

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Rafael Tozzo Busetto**

**RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO: ANÁLISE  
DA VARIABILIDADE EM CORPOS DE PROVA MOLDADOS  
EM OBRA SITUADA EM PORTO ALEGRE**

Porto Alegre  
dezembro 2013

**RAFAEL TOZZO BUSETTO**

**RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO: ANÁLISE  
DA VARIABILIDADE EM CORPOS DE PROVA MOLDADOS  
EM OBRA SITUADA EM PORTO ALEGRE**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de  
Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal  
do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do  
título de Engenheiro Civil

**Orientadora: Angela Borges Masuero**

Porto Alegre  
dezembro 2013

**RAFAEL TOZZO BUSETTO**

**RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO: ANÁLISE  
DA VARIABILIDADE EM CORPOS DE PROVA MOLDADOS  
EM OBRA SITUADA EM PORTO ALEGRE**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Professora Orientadora e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, dezembro de 2013

Profa. Angela Borges Masuero  
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Orientadora

Profa. Carin Maria Schmitt  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA**

**Profa. Dra. Angela Borges Masuero (UFRGS)**  
Dra. Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Eng. Dr. Nei Ricardo Vaske (UFRGS)**  
Dr. Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Eng. MSc. Eduardo Polesello (UFRGS)**  
MSc. Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a meus pais, Lino e Maria Luiza, que  
sempre acreditaram e apoiaram meu sonho de ser  
Engenheiro formado pela UFRGS.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Profa. Angela Borges Masuero, orientadora deste trabalho, por toda atenção e comprometimento ao orientar de maneira eficaz meu TCC, tirando dúvidas, ensinando e corrigindo.

Agradeço a Profa. Carin Maria Schmitt por todos os ensinamentos e correções referentes ao trabalho, bem como pela motivação em buscar sempre executar as tarefas da melhor maneira possível, também pela paciência e por sempre me auxiliar quando solicitado, seja por e-mail ou consultas.

Agradeço ao Eng. Cristian Bresolin por toda experiência passada nesses meus primeiros anos trabalhando com construção civil, que me permitiram ter um maior entendimento sobre o conteúdo abordado nesse TCC.

Agradeço a meus pais, Lino e Maria Luiza, que sempre estiveram ao meu lado, apoiando e motivando apesar das dificuldades enfrentadas no decorrer do curso. A minha namorada, Micheli Fagundes, por todo amor e compreensão em todos os momentos.

Os únicos limites das nossas realizações de amanhã são as  
nossas dúvidas e hesitações de hoje.

*Franklin D. Roosevelt*

## RESUMO

A crescente demanda por imóveis nas últimas décadas, fez com que algumas construtoras acelerassem seus processos construtivos para aumentar a oferta aos usuários. Dessa forma, encontra-se hoje em dia um cenário no qual a qualidade das obras vem diminuindo em função da pressão por prazos e custos menores, o que na verdade, não gera nenhuma economia, pois, em determinados casos, gera custos de manutenção significativos. Para suprir essas questões tem tecnologias, como o concreto usinado, que tem como objetivo fornecer um concreto de alta qualidade e reduzir o tempo despendido em concretagens. Uma propriedade importante e usada como controle de qualidade do concreto é a sua resistência à compressão, sendo avaliada através da moldagem e rompimento de corpos de prova cilíndricos, 28 dias após a moldagem. É fundamental um controle deste ensaio, contribuindo, assim, na redução de uma possível variabilidade do concreto. Entretanto, tem-se observado uma variabilidade excessiva nos resultados de resistência à compressão do concreto, muitas vezes associada à variabilidade decorrente do processo de moldagem, transporte, ruptura do corpo de prova, ou ainda ao próprio processo, faltando uma padronização maior na produção e dosagem dos materiais. Nesse trabalho comprovou-se que para o caso estudado, a concreteira A não conseguiu, ao longo de todo o processo, produzir um concreto com resistência à compressão adequada para uma obra situada em Porto Alegre. Essa conclusão está apoiada ao fato de que 7 das 31 concretagens realizadas, não atingiram a resistência característica mínima exigida pelo projetista para a estrutura em questão.

