

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
DE MINAS GERAIS - *CAMPUS* AVANÇADO PIUMHI  
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

Glaysen Ronan Teixeira

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE CURA NA RESISTÊNCIA À  
COMPRESSÃO DO CONCRETO**

PIUMHI - MG

2020

Glaysen Ronan Teixeira

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE CURA NA RESISTÊNCIA À  
COMPRESSÃO DO CONCRETO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. M.e Júnior Henrique Canaval

PIUMHI

2020

## FICHA CATALOGRÁFICA

T266a Teixeira, Glayson Ronan.

Avaliação da influência do processo de cura na resistência à compressão do concreto / Glayson Ronan Teixeira. – 2020.  
60 f.

Orientador: Júnior Henrique Canaval.

Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais - *Campus Avançado Piumhi*, 2020.

1. Concreto. 2. Processo de cura - concreto. 3. Resistência à compressão - concreto. I. Título.

CDD 620.137

Ficha elaborada pela bibliotecária Andreia Cristina Damasceno - CRB6/1974

Glaysen Ronan Teixeira

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE CURA NA RESISTÊNCIA À  
COMPRESSÃO DO CONCRETO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Instituto Federal de  
Ciência e Tecnologia de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do  
título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 13 de Abril de 2020.


**BANCA EXAMINADORA**

  
\_\_\_\_\_  
Prof. M.e Humberto Coelho de Melo - IFMG

  
\_\_\_\_\_  
Prof. M.e Thiago Pastre Pereira – IFMG

  
\_\_\_\_\_  
Prof. M.e Tobias Ribeiro Ferreira - IFMG

  
\_\_\_\_\_  
Prof. M.e Vinícius Barbosa de Paiva - IFMG

  
\_\_\_\_\_  
Prof. M.e Júnior Henrique Canaval - IFMG (Orientador)

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse, ao longo de minha vida, e não somente nestes anos como universitário, mas que em todos os momentos é o maior mestre que alguém pode conhecer.

A esta Instituição, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um horizonte superior, eivado pela acendrada confiança no mérito e ética aqui presentes.

Ao meu orientador M.e Júnior Henrique Canaval, pelo suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas suas correções, disposição, confiança e incentivos.

A minha namorada Sarah Felício Teixeira, que em todos os momentos durante todo o decorrer do curso esteve sempre ao meu lado, me incentivando, dispondo-se para ajudar em qualquer situação, e nunca me deixado desistir.

Aos meus pais e irmão, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

Agradeço a todos os professores por me proporcionar o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional, por tanto que se dedicaram a mim, não somente por terem me ensinado, mas por terem me feito aprender. A palavra mestre, nunca fará justiça aos professores dedicados aos quais sem nominar terão os meus eternos agradecimentos.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

## RESUMO

O processo de cura é um dos estágios fundamentais na execução do concreto, pois contribui para o aumento de sua resistência e para garantir características necessárias para um bom desempenho. As propriedades do concreto são consequências do controle de qualidade de sua produção, onde os materiais utilizados são de grande importância para que o concreto alcance os requisitos exigidos em projetos. Assim sendo, o presente trabalho tem como objetivo analisar e comparar a resistência à compressão do concreto, por meio de ensaio de compressão axial de corpos-de-prova cilíndricos, variando os tipos de cura. Os tipos de curas empregados foram por aspersão, submersão, corpos-de-prova enterrados e expostos ao ambiente (sem cura). De posse dos resultados foi observada a relevância do processo adequado de cura que pode proporcionar um ganho de até 52% na resistência final à compressão axial do concreto. O processo de cura por aspersão, que é muito utilizado na prática, se mostrou eficaz, entretanto, é de elevada importância o controle na produção, tendo em vista a grande variedade de fatores que influenciam na resistência final do elemento de concreto. A cura com corpos-de-prova enterrados demonstrou resultados semelhantes aos aspergidos para o tempo de cura de 28 dias, tendo um efeito semelhante para impedir a evaporação da água de amassamento. Analisando a cura exposta ao ambiente, demonstrou resultados elevados devido a condições climáticas ocorridas no período inicial de cura. Já a cura por submersão apresentou resultados satisfatórios e esperados, por estar sempre em contato com a água durante todo o processo.

**Palavras chave:** Processo de cura. Concreto. Resistência à compressão.

## **ABSTRACT**

The curing process is one of the fundamental stages in the execution of the concrete, because it contributes to the increase of resistance and guarantees the necessary characteristics for a good performance. The properties of concrete are consequences of the quality control of the production, where the materials used are of great importance for the concrete to reach the requirements required in projects. Therefore, the present work aims to analyse and compare the compressive strength of concrete, by means of axial compression testing of cylindrical specimens, varying the types of curing. The types of cures used were sprinkling, submersion, buried and exposed to the environment (without curing). In possession of the results, the relevance of the adequate curing process was observed, which can provide a gain of up to 52% in the final resistance to axial compression of the concrete. The spray-curing process, which is widely used in practice, proved to be effective, however, production control is of high importance, given the wide variety of factors that influence the final strength of the concrete element. The curing with buried specimens showed results like those sprinkled for the curing time of 28 days, having a similar effect to prevent the evaporation of the kneading water. Analysing the cure exposed to the environment, it showed high results due to climatic conditions that occurred in the initial cure period. The submersion cure, on the other hand, presented satisfactory and expected results, as it is always in contact with water throughout the process.

Keywords: Curing process. Concrete. Compressive strength.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Panteão Roma.....	16
Figura 2 - Etapas envolvidas na hidratação do cimento Portland e suas respectivas liberações de calor.....	24
Figura 3 - Processo hidratação cimento.....	26
Figura 4 - Ensaio de abatimento de cone.....	35
Figura 5 - Resistência a compressão diferentes dias.....	38
Figura 6 - Betoneira.....	41
Figura 7 - Molde cilíndrico para corpos-de-prova.....	42
Figura 8 - Conjunto para slump test.....	42
Figura 9 - Balança digital.....	43
Figura 10 - Prensa hidráulica elétrica digital.....	44
Figura 11 - Pesagem e separação dos materiais.....	45
Figura 12 - Moldes cilíndricos.....	46
Figura 13 - Concreto misturado na betoneira.....	47
Figura 14 - Adensamento camadas corpos-de-prova.....	48
Figura 15 - Desmolde dos corpos-de-prova.....	48
Figura 16 - Corpos-de-prova após cura inicial.....	49

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Percentual das fases em uma mesma pasta de cimento Portland .....	26
Quadro 2: Resultados comparativos de diferentes tipos de cura .....	38
Quadro 3 - Tolerância para a idade de ensaio .....	39
Quadro 4 - Características cimento .....	40
Quadro 5 - Resultados ensaio de resistência à compressão.....	52
Quadro 6 - Avaliação do coeficiente de variação .....	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das consistências do concreto.....	19
Tabela 2 - Classificação das britas.....	33
Tabela 3 - Classificação através do abatimento do tronco de cone.....	35
Tabela 4 - Tempo mínimo de cura do concreto conforme a relação a/c e o tipo de cimento .....	36
Tabela 5 - Traços determinados.....	45
Tabela 6 - Médias as resistências entre os corpos-de-prova.....	54
Tabela 7 - Desvio padrão.....	54
Tabela 8 - Coeficiente de variação do ensaio .....	54
Tabela 9 - Relação entre resistências corpos-de-prova aspergidos e os outros.....	55

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1 OBJETIVOS .....	14
1.1.1 Objetivo Geral .....	14
1.1.2 Objetivos específicos .....	14
1.2 JUSTIFICATIVA .....	14
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>16</b>
2.1 Concreto.....	16
2.2 Propriedades do concreto fresco .....	18
2.2.1 Consistência .....	18
2.2.2 Trabalhabilidade.....	19
2.2.3 Homogeneidade.....	20
2.2.4 Adensamento .....	20
2.2.5 Início do endurecimento do concreto.....	20
2.3 Cura do concreto .....	21
2.4 Concreto Endurecido .....	21
2.4.1 Resistência à compressão .....	22
2.5 Materiais constituintes do concreto .....	22
2.5.1 Cimento .....	22
2.5.2 Hidratação do cimento .....	23
2.5.3 Agregados.....	32
2.5.4 Água .....	34
2.6 Ensaio de abatimento do tronco de cone.....	34
2.6 Processos de Cura .....	36
2.6.1 Aspersão.....	37
2.6.2 Cura por submersão .....	37
2.6.3 Cura enterrada.....	37
2.6.4 Cura ao ar livre.....	37
2.6.5 Estudos comparativos .....	37
2.7 Ensaio de Compressão .....	39
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>40</b>
3.1 Materiais.....	40
3.2 Equipamentos.....	41
3.3 Metodologia .....	44
<b>4 RESULTADOS .....</b>	<b>51</b>

4.1 <i>Slump Test</i> .....	51
4.2 Resistência à compressão .....	51
4.3 Discussões dos resultados .....	55
4.3.1 Análise por traços .....	56
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	<b>57</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>59</b>

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Alumina
<b>C<sub>2</sub>S</b>	Silicato dicálcico
<b>C<sub>3</sub>A</b>	Aluminato tricálcico
<b>C<sub>3</sub>S</b>	Silicato tricálcico
<b>C<sub>4</sub>AF</b>	Ferroaluminato tetracálcico
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Óxido de ferro III
<b>K<sub>2</sub>O</b>	Óxido de Potássio
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	Óxido de Sódio
<b>µm</b>	Unidade de medida de comprimento- micrometro
<b>a/c</b>	Água/cimento
<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>cm</b>	Unidade de medida de comprimento- centímetro
<b>CP</b>	Cimento Portland
<b>F<sub>ck</sub></b>	Resistência Característica do Concreto à Compressão
<b>Kg</b>	Unidade de medida de massa- quilograma
<b>KN</b>	Unidade de medida de força- quilo Newton
<b>mg/l</b>	Unidade de medida de densidade- miligrama/litro
<b>mm</b>	Unidade de medida de comprimento- milímetro
<b>MPa</b>	Unidade de medida de tensão- Mega Pascal
<b>NBR</b>	Norma brasileira
<b>NM</b>	Norma Mercosul
<b>Ø</b>	Diâmetro
<b>Ph</b>	Unidade de medida de grau de acidez- potencial Hidrogeniônico
<b>Tf</b>	Unidade de medida de força- Tonelada Força
<b>CaO</b>	Cal
<b>MgO</b>	Magnésia
<b>SO<sub>3</sub></b>	Óxido sulfúrico
<b>SiO<sub>2</sub></b>	Sílica

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto hidráulico, composto por cimento, agregado graúdo, agregado miúdo e água, é um material amplamente usado na indústria da construção civil, devido ao seu elevado desempenho quanto aos esforços de compressão e sua adaptabilidade com outros materiais como o aço que garante resistência à tração, fazendo com que o elemento atenda às cargas solicitantes. Pode ainda, se desejar melhorar as propriedades do material, acrescentar aditivos na composição da mistura (PETRUCCI, 1998).

A correta execução e controle do processo produtivo, manipulação adequada e cura cuidadosa, assim como as propriedades dos materiais e a proporção entre eles, são essenciais para que o concreto alcance as características especificadas em projeto, que seja durável e econômico (PETRUCCI, 1998).

A cura, que é uma das principais etapas na execução do concreto, é um conjunto de medidas com o objetivo de impedir a evaporação da água de amassamento no seu interior, tem participação direta no desenvolvimento do processo de hidratação da pasta de cimento, contribuindo assim, para evitar a retração e o transporte de substâncias que poderão interferir neste estágio (AMBROZEWICZ, 2012).

Bauer (2016) defende que um bom processo de cura favorece consideravelmente qualidades desejáveis do concreto como resistência mecânica à ruptura e ao desgaste, impermeabilidade e resistência à agentes agressivos.

