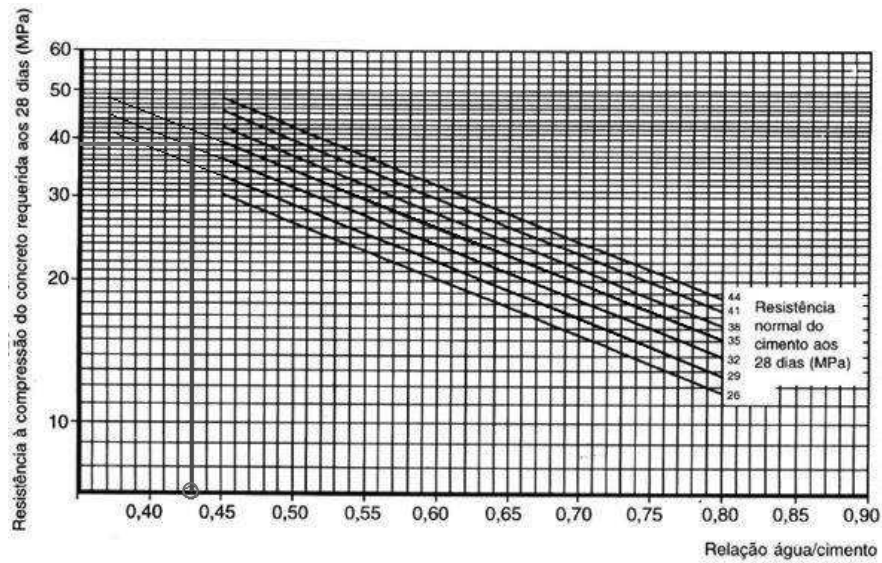
### 3.4 DEFINIÇÃO DO TRAÇO E PRODUÇÃO DO CONCRETO

#### 3.4.1 Determinação da Dosagem

Como citado no item 2.5.1, é necessária a fixação de duas características para a determinação da dosagem, sendo assim, a resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ) foi fixada em 30 MPa e o abatimento de tronco de cone em 100 mm.

Partindo-se destes dados iniciais, obteve-se o valor de 39 MPa para  $f_{cj}$  através da Equação 2, adotando-se a condição B de variabilidade, a qual recomenda a utilização de  $S_d = 5,5$  MPa para concreto dosado em massa com cuidados medianos.

Determinado  $f_{cj}$  e com um cimento com resistência normal aos 28 dias de 32 MPa, determinou-se, através da curva de Abrams (Figura 11), o fator água/cimento de 0,43.



**Figura 11 – Curva de Abrams com o fator água/cimento 0,43 determinado para a dosagem**

O próximo passo foi encontrar a estimativa para o consumo de água através da relação entre o diâmetro máximo do agregado graúdo (19 mm) e o abatimento do tronco de cone (100 mm). Ao entrar com esses dados na Tabela 1, obteve-se o consumo de água igual a 205 l/m<sup>3</sup>.

Dividindo-se o consumo de água em litros por metro cúbico pelo fator água/cimento, determinou-se a estimativa do consumo de cimento (C<sub>c</sub>) sendo de 476,74 Kg por metro cúbico.

Como explicado no item 2.5.1, para a obtenção do consumo de agregado graúdo (C<sub>b</sub>), é necessário o valor de V<sub>cp</sub> por metro cúbico de concreto. Entrando na Tabela 2 com o Diâmetro Máximo característico do agregado graúdo (19 mm) e do módulo de Finura do agregado miúdo (≈ 1,8), obteve-se V<sub>cp</sub> = 0,770.

Definido o valor de V<sub>cp</sub> e conhecida a massa unitária compactada do agregado graúdo, através da Equação 4 obteve-se o consumo deste agregado, que ficou sendo de 1170,92 Kg/m<sup>3</sup>.

Para a obtenção do consumo de agregado miúdo, utilizou-se dos valores obtidos para todos os outros materiais. Como o consumo dos agregados foi determinado em relação a 1 m<sup>3</sup> de concreto, a soma dos volumes absolutos de todos os componentes deve resultar em 1 m<sup>3</sup>, portanto a porção faltante resultou no volume do agregado miúdo por metro cúbico de concreto (V<sub>a</sub>). Tem-se, portanto, V<sub>a</sub> igual a 0,231 e conseqüentemente, através da Equação 6, um consumo de areia de 607,66 Kg/m<sup>3</sup>.

Após realizar a determinação do consumo de todos os componentes da mistura, o traço obtido ficou com as seguintes proporções:

1:1,27:2,46:0,43

Desta maneira, calculou-se a massa necessária de cada item para a produção da quantidade necessária de corpos de prova com um adicional, também controlado, para suprir eventuais perdas, derramamentos ou retenção da massa pela própria betoneira (embora realizada a correta imprimação do equipamento).

### 3.5 PRODUÇÃO DO CONCRETO

O primeiro passo antes de se iniciar a mistura na betoneira, foi realizar a imprimação deste equipamento. Este processo consiste em bater uma mistura na mesma proporção do traço a ser utilizado na produção, porém em quantidade menor, apenas para “selar” o lado interno do equipamento. Após rodar por cinco minutos essa mistura, ela foi descartada e então o concreto para estudo pôde ser produzido na sequência. Baseado no procedimento descrito em Bauer (2000, v. 1, p. 241), para a mistura, respeitou-se a ordem de colocação dos materiais na betoneira e o tempo de mistura de aproximadamente 6 minutos para a obtenção de uma massa homogênea. Depois de realizada a mistura, realizou-se o *Slump test* e na sequência os corpos de prova puderam ser moldados conforme NBR 5738 (ABNT, 2015).