Palavras-chave: Qualidade do Concreto Usinado. Resistência à Compressão do Concreto.  
Corpos de Prova Cilíndricos de Concreto.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Delineamento do TCC .....	18
Figura 2 – Relação entre água/cimento e resistência .....	27
Figura 3 – Fatores que influenciam na resistência do concreto .....	33
Figura 4 – Influência da cura úmida na resistência do concreto .....	36
Figura 5 – Moldes metálicos utilizados no experimento .....	45
Figura 6 – Vista geral de CPs identificados ainda dentro dos moldes metálicos .....	47
Figura 7 – (a) Vista geral dos CPs em processo de cura em câmara úmida e (b) CP posicionado para início do processo de retificação .....	47
Figura 8 – Aspecto do CP após ser submetido a esforços de compressão .....	47
Figura 9 – (a) Retifica e (b) prensa utilizadas no experimento pelo laboratório 3.....	49
Figura 10 – Valores máximos, mínimos e médios da resistência à compressão para cada lote do laboratório 1 .....	51
Figura 11 – Valores máximos, mínimos e médios da resistência à compressão para cada lote do laboratório 3 .....	51
Figura 12 – Resistências estimadas encontradas para o laboratório 1 .....	54
Figura 13 – Porcentagem dos lotes aceitos e rejeitados com base nos resultados obtidos pelo laboratório 1 .....	56



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Tipos de cimento encontrados no Brasil .....	24
Quadro 2 – Influência dos parâmetros de dosagem no concreto e seus custos .....	28
Quadro 3 – Grau de influência dos processos de moldagem e rompimento de CP .....	34
Quadro 4 – Avaliação do nível de qualidade do ensaio em função do coeficiente de variação .....	41

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Requisitos para o concreto, em condições especiais de exposição .....	26
Tabela 2 – Especificação do número de camadas em função do tipo de adensamento ..	35
Tabela 3 – Fator de correção para diferentes relações altura / diâmetro .....	39
Tabela 4 – Valores para $d_2$ em função da quantidade de CP moldados .....	41
Tabela 5 – Desvio padrão a ser adotado em função da condição de preparo do concreto	43
Tabela 6 – Valores de $\sqrt{6}$ .....	43
Tabela 7 – Resistências à compressão mínimas e máximas obtidas nos três laboratórios	50
Tabela 8 – Resistências à compressão potencial do concreto, em MPa, para o laboratório 1 .....	53
Tabela 9 – Resistência estimada e aceitação dos lotes do laboratório 1 .....	55
Tabela 10 – Coeficiente de variação para os lotes do laboratório 1 conforme NBR 5739 .....	58
Tabela 11 – Coeficiente de variação para os lotes do laboratório 3 conforme NBR 5739 .....	59
Tabela 12 – Tabela ANOVA calculada para o experimento .....	60
Tabela 13 – Análise da significância através da comparação entre médias .....	60

## **LISTA DE SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANOVA – Análise de variância

CP – Corpo de prova

NBR – Norma Brasileira

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## LISTA DE SÍMBOLOS

$f_c$  – resistência à compressão do concreto (MPa)

$K_1$  e  $K_2$  – constantes empíricas (adimensional)

$a/c$  = relação água/cimento (adimensional)

$F$  – força (N)

$D$  – diâmetro (mm)

$S_e$  – desvio padrão (MPa)

$A_i$  – amplitude de valores de resistência (MPa)

$n$  – número de CP de uma amostra (un.)

$d_2$  – coeficiente de ajuste para desvio padrão em função da quantidade de CP moldados (adimensional)

$CV_e$  – coeficiente de variação de ensaios de resistência à compressão de corpos de prova de concreto (adimensional)

$f_{cm}$  – resistência média (MPa)

$f_{ckest}$  é a resistência característica estimada (MPa)

$f_1, f_2, \dots, f_m$  são valores das resistências dos exemplares em ordem crescente (MPa)

$L_d$  é o limite de decisão (MPa)