Haja vista a importância da fase de cura na qualidade do material, este trabalho tem por objetivo avaliar a resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto submetidos à diferentes processos de cura, mais especificamente cura por aspersão, submersa, ao ar livre e com os corpos-de-prova enterrados após a desforma, visando aplicações de pequena massa de concreto comum e sem aditivos, em climas da região de Piumhi-MG.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a resistência à compressão axial de corpos-de-provas cilíndricos de concreto submetidos a diferentes processos de cura.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar produção de concreto comum, nos três traços em massa 1:2:3:0,5; 1:2:1,5:0,6 e 1:2:2:0,51;
- Realizar ensaios de compressão simples;
- Analisar os resultados do ensaio para diferentes tipos de cura e traços de concreto;
- Analisar a consistência do concreto a partir do *slump test* ou ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone;
- Produzir corpos-de-prova de concreto, de acordo com a norma ABNT NBR 5738.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O processo de cura tem por objetivo proteger a superfície dos elementos estruturais e principalmente evitar que a água usada no amassamento necessária para hidratação do cimento evapore precocemente. Logo, se o concreto é corretamente dosado e curado durante os primeiros estágios de endurecimento, ele terá melhores condições como baixa permeabilidade, baixa absorção de água, alta resistência à carbonatação e à difusão de íons, e conseqüentemente maior resistência mecânica e durabilidade (HELENE; LEVY, 2013).

Se a cura do concreto for feita de forma inadequada não havendo hidratação suficiente do cimento, pode ocorrer perda de resistência e deformações específicas ocasionadas pela retração. Se esta deformação for de grande dimensão poderá acarretar tensões acentuadas provocando fissuras no concreto. Sendo assim a cura é a última de todas as etapas importantes para execução de um elemento de concreto, influenciando diretamente na resistência e durabilidade da estrutura (SOUZA; RIPPER, 1998).

Helene e Levy (2013) ressaltam que secagens prematuras do concreto resultam em camadas superficiais porosas, conseqüentemente com baixa resistência ao ataque dos agentes agressivos e facilmente fissuráveis, o que compromete a qualidade e durabilidade da estrutura.

Visando que a estrutura apresente resultados mais próximos daqueles definidos no dimensionamento e projeto, certas operações de cura são de suma importância, e é essencial que estas tenham início imediatamente após o adensamento do concreto fresco. Porém, é notório que para a maior parte das obras, a etapa de cura limita-se exclusivamente a molhar as estruturas recém concretadas umas poucas vezes ao dia, por um curto período (HELENE; LEVY, 2013).

Este estudo ainda se justifica por orientar e apresentar os efeitos ocasionados por não fazer a cura ou realizá-la de maneira incorreta. Os resultados demonstram efeitos que podem ser obtidos pelos processos de cura através de tratamento e ensaios realizados nas condições climáticas do ambiente, para explicitar aos executores a importância do correto procedimento de cura.

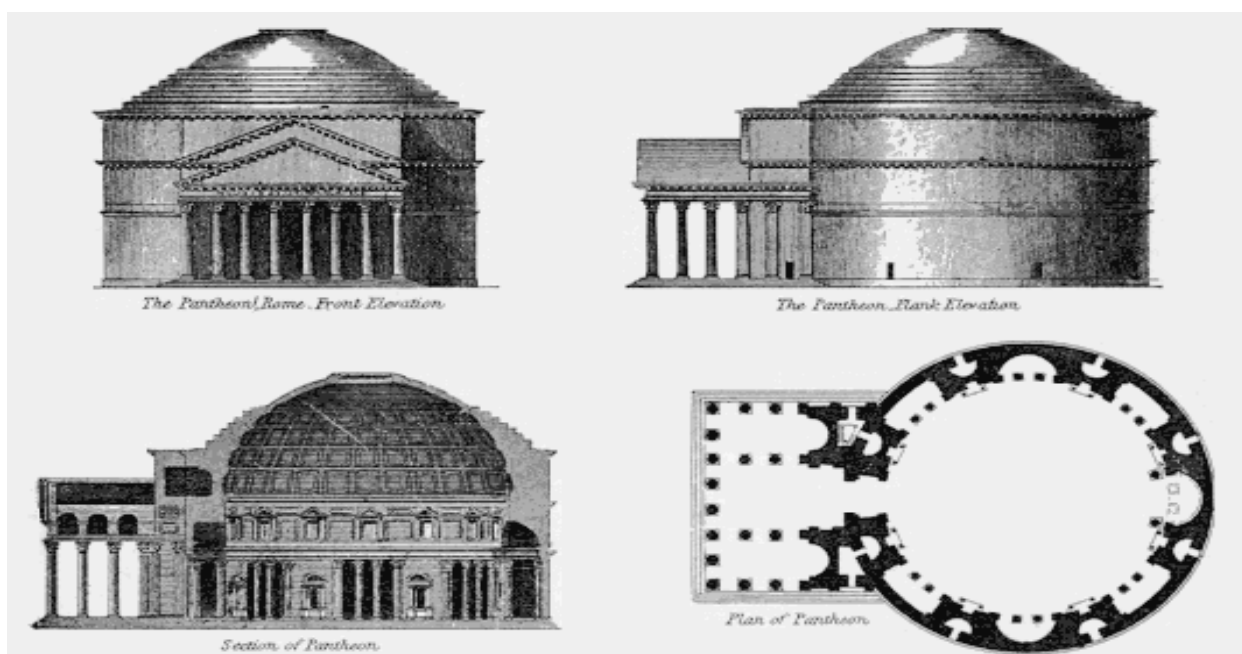
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Concreto

O concreto é o material de construção civil mais consumido pelo homem depois da água. Ele é o resultado da mistura de aglomerante, agregados graúdos, miúdos e água, sendo os mais utilizados: cimento, brita e areia, respectivamente. Em algumas situações são adicionados produtos químicos ou componentes, como polímeros e microsilica, com a finalidade de melhorar suas propriedades de trabalhabilidade, resistência e para retardar a velocidade das reações químicas que ocorrem no concreto.

A cúpula do Panteão é um exemplo emblemático do concreto simples na Roma, conforme ilustrado na Figura 1, com maior vão livre da antiguidade, foi construída com um concreto primitivo obtido pela mistura de cal hidratada e argila pozolânica (HELENE, 2010).

Figura 1 - Panteão Roma



Fonte: História da Arte<sup>1</sup>, 2019

Joseph Aspdin, em 1824, criou o processo de fabricação industrial do cimento Portland na Inglaterra que passou a ser produzido em todo mundo. Entretanto, as

---

<sup>1</sup> Disponível em: [historiadaarte.pbworks.com/w/page/18413911/Pante%C3%A3o](https://historiadaarte.pbworks.com/w/page/18413911/Pante%C3%A3o). Data de acesso 16/12/2019.

primeiras regras de dosagem de materiais para concreto são atribuídas a Leonardo da Vinci (CLÍMACO, 2013).

Em 1873, o americano W.E Ward construiu na cidade de New York, a primeira casa de concreto armado, ainda existente, conhecida por Ward's Castle (CHUST, 2013).

Estudos recentes em tecnologia do concreto têm apresentado resultados cada vez mais resistentes e duráveis para o material, logo, mais eficientes e com vantagens econômicas para a obra como um todo, possibilitando a redução da altura das vigas e a quantidade de pilares (HELENE; LEVY, 2013).

O planejamento e cuidados na execução do concreto são fatores dependentes para as diversas características que este deve apresentar em sua fase de endurecimento. Este planejamento consiste na definição das propriedades e características do concreto (CARVALHO, 2007).

De acordo com Ambrozewicz (2012) para se obter um concreto com características desejadas deve-se observar os seguintes aspectos:

- Propriedades dos materiais que o compõe;
- Propriedades com concreto e a relação com fatores que podem alterá-las;
- Definição do traço, correta proporção e execução da mistura;
- Equipamentos para a mistura e transporte;
- Controle durante à fabricação e após endurecimento;
- Adensamento e cura.

Dentro do controle de execução, uma das partes importantes é a cura do concreto, objeto de estudo neste trabalho, dentre as diversas soluções, escolheu-se às seguintes para estudo: cura por aspersão, submersa, direto ao ar e com corpo-de-prova enterrado. A análise feita em corpo-de-prova enterrado visa aproximar a situação ocorrida na concretagem de elementos de fundação em concreto. Ressalta-se ainda que, o procedimento do corpo-de-prova enterrado poderia ser mais próximo do real caso fosse possível moldar o corpo-de-prova em contato direto com o solo.

## **2.2 Propriedades do concreto fresco**

Dentre as propriedades do concreto fresco, as principais são a trabalhabilidade, a consistência e a homogeneidade. Este é caracterizado como substancialmente heterogêneo, composto por elementos em todas as fases, ou seja, gases, líquidos, gel e sólidos, com o objetivo do seu preparo para obter um material predominantemente sólido, com alta resistência e com poucos índices de vazios. É obtido pela hidratação adequada do cimento, de forma que a pasta decorrente possa cingir e aderir satisfatoriamente os sólidos presentes (CARVALHO, 2007).

Para AMBROZEWICZ (2012), a consistência e a trabalhabilidade dependem da composição do concreto, especificamente da quantidade de água, da granulometria dos agregados e da presença de aditivos. Na dosagem do concreto deve-se obter consistência necessária para as condições da obra, onde que houver peças finas e bastante armadas, será necessário misturas mais fluidas que em peças de grandes dimensões e com pouca armação.

Uma etapa essencialmente importante na produção do concreto e que pode interferir em suas características finais é o adensamento a que ele é submetido, de maneira a ocupar todo o espaço da fôrma sem que exista segregação de seus materiais constituintes. Outro fator que afeta nas suas propriedades e a sua qualidade e durabilidade é a cura que ele é submetido, posteriormente ao adensamento e início de pega (CARVALHO, 2007).

### **2.2.1 Consistência**

A consistência do concreto fresco é a primeira propriedade que deve ser apontada. Esta representa a menor ou maior capacidade que o concreto fresco tem de deformar, sendo concernente ao processo de transporte, adensamento e lançamento, podendo variar com a quantidade de água aplicada, granulometria dos agregados e pela presença de aditivos (CARVALHO, 2007).

Os concretos que possuem baixas consistências devem ser utilizados em elementos com alta taxa de armadura, pois contém maior dificuldade de adensamento. Em casos que não houver uma quantidade significativa de armadura nas peças, deve-se utilizar concretos com maior consistência, sendo este geralmente com menor quantidade de água. Uma forma de ser medida a consistência do concreto

é por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone ou *slump test*, descrito no item 2.6 Ensaio de abatimento, que é regulamentado pela NBR NM 67/1998 (CARVALHO, 2007).

Andolfato (2002) classifica a consistência dos concretos de acordo com o resultado de abatimento obtido no *slump test*, conforme recomenda as faixas de abatimento entre 3 cm e 10 cm para obras de fundações e paredes grossas, entre 5 cm e 10 cm para vigas, lajes e paredes finas e 3 cm e 5 cm para pavimentos e para obras maciças entre 2 cm e 5 cm.

Tabela 1 - Classificação das consistências do concreto

<b>Consistência</b>	<b>Abatimento (mm)</b>
<b>Seca</b>	$0 \leq A < 20$
<b>Firme</b>	$20 \leq A < 50$
<b>Média</b>	$50 \leq A < 120$
<b>Mole</b>	$120 \leq A < 180$
<b>Fluída</b>	$180 \leq A < 250$

Fonte: Andolfato, 2002.

### 2.2.2 Trabalhabilidade

A definição de trabalhabilidade de um concreto está relacionada aos métodos de lançamento, de adensamento e de acabamento, que serão adotados. Esta noção é mais subjetiva que física, onde seu comportamento físico, o fator mais importante da trabalhabilidade é a consistência, modo que aplicado ao concreto, mostra propriedades intrínsecas da mistura fresca relativa a mobilidade de massa e coesão entre os elementos constituintes, visando a uniformidade e a compacidade do concreto, além de seu bom rendimento na execução (BAUER, 2016).