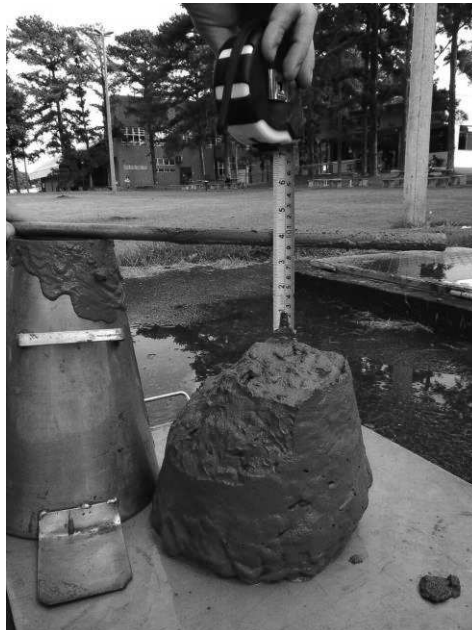
#### 3.5.1 Ensaio de Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone

Foi realizado o ensaio de determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (ABNT NBR NM 67/1998). Segundo esta norma, o molde do corpo de prova deve ser um tronco de cone oco, com diâmetro da base inferior igual a 200 mm, diâmetro da base superior de 100 mm e altura de 300 mm; e ainda a haste de compactação de 16 mm de diâmetro com 600 mm de comprimento, bem como a placa de base com lados de 500 mm e espessura de 3 mm, apresentados na Figura 12.



**Figura 12 – Equipamentos para a realização do *Slump test***

O ensaio consiste em umedecer o molde e a placa de base. Posicionando o molde sobre a placa de base, este foi preenchido em três partes, sendo que cada camada foi compactada com 25 golpes aplicados com a haste de compactação e a retirada do molde foi realizada respeitando-se uma duração de 5 a 10 segundos. Após a retirada, mediu-se a diferença entre a altura do molde e a altura média do corpo de prova desmoldado. A medida que é igual a 10 cm (100 mm) pode ser observado na Figura 13.



**Figura 13 – Abatimento do tronco de cone de 10 cm (100mm)**

### 3.5.2 Disposição dos Lotes de Concreto

Com o concreto produzido, moldou-se os corpos de prova e estes foram identificados em grupos. Depois de moldados, os corpos de prova (CPs) foram divididos em lotes denominados lotes de referência, os quais ficaram expostos apenas à temperatura ambiente, e em lotes que inicialmente foram expostos a temperatura controlada de 5°C e posteriormente, em idades selecionadas, foram transferidos para o tanque de cura com água em temperatura ambiente. Todos os lotes eram compostos por seis unidades (Figura 14).



**Figura 14 – Corpos de prova desmoldados.**

Devido à capacidade da betoneira e ao número de moldes de CPs disponíveis para o trabalho, o concreto foi produzido em dois dias distintos. Embora utilizado o mesmo traço e os mesmos equipamentos, optou-se por nas duas datas produzir lotes de referência que seriam rompidos com a mesma idade, desta forma, caso uma produção tivesse resultados diferentes da outra, corpos de prova de referência já estariam prontos para a realização de ensaios e a devida comparação.

Buscando definir as idades para ensaio, Bauer (2000) cita que é comum encontrar a especificação de resistência à compressão do concreto em projetos estruturais designada para a idade de 28 dias. Embora o crescimento de resistência seja observado claramente até os 360 dias, essa consideração é feita porque, nesta idade, o concreto já desenvolveu grande parte de sua resistência final.

A ABNT, através da NBR 5739 (2007) apresenta outras idades como alternativas, sendo 3, 7, 63 e 91 dias. Em geral, esses rompimentos em idades inferiores aos 28 dias servem para acelerar a retirada de formas ou escoras, já os rompimentos em idades superiores são utilizados para determinar a evolução da resistência do concreto em idades avançadas (MAGALHÃES, 2009).

No presente trabalho, os ensaios ocorreram nas idades de 3, 7 e 28 dias. Para facilitar a identificação dos lotes, eles foram nomeados de maneira que o nome pudesse ser relacionado com o tempo de cura, com o tipo de cura que ele esteve exposto e a qual produção ele pertencia, seguindo o formato iFjA(n).

Onde:

“i”: indica número de dias exposto a 5°C

F: frio (5°C)

“j” indica número de dias exposto a temperatura ambiente.

A: Ambiente ( $\approx 24^\circ\text{C}$ )

(n): número da produção correspondente.

Para a idade de três dias, foram necessários três lotes no conservador horizontal, e a mesma quantia de lotes de referência, pois cada um foi ensaiado nas idades de 3, 7 e 28 dias. Estes 36 CPs foram produzidos na primeira data (n=1).

Depois de permanecerem 24 horas dentro dos moldes, em temperatura ambiente, os CPs foram desmoldados e reservados conforme fora proposto. Nesta data, portanto, produziu-se o restante do concreto necessário ao estudo. Desta segunda produção (n=2), 30 CPs foram obtidos, e este concreto, ao ser desmoldado seguindo o mesmo procedimento da produção anterior, foi reservado para os ensaios de sete e de 28 dias. Pode-se observar nas Tabelas 6 e 7 como ficou dividida a produção e como ficaram organizados os períodos de cura.

**Tabela 6 – Quantidade total e por período de corpos de prova produzidos no primeiro dia.**

Período de Cura	Quantidade de CPs		
	Baixa Temp.	Temp. Ambiente	TOTAL
<b>3 dias</b>	18	6	24
<b>7 dias</b>	-	6	6
<b>28 dias</b>	-	6	6
<b>Total</b>	<b>18</b>	<b>18</b>	<b>36</b>

**Tabela 7 – Quantidade total e por período de corpos de prova produzidos no segundo dia.**

Período de Cura	Quantidade de CPs		
	Baixa Temp.	Temp. Ambiente	TOTAL
<b>3 dias</b>	-	-	-
<b>7 dias</b>	12	6	18
<b>28 dias</b>	6	6	12
<b>Total</b>	<b>18</b>	<b>12</b>	<b>30</b>

Nota-se que os lotes destinados a ficarem sete e 28 dias na temperatura ambiente foram produzidos nas duas datas, como explicado anteriormente. Nesta segunda produção, foram necessários dois lotes com cura no conservador horizontal, e a mesma quantia no tanque de cura em temperatura ambiente, visto que os ensaios foram realizados nas idades de sete e 28 dias. Quanto ao concreto que permaneceu no conservador horizontal até o 28º dia, foi necessária a cura de um único lote dentro do conservador, pois o lote curado em temperatura ambiente para a devida comparação é o mesmo a ser comparado com o concreto de cura combinada de sete dias iniciais em baixa temperatura e 21 dias finais em temperatura ambiente, uma vez que são integrantes da mesma produção e foram ensaiados ao completar 28 dias.