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2 DIRETRIZES DA PESQUISA .....</b>	<b>16</b>
2.1 QUESTÃO DA PESQUISA .....	16
2.2 OBJETIVO PRINCIPAL .....	16
2.3 OBJETIVO SECUNDÁRIO .....	16
2.4 HIPÓTESE .....	16
2.5 PRESSUPOSTO .....	16
2.6 PREMISA .....	17
2.7 DELIMITAÇÕES .....	17
2.8 LIMITAÇÕES .....	17
2.9 DELINEAMENTO .....	17
<b>3 CONCRETO .....</b>	<b>20</b>
3.1 MATERIAIS CONSTITUINTES .....	21
<b>3.1.1 Agregados .....</b>	<b>22</b>
<b>3.1.2 Cimento .....</b>	<b>23</b>
<b>3.1.3 Aditivos .....</b>	<b>24</b>
3.2 RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO .....	25
3.3 POROSIDADE .....	27
3.4 DOSAGEM .....	28
3.5 CONCRETO DOSADO EM CENTRAL .....	29
3.6 DURABILIDADE DE ESTRUTURAS DE CONCRETO .....	30
<b>4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO .....</b>	<b>32</b>
4.1 CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS DE CONCRETRO .....	33
4.2 MOLDAGEM .....	34
4.3 CURA .....	36
4.4 RETIFICAÇÃO E CAPEAMENTO .....	37
4.5 CARREGAMENTO .....	38
4.6 RESULTADOS .....	39
<b>4.6.1 Coeficiente de variação .....</b>	<b>40</b>
<b>4.6.2 Controle estatístico do concreto .....</b>	<b>42</b>
<b>5 PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>44</b>
5.1 APRESENTAÇÃO DA OBRA .....	45
5.2 LABORATÓRIO 1 .....	46

5.3 LABORATÓRIOS 2 E 3 .....	48
<b>6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>49</b>
6.1 CONTROLE ESTATÍSTICO DO CONCRETO CONFORME NORMA NBR 12655/2006 .....	52
6.2 AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DE DESEMPENHO DO ENSAIO CONFORME NBR 5739/2007 .....	56
6.3 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS TRÊS LABORATÓRIOS ATRAVÉS DE ANÁLISE DE VARIÂNCIAS E COMPARAÇÃO ENTRE MÉDIAS .....	59
6.4 CONCLUSÕES .....	61
REFERÊNCIAS .....	62
ANEXO A - DADOS COLETADOS .....	65



## 1 INTRODUÇÃO

O concreto é um material fundamental para a construção civil. Sendo largamente utilizado em obras em todo o mundo, tornou-se uma alternativa relativamente barata quando comparada com outros métodos estruturais. Segundo Mehta e Monteiro (1994, p. 8), “[...] o concreto é um material composto que consiste essencialmente de um meio contínuo aglomerante, dentro do qual estão mergulhadas partículas ou fragmentos agregados.”. Além disso, o concreto possui diversas vantagens, porém, para que suas características sejam desempenhadas de maneira eficiente, é necessário uma série de cuidados na escolha de materiais, mistura, lançamento, adensamento e cura.

Atualmente, construir estruturas com grandes volumes de concreto é impraticável se não for utilizado o concreto usinado e bombeado. Isso é devido a uma série de fatores como produtividade, redução de custos, canteiros mais limpos e redução da mão de obra. Deste modo, a produção do concreto torna-se responsabilidade das concreteiras, chegando pronto para utilização em obra, de acordo com o que foi solicitado pelo responsável técnico. Teoricamente, as concreteiras possuem uma maior tecnologia e controle para produzir um concreto de qualidade, porém, o que se encontra em alguns empreendimentos, são concretos de baixa qualidade, em alguns casos comprometendo a segurança do edifício.

Sabe-se que a principal característica do concreto, e que pode ser usado como parâmetro para definir sua qualidade, é sua resistência à compressão, que depende de diversos fatores. O ensaio mais comum nas obras para a sua verificação consiste na moldagem de corpos de prova com concreto fresco, o qual é curado e rompido geralmente aos 28 dias, data na qual, considera-se que o concreto já atingiu à resistência de projeto. Há, também, o método de retirada de testemunhos do concreto endurecido, sendo um ensaio com resultados um pouco mais confiáveis, porém feito, geralmente, somente quando no ensaio dos corpos de prova não se atinge a resistência desejada.

O que encontra-se hoje em algumas obras são grandes variabilidades nos resultados de resistência à compressão de corpos de prova de concreto. Variabilidade que pode estar associada a má produção do concreto pela usina dosadora, ou pela falta de cuidados na hora de se executar os procedimentos de ensaio. É de fundamental importância saber o valor



correto da resistência à compressão do concreto, visto que, se ficar abaixo do especificado em projeto, se deve avaliar a necessidade de reforçar a estrutura, o que normalmente tem custo alto e pode modificar o espaço físico da obra (quando, por exemplo, há necessidade de aumento de seções de pilares e vigas). Por outro lado, se a resistência ficar muito acima do especificado, pode-se ter problemas de aderência dos revestimentos.