A trabalhabilidade de um concreto, bem como sua consistência, é relacionada de acordo com a granulometria dos agregados, aditivos e essencialmente do fator água/cimento (*a/c*). Este fator é regulamentado pela NBR 6118:2014, relacionando valores máximos, estipulados em função da agressividade do meio em que está inserida, edificação e resistência específica para o concreto (CARVALHO, 2007).

Experimentalmente é possível verificar que quanto mais elevada for a relação *a/c*, maior será a relação areia/pedra para uma maior plasticidade, visto que para obter melhor trabalhabilidade é necessário que os agregados possuam granulometria

contínua. Outro fator que pode estar modificando a consistência do concreto é a temperatura ambiente, onde pode variar a quantidade de água necessária para atingir a mesma consistência (AMBROZEWICZ, 2012).

### **2.2.3 Homogeneidade**

É de grande importância a distribuição correta dos agregados graúdos dentro da massa de concreto pois pode haver interferência na qualidade do mesmo. O seu fator de qualidade está relacionado com a uniformidade ou regularidade que seus agregados graúdos apresentam dispersos na massa, estando totalmente envolvidos por estas pastas, sem apresentar desagregação, principalmente quanto à proteção e permeabilidade relativa à armadura, resultando em um melhor acabamento e dispensando a necessidade de reparos consequentes (CARVALHO, 2007).

Quanto mais homogêneo for o concreto, melhor será a qualidade da edificação decorrente, podendo ser adquirida com uma boa mistura do concreto durante a etapa de fabricação, cuidados no transporte e no lançamento do concreto nas fôrmas. Estes cuidados são definidos pela NBR 14931:2004 que se trata da execução das estruturas de concreto (CARVALHO, 2007).

### **2.2.4 Adensamento**

Este fator é de grande importância na produção das estruturas de concreto e interfere nas características e propriedades finais das mesmas. O adensamento é realizado por meio de aplicação de energia mecânica no concreto, constituído em um primeiro momento na separação dos componentes em seguida para mistura adequada, evitando a formação de bolhas de ar, vazios e segregação de materiais, preenchendo toda a fôrma. Um dos processos utilizado para atingir um adensamento eficaz é a vibração mecânica, obtida pela imersão de vibradores na massa de concreto obedecendo a norma ABNT NBR 14931:2004 (CARVALHO, 2007).

### **2.2.5 Início do endurecimento do concreto**

Este processo de endurecimento do concreto se inicia em poucas horas após sua produção, até atingir um estado que possa ser desenformado mesmo não atingindo sua resistência total, chamado também de “pega”. Este início do endurecimento do concreto é definido quando sua consistência não possibilita mais

trabalhabilidade, de forma prática, quando não é mais possível lançá-los nas fôrmas e adensá-lo. Para se caracterizar o início de pega, deve-se fazer a medição da profundidade de inserção de uma haste, de tamanho e peso predefinidos, atingindo uma profundidade menor que um limite preestabelecido pela ABNT NBR 14931:2004, podendo assim começar os procedimentos de cura (CARVALHO, 2007).

### **2.3 Cura do concreto**

O processo de cura do concreto tem como função impedir a evaporação de água empregada no traço realizado para sua formação, durante o seu período inicial de hidratação (AMBROZEWICZ, 2012).

Para (CARVALHO, 2007) após o início do endurecimento do concreto, sua hidratação aumenta com grande velocidade, e nesse período a água presente na mistura tem a tendência de evadir pelos poros do material e evaporar, podendo comprometer as reações de hidratação do cimento, e fazer com que o concreto sofra uma redução de volume denominado de retração, maior que o comum. Esse processo de retração é relativamente impedido pelas armaduras e fôrmas, gerando tensões de tração que podem ser resistidas pelo concreto, proporcionando fissuras que influenciam na resistência final do mesmo. Desse modo é preciso realizar métodos para evitar a evaporação antecipada de modo a conservar a umidade necessária para as reações de hidratação adequadas, denominando tais medidas como a cura.

### **2.4 Concreto Endurecido**

O concreto é classificado como um sólido a partir da pega, sendo este um material em evolução contínua, podendo ser modificado dependendo das condições ambientais, físicas, químicas, mecânicas, e reações usualmente prolongadas. Estas propriedades e características conceituam o concreto, devendo ser consideradas em termos correspondentes, segundo a qualidade requerida para fins de construções. Tendo como exemplo a durabilidade de um concreto pode ser distintamente perceptível quando a estrutura está mantida de ações dos elementos, e imprópria se exposta diretamente a ações de agentes nocivos (BAUER, 2016).

A qualidade do concreto deve ser empregada à economia geral do projeto, sendo atendido os aspectos de custo inicial e durante toda existência em serviço.

As principais características do concreto endurecido são as mecânicas, sendo destacadas as suas resistências à tração e compressão. A resistência do concreto está relacionada em função do tempo de duração e solitação, onde seus ensaios são feitos de forma rápida, já em construção o concreto é submetido a ações que operam de forma permanente reduzindo sua resistência no decorrer do tempo. As formas dos corpos-de-prova e características utilizadas no ensaio também influencia na resistência desejada (CARVALHO, 2007).

#### **2.4.1 Resistência à compressão**

A resistência à compressão do concreto é sua característica predominante, sendo determinada pelo ensaio de corpos-de-prova sujeito à compressão centrada, onde é obtido suas propriedades, como o módulo de elasticidade de acordo com a NBR 6118:2014. Para qualquer tipo de ensaio, vários fatores influenciam a resistência do concreto endurecido, no qual os mais notáveis são o traço do concreto e sua idade (CARVALHO, 2007).

Para que uma estrutura de concreto armado obedeça aos requisitos de segurança em relação ao conceito estrutural, sua resistência deve ser bem avaliada, demonstrada e registrada no decorrer de seu processo de construção. Este ensaio de resistência deve seguir os procedimentos da NBR 5739:2018, que define os tratamentos empregados, a velocidade de carregamento e condições que podem influenciar nos resultados dos corpos-de-provas (HELENE, 2010).

### **2.5 Materiais constituintes do concreto**

#### **2.5.1 Cimento**

O cimento Portland é um material oriundo da moagem do clínquer (mistura de calcário e argila cozidos), constituído de silicatos e aluminatos complexos que ao reagirem com água hidratam-se produzindo o endurecimento da massa (PETRUCCI, 1998).

Petrucci (1998) explicita os principais componentes do cimento determinados por análise química, sendo que nos cimentos nacionais apresenta a seguinte porcentagem média:

- $CaO$ : cal (61% a 67%), o aumento do teor de cal aumenta as propriedades mecânicas do cimento, tais como trabalhabilidade, boa aderência às superfícies, bom acabamento, e maior rentabilidade de mão-de-obra, melhorando consideravelmente a qualidade da construção civil.
- $SiO_2$ : sílica (20% a 23%), combina-se com outros componentes da argila sobretudo com a cal que resulta em compostos mais importantes do cimento;
- $Al_2O_3$ : alumina (4,5% a 7%), sua combinação com a cal acelera a pega do aglomerante, entretanto reduz sua resistência a sulfatos;
- $Fe_2O_3$ : óxido de ferro III (2% a 3,5%), exerce papel de fundente, mais energético que alumina;
- $SO_3$ : óxido sulfúrico (1% a 2,3%) ajuda a regular a pega, retardando-a;
- $MgO$ : magnésia (0,8% a 6%) provém do carbonato de magnésio presente no calcário, deve ser limitada devido atuação como expansivo
- $K_2O$  e  $Na_2O$ : álcalis (0,3% a 1,5%) desenvolvem papel de fundente no processo de cozedura e de aceleradores de pega.

Neste trabalho o aglomerante utilizado foi o Cimento Portland Composto (CPII-E-32), que é um material com composição intermediária entre Cimento Portland Comum e o Cimento Portland com adição de escória (CP II-E) ou pozolana (CP II-Z), e que corresponde a maior parte da produção no Brasil, sendo utilizado na maioria das aplicações usuais (AMBROZEWICZ, 2012).

### 2.5.2 Hidratação do cimento

O processo de hidratação do cimento tem início no período de cura, que tem por objetivo impedir que a água determinada no traço evapore (AMBROZEWICZ, 2012).

A reação de hidratação do cimento é responsável pelo processo de endurecimento dos anidros mais solúveis componentes do Portland que reagem com a água resultando em produtos hidratados que são de fraca solubilidade na água (PETRUCCI, 1998).

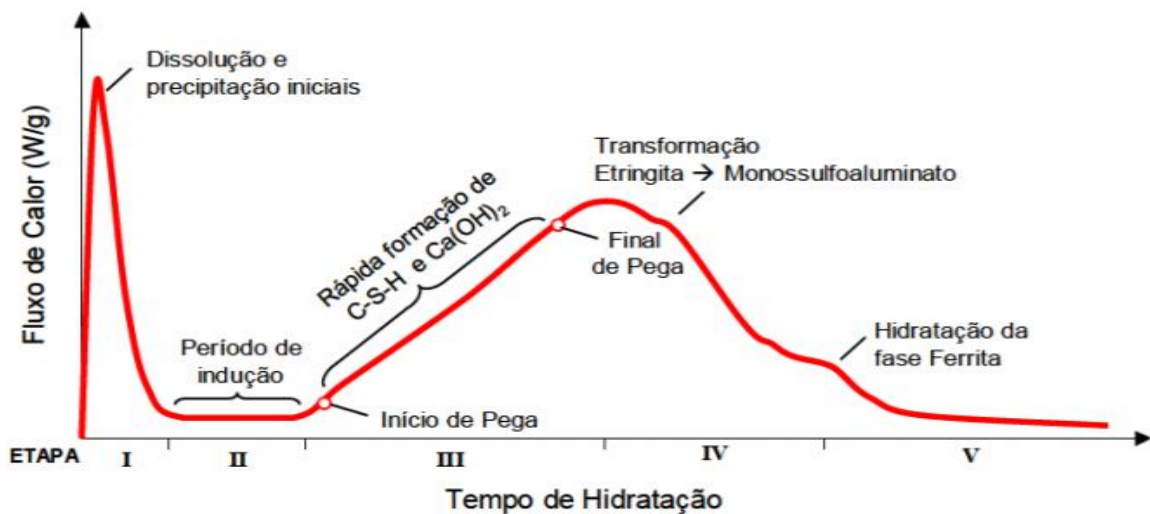
A teoria de Le Chatelier explica que no processo de hidratação o endurecimento ocorre devido ao “engavetamento de cristais que se formam pela cristalização de uma solução supersaturada de compostos hidratados menos solúveis que os anidros” (PETRUCCI, 1998). Em síntese o aglomerante é um sistema de constituintes anidros instáveis que em contato com a água reagem resultando em um sistema de constituintes hidratados estáveis.

Segundo (QUARCIONI, 2008), o mecanismo de hidratação pode ser dividido em cinco etapas, conforme a associação do calor de hidratação do cimento Portland com a variação dos íons, ilustrado na

Figura 2:

- Estágio I: período da mistura;
- Estágio II: período de indução ou dormente;
- Estágio III: início da pega;
- Estágio IV: endurecimento;
- Estágio V: redução da velocidade.

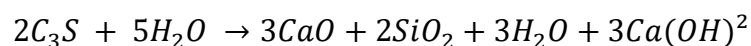
Figura 2 - Etapas envolvidas na hidratação do cimento Portland e suas respectivas liberações de calor



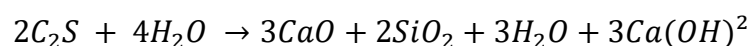
Fonte: QUARCIONI, 2008

Na hidratação do cimento Petrucci (1998) descreve o que acontece com os componentes e as reações químicas:

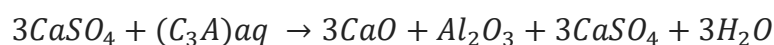
- $C_3S$ : reação inicia em poucas horas, libera grande quantidade de calor e cal, desenvolve elevadas resistências iniciais;



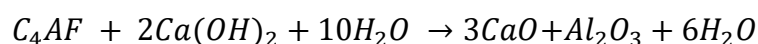
- $C_2S$ : atacado lentamente pela água, reação inicia após dias, desenvolve elevadas resistências a longo prazo, libera pouco calor de hidratação e pouca cal;



- $C_3A$ : reação rápida e cristalização em poucos minutos, ocorrendo a pega instantânea, pode ser prevenida pela adição de gesso, o calor de hidratação é tão grande que quase seca a massa;



- $C_4AF$ : reação e pega rápida, desenvolve pequena resistência inicial e final, libera pouco calor de hidratação, possui ótima resistência ao ataque de águas agressivas e sulfatos.