### 3.5.3 Manejo dos Corpos de Prova

Imediatamente após o concreto da primeira produção completar três dias de idade, dois lotes inteiros foram testados à compressão, sendo um lote de referência e um lote dos que estavam nas condições de frio, denominados 3A e 3F, respectivamente. Os outros dois lotes que estavam no conservador horizontal e pertenciam a essa mesma produção (lotes 3F4A e 3F25A), foram retirados dessa condição e transferidos para um tanque de cura em temperatura ambiente, aguardando a realização dos ensaios em idades mais avançadas, sete e 28 dias.

Repetindo o processo descrito acima para o concreto da segunda produção, ao completar sete dias de idade, dois lotes inteiros foram testados à compressão, sendo um lote de referência e um lote dos que estavam submetidos à baixa temperatura, denominados 7A e 7F, respectivamente. O outro lote que estava no conservador horizontal (7F21A) foi retirado dessa condição e transferido para as

condições de cura em temperatura ambiente, aguardando a realização do ensaio aos 28 dias.

Ao completar a idade desejada, o lote que permaneceu até o 28º dia no conservador (28F) foi imediatamente ensaiado, sem a necessidade de remanejá-lo para cura ambiente, juntamente com o lote que estava sendo curado em temperatura ambiente (28A).

### 3.6 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA O ENSAIO

De acordo com o item 9.3 da NBR 5738 (ABNT, 2015), existem duas formas aceitáveis de preparação das bases dos corpos de prova, a retificação e o capeamento. No presente trabalho o método utilizado foi o da retificação, uma vez que o equipamento para retificar os corpos de prova se encontra disponível no laboratório da universidade.

A retificação consiste na remoção de uma fina camada de material da base a ser preparada mantendo a integridade estrutural das camadas adjacentes à camada removida, apresentando assim uma superfície livre de ondulações e abaulamentos NBR 5738 (ABNT, 2015). A retificação dos CPs era realizada minutos antes do ensaio de compressão.

### 3.7 ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL

Como explicado no item 3.1, o rompimento dos corpos de prova (Figura 15) foi realizado no laboratório da própria universidade, seguindo as recomendações de ensaio da NBR 5739 (ABNT, 2007) utilizando-se da prensa universal.





**Figura 15 – Corpo de prova após realização do ensaio de compressão uniaxial.**

Na preparação dos CPs para os ensaios, alguns cuidados foram previamente pensados para evitar a influência de fatores externos. Buscando manter uma mesma condição de umidade entre todos os lotes, tanto os CPs curados no conservador como os CPs curados no tanque permaneceram imersos em água desde a data em que foram desmoldados até a data de ensaio.

Como mencionado em 3.5.2, os ensaios foram realizados quando os lotes de concreto completaram 3, 7 e 28 dias de idade. O modelo da prensa utilizada no ensaio fornecia os valores da resistência à compressão por corpo de prova e também já realizava uma análise estatística básica por lote, mostrando valores de média, mediana, desvio padrão, coeficiente de variância, e valores de máximo e mínimo. Mesmo assim, após obter-se os valores de resistência de todos os lotes, optou-se por realizar outras formas de análise estatística dos dados obtidos.

## 3.8 METODOLOGIA DE ANÁLISE

### 3.8.1 Dispersão de Resultados

A NBR 5739 (ABNT, 2007), apresenta um método de avaliação estatística de desempenho, a fim de identificar a dispersão dos resultados devido às operações

de ensaio. Para isso, primeiramente deve-se calcular o desvio padrão dentro do ensaio, através da Equação 13:

$$S_e = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{d_2 \cdot n} \quad (13)$$

Onde:

$A_i$ : Amplitude de valores de resistência, em megapascals;

$N$ : O número de exemplares da amostra;

$d_2$ : Coeficiente tabelado de acordo com quantidade de corpos de prova

A partir do desvio padrão ( $S_e$ ), calcula-se o coeficiente de variação dentro do ensaio, através da Equação 14:

$$cv_e = \frac{S_e}{f_{cm}} \quad (14)$$

Onde:

$cv_e$ : Coeficiente de variação de ensaios de resistência à compressão de corpos de prova de concreto em porcentagem;

$f_{cm}$ : Resistência média em megapascal.

Dessa forma é possível avaliar o coeficiente de variação dos ensaios através dos intervalos apresentados na Tabela 8, podendo variar de excelente a deficiente.

**Tabela 8 – Avaliação do nível de qualidade do ensaio em função do coeficiente de variação**

Coeficiente de Variação ( $cv_e$ )				
Nível 1 (Excelente)	Nível 2 (Muito Bom)	Nível 3 (Bom)	Nível 4 (Razoável)	Nível 5 (Deficiente)
$cv_e \leq 3,0$	$3,0 < cv_e \leq 4,0$	$4,0 < cv_e \leq 5,0$	$5,0 < cv_e \leq 6,0$	$cv_e > 6,0$

**Fonte: NBR 5739 (ABNT, 2007)**

Além da análise dos desvios e do coeficiente de variação, os resultados dos ensaios experimentais passaram por Análise de Variância, ANOVA, através do programa ASSISTAT pelo parâmetro F de Levene e pelo teste *a posteriori* de Tukey, sendo os valores determinados neste estudo a um nível de 5% de probabilidade, ou seja, 95% de confiabilidade dos dados para ambas as análises.

### 3.8.2 Análise de Variância (ANOVA)

A Análise de Variância (ANOVA) é um procedimento utilizado para comparar três ou mais tratamentos e devido aos diferentes tipos de experimentos que podem ser realizados, existem muitas variações da ANOVA.