Segundo a NBR 7212 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012) a central dosadora de concreto deve realizar a coleta de uma amostra de concreto para, no máximo, cada 50 m<sup>3</sup> de concreto fornecido. Sendo assim, o responsável pela obra deve buscar empresas especializadas na tecnologia do concreto, a fim de ter uma maior segurança e para conseguir fazer comparativos com os resultados apresentados pela concreteira. Isso é necessário, visto que o corpo de prova moldado pela concreteira em questão nesse trabalho foi feito antes da saída dos caminhões betoneira da central. E, em alguns casos, o concreto foi utilizado na obra uma a duas horas após o carregamento dos caminhões, podendo gerar diferenças nos resultados dos ensaios.

Nesse trabalho foi estudado o concreto fornecido por uma concreteira, identificada aqui como A, situada em Porto Alegre, a fim de avaliar, através da moldagem de corpos de prova, a variabilidade da resistência à compressão aos 28 dias. Para isso foram ensaiados corpos de prova irmãos, de um único traço de concreto, por três laboratórios.

## **2 DIRETRIZES DA PESQUISA**

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

### **2.1 QUESTÃO DE PESQUISA**

A questão de pesquisa do trabalho é: adotando-se concreto usinado e bombeado na obra estudada, qual a variabilidade encontrada entre os resultados de resistência à compressão de corpos de prova, ao longo da execução da estrutura, moldados e rompidos por um laboratório e desses valores comparativamente com os obtidos por dois outros laboratórios?

### **2.2 OBJETIVO PRINCIPAL**

O objetivo principal do trabalho é a verificação da variabilidade da resistência à compressão do concreto usinado e bombeado empregado em uma obra, em Porto Alegre, ao longo de sua execução, através dos resultados obtidos por um laboratório.

### **2.3 OBJETIVO SECUNDÁRIO**

O objetivo secundário do trabalho é a verificação da influência do laboratório escolhido nos resultados de resistência à compressão de CPs de concreto.

### **2.4 HIPÓTESE**

Tem-se por hipótese que a variabilidade dos resultados obtidos pelo laboratório responsável pelo controle tecnológico do concreto é significativa.

### **2.5 PRESSUPOSTO**

Tem-se por pressuposto que as normas NBR 5738/2003, NBR 5739/2007 e NBR 12655/2006 são válidas na avaliação da resistência à compressão de corpos de prova de concreto.

## 2.6 PREMISSA

O trabalho tem por premissa que a contínua avaliação da qualidade do concreto fornecido pelas concreteiras é fundamental para garantir a segurança e vida útil de estruturas de concreto armado.

## 2.7 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se a ensaios de resistência à compressão de concreto fornecido por uma concreteira para uma determinada obra em Porto Alegre.

## 2.8 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

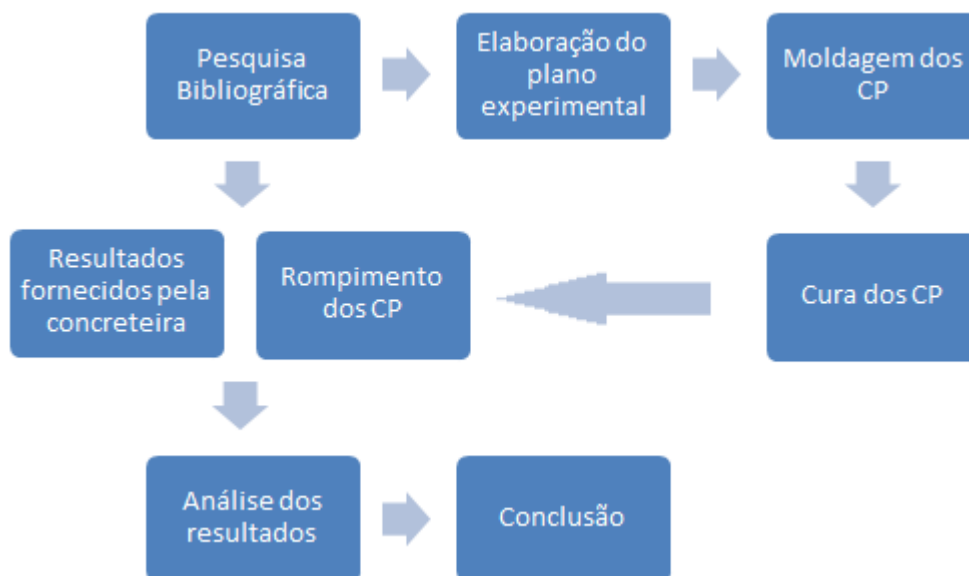
- a) concreto com um traço específico;
- b) concreto com um nível de resistência;
- c) não conhecimento das operações de ensaio realizadas pelo laboratório 2;
- d) amostragens parciais para os laboratórios 2 e 3;
- e) apenas  $f_{ck}$  potencial fornecido pelo laboratório 2.