A resistência à compressão do concreto pode ser relacionada com o grau de hidratação do cimento e a relação a/c. Imediatamente após a mistura as pastas são constituídas de três fases: cimento anidro, água e ar. Com o decorrer da hidratação progressiva, ocorre a variação dos volumes dessas fases, e a formação de novas fases. O Quadro 1 mostra as fases formadas com o grau de hidratação de 67% (cura por cerca de 28 dias a 23°C) e 100% (cura em câmara úmida ou sob água a 23°C), observa-se que conforme aumenta o grau de hidratação, aumenta o volume das fases que contribuem para o desempenho mecânico da pasta (HELENE, 2010).

Quadro 1 - Percentual das fases em uma mesma pasta de cimento Portland

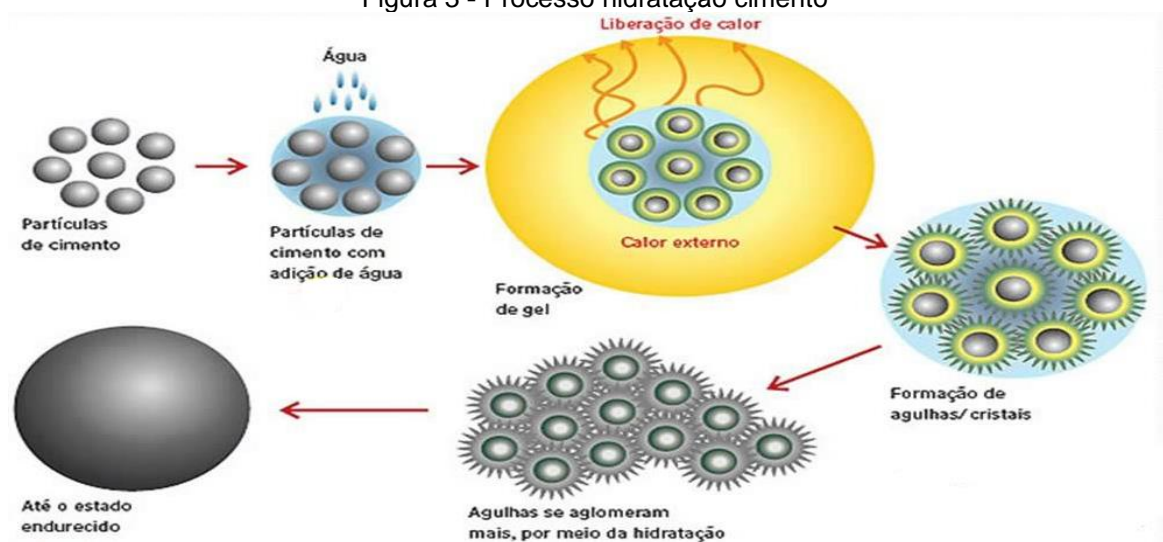
FASES DA PASTA DE CIMENTO 1kg DE CIMENTO : 0,5kg DE ÁGUA			GRAU DE HIDRATAÇÃO					
			67% (28 dias)			100% (100 anos)		
			dm <sup>3</sup>	%	%	dm <sup>3</sup>	%	%
Fases resistentes (dm <sup>3</sup> )	Volume de gel hidratado	Prod. sólidos	0,246	28,8	58,2	0,491	57,6	78,9
		Poros do gel	0,091	10,7		0,182	21,3	
	Vol. de cimento anidro	0,160	18,7	0,000	0,0			
Fases não resistentes (dm <sup>3</sup> )	Vol. total de ar	0,033	3,9	41,8	0,033	3,9	21,1	
	Vol. de poros vazios	0,029	3,4		0,059	6,9		
	Vol. de poros com água	0,294	34,5		0,088	10,3		
Volume total de pasta endurecida			0,853	100%	0,853	100%		

Fonte: HELENE, 2010

Mehta & Monteiro (2008) dividem a reação química do cimento, ilustrada na Figura 3, com a água em duas etapas:

- “Dissolução-precipitação, com a dissolução de compostos anidros em constituintes iônicos e formação de hidratos na solução, devido à pouca solubilidade e precipitação de cristais;
- Topoquímico ou hidratação em estado sólido do cimento, as reações ocorrem diretamente no local, ou seja, na superfície dos componentes do cimento anidro sem entrarem em solução.”

Figura 3 - Processo hidratação cimento



Fonte: Mehta &amp; Monteiro (2008)

Na hidratação dos aluminatos as reações do  $C_3A$  são instantâneas e geram liberações de calor. Para garantir o tempo de aplicação na construção civil, é feita a adição de gipsita (gesso) na mistura, ainda no processo de fabricação do cimento. As reações constituem o produto em que a cristalização se assemelha à pequenas agulhas prismáticas denominadas alto-sulfato ou etringita. Ao passar do tempo a etringita torna-se instável e é convertida em monossulfato. Já a hidratação dos silicatos as reações do  $C_3S$  e  $C_2S$  produzem silicatos de cálcio hidratados estruturalmente semelhantes ao da relação cálcio/sílica e ao teor de água conciliado quimicamente. O  $C_3S$  hidrata mais rápido que o  $C_2S$ , sendo dirigente pela resistência inicial. Os cimentos com mais  $C_2S$  possui maior durabilidade em ambientes ácidos e sulfatados do que cimentos com alto teor de  $C_3S$ . Os materiais como os silicatos são pouco cristalinos e forma um sólido poroso com características semelhantes à de um gel rígido (RIBEIRO JR, 2015).

### **2.5.2.1 Microestrutura da Pasta de Cimento Hidratada**

A pasta de cimento hidratada se desenvolve como resultado de reações químicas entre compostos de cimento e água. Através da moagem de clínquer com baixa quantidade de sulfato de cálcio, é produzido o cimento anidro, este é um pó cinza composto de partículas angulares com variação de dimensões entre 1  $\mu\text{m}$  a 50  $\mu\text{m}$ . O clínquer é uma mistura heterogênea de diversos compostos gerado por reações submetidas a altas temperaturas, entre a sílica e óxido de cálcio, alumina e óxido de ferro. Os principais componentes do clínquer constitui a composição química correspondente a  $C_4AF$ ,  $C_3A$ ,  $C_3S$ ,  $C_2S$ , onde as quantidades no cimento Portland comum variam normalmente entre 6% e 8%, 6% e 12%, 45% e 60%, e 15% e 30% (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Ao misturar o cimento e água, os compostos de cálcio e sulfato de cálcio que foram formados em altas temperaturas inicia-se reações em uma solução, onde a fase líquida rapidamente se torna saturada com diversos tipos de íons. Através do resultado da interação entre íons hidroxilas, sulfato, cálcio e aluminato, e em pouco tempo de hidratação do cimento, surgem cristais aciculares de trissulfoaluminato de cálcio hidratado, denominada etringita. Em seguida, depois de algumas horas, grandes cristais prismáticos de hidróxido de cálcio e pequenos cristais fibrosos de silicato de cálcio hidratado preenchem os espaços vazios que estavam tomados por

partículas de cimento em dissolução e água. Ao passar dos dias de acordo com a relação alumina-sulfato do cimento Portland, forma-se o monossulfoaluminato hidratado através da decomposição da etringita por sua instabilidade, obtendo a forma de placa hexagonal. A estrutura da placa hexagonal é uma característica dos aluminatos de cálcio hidratados formados em pasta de cimentos Portland hidratadas, abrangendo grande teor de  $C_3A$ , e pequena taxa de sulfato (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

Além disso, Mehta e Monteiro (2008) também retratam que no modelo da microestrutura da pasta de cimento hidratada é notório que as diversas fases não são uniformes na estrutura e tamanho e nem distribuídas uniformemente. A microestrutura heterogênea nos sólidos pode acarretar resultados desfavoráveis na resistência e propriedades mecânicas, pois a microestrutura controla tais propriedades onde é gerado a ligação mais fraca, não sendo a microestrutura média. Com isso há um desenvolvimento como resultado de variações químicas, ocorridas depois que o cimento entra em contato com a água, devendo estar atento as reações das propriedades da pasta de cimento no seu estado fresco, o que influencia a microestrutura da pasta de cimento endurecida. As grandes partes de evolução da heterogeneidade na microestrutura têm como principais fontes as variações na relação água/cimento, em que no conjunto de pasta de cimento grandemente floclada os produtos cristalinos da hidratação e o tamanho e forma dos poros, deverão ser divergentes quando comparados com um sistema disperso.

### **2.5.2.2 Sólidos na pasta de cimento hidratado**

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), as quatro principais fases sólidas na pasta de cimento hidratada que podem ser observadas por um microscópio eletrônico de varredura, de acordo com seus tipos, quantidades e características, são retratados a seguir:

- **Silicato de cálcio hidratado:** Consistem de 50% a 60% do volume de sólidos em uma pasta de cimento totalmente hidratada, sendo assim, a parte com maior relevância, determinando as propriedades da pasta, abreviada como C-S-H. A estrutura do C-S-H possui variância desde fibras pouco cristalinas até redes reticulares, onde seus cristais foram analisados somente através do advento de

microscópio eletrônico devido as suas dimensões coloidais e sua tendência de se aglomerarem;

- **Hidróxido de cálcio:** estabelecem 20% a 25% do volume de sólidos na pasta de cimento hidratada, também denominados de portlandita. Adverso ao C-S-H, este é composto com estequiometria definida,  $Ca(OH)_2$ , que pode causar a constituição de cristais amplos de morfologia prismática hexagonal distinta. Sua estrutura pode variar pela temperatura de hidratação, impurezas sujeitas ao sistema e espaços disponíveis. Em comparação ao C-S-H, por sua área superficial mais baixa, suprime a grande contribuição à resistência do hidróxido de cálcio;
- **Sulfoaluminatos de cálcio:** Possuem funções secundárias nas relações microestrutura-propriedade, devido ocuparem apenas 15% a 20% do volume sólido da pasta de cimento hidratada. No decorrer dos estágios iniciais de hidratação, a relação iônica sulfato/alumina da solução normalmente melhora a constituição de trissulfato hidratado, denominado etringita, sendo formado cristais prismáticos na forma acicular. A etringita se modifica para monossulfato hidratado na pasta de cimento puro formando cristais de placas hexagonais. O concreto de cimento Portland fica exposto ao ataque por sulfato devido a existência de monossulfato hidratado, devendo assim atentar a presença de pequenas quantidades de ferro na etringita e no monossulfato, que podem permutar os íons de alumínio na estrutura dos cristais;
- **Grãos de clínquer não hidratados:** Podem ser encontrados na microestrutura de pastas de cimento hidratadas em baixa quantidade, conforme sua distribuição de tamanho das partículas do cimento anidro e de seu grau de hidratação, mesmo tempos após sua hidratação. Com o desenvolvimento da hidratação, as partículas menores se desfazem primeiro e extinguem no sistema, em seguida as partículas grandes se tornam menores. Os produtos de hidratação começam a se cristalizar junto as partículas de clínquer em hidratação devido ao espaço restrito entre as partículas, criando um envoltório. Ao passar do tempo a hidratação das partículas do

clínquer se torna densa, onde sua estrutura equipara-se a partícula original.