Analisando a possibilidade da aplicação de testes neste trabalho, tem-se que os lotes ensaiados aos três dias de idade não são possíveis de comparação através da ANOVA por não possuírem mais que duas formas de tratamento. Já aqueles ensaiados aos sete e aos 28 dias puderam ser submetidos aos testes por possuírem 3 e 4 tratamentos, respectivamente.

Ao realizar o teste da ANOVA, tem-se que no mínimo um par das médias é distinto, mas não é possível identificar qual(is). Portanto após concluir-se que existe uma diferença significativa entre tratamentos, por meio do teste F, avalia-se a magnitude destas diferenças utilizando um teste de comparações múltiplas. O teste Tukey (TSD – *Tukey Significant Difference*) é um dos testes de comparação de médias mais utilizados, por ser bastante rigoroso e de fácil aplicação. O teste Tukey é utilizado para testar toda e qualquer diferença entre duas médias de tratamento e é aplicado quando o teste “F” para tratamentos da ANOVA (análise de variância) for significativo.

## 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 TRAÇO DE REFERÊNCIA

Com os agregados devidamente caracterizados e seguindo todo o procedimento do item 2.5.1 para a obtenção do traço do concreto, obtiveram-se as proporções, em massa, já mencionadas no item 3.4.1, que são novamente apresentadas aqui.

1: 1,27: 2,46: 0,43.

### 4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO

O trabalho propôs analisar a influência de três diferentes períodos de exposição do concreto a 5°C em sua resistência à compressão quando comparada ao mesmo período de cura em temperatura ambiente. Depois de produzir o concreto e aguardar seu período de cura, o ensaio de compressão uniaxial foi realizado e os dados foram estudados.

Como se pode analisar, a resistência aos 28 dias ficou próxima de 39 MPa (valor estimado para resistência de dosagem  $F_{cj}$ ). Os valores das médias de resistência à compressão são apresentados nas Tabelas 9, 10 e 11 e sua evolução pode ser melhor observada através das figuras 17, 18, 19 e 20.

**Tabela 9 – Comparação da resistência à compressão dos CPs expostos por 3 dias a 5°C com CPs expostos a temperatura ambiente**

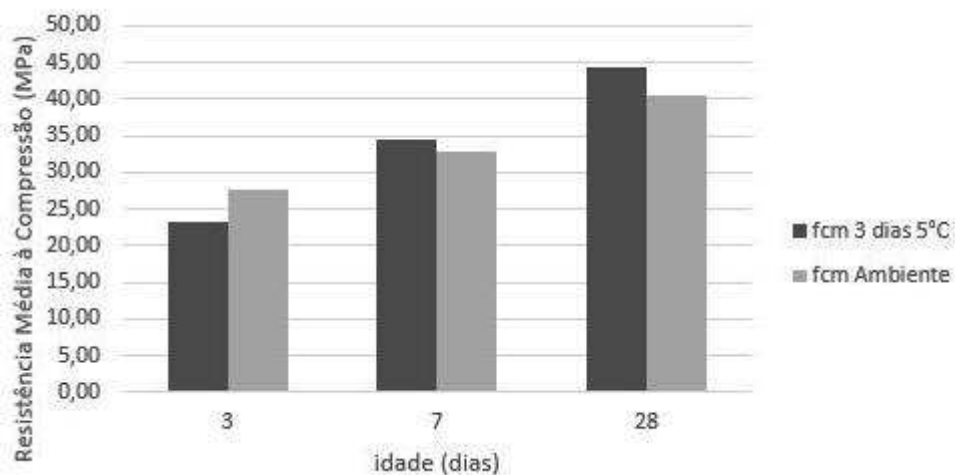
Amostras	Resistência à Compressão (MPa)					
	3F(1)	3A(1)	3F4A(1)	7A(1)	3F25A(1)	28A(1)
CP1	24,62	29,67	35,6	32,7	42,77	42,94
CP2	21,59	25,83	32,7	31,71	43,38	35,59
CP3	24,33	28,41	34,81	31,55	45,66	44,12
CP4	23,07	29,54	33,27	35,44	47,33	40,90
CP5	22,85	26,58	32,92	31,61	45,27	41,48
CP6	23,60	26,23	36,91	34,29	41,45	37,96
<b>Média</b>	<b>23,34</b>	<b>27,71</b>	<b>34,37</b>	<b>32,88</b>	<b>44,31</b>	<b>40,50</b>

**Tabela 10 – Comparação da resistência à compressão dos CPs expostos por 7 dias a 5°C com CPs expostos a temperatura ambiente**

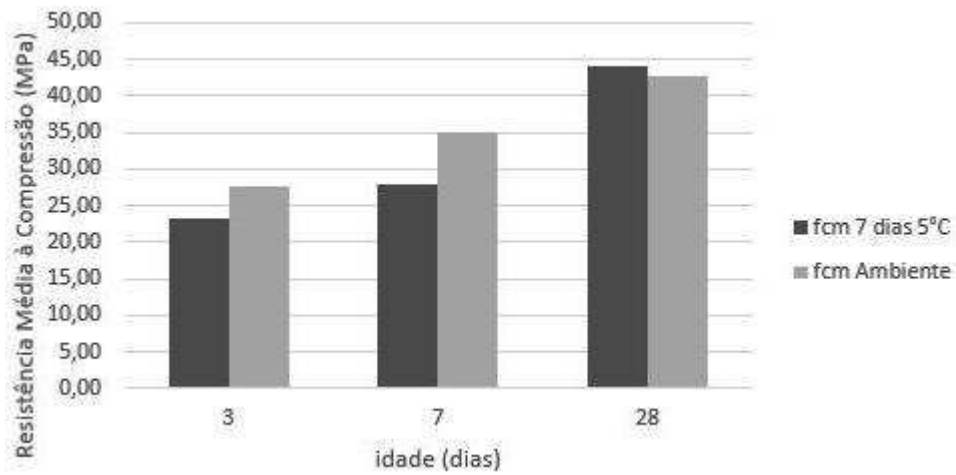
Amostras	Resistência à Compressão (MPa)			
	7F(2)	7A(2)	7F21A(2)	28 A(2)
CP1	29,07	33,88	41,64	44,64
CP2	24,47	34,80	42,14	43,14
CP3	28,58	35,47	44,71	43,07
CP4	29,36	33,16	49,16	42,89
CP5	27,26	37,15	40,96	38,85
CP6	28,17	34,99	46,08	43,46
<b>Média</b>	<b>27,82</b>	<b>34,91</b>	<b>44,12</b>	<b>42,68</b>