## 2.9 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir, que estão representadas na figura 1, e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) elaboração do plano experimental;
- c) moldagem dos CP;
- d) cura dos CP;
- e) rompimento dos CP;
- f) resultados fornecido pela concreteira;
- g) análise dos resultados;
- h) conclusão.

Figura 1 – Delineamento do TCC



(fonte: elaborado pelo autor)

Inicialmente foi feita uma pesquisa bibliográfica a fim de se obter os conceitos básicos referentes ao assunto estudado, assim como estudar a melhor forma de abordar o tema através da leitura de livros, artigos e outros materiais que sejam pertinentes. Na etapa de elaboração do plano experimental, foi definido como seriam feitas as moldagens dos corpos de prova, definindo as datas em que houvessem concretagens na obra estudada e também as datas de rompimento, aos 28 dias, dos CP moldados.

Em seguida, começaram as moldagens dos CP nas datas definidas, inicialmente pelos laboratório 1 e 2, sendo o primeiro contratado pela construtora responsável para fazer o controle tecnológico do concreto e o segundo associado a concreteira A. Após 28 dias da moldagem dos CP executou-se o rompimento dos mesmos para avaliação da resistência à compressão. Com esses dados obtidos foi feita uma análise da variabilidade dos resultados, comparando-os com a resistência característica do concreto estudado e, também, um comparativo entre os resultados dos três laboratórios. Tendo analisado os dados, obteve-se uma conclusão a respeito da qualidade do concreto usinado fornecido pela concreteira A e também se há uma diferença substancial entre os resultados dos laboratórios.

Para que todas etapas fossem efetivamente realizadas dentro dos prazos desse trabalho, foi necessário uma programação adequada, visto que os CP só podem ser rompidos 28 dias após a moldagem. Dessa forma, as etapas começaram a ser feitas em dezembro de 2011,

concluindo-se o experimento em janeiro de 2013, mês no qual a estrutura da obra estudada foi concluída.

### 3 CONCRETO

Para Mehta e Monteiro (1994), o grande uso do concreto nos dias de hoje se deve a uma série de vantagens, entre elas pode-se citar a alta resistência à compressão que o material atinge em pouca idade. Além disso, é um material que resiste bem ao desgaste mecânico e a ação de agentes atmosféricos, o que o torna ideal para utilização em praticamente qualquer tipo de ambiente agressivo. Ainda sobre vantagens, pode-se dizer que tem uma vida útil longa e também, uma boa resistência ao fogo, evitando que, em caso de incêndios, as chamas se propaguem com tanta velocidade como ocorreria, por exemplo, em estruturas de madeira.

Além dessas vantagens, Araújo (2003) cita que o concreto pode se adequar aos mais diversos tipos de obras e suas necessidades, para isso, se deve variar sua composição e utilizar aditivos que incorporem características únicas ao concreto. Como exemplo de sua utilização, pode-se citar o concreto autoadensável (utilizado quando não há como fazer a vibração adequada), concreto de agregado leve (utilizado para reduzir o peso das estruturas, sendo mais comum em vergas e contravergas), concreto branco (utilizado para fins estéticos).

Mehta e Monteiro (1994) destacam outra vantagem importante do concreto, que refere-se a composição básica do mesmo, ou seja, agregados, cimento e água. Esses materiais são encontrados com facilidade em praticamente qualquer local onde se queira construir, e também, tem um custo normalmente acessível. Ainda sobre os materiais componentes do concreto, Isaia (2005, p. 16) cita “[...] na sua composição, estão presentes os cinco elementos químicos mais abundantes do planeta, que totalizam 89% da massa da crosta terrestre [...]”, o que justifica a sua abundância e facilidade de produção.

Para Mehta e Monteiro (1994), quando se comparam estruturas de concreto com estruturas de aço e madeira, tem-se como maior vantagem no concreto a excelente resistência à água sem sofrer nenhum dano mais grave, o que torna o material viável para qualquer tipo de estrutura que seja utilizada para transportar ou estocar água como em barragens e reservatórios, além de ser ótimo também com estruturas como fundações, coberturas, paredes externas (em contato direto com chuvas, vento e solos) que sofrem com a umidade proveniente do ambiente. Além disso, outras vantagens que podem ser consideradas, é a menor necessidade de energia para sua produção e, também, o fato do concreto servir como proteção ao aço em estruturas de

concreto armado, evitando a exposição direta com ambientes agressivos, dessa forma, evitando a corrosão.