### 2.5.2.3 Vazios na pasta de cimento hidratada

Mehta e Monteiro (2008) ressaltam que a pasta de cimento hidratada possui diversos tipos de vazios que têm influência significativa em suas propriedades além dos sólidos. As quantidades, tipos e importância estão descritos a seguir:

- **Espaço interlamelar no C-S-H:** A largura deste corresponde por 28% da porosidade no C-S-H sólido, sendo este tamanho de vazio bastante pequeno para se ter um efeito contrário na permeabilidade e resistência da pasta de cimento hidratada, contudo as ligações de hidrogênio podem reter água nos vazios pequenos, e ser removidos dependendo das condições, contribuindo para sua retração por fluência e perda de água;
- **Vazios capilares:** Correspondem aos espaços não ocupados pelos elementos sólidos da pasta de cimento hidratada. A mistura de cimento-água não sofre alterações em seu volume total específico durante o processo de hidratação, e sua massa específica média é substancialmente menor que a densidade do cimento anidro, em que 1 cm<sup>3</sup> de cimento em completa hidratação exige aproximadamente 2 cm<sup>3</sup> para adequar os produtos de hidratação. Com isso, a hidratação do cimento pode ser notada como um processo onde o espaço que era ocupado pela água e cimento é preenchido aos poucos pelos produtos da hidratação. Os vazios capilares são constituídos pelos produtos de hidratação ou pelos espaços não preenchidos pelo cimento, e seu volume e dimensões é definido pelo espaço entre as partículas de cimento anidro na pasta de cimento em seu estado fresco e a medida de hidratação do cimento. Em pastas de cimento com boa hidratação e relação água/cimento baixa, os vazios capilares podem obter uma variação de 10 nm a 50nm, já em pastas que possui uma grande relação de água/cimento nos primeiros tempos de hidratação, estes vazios tendem a ser maiores com dimensões ente 3 µm e 5 µm. Vazios capilares cuja dimensão seja

maior que 50 nm denominados macroporos possuem maior influência em impermeabilidade e determinação da resistência, já em caso de serem menor que 50nm são classificados como microporos em que sua atribuição é de grande relevância na fluência e retração por secagem;

- **Ar incorporado:** Os vazios de ar normalmente são esféricos ao passo que os vazios capilares são irregulares em sua forma. Comumente pouca quantia de ar fica reclusa na pasta de cimento no decorrer da mistura do concreto. Vazios de ar aprisionado podem variar suas dimensões de 50  $\mu\text{m}$  a 200  $\mu\text{m}$ , já os vazios de ar incorporados podem alcançar a escala de 3mm, com isso ambos são maiores que os vazios capilares na pasta de cimento hidratada, o que pode influenciar aspectos negativos na resistência.

#### 2.5.2.4 Água na pasta de cimento hidratada

Ao se observar os poros na pasta de cimento hidratada através de um microscópio eletrônico, aparentam estar vazios devido ao procedimento de preparação da amostra conveniente a secagem a alto vácuo, onde a pasta de cimento não tratada é capaz reter bastante quantia de água. Existem diversas formas que a água pode existir na pasta de cimento hidratada assim como as fases dos sólidos e dos poros em que suas classificações são baseadas no grau de complexidade de sua remoção da pasta. A linha que divide os diferentes estágios da água não é resistente devido a redução da umidade ambiente relativa e perda contínua de água de uma pasta de cimento saturada, entretanto possui boa especificação para alcançar as propriedades da pasta de cimento hidratada. Além disso Metha e Monteiro (2008) mostra que não só existe vapor nos poros vazios não preenchidos por água, mas também existe água na pasta de cimento hidratada, nos seguintes estados especificados a seguir:

- **Água capilar:** É retratada como o volume de água que não possui influência de forças de atração realizada pela superfície sólida. Seu comportamento na pasta de cimento hidratada pode ser dividido em duas categorias, sendo a água livre que possui grandes vazios onde sua extração não causa alteração no volume, e a água retida por

tensão capilar, em que sua remoção pode provocar retração do composto;

- **Água adsorvida:** Encontra-se adjacente à face dos sólidos. Suas moléculas de água são efetivamente adsorvidas na superfície dos sólidos na pasta de cimento hidratada através da influência de forças de atração. Pode se perder uma grande quantidade de água adsorvida pela secagem da pasta de cimento hidratada quando possui 30% de umidade relativa, devido às energias de ligação das moléculas individuais de água que reduzem com a distância da superfície do sólido, sendo esta perda responsável pela retração da pasta de cimento hidratada;
- **Água interlamelar:** Água agregada a estrutura de C-S-H em que uma camada monomolecular é bastante retida pelas ligações de hidrogênio podendo ser perdida apenas por uma secagem forte abaixo de 11% de umidade concernente, pois a arranjo do C-S-H tem uma grande retração ao se perder a água interlamelar;
- **Água quimicamente combinada:** Corresponde a água que contém parte da microestrutura de diversos produtos de hidratação do cimento, onde não é perdida na secagem, mas atribuída quando os hidratos se decompõem através do aquecimento.

### 2.5.3 Agregados

Agregados são materiais granulares, sem forma nem volume definidos, de origem natural ou de processamento industrial, no concreto tem como principal objetivo redução do custo, pois correspondem a cerca de um terço do volume, mas com custo relativamente baixo (AMBROZEWICZ, 2012).

Bauer (2016) descreve que o agregado é um material particulado, sem coesão, de atuação química quase nula, composto por misturas de partículas envolvendo grande escala de tamanhos, sendo classificados de acordo com sua origem, tamanhos das partículas e seu peso específico aparente. Eles constituem um componente significativo no concreto, colaborando com aproximadamente 80% do peso e 20% do valor de concreto estrutural que não possui aditivos, com resistência característica à compressão do concreto na faixa de 15 MPa. Devido suas

características apresentarem grandes variações, são submetidos ao aperfeiçoamento, estudo e controle de qualidade na ciência do concreto antes e durante a execução da obra, onde não devem reagir diante do cimento e ser constantes aos agentes que entrarão em contato com o concreto. Além disso, devem ser excluídos os agregados procedentes de rochas macias, friáveis, de pouca resistência à compressão, ou que envolvam pirita, gesso e elementos ferrosos, devendo ser despidos de argila, matéria orgânica, e objetos que intervenham na pega e no endurecimento do concreto ou que prejudiquem sua aderência à argamassa.

Contudo existem características dos agregados além da resistência, como sua forma, dimensão, textura superficial, granulometria e mineralogia que afetam a resistência do concreto em diversos pontos, onde a causa de sua característica pode determinar uma modificação da relação água/cimento (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

A norma ABNT 7211: 2009 classifica os agregados em:

- a) gráudo: correspondem aos grãos que não são retidos pela peneira com abertura de malha de 75 mm, mas se retém em peneiras de abertura de 4,75 mm;
- b) miúdo: grãos que passam pela peneira com abertura de malha de 4,75mm e ficam presos em peneiras com abertura de 150  $\mu$ m.

As britas, também chamadas de pedras britadas, são classificadas de acordo com o tamanho nominal, conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação das britas

Brita	Tamanho Nominal (mm)	
	Mínimo	Máximo
1	4,8	12,5
2	12,5	25
3	25	50
4	50	76
5	76	100

Fonte: Adaptado ABNT NBR 7225: 1993

As areias, materiais naturais com propriedades adequadas, são classificadas em faixas granulométricas (BAUER, 2015):

- a) areia fina: com dimensões nominais entre 0,15 mm e 0,6 mm;
- b) areia média: com dimensões nominais entre 0,6 mm e 2,4 mm;

- c) areia grossa: com dimensões nominais entre 2,4 mm e 4,8 mm.

#### 2.5.4 Água

A água utilizada na produção do concreto, chamada de água de amassamento deverá ser isenta de teores prejudiciais e de substâncias estranhas, Ambrozewicz (2012) define limites máximos:

- a) matéria orgânica: 3 mg/l de oxigênio consumido;
- b) resíduo sólido: 5.000 mg/l;
- c) sulfatos: 300 mg/l de íons  $SO_4^{2-}$ ;
- d) cloretos: 500mg/l de íons  $Cl^-$ ;
- e) açúcar: 5 mg/l.

Impurezas à sais dissolvidos na água podem ser prejudiciais ao cimento, e conseqüentemente na resistência do concreto, recomenda-se a utilização de águas potáveis com pH entre 5,8 e 8,0 (AMBROZEWICZ, 2012).

Além da qualidade, a quantidade de água utilizada tem interferência direta nas características do concreto o que fica evidente na norma NBR 6118:2014, que estabelece a relação a/c variando de acordo com a classe de agressividade do ambiente, sendo menor ou igual a 0,65 para ambientes rurais ou submersos com fraca agressividade e menor ou igual a 0,45 para ambientes industriais ou com respingos de marés, com alto grau de agressividade.

#### 2.6 Ensaio de abatimento do tronco de cone

Também conhecido como *Slump Test*, o ensaio de abatimento é normatizado pela NBR NM 67/1998, sendo realizado através de um tronco de cone metálico com 20 cm de diâmetro na base, 10 cm de diâmetro no topo e 30 cm de altura. Os procedimentos para realização do ensaio estão ilustrados na Figura 4, cujas etapas são:

- a) umedecer o molde e a placa de base;
- b) encher rapidamente o molde em três camadas iguais;
- c) compactar cada camada com 25 golpes da haste de socamento;
- d) rasar a superfície do concreto com uma desempenadeira;

- e) limpar a placa de base e retirar o molde do concreto, levantando-o cuidadosamente na direção vertical;
- f) medir o abatimento do concreto.

Figura 4 - Ensaio de abatimento de cone



Fonte: Total Concrete<sup>2</sup>, 2019

A NBR 8953/2015 classifica os concretos em relação ao abatimento de tronco de cone em cinco classes, conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Classificação através do abatimento do tronco de cone

Classe	Abatimento	Aplicações típicas
<b>S10</b>	$10 \leq A < 45$ mm	Concreto extrusado, vibroprensado ou centrifugado
<b>S50</b>	$50 \leq A < 95$ mm	Alguns tipos de pavimentos e elementos de fundações
<b>S100</b>	$100 \leq A < 155$ mm	Elementos estruturais com lançamento convencional
<b>S160</b>	$160 \leq A < 215$ mm	Elementos estruturais com lançamento bombeável
<b>S220</b>	$\geq 220$ mm	Elementos estruturais esbeltos ou com alta densidade de armaduras

Fonte: ABNT NBR 8953: 2015

<sup>2</sup> Disponível em: [www.totalconcrete.co.uk/news/concrete-slump-tests-measuring-the-workability-of-concrete/](http://www.totalconcrete.co.uk/news/concrete-slump-tests-measuring-the-workability-of-concrete/). Data de acesso: 16/12/2019.

## 2.6 Processos de Cura

Durante o processo de endurecimento, até que o concreto atinja resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ), de acordo com a ABNT NBR 14931:2004, igual ou superior a 15 MPa para elementos estruturais de superfície, como lajes, é necessário que o concreto seja curado e protegido contra agentes prejudiciais visando (ABNT, 2004):

- a) evitar a perda de água;
- b) assegurar resistência adequada;
- c) assegurar a formação de superfície durável.

A norma NBR 14931:2004 explicita os principais agentes nocivos ao concreto no período de cura, que são empecilhos para atingir a resistência à compressão conveniente são mudanças bruscas de temperatura, secagem, chuva forte, água em regime torrencial, congelamento, agentes químicos, assim como choques e vibrações de intensidade tal que possam produzir fissuras na massa de concreto (ABNT, 2004).

De acordo com a norma de Execução de estruturas de concreto (ABNT, 2004) em caso de utilização de água no processo de cura, é necessário que esta seja potável ou satisfaça às exigências da ABNT NBR 12655:2015.

A duração do processo de cura do concreto varia em função do tipo de cimento e da relação a/c, conforme apresentado na Tabela 4 (PEINADO, 2013).