**Tabela 11 – Comparação da resistência à compressão dos CPs expostos por 28 dias a 5°C com CPs expostos a temperatura ambiente**

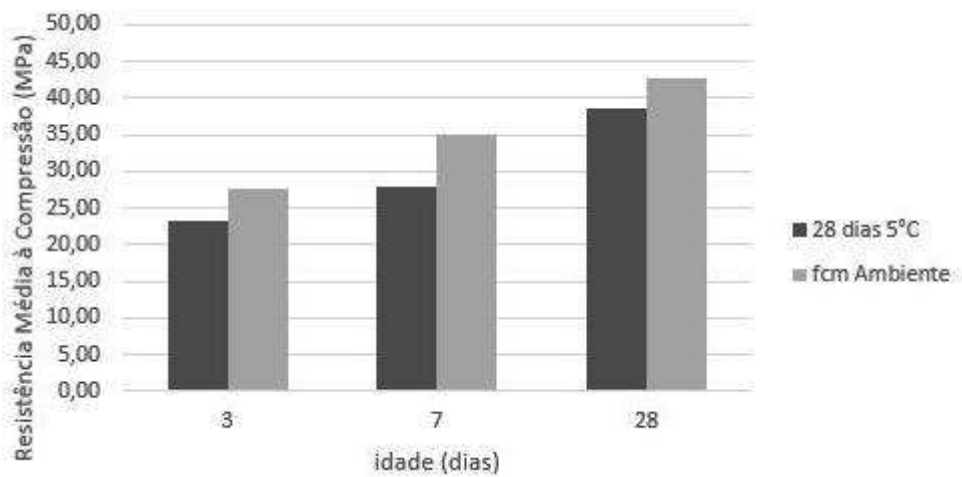
Amostras	Resistência à Compressão (MPa)	
	28F(2)	28A(2)
CP1	41,19	44,64
CP2	39,70	43,14
CP3	35,96	43,07
CP4	35,89	42,89
CP5	37,30	38,85
CP6	41,46	43,46
<b>Média</b>	<b>38,58</b>	<b>42,68</b>



**Figura 16 – Desenvolvimento da resistência à compressão do concreto curado à 5°C até completar 3 dias de idade com concreto curado inteiramente em temperatura ambiente.**



**Figura 17 – Desenvolvimento da resistência à compressão do concreto curado à 5°C até completar 7 dias de idade com concreto curado inteiramente em temperatura ambiente.**



**Figura 18 – Desenvolvimento da resistência à compressão do concreto curado à 5°C com concreto curado em temperatura ambiente.**

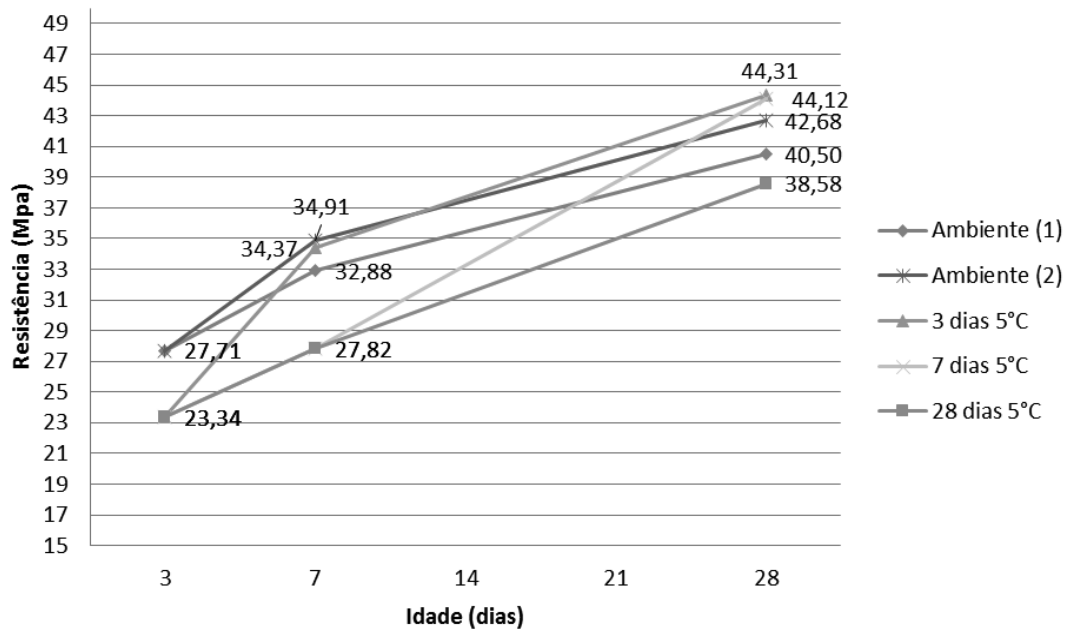


Figura 19 – Comparação da resistência à compressão dos CPs curados a 5°C com CPs curados na temperatura ambiente

#### 4.2.1 Análise da Dispersão dos Resultados

Como a quantidade de CPs analisados por lote era igual a seis, o valor do coeficiente  $d_2$  sugerido pela norma é de 2,534 para o cálculo do desvio padrão através da Equação 13. Baseado nesta classificação da NBR 5739 (ABNT, 2007), todos os lotes tiveram uma variação baixa e foram classificados como excelente, como pode ser observado nas Tabelas 12 e 13.