Apesar de tantas vantagens, o concreto também tem suas desvantagens. Segundo Araújo (2003), a principal é o elevado peso das construções, visto que a massa específica média do concreto é em torno de  $2400 \text{ kg/m}^3$  (variando de acordo com o traço adotado). Além disso, também há dificuldades para execução de reformas.

Sobre a importância do concreto nos dias de hoje, Isaia (2005, p. 15), cita que o concreto representa:

- a) proteção, saúde, lazer, e conforto do homem, supridos por habitações, escolas, hospitais, indústrias, ginásios, templos, edificações em geral;
- b) rede de músculos e tendões que intercomunicam a sociedade global por meio de pontes, viadutos, túneis, estradas rodoviárias e ferroviárias, aeroportos, docas, torres de comunicação;
- c) provisão e manutenção da salubridade social representada por estações de tratamento de água, de esgotos e suas redes, aquedutos, reservatórios para armazenamento, obras de saneamento e de infraestrutura em geral;
- d) energia com a qual toda sociedade funciona através de usinas hidroelétricas, plataformas marítimas de petróleo, usinas nucleares, de marés, torres de transmissão de energia.

Nos próximos itens do trabalho são abordados fatores que influenciam diretamente na resistência à compressão do concreto, tendo ligação direta com os resultados apresentados por corpos de prova cilíndricos, moldados e rompidos aos 28 dias. Assim sendo, no próximo item, são abordados os principais materiais utilizados na composição do concreto, e, nos itens seguintes a importância da relação água/cimento, porosidade, dosagem e requisitos de durabilidade esperado para estruturas de concreto.

### 3.1 MATERIAIS CONSTITUINTES

Cada material que compõe o concreto tem sua importância para a resistência final, bem como para outras propriedades. Helene e Terzian (1993, p. 103) definem a importância dos materiais:

[...] não há dúvida que a propriedade do concreto que melhor o qualifica é a resistência à compressão. Desde que na sua dosagem e preparação tenham sido

levados em conta também os aspectos de trabalhabilidade e durabilidade, optando-se por determinada curva granulométrica, tipo e classe de cimento e relação água/cimento e, conseqüentemente, resultando uma certa resistência à compressão. Qualquer modificação na uniformidade, natureza e proporcionamento dos materiais poderá ser indicada por uma variação na resistência. A resistência à compressão é uma propriedade muito sensível, capaz de indicar com presteza as variações da qualidade de um concreto.

Para uma melhor compreensão sobre o assunto, nos próximos itens são abordados cada um dos materiais.

### 3.1.1 Agregados

Os agregados tem grande importância na composição do concreto, sendo eles basicamente representados por areia e brita (das mais diversas granulometrias), são responsáveis por quase 75% do volume total do concreto (SCANDIUZZI; ANDRIOLO, 1986). Neville (1997), explica que esse alto volume é devido ao fato dos agregados custarem mais barato que o cimento, sendo assim, devem ser utilizados na maior proporção possível, porém de maneira adequada para que se possa produzir um concreto que mantenha seus benefícios estruturais, encontrando a melhor relação custo-benefício.

Mehta e Monteiro (1994) explicam que nem todas as características do agregado influenciam na resistência à compressão do concreto. Deve-se ter atenção especial à influência dos agregados na zona de transição, que representa a região entre as partículas de agregado graúdo e a pasta de cimento, sendo a fase mais fraca do concreto. Na zona de transição quanto maior o tamanho e forma do agregado, menor a quantidade de água necessária para o amassamento, conseqüentemente acaba formando-se zonas de transição mais fracas, reduzindo a resistência à compressão. Além disso, outra característica importante, refere-se à textura do agregado, sendo rugosa a mais indicada para maiores resistências nas primeiras idades por gerar uma ligação mais forte entre a pasta de cimento e o agregado.

Segundo Scanduzzi e Andriolo (1986), os agregados devem ser controlados a partir de características específicas, entre elas destacam-se:

- a) granulometria;
- b) módulo de finura;
- c) tamanho máximo do agregado;
- d) massa específica;



- e) umidade do agregado;
- f) índice de vazios;
- g) porosidade;
- h) módulo de deformação (elasticidade).