Tabela 4 - Tempo mínimo de cura do concreto conforme a relação a/c e o tipo de cimento

Tipo de Cimento	Relação água-cimento			
	0,35	0,55	0,65	0,7
<b><i>CPI e II-32</i></b>	2 dias	3 dias	7 dias	10 dias
<b><i>CP IV-32</i></b>	2 dias	3 dias	7 dias	10 dias
<b><i>CP III-32</i></b>	2 dias	5 dias	7 dias	10 dias
<b><i>CPI e II-40</i></b>	2 dias	3 dias	5 dias	5 dias
<b><i>CPV-ARI</i></b>	2 dias	3 dias	5 dias	5 dias

Fonte: Peinado, 2013

### **2.6.1 Aspersão**

O método de cura do concreto por aspersão consiste no lançamento de água sobre a estrutura de modo intermitente ou contínuo, podendo ser utilizado sistema de aspersores, recomendado para superfícies planas, tais como pavimentos de edificações. Devendo-se ter cuidado para não ocorrer secamento com grande profundidade, para evitar a fadiga superficial ocasionada pelas dilatações e contrações frequentes, onde o concreto não desenvolveu completamente sua resistência mecânica (BAUER, 2016).

### **2.6.2 Cura por submersão**

É o método de cura ideal, onde os corpos-de-provas são submergidos em tanques ou locais específicos com água. Sua aplicação é limitada e pouco prática, podendo ser utilizada em pisos, lajes e pavimentos em que há superfícies expostas ou quando não há utilização destes nos primeiros dias (BAUER, 2016).

### **2.6.3 Cura enterrada**

Este método consiste em enterrar os corpos-de-prova, a fim de evitar a ação direta do sol e do vento. Embora este método evite a ação direta do sol e do vento, ele não impede a perda de água, que se dá pela absorção do solo, podendo ser falho e recomendado apenas em casos onde a cura é de importância secundária (BAUER, 2016).

### **2.6.4 Cura ao ar livre**

O método de cura ao ar livre consiste em deixar o concreto em um local exposto ambiente natural, sem choques ou esforços que possam prejudicar sua estrutura. Com isso o concreto não terá mecanismos de proteção de retração, perda de umidade, e controle de temperatura (Silva *et al.*, 2016).

### **2.6.5 Estudos comparativos**

Silva *et al.* (2016) em análise comparativa dos processos de cura em imersão em água saturada com cal, cura química e exposta ao sol conclui que a submersão

em água é o processo que garantem maior eficiência. A cura química também gera resultados satisfatórios, conforme apresentados no Quadro 2.

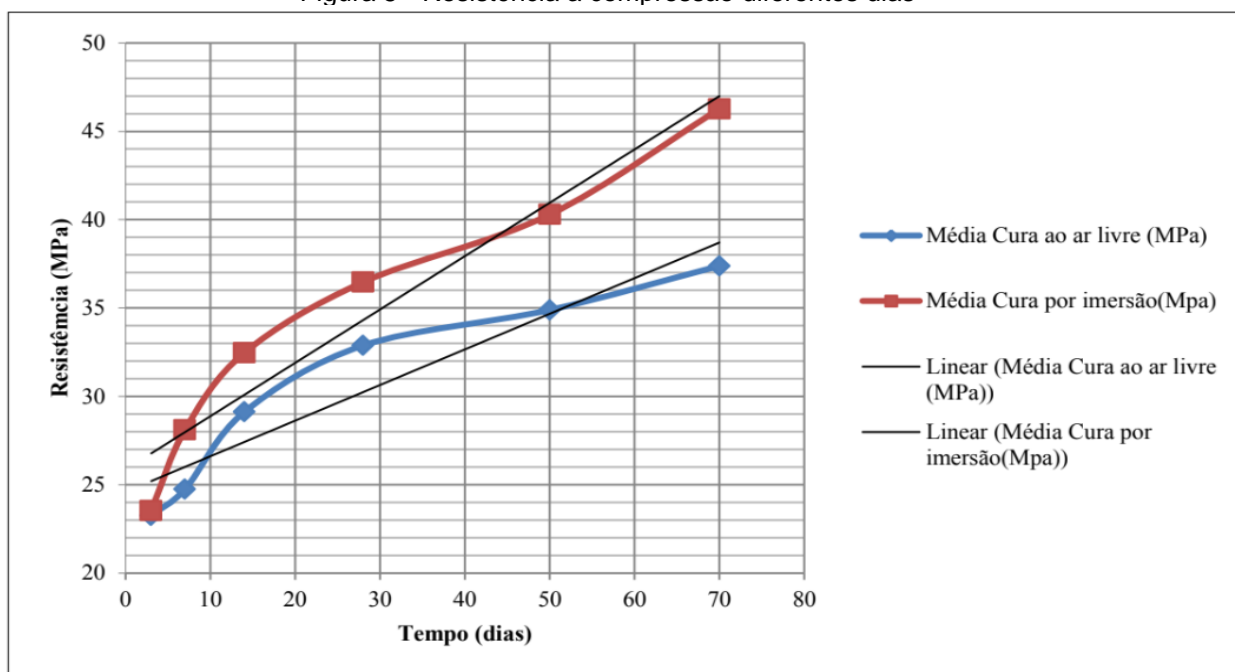
Quadro 2: Resultados comparativos de diferentes tipos de cura

CLASSE DO CONCRETO	TIPO DE CURA	RESISTÊNCIA (MPa)		CLASSE DO CONCRETO	RESISTÊNCIA (MPa)		CLASSE DO CONCRETO	RESISTÊNCIA A (MPa)	
		07 DIAS	28 DIAS		07 DIAS	28 DIAS		07 DIAS	28 DIAS
C 20	Imerso em água saturada com Cal	17,2	27,8	C 25	20,5	28,6	C 30	20,5	32,6
	Cura Química	17,2	17,6		19,2	26,2		19,7	29,8
	Exposto ao Sol	13,9	14,9		14,8	18,7		19,1	19,4

Fonte: Silva, *et al.* 2016

Silva *et al.* (2012) analisam a influência do processo de cura por imersão, analisando comparativamente os resultados dos testes de resistência à compressão entre corpos-de-prova expostos à cura ao ar livre e à cura por imersão. Os resultados são expostos na Figura 5.

Figura 5 - Resistência a compressão diferentes dias



Fonte: Silva *et al.*, 2012

A diferença de resistência aos 3 dias de cura é mínima devido ao pequeno tempo de exposição à hidratação. Aos 14 dias a discrepância entre estes é de aproximadamente, 11,5% superior a parte do concreto submerso. Aos 28 dias verificou-se uma diferença, por volta, de 3,59 MPa entre os corpos-de-prova, seguindo

a mesma tendência até aos 70 dias de cura, período em que a diferença chegou próximo a 23,77% (SILVA *et al.*, 2012).

## 2.7 Ensaio de Compressão

A resistência à compressão do concreto é analisada a partir da tensão de ruptura ( $\sigma$ ) determinada pela relação entre a carga de ruptura ( $P$ ) e a área da seção transversal ( $A$ ) do corpo-de-prova, conforme equação abaixo (RIBEIRO *et al.*, 2013):

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \text{Equação 1}$$

O ensaio de compressão do concreto utilizado neste trabalho é regido pela norma da ABNT NBR 5739:2018, onde, inicialmente, deve-se determinar as dimensões do diâmetro e altura dos corpos-de-prova com precisão de 0,1 mm utilizando um paquímetro, sendo o diâmetro medido na metade da altura, ortogonalmente, e a altura sobre seu eixo longitudinal, incluindo capeamento. Os rompimentos dos cilindros se darão com idade especificada, contada a partir do momento em que o cimento é posto em contato com a água de mistura, admitindo-se tolerâncias de tempos especificadas no Quadro 3 (ABNT, 2018).

Quadro 3 - Tolerância para a idade de ensaio

IDADE DE ENSAIO	TOLERÂNCIA PERMITIDA (H)
24 h	0,5
3 d	2
7 d	6
28 d	24
63 d	36
91 d	48

Nota: Para outras idades de ensaio, a tolerância deve ser obtida por interpolação

Fonte: ABNT NBR 5739: 2018

A norma NBR 5739:2018 estabelece ainda que as faces dos pratos estejam limpas e secas antes do início do ensaio e que os corpos-de-prova devem ser colocados no centro do prato inferior. Tem-se que a escala de força escolhida para o ensaio deve ser tal que a força de ruptura do corpo-de-prova ocorra no intervalo de calibração da máquina. Durante a execução do ensaio a carga deve ser aplicada continuamente e sem choques, com velocidade de carregamento constante de  $0,45 \pm 0,15$  MPa/s (ABNT, 2018).

De acordo com a ABNT NBR 5738: 2015 os resultados do ensaio devem conter as seguintes informações:

- a) número de identificação do corpo-de-prova;
- b) data de moldagem;
- c) idade do corpo-de-prova;
- d) data do ensaio;
- e) resistência à compressão, expressa com aproximação de 0,1 MPa;
- f) tipo de ruptura do corpo-de-prova.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Materiais

Para a confecção dos corpos-de-prova utilizou-se os seguintes materiais:

- a) cimento Portland tipo II composto por escória granulada de alto forno (CP II -E-32), comercializado em sacos de 50kg, e suas características correspondentes a ABNT NBR 16697:2018 onde algumas características são mostradas no Quadro 4 abaixo:

Quadro 4 - Características cimento

<b>REQUISITOS QUÍMICOS</b>	
Resíduo insolúvel	≤ 5,0 (% massa)
Perda ao fogo	≤ 8,5 (% massa)
Trióxido de enxofre	≤ 4,5 (% massa)
<b>REQUISITOS FÍSICOS E MECÂNICOS</b>	
Finura (resíduo na peneira 75 µm)	≤ 12 %
Tempo inicial de pega	≥ 60 min
Expansibilidade a quente	≤ 5 mm
<b>RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (MPA)</b>	
Aos 3 dias	≤ 10,0
Aos 7 dias	≥ 20,0
Aos 28 dias	≤ 32,0

Fonte: ABNT NBR 16697: 2018

- b) areia média adquirida em loja de material de construção na cidade de Piumhi-MG;

- c) brita 1 provinda de loja de material de construção na cidade de Piumhi-MG;
- d) água potável proveniente da rede de distribuição do município de Piumhi/MG no mês de setembro/2019.

### 3.2 Equipamentos

Na produção do concreto e realização do ensaio foram usados os seguintes equipamentos:

- a) betoneira modelo CS 150 litro 0073, com capacidade de mistura de 85 litros, rotação do tambor 34 rpm, e dimensões 1200 mm x 655 mm x 1290 mm, conforme apresentada na Figura 6;

Figura 6 - Betoneira



Fonte: Arquivo próprio, 2019

- b) moldes cilíndricos em Aço Zincado para moldagem de corpo-de-prova de concreto com dimensões  $\varnothing 10 \times 20$  cm, com abertura diametral, alça plastificada e parafusos com cabeça especial que impedem que o concreto caia sobre a rosca, conforme Figura 7.

Figura 7 - Molde cilíndrico para corpos-de-prova



Fonte: Arquivo próprio, 2019.

- c) régua;
- d) colher de pedreiro;
- e) conjunto para teste de abatimento de cone fabricado em aço zincado, conforme Figura 8:
  - Tronco de Cone  $\varnothing 4 \times 8 \times 12$ ";
  - Base em chapa de 500x500mm;
  - Funil metálico;
  - Haste socadora  $\varnothing 5/8 \times 600$ mm;
  - Colher para corpos-de-prova ( $\varnothing 10 \times 20$ cm).

Figura 8 - Conjunto para *slump test*



Fonte: Arquivo próprio, 2019

- f) placas de madeira compensada de 11 x 11 cm;
- g) balança digital de alta precisão, capacidade máxima de 40kg, com escala de sensibilidade de 2 gramas, marca Import Eletro, conforme Figura 9;

Figura 9 - Balança digital



Fonte: Arquivo próprio, 2019

- h) prensa hidráulica elétrica digital, marca SOLOCAP- Geotecnia Rodoviária Ltda. capacidade até 2.000 KN (>200 Tf), com indicadores digitais de força velocidade de aplicação de carga, prato superior ajustável através de fuso manual acionada por motor elétrico, leitura digital em tempo real de força e de velocidade de aplicação da força aplicada, sistema de rótula para compensar pequenos desníveis no corpo de prova, regulagem de altura de 0 a 360mm, conforme Figura 10.