Tabela 12 - Classificação das Resistências

	3F(1)	3A(1)	3F4A(1)	7A(1)	3F25A(1)	28A(1)
Desv. Pad.	0,199	0,253	0,277	0,256	0,387	0,5610
Se/fcm	0,009	0,009	0,008	0,008	0,009	0,0139
$cv_e$	0,854	0,911	0,806	0,778	0,873	1,385
<b>Classificação</b>	excelente	excelente	excelente	excelente	excelente	excelente

Tabela 13 - Continuação da Classificação das Resistências

	7F(2)	7A(2)	7F21A(2)	28A(2)	28F(2)
Desv. Pad.	0,322	0,262	0,539	0,381	0,366
Se/fcm	0,012	0,008	0,012	0,009	0,009
$cv_e$	1,156	0,752	1,223	0,892	0,950
<b>Classificação</b>	excelente	excelente	excelente	excelente	excelente

#### 4.2.2 Teste da Análise de Variâncias

O valor do teste F de Levene indica se deve-se ou não proceder com a análise de variância. Como o valor encontrado no teste F foi maior que F crítico, então tem-se uma diferença significativa entre as médias dos valores das 3 amostras ao nível de 5 % de probabilidade ou 95% de confiança.

Uma vez analisados os coeficientes de variação dos lotes e constatado que pouco variam, optou-se por, na análise das variâncias, comparar lotes de mesma idade, independentemente da produção que originou este lote. Sendo assim, a análise das variâncias foi realizada para os lotes de sete dias de idade denominados 3F4A, 7A e 7F (3 tratamentos) e para os lotes de 28 dias de idade, denominados 3F25A, 7F21A, 28A e 28F (4 tratamentos).

Desta forma o programa calcula as médias de cada tratamento com a aplicação do teste Tukey com 5% probabilidade ou 95 % confiança, obtendo os parâmetros mostrados nas Figuras 20 e 21.

EXPERIMENTO INTEIRAMENTE CASUALIZADO				
QUADRO DE ANÁLISE				
FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	2	186.92440	93.46220	35.1337 **
Resíduo	15	39.90285	2.66019	
Total	17	226.82725		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ )  
 \* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )  
 ns não significativo ( $p \geq .05$ )

GL	GLR	F-crit	F	p
2	15	6.3589	35.1337	<.0001

MÉDIAS E MEDIDAS

Médias de tratamento		
1	27.81833	b
2	34.90833	a
3	34.36833	a

Figura 20 – Teste de Tukey para 3 tratamentos (CPs com 7 dias de idade)

Fonte: ASSISTAT®



Para o teste com 3 tratamentos, dois grupos foram determinados, a e b, desta forma, a segunda e a terceira amostras (7A e 3F4A) podem estar associadas (grupo a) e a primeira amostra (7F) é estatisticamente distinta (grupo b).

EXPERIMENTO INTEIRAMENTE CASUALIZADO				
QUADRO DE ANÁLISE				
FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	3	127.38095	42.46032	6.8180 **
Residuo	20	124.55443	6.22772	
Total	23	251.93538		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ )  
 \* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )  
 ns não significativo ( $p \geq .05$ )

GL	GLR	F-crit	F	P
3	20	4.9382	6.818	0.0023

MÉDIAS E MEDIDAS	
Médias de tratamento	
1	44.11500 a
2	42.67500 a
3	38.58333 b
4	44.31000 a

dms = 4.03445

**Figura 21 – Teste de Tukey para 4 tratamentos ( CPs com 28 dias de idade)**

Fonte: ASSISTAT®

Para o teste com 4 tratamentos, as amostras (3F25A, 7F21A, e 28A) podem estar associadas ao mesmo grupo (grupo a) e a terceira amostra (28F) é estatisticamente distinta dos demais (grupo b).

### 4.3 SÍNTESE DOS RESULTADOS

#### 4.3.1 Lote 1 - Três Dias de Exposição à Temperatura de 5°C

Pode-se analisar que no ensaio do concreto com idade igual a três dias, aquele que teve seu processo de cura submetido a 5°C adquiriu menor resistência à

compressão quando comparado ao concreto curado em condições de temperatura ambiente. O concreto exposto a baixa temperatura obteve uma média de resistência de 23,34 MPa, enquanto o concreto curado em temperatura ambiente obteve uma resistência média de 27,72 MPa, adquirindo apenas 84,2% da resistência que ele deveria atingir nesse período.

Ao ensaiar este lote com a idade de sete dias, verificou-se uma inversão no ganho de resistência. Dessa vez, o concreto que ficou até os três dias de idade exposto ao frio, e depois mais quatro dias em condições ambientes, obteve uma resistência 4,5% maior que a resistência adquirida pela amostra que ficou exposta durante sete dias a temperatura ambiente, ou seja, obteve uma média de 34,37 MPa contra 32,88 MPa da cura ambiente.

Depois de romper os CPs com 28 dias de idade, constatou-se que o concreto que ficou até os três dias de idade exposto ao frio, e depois mais 25 dias exposto ao ambiente, obteve uma resistência 9,41% maior que aquela adquirida pelos CPs expostos apenas a temperatura ambiente, comparando-se valores de 44,31 MPa com 40,50 MPa.

Assim sendo, nota-se que na exposição até o terceiro dia à temperatura de 5°C, o concreto apresentou um ganho de resistência inicial mais lento, porém ele foi se desenvolvendo durante sua cura, e ao final de 28 dias, esta resistência era maior que o concreto curado em temperatura ambiente.

Segundo CECCONELLO e TUTIKIAN (2012), quanto mais lenta for a hidratação do cimento Portland, melhor será a estrutura cristalina do concreto. Desta forma, é justificável que os elementos que foram expostos, em suas idades iniciais, à baixas temperaturas, obtenha um desempenho superior ao de elementos curados em temperatura ambiente. Portanto, verifica-se que temperaturas na faixa de 5°C são capazes de desacelerar o processo de hidratação do cimento.