### 3.1.2 Cimento

Neville (1997, p. 23) apresenta a seguinte definição de cimento:

Cimento, na acepção geral da palavra, pode ser considerado todo material com propriedades adesivas e coesivas capaz de unir fragmentos de minerais entre si de modo a formar um todo compacto. Esta definição abrange uma grande variedade de materiais.

No campo da construção, o significado do termo “cimento” se restringe aos materiais ligantes usados com pedras, areia, tijolos, blocos etc. Os constituintes principais desse tipo de cimento são os calcários. Os cimentos que interessam no preparo do concreto têm a propriedade de endurecer mesmo dentro d’água, devido a reações químicas com esse elemento, e, portanto, são denominados cimentos hidráulicos.

Segundo Scanduzzi e Andriolo (1986), os dois componentes do cimento mais importantes para definição da resistência do concreto, são o silicato tricálcico ( $C_3S$ ) e o silicato bicálcico ( $C_2S$ ). Sendo, o primeiro, responsável pela maior resistência à compressão do concreto nos primeiros dias, devido a sua rápida reação com a água, e, o segundo, por maiores resistências à compressão em idades mais avançadas. Além desses componentes, tem-se também o aluminato tricálcico e o tetracálcio aluminoferrita como componentes do cimento Portland.

Os principais tipos de cimento encontrados no Brasil são apresentados no quadro 1.

Quadro 1 - Tipos de cimento encontrados no Brasil

Nome técnico	Sigla	Classes
Comum	CPI	25 - 32 - 40
Comum com adições	CPI-S	25 - 32 - 40
Composto com escória	CPII-E	25 - 32 - 40
Composto com pozolana	CPII-Z	25 - 32 - 40
Composto com fíler	CPII-F	25 - 32 - 40
Alto forno	CPIII	25 - 32 - 40
Pozolâmico	CPIV	25 - 32
Alta resistência inicial	CPV-ARI	-
Resistente a sulfatos	RS	25 - 32 - 40
Baixo Calor de Hidratação	BC	25 - 32 - 40
Branco estrutural	CPB	25 - 32 - 40

(adaptado de KIHARA; CENTURIONE, 2005)

### 3.1.2 Aditivos

Sobre os aditivos, Neville (1997, p. 251) cita:

O motivo do grande crescimento do uso dos aditivos é a capacidade de proporcionar ao concreto consideráveis melhorias físicas e econômicas. Essas melhorias incluem o uso em condições nas quais seria difícil ou até impossível usar concreto sem aditivos. Eles também tornam possível o uso de uma grande variedade de componentes na mistura.

Os aditivos embora nem sempre baratos, não representam necessariamente um custo adicional porque podem resultar economias, como, por exemplo, no custo do trabalho necessário para o adensamento, na possibilidade de redução do teor de cimento ou na melhoria da durabilidade sem outras providências.

Deve-se lembrar que, embora usados corretamente, sejam benéficos para o concreto, os aditivos não são um remédio para a falta da qualidade dos ingredientes do concreto, para proporções não adequadas da mistura, ou para despreparo da mão de obra para transporte, lançamento e adensamento.

Mehta e Monteiro (1994), relatam que, em alguns países, até 80% dos concretos produzidos têm aditivos em sua composição, o que comprova sua popularidade e uso difundido em praticamente qualquer local. Scandiuzzi e Andriolo (1986, p. 232) citam que: “Os aditivos podem ser classificados de acordo com critérios baseados na sua ação ou baseados nos seus efeitos sobre o concreto.”. Ainda sobre aditivos, explicam que os efeitos dos mesmos podem ser notados em todas as fases de reação do concreto, desde a massa fluída até o material endurecido. Alguns dos mais comuns são os incorporadores de ar, que melhoram a

durabilidade do concreto através da melhora da trabalhabilidade e redução da segregação e exsudação, os modificadores de pega, que servem tanto para retardar quanto para acelerar a reação do cimento, e, também, os plastificantes redutores de água, que servem para melhorar a trabalhabilidade da massa fluída de concreto.

Mehta e Monteiro (1994) descrevem de uma forma diferente os aditivos, por julgar ser um pouco difícil classificá-los apenas de acordo com sua função como citado anteriormente. Dessa forma pode-se identificar os aditivos através da sua velocidade de reação com a pasta de cimento e água, ou seja, tem-se os aditivos que reagem rapidamente com o cimento e a água por adsorção ou modificação da tensão superficial da água e, outros, que demoram um pouco mais a reagir com o composto cimento-água, podendo levar desde alguns minutos, até algumas horas após a adição do mesmo, sendo que fisicamente incorporam características que são visíveis no concreto fluído no lançamento da massa de concreto na estrutura, porém algumas das reações químicas só são observadas alguns dias ou meses depois da concretagem.