Figura 10 - Prensa hidráulica elétrica digital



Fonte: Arquivo próprio, 2019.

### 3.3 Metodologia

No princípio da pesquisa realizou-se uma revisão bibliográfica, definida por GIL (1991) como aquela desenvolvida a partir de material já elaborado, constituído principalmente por livros e artigos científicos. Tendo como objetivo compreender as etapas de produção do concreto e os diferentes processos de cura, bem como um estudo detalhado das normas que regem os ensaios e execução de estruturas de concreto.

Os traços utilizados nesta pesquisa foram escolhidos de forma a equiparar-se aos traços executados em obras sem controle rigoroso do material, tendo em vista que o estudo visava comparar a variação da resistência para um mesmo traço, variando apenas os métodos de cura. Foram considerados traços em massa na produção do concreto, os quais estão explicitados na Tabela 5.

Tabela 5 - Traços determinados

Traço	Cimento	Areia	Brita	Água
1	1	2	3	0,5
2	1	2	1,5	0,6
3	1	2	2	0,51

Fonte: Arquivo próprio, 2019

No dia 16/09/2019, no IFMG *Campus* Avançado Piumhi, foi produzido o concreto para o traço 1 utilizando 10 kg de cimento, 20 kg de areia, 30 kg de brita e 5 kg de água. Todos os materiais foram pesados na balança, conforme Figura 11.

Figura 11 - Pesagem e separação dos materiais



Fonte: Arquivo próprio, 2019.

Inicialmente os moldes cilíndricos e suas bases foram revestidos internamente com uma fina camada de óleo desmoldante e dispostos em superfície rígida e horizontal, livre de vibrações, conforme Figura 12.

Foi feito um concreto inicial para imprimação da betoneira, sendo utilizado 5 kg de cimento, 10 kg de areia, 10 kg de brita e 2,5 kg de água garantindo que toda a superfície interna estivesse imprimada.

Figura 12 - Moldes cilíndricos



Fonte: Arquivo próprio, 2019

Após a correta separação dos materiais, estes foram colocados na betoneira de forma gradativa na seguinte ordem:

- toda a quantidade de brita;
- dois terços da água (ligou a betoneira);
- todo o cimento;
- toda a areia;
- restante da água.

Após a mistura dos materiais, obtendo-se a completa homogeneização do concreto, retirou-se uma amostra para verificação da consistência e a coesão do mesmo, utilizando o *Slump test*, conforme procedimento da Figura 4.

Posteriormente, o restante do concreto foi despejado no carrinho de mão, conforme Figura 13, e foram moldados os corpos-de-prova a serem utilizados no ensaio conforme estabelecido pela ABNT NBR 5738:2015.

Figura 13 - Concreto misturado na betoneira



Fonte: Arquivo próprio, 2019

O adensamento foi realizado manualmente em duas camadas com a haste metálica, sendo executado conforme os procedimentos estabelecido em norma NBR 5738: 2015 para corpos-de-prova com diâmetro de 100 mm, ou seja, foram dados 12 golpes em cada camada e em toda a espessura, como mostrado na Figura 14. Na última camada, após os golpes, realizou-se o arrasamento do material e a retirada do material em excesso com uma colher de pedreiro.

Figura 14 - Adensamento camadas corpos-de-prova



Fonte: Arquivo próprio, 2019

Foram feitas as desmoldagens dos corpos-de-prova 24 horas após a moldagem, conforme representado na Figura 15. Os corpos-de-prova foram identificados submetidos aos quatro tipos de cura propostos neste trabalho, sendo eles: cura por aspersão, submersa, enterrado e exposto ao ambiente. Foram produzidos dois corpos-de-provas para cada tipo de cura. Os ensaios de compressão foram realizados aos 28 dias.

Figura 15 - Desmolde dos corpos-de-prova



Fonte: Arquivo próprio, 2019

Já no dia 23/09/2019 foram produzidos os concretos para os traços 2 e 3, seguindo o mesmo procedimento descrito acima, para cada traço foram utilizados 10 kg de cimento e os demais materiais na proporção correspondente aos traços. Os procedimentos de desmoldagem e cura foram análogos aos corpos-de-prova produzidos pelo traço 1. A Figura 16 retrata os corpos-de-prova após a cura inicial, prontos para desmoldagem.

Figura 16 - Corpos-de-prova após cura inicial.



Fonte: Arquivo próprio, 2019.

Os ensaios de compressão dos corpos-de-prova, normatizados pela NBR 5739:2018, foram realizadas aos 28 dias, período em que o concreto atinge resistência adequada de ao menos 15 MPa. Foram usadas placas de madeirite de 11x11 cm para regularização das bases, no lugar do tradicional processo em laboratórios que consiste em capeamento com enxofre ou retificação da superfície. Tendo em vista que a norma brasileira NBR 5738:2015, estabelece que a respeito de regularização outros processos podem ser adotados, desde que estes apresentem resultados compatíveis. Esta escolha foi embasada em resultados de pesquisa sobre a influência do capeamento na resistência a compressão de corpos-de-prova, realizada por Osama & Ameer (2003), que concluem que a madeira compensada pode ser usada. Seguindo essa premissa por ser um capeamento de mais fácil aplicação e custo reduzido.

O ensaio foi realizado no laboratório de Materiais de Construção Civil do IFMG *Campus Avançado Piumhi* e todos os corpos-de-prova da Figura 17 foram colocados na prensa hidráulica, conforme mostrado na Figura 10.

Figura 17 - Corpos-de-prova prontos para ensaio de resistência



Fonte: Arquivo próprio, 2019

Após a realização dos experimentos descritos e de posse dos resultados referentes a resistência à compressão dos corpos-de-prova para todos os procedimentos de cura utilizados neste trabalho, foram realizadas as análises dos resultados.

Para a análise estatística foram calculadas a média aritmética dos resultados para os corpos-de-provas similares, com mesmo traço e submetidos ao mesmo processo de cura, e, posteriormente, o desvio padrão e o coeficiente de variação.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 *Slump Test*

O primeiro ensaio em que o concreto foi submetido foi o *slump test* ou ensaio de abatimento do tronco de cone, para determinação da consistência, conforme procedimento ilustrado na Figura 18.

Os concretos de traços 1, 2 e 3 foram classificados respectivamente como S10, S220 e S50, de acordo com o estabelecido na norma NBR 8953:2015, com abatimentos de 10 mm, 235 mm e 70 mm, conforme Tabela 3.

Figura 18 - Resultados *Slump Test*



Fonte: Arquivo próprio, 2019

O teste de abatimento do tronco de cone demonstrou que os concretos produzidos possuem consistência diferentes: seca, fluida e média o que possibilitou analisar a influência do tipo de cura para amostras com diferentes consistências.

### 4.2 Resistência à compressão

Todos os corpos-de-prova foram devidamente identificados e submetidos ao ensaio de resistência à compressão conforme metodologia explicada anteriormente, seguindo as recomendações da NBR 5739:2018. O ensaio dos corpos-de-prova está ilustrado na Figura 19.

Figura 19 - Corpos-de-prova no ensaio de resistência



Fonte: Arquivo próprio, 2019

No Quadro 5 estão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão. Foram ensaiados 24 corpos-de-prova, sendo 8 corpos-de-prova para cada traço. E para cada traço, foram feitos 2 corpos-de-prova para cada tipo de procedimento de cura utilizado. Os corpos-de-prova tiveram suas massas previamente mensuradas. Os valores das tensões obtidas na ruptura são graficamente apresentados na Figura , para melhor visualização e análise.

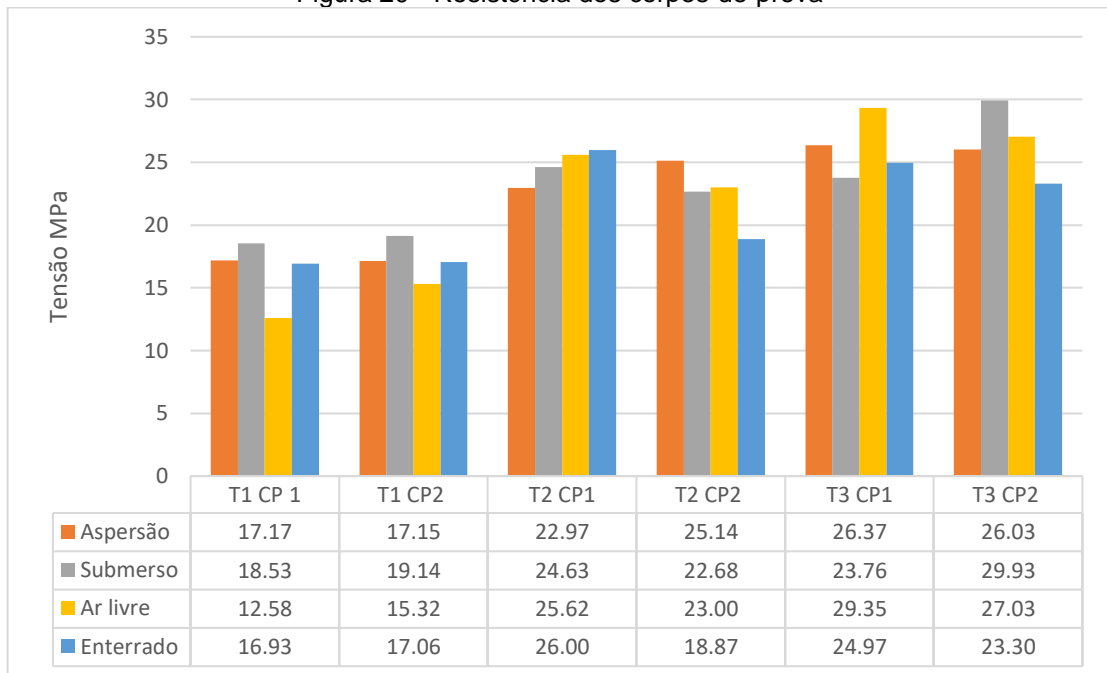
Os corpos-de-prova sofreram dois tipos de ruptura, conforme ilustrado na Figura , definidas de acordo com o especificado na NBR 5739:2018 como fraturas próximas ao topo (tipo G) para o traço 1. Já para os traços 2 e 3 os tipos de rupturas observados foram do tipo colunar (tipo C) e cisalhada (tipo E).

Quadro 5 - Resultados ensaio de resistência à compressão

TIPOS DE CURA	TRAÇO 1			TRAÇO 2			TRAÇO 3		
	Massa (Kg)	Carga (KN)	Tensão (MPa)	Massa (Kg)	Carga (KN)	Tensão (MPa)	Massa (Kg)	Carga (KN)	Tensão (MPa)
Aspersão CP1	3,55	134,82	17,17	3,49	180,44	22,97	3,57	207,08	26,37
Aspersão CP2	3,51	134,71	17,15	3,43	197,42	25,14	3,56	204,42	26,03
Submerso CP1	3,58	145,52	18,53	3,55	193,48	24,63	3,60	186,64	23,76
Submerso CP2	3,62	150,35	19,14	3,55	178,16	22,68	3,67	235,06	29,93
Ar livre CP1	3,52	98,81	12,58	3,43	201,20	25,62	3,53	230,49	29,35
Ar livre CP2	3,48	120,34	15,32	3,45	180,66	23,00	3,52	212,31	27,03
Enterrado CP1	3,67	132,96	16,93	3,52	204,19	26,00	3,64	196,08	24,97
Enterrado CP2	3,61	133,96	17,06	3,54	148,19	18,87	3,63	183,03	23,30

Fonte: Arquivo próprio, 2019

Figura 20 - Resistência dos corpos-de-prova



Fonte: Arquivo próprio, 2019

Figura 21 - Rupturas dos corpos-de-prova



Fonte: Arquivo próprio, 2019

Com objetivo de comparar os resultados obtidos determinou-se a média das resistências, agrupando os dados em duas variáveis traço e tipo de cura, o resultado é expresso na Tabela 6.