Além disso, ao analisar profundamente a hidratação dos compostos químicos presentes no cimento, segundo Helene e Terzian (1993), a resistência à compressão em idades iniciais depende da hidratação de compostos como o aluminato tricálcico (C3A) e o ferro-aluminato (C4AF), que são os responsáveis pelo enrijecimento da pasta (formação de etringitas e posteriormente dão origem a monossulfatos hidratados) enquanto em idades mais avançadas prevalece a influência da hidratação dos silicatos bicálcicos (C2S), responsável pela resistência da pasta endurecida.

#### 4.3.2 Lote 2 – Sete Dias de Exposição à Temperatura de 5°C

Ao ensaiar as amostras desse lote com idade igual a sete dias, o concreto que teve seu processo de cura submetido a 5°C também adquiriu menor resistência à compressão que as amostras curadas em temperatura ambiente e com mesma idade. O concreto exposto a baixa temperatura obteve uma média de resistência de 27,82 MPa, enquanto o concreto curado em temperatura ambiente obteve uma resistência de 32,88 MPa, ou seja, adquiriu somente 84,6% da resistência esperada para a idade.

É interessante destacar que a resistência adquirida pelo concreto, em sete dias de exposição ao frio, é minimamente superior à resistência adquirida pelo concreto de três dias de idade que ficou exposto apenas a temperatura ambiente. Ou seja, em sete dias de frio, o concreto adquiriu 0,39% mais resistência que um concreto com idade igual a três dias, porém curado na temperatura ambiente. (27,82 MPa contra 27,71 MPa)

Já nos resultados dos ensaios do concreto com idade de 28 dias, notou-se uma inversão nos valores. Novamente aquele concreto que teve sua idade inicial exposta a baixas temperaturas, “recuperou” a resistência ao ser transferido para completar sua cura em temperatura ambiente, desenvolvendo uma resistência 8,93% maior que o concreto curado completamente na temperatura ambiente. (44,12 MPa contra 40,50 MPa).

Nota-se que o concreto que completou sete dias de no frio e 21 ao ambiente obteve uma resistência 0,44% menor que a resistência desenvolvida pelo concreto que completou três dias exposto a 5°C e 25 dias em cura ambiente.

#### 4.3.3 Lote 3 – 28 Dias de Exposição à Temperatura de 5°C

Para o lote que permaneceu todo o período de cura exposto ao frio, os resultados mantiveram um padrão diferente. A resistência média deste concreto foi igual a 38,58 MPa, 4,73% menor que a resistência desenvolvida pelo concreto que teve toda sua cura em temperatura ambiente.

Com esses resultados, observa-se que nas idades iniciais, a resistência à compressão do concreto exposto a baixas temperaturas é cerca de 15% menor que

o concreto curado em temperatura ambiente. Em uma idade mais avançada, 28 dias, o concreto curado em baixa temperatura consegue diminuir essa diferença para 4,73%, mas ainda continua menor que qualquer lote do estudo que foi exposto à temperatura ambiente. A inversão nos valores das resistências ocorreu apenas no material que foi exposto as duas modalidades de cura, o que certamente propiciou esse desenvolvimento de resistência de uma forma mais acentuada.

Observa-se assim que a exposição a temperatura de 5°C afetou de forma mais acentuada o desenvolvimento da resistência em idades iniciais, e que ao transferir o material para as condições de temperatura ambiente, o concreto foi capaz de obter uma resistência final ainda maior que o concreto curado apenas em temperatura ambiente.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através deste trabalho foi possível evidenciar que a exposição do concreto a baixas temperaturas pode influenciar negativamente o desenvolvimento inicial da resistência à compressão do material, porém em longo prazo essa exposição pode trazer benefícios.

Além de desacelerar o ganho da resistência à compressão do concreto, a temperatura de 5°C, quando combinada com a cura ambiente também se mostrou eficaz em longo prazo. Após 28 dias o concreto exposto às duas condições de cura propostas por diferentes períodos, adquiriu uma resistência à compressão cerca de 9% maior que aquela adquirida pelo material exposto somente à temperatura ambiente. Portanto, a baixa temperatura influencia de forma negativa apenas o ganho inicial da resistência, já para idades mais avançadas, os resultados mostram que o material desenvolveu um comportamento melhor que o esperado.

Aplicando esses valores na prática da construção civil, cuidados especiais devem ser tomados para concretagens em dias com temperaturas próximas ou inferiores a 5°C, principalmente quanto à desforma dos elementos estruturais de concreto. Com a redução da resistência à compressão nessas condições de cura, os elementos concretados podem não atingir a resistência esperada até a retirada do escoramento, e se este mesmo assim ocorrer na data que era prevista para condições normais de cura, fissuras poderão surgir nessas estruturas, trazendo danos irreversíveis à edificação.

### 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Utilizando do mesmo processo de cura, recomenda-se que se teste o concreto à tração, buscando observar como a baixa temperatura pode influenciar nesta outra característica do concreto.

Dentro das condições que se tinha na universidade, e objetivando a cura por imersão do concreto, esperou-se 24 horas para desformar e submeter os CPs às baixas temperaturas. Essas primeiras 24 horas podem ter sido responsáveis pela formação da alta resistência inicial deste concreto. Recomenda-se que em futuros trabalhos, os CPs sejam submetidos a baixas temperaturas logo na primeira hora,

mesmo dentro do molde, simulando com maior fidelidade uma concretagem em dias de inverno.

Outra pesquisa interessante seria realizar o mesmo procedimento de cura realizado neste trabalho, porém variando o consumo de água na dosagem do concreto, analisando assim como a quantidade de água no material pode influenciar diante da exposição as condições de frio.

## REFERÊNCIAS

AÏTCIN, Pierre Claude. **Concreto de Alto Desempenho, tradução de Geraldo G. Serra.** rev. Salvador Eugênio Giammusso – São Paulo – Editora Pini, 2000.

ALVES, J. D. **Materiais de construção.** 6ª ed. Goiânia, Editora da Universidade Federal de Goiás, 1987.363p.