Para que se utilize adequadamente o aditivo, Helene e Terzian (1993), recomendam que sejam primeiramente identificados todos os tipos de materiais utilizados na produção do concreto, seja ele dosado em central ou em obra. Para tanto, deve-se ter bem especificados os tipos de cimento e agregados, quantidade de água (relação água/cimento) para que então se determine o aditivo mais adequado. Essa avaliação deve se adequar as características que deseja-se adicionar ao concreto, devendo ser feita através da determinação da massa específica, aspecto e desempenho desejado do aditivo levando em conta um critério de custo-benefício.

### 3.2 RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO

Segundo Neville (1997), a relação água/cimento pode ser considerada um dos principais fatores relacionados à resistência à compressão do concreto. Isso é demonstrado através da Lei de Abrams (fórmula 1), que define a resistência como sendo inversamente proporcional a relação água/cimento, ou seja, quanto maior a relação água/cimento, menor é a resistência do concreto:

$$f_c = \frac{K_1}{K_2^{a/c}} \quad (\text{fórmula 1})$$

Onde:

$f_c$  = resistência à compressão do concreto (MPa);

$K_1$  e  $K_2$  = constantes empíricas (adimensional);

$a/c$  = relação água/cimento (adimensional).

A relação água/cimento também é abordada pela NBR 12655 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006), que limita a máxima relação que pode ser utilizada em função das condições especiais de exposição do ambiente, relacionando também à resistência à compressão mínima que deve ser utilizada, conforme apresentado na tabela 1. Nota-se que quanto pior é a condição de agressividade, maior a resistência à compressão que deve ser utilizada e, também, menor a relação água/cimento.

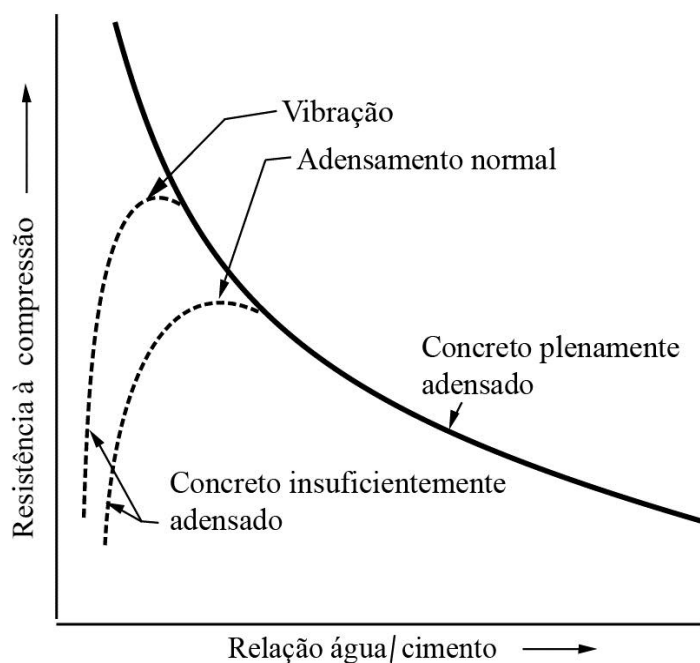
Neville (1997), mostra a forma geral da curva que representa a dependência entre a relação água/cimento e a resistência do concreto, bem como a importância do adensamento adequado (figura 2).

Tabela 1 – Requisitos para o concreto, em condições especiais de exposição

Condições de exposição	Máxima relação água/cimento	Mínimo valor de resistência à compressão
Condições em que é necessário um concreto de baixa permeabilidade à água	0,50	35
Exposição a processos de congelamento e descongelamento em condições de umidade ou a agentes químicos de degelo	0,45	40
Exposição a cloretos provenientes de agentes químicos de degelo, sais, água salgada, água do mar, ou respingos ou borrifação desses agentes	0,40	45

(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006)

Figura 2 – Relação entre água/cimento e resistência



(fonte: NEVILLE, 1997, p. 300)

### 3.3 POROSIDADE

Segundo Neville (1997), a resistência à compressão do concreto e de outros materiais frágeis como ele é fortemente