Tabela 6 - Médias as resistências entre os corpos-de-prova

Tipos de cura	Médias		
	Traço 1	Traço 2	Traço 3
Aspersão	17,16	24,06	26,20
Submerso	18,84	23,66	26,85
Exposto ambiente	13,95	24,31	28,19
Enterrado	17,00	22,44	24,14

Fonte: Arquivo próprio, 2019

Tendo em vista que alguns resultados estavam muito dispersos do esperado, calculou-se o desvio padrão e coeficiente de variação, expressos nas Tabela 7 e Tabela 8.

Tabela 7 - Desvio padrão

Tipos de cura	Desvio padrão		
	Traço 1	Traço 2	Traço 3
Aspersão	0,014	1,534	0,240
Submerso	0,431	1,379	4,363
Exposto ambiente	1,937	1,853	1,640
Enterrado	0,092	5,042	1,181

Fonte: Arquivo próprio, 2019

Tabela 8 - Coeficiente de variação do ensaio

Tipos de cura	Coeficiente de variação %		
	Traço 1	Traço 2	Traço 3
Aspersão	0,082	6,379	0,918
Submerso	2,290	5,829	16,252
Exposto ambiente	13,889	7,621	5,819
Enterrado	0,541	22,467	4,893

Fonte: Arquivo próprio, 2019

Através da ABNT NBR 5739: 2018 é feita a avaliação da eficiência dos ensaios à compressão pelo valor do coeficiente de variação experimental (CvE) onde é estabelecido seus níveis conforme o Quadro 6.

Quadro 6 - Avaliação 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: Adaptado, ABNT NBR 5739:2018

Além da análise separando-se os corpos-de-prova semelhantes comparou-se o processo de cura por aspersão com os demais, tendo em vista que este é o processo mais utilizado na prática, os resultados são expressos na Tabela 9.

Tabela 9 - Relação entre resistências corpos-de-prova aspergidos e os outros

Relação de resistência			
Tipos de cura	Traço 1	Traço 2	Traço 3
Submerso	91%	102%	98%
Exposto ambiente	123%	99%	93%
Enterrado	101%	107%	109%

Fonte: Arquivo próprio, 2019

### 4.3 Discussões dos resultados

Os desvios padrão calculados foram baixos, o que indica que o processo de produção teve boa regularidade sendo que o maior desvio padrão encontrado foi de 5,04 no traço 2, corpo-de-prova enterrado, é menor que 5,5 valor recomendado pela norma ABNT NBR 12655:2015 a ser adotado para o cálculo da resistência de dosagem quando o concretos for produzido nas seguintes condições: cimento medido em massa, a água de amassamento medida em volume mediante dispositivo dosador e os agregados medidos em massa combinada com volume.

Conseqüentemente, a maioria dos coeficientes de variação dos corpos-de-provas analisados foram baixos, ou seja, 33% são avaliados como excelentes, 8% como bons, 17% razoáveis, de acordo com o Quadro 6. Entretanto cinco dos coeficientes (42%) foram acima de 6, o que os avalia como deficientes, resultados muito dispersos.

Observou-se que nos traços 2 e 3 houve um aumento da resistência dos corpos-de-prova que foram submetidos ao processo de cura exposto ao ambiente, relacionando-os com que foram submersos, eles foram 3% e 5% mais resistentes,

enquanto no traço 1 estes foram 26% menos resistentes. Este fato pode ser justificado pelas chuvas e tempo nublado que ocorreram no período inicial de cura dos corpos-de-prova para estes traços, o que provocou maior disponibilidade de água para o processo de hidratação do cimento, gerando um efeito favorável no processo de cura em relação ao traço 1.

O processo de cura por aspersão demonstrou-se eficiente, evidenciado no traço 1 quando comparado com o que foi curado exposto ao ambiente em que foi 23% mais resistente, o que comprova a importância do processo adequado de hidratação.

### **4.3.1 Análise por traços**

#### **4.3.1.1 Traço 1**

No concreto do traço 1 de consistência mais seca, observou-se maior consistência nos resultados, comprovado pelos baixos coeficientes de variação, 3 destes classificados como excelentes ( $C_{Ve} < 3$ ), de acordo com a norma NBR 5739: 2018.

As resistências crescentes para os corpos submetidos a cura ao ar livre, seguida do enterrada, aspersão e submerso para as duas amostras.

A diferença entre os corpos enterrados e aspergidos de 0,24 MPa e 0,1 MPa para os corpos-de-prova 1 e 2 respectivamente demonstram que os métodos têm um efeito semelhante para impedir evaporação da água no concreto, para o tempo de cura de 28 dias, contribuindo para aumento da resistência axial, que para o processo de cura submerso é maior, tendo em vista a disponibilidade de água para as reações químicas de hidratação.

#### **4.3.1.2 Traço 2**

O concreto do traço 2 de consistência classificada como fluída apresentou as maiores divergências entre as resistências, conseqüentemente maiores coeficientes de variação, sendo um deles de até 22,47% o que torna deficiente, não aceitável para análise, fato que dificulta a análise através da média, como nos corpos-de-prova que foram enterrados, que resultaram valores de resistência à compressão de 26 MPa e 18,9 MPa, diferença de 7,1 MPa.

Os corpos que passaram pelos processos de cura por aspersão e submersão apresentaram resultados semelhantes, o que reforça a interferência das chuvas no aumento da resistência axial.

#### **4.3.1.3 Traço 3**

Já para o concreto do traço 3, classificado como média consistência, os corpos-de-prova também apresentaram significativas variações de resistência axial.

Um dos corpos-de-prova submetido à cura submerso apresentou a maior resistência à compressão de todas as amostras (29,9 MPa), o que indica que a relação a/c é inversamente proporcional à resistência e que a diminuição da evaporação prematura da água é muito importante para melhorar as reações de hidratação do concreto, garantindo maior resistência do material.

## **5 CONCLUSÕES**

Neste trabalho buscou-se simular os tipos de cura usuais em obras de pequeno porte, com olhar comparativo voltado para a cura por aspersão. Confirmou-se neste estudo que ocorre variação da resistência à compressão do concreto para diferentes processos de cura.

Destaca-se com os resultados a relevância do processo adequado de cura do concreto com ganho de até 52% na resistência comparando-se dois tipos para um mesmo traço, ou seja, a relação da resistência do corpo-de-prova 2 do traço 1 em cura submersa com o corpo-de-prova 1 do traço 1 em cura exposta ao ambiente.

Destaca-se ainda, conforme a bibliografia que além do tipo de cura, muitos outros fatores são significantes para a qualidade do concreto, tais como, o processo produtivo, propriedades dos materiais, dosagem enfatizando a importância de cuidados no projeto e execução de estruturas de concreto.

No traço 2 comprova-se a grande importância do controle na produção do concreto, especialmente nos concretos feitos em obra para aumentar a trabalhabilidade, pois sua consistência fluída apresentou resultados com maior divergência uns aos outros, com elevado desvio padrão, o que acarreta elementos estruturais com diferentes resistências, o que se não previsto em projeto pode gerar manifestações patológicas nas edificações.

Conclui-se que o processo de cura por aspersão, muito utilizado na prática, demonstrou-se eficaz, entretanto deve ser bem executado, garantindo a disponibilidade de água, principalmente nos primeiros dias de cura.

O período chuvoso pode ter afetado a resistência dos corpos-de-prova que estavam expostos ao ambiente para os traços 2 e 3, tendo em vista que choveu constantemente no período inicial da cura, garantindo mais água, maior umidade, menor temperatura do ambiente, além de grande período, os quais promovem melhor condição para a cura do concreto. Entretanto outros fatores como adensamento manual e controle de qualidade dos materiais também podem ter influenciado.

No traço 1 os resultados atingiram o que se esperava e foram menos dispersos, pois não houve chuva nos dias iniciais do período de cura.

Recomenda-se o estudo em períodos não chuvosos para evitar um dos fatores que tem grande influência na resistência e permitir análise mais crítica, assim como o ensaio de outros tipos de cura como cura química ou imerso em água saturada com cal para que se tenham mais dados comparativos.

Para estudos posteriores recomenda-se uma maior quantidade de corpos-de-prova, para realizar uma análise mais consistente nos aspectos quantitativo e temporal, assim como maior variação de ambientes e formatos.

Este trabalho limita-se a obras de pequeno porte, com condições climáticas específicas da região, visando a ocorrência da prática onde não há controle significativo da qualidade de materiais, com a utilização de concreto comum.

Para trabalhos futuros sugere-se:

- Estudar os efeitos dos processos de cura em elementos superficiais de concreto, tendo em vista que o volume do corpo-de-prova pode ter influenciado para melhores resultados, uma vez que superfícies grandes de pequena espessura, tais como placas, são mais susceptíveis à retração.
- Verificar a influência do tempo de cura em diferentes métodos de cura.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 14931:2004 **Execução de estruturas de concreto – Procedimento**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT NBR 16697:2018 **Cimento Portland – Requisitos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2018.

ABNT NBR 5738:2015 **Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT NBR 5739:2018 **Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2007.

ABNT NBR 6118:2014 **Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**.  
ABNT NBR 7225: 1993 **Materiais de pedra e agregados naturais**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 1993.

ABNT NBR 8953:2015 **Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT NM 67:1996 **Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 1996.  
AMBROZEWICZ, Paulo Henrique Laporte. **Materiais de Construção Civil**. São Paulo: Editora Pini LTDA, 2012.

ANDOLFATO, Rodrigues Piernas. **Controle Tecnológico Básico do Concreto**. Ilha Solteira. 2002. UNESP Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2014.

CARVALHO, Roberto Chust; FILHO, Jasson Rodrigues de Figueiredo. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: segundo a NBR 6118/2003**. 3.ed3 São Carlos: EdUFSCar, 2007.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 1946. 3. ed. São Paulo: Atlas, 1991.

HELENE, P.; LEVY, S. **Boletim Técnico – Cura do Concreto**. Mérida, México: ALCONPAT Internacional - Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, 2013. Disponível em: <<http://alconpat.org.br/wp-content/uploads/2012/09/B8-Cura-do-concreto.pdf>>. Acesso em: 13/10/2019.

HELENE, Paulo; ANDRADE, Tibério. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. Capítulo 29 Concreto de Cimento Portland. IBRACON. 2010.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

OSAMA A. A.; AMEED, A. S. **The Effect of Capping Condition on the Compressive Strength of Concrete Hollow Blocks**. An-Najah Univ. J. Res. (N. Sc), Vol. 17(1), 2003.

PEINADO, Hugo Sefrian. **Conheça as alternativas para fazer a cura de elementos de concreto**. Métodos podem ser combinados para evitar a evaporação da água de hidratação e garantir o desempenho estrutural. Revista Técnica, Edição 201. Dezembro/2013.

PETRUCCI, Eladio G.R. **Concreto de Cimento Portland**. 13ed. revisado por Vladimir Antônio Paulon. São Paulo: Globo, 1998.

RIBEIRO JÚNIOR, Enio. **Propriedades dos materiais constituintes do concreto**. Revista Especialize On-line IPOG. Goiânia. Edição 10. Vol 01. Dezembro/2015.

RIBEIRO, Carmen Couto; PINTO, Joana Darc Da Silva; STARLING, Tadeu. **Materiais de Construção Civil**. 4. ed. rev. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2013.

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

SILVA, Andressa Varela da Rocha; DINIZ, Hugo Alessandro Almeida; RIBEIRO, Janiele Alves Eugênio; OLIVEIRA, Samuel Silva; GOMES, Valtencir Lucio de Lima. **Influência do processo de cura em concreto convencional em seis idades**. VII CONNEPI Congresso Norte-Nordeste de Pesquisa e Inovação. Palmas. Tocantins. 2012.

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