ANDRIOLO, Francisco Rodrigues. **Construção de concreto, manual de práticas para controle e execução.** São Paulo: PINI, 1984.

AOKI, Jorge. Adicionar água suplementar ao concreto exige cuidados. **Cimento Itambé.** 2013. Disponível em: <<http://www.cimento-itambe.com.br/adicionar-agua-suplementar-ao-concreto-exige-cuidados/>>. Acesso em: 07 abr. 2017.

ARAÚJO, R. C. L.; RODRIGUES, E. H. V.; FREITAS, E. G. A. **Materiais de construção.** v.1 Editora Universidade Rural,. Rio de Janeiro, 2000. 203p.

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

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

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

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

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

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

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

ASTM C125-13: Terminology Relating to Concrete and Concrete Agregates. West Conshohocken, PA. Estados Unidos da América, 2013.

ASTM C150-07: Standard Specification for Portland Cement. West Conshohocken, PA. Estados Unidos da América, 2007.

BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de Construção**. Vol 1, 5º ed p. 49 e p 347. São Paulo, LTC, 2000. 435 p.

BRANCO, Caio Péricles; PIERETTI, Renato Aparecido. **Avaliar a resistência do concreto curado à -5°C e 0°C**. 40f. Trabalho de Conclusão de Curso de Tecnologia em Concreto - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

BUCHER, H. R. E. **Estimativa da resistência à compressão de concretos executados com cimento nacional em função da relação a/c**. São Paulo: ABCP 1989.

CARVALHO, João Dirceu Nogueira de. Sobre as origens e desenvolvimento de concreto. **Revista Tecnológica**. v. 17, p. 19-28, 2008. Disponível em: <http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/RevTecnol/article/view/8169/0>. Acesso em: 07 abr. 2017.

CECCONELLO, Vinicius; TUTIKIAN, Bernardo. The influence of low temperature on the evolution of concrete strength (A influência das baixas temperaturas na evolução das resistências do concreto) 2012. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1983-41952012000100006](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-41952012000100006) > Acesso em: 01 set. 2016.

Del Zotto – Products of Florida, Inc. **Interesting Facts about the concrete Pantheon**. Disponível em: <https://delzottoproducts.com/2014/12/22/interesting-facts-concrete-pantheon/>. Acesso em: 21 abr 2017.

GIAMMUSSO, Salvador Eugênio. **Manual do Concreto**.1ª ed. São Paulo. PINI, 1992. 164p.

HELENE, Paulo. R. L. TERZIAN, Paulo **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo, Pini, 1993. 349 p.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Temperatura média anual. Brasília – DF. Disponível em: < <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/page&page=anomaliaTempMediaAnual> > Acesso em: 30 abr. 2017.



ISERHARD, José Luís Rodrigues de Freitas. **Contribuição ao estudo da viabilidade da cura do concreto por energia solar**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

LAGUNA, Luis Antonio; IKEMATSU, Paula. A influência da temperatura na desforma do concreto. **Revista Técnica**. 2011. Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/>>. Acesso em: 13 set. 2016.

LANSINI, Bruno, **Influência da temperatura de cura na resistência à compressão do concreto**. 2016. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Curso de Engenharia Civil.

LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E. (1977). Construções de concreto: princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado Vol.1. Trad. Sob direção de David Fridman. Rio de Janeiro, Interciência, 2008. 305p.

MACGREGOR, J. G., Reinforced Concrete Mechanics and Design, Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River, New Jersey, 1997.

MACHADO, Marlon. Clima do Brasil. **Projeto Cactáceas Brasileiras**. Disponível em: <<http://www.bractaceae.org/clima.html> > Acesso em: 06 set. 2016.

MAGALHÃES, Fábio Costa. **Estudo probabilístico da resistência à compressão e da resistência à tração na flexão dos concretos utilizados na construção do dique seco do estaleiro rio grande, no superporto, em Rio Grande-RS**. 181f. Dissertação (Mestrado em engenharia oceânica). Universidade Federal do Rio Grande. Rio Grande-RS, 2009.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 3 ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.

NERY, Jonas Teixeira. Dinâmica climática da região sul do brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**. V1, n 1. Aracaju, SE. 2005

NEVILLE, A. M. Propriedades do Concreto / Tradução Salvador E. Giammusso – São Paulo, Pini, 1997.

OLIVEIRA, Raquel Maria de. **Relação entre distribuição de espécies arbóreas em matas úmidas e os os fatores Ambientais da costa atlântica brasileira**. 212f. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Rio Claro, 2003.

PEDROSO, Fábio Luís. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Revista Concreto & Construções**, ano 37, n. 53, p.14-19, São Paulo, IBRACON, 2009. Disponível em: < [www.ibracon.org.br](http://www.ibracon.org.br) > Acesso em: 06 set. 2016.

PETRUCCI, Eládio G. R. **Concreto de Cimento Portland**. 13ªed. São Paulo: Editora Globo, 1998.

PINHEIRO, L. M., MUZARDO, C. D., SANTOS S.P., Estruturas de concreto Cap. 2. 03/2004 Disponível em: <<http://www.fec.unicamp.br/~almeida/ec702/EESC/Concreto.pdf>> Acesso em: 03 set. 2016.

REGINATO, L. A.; FOIATO, M.; PIOVESAN A. Z. Avaliação da resistência à compressão do concreto curado em baixa temperatura. **UNOESC & Ciência ACET**. V.4, n.2 (2013).

REIS, João Felipe Araujo. **Determinação de Parâmetros Reológicos de Concretos Através do Ensaio de Abatimento de Tronco de Cone Modificado: Estudo de Caso**. 178f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia - UNESP – Campus de Ilha Solteira - SP. 2008.

RIBEIRO, C. C., PINTO J. D. S. e STARLING, T. **Materiais de Construção Civil**. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2006. p.62.

RODRIGUES, Publio Penna Firme. **Parâmetros da Dosagem Racional do Concreto**. 34ª Reunião dos Técnicos da Indústria do Cimento, 1983.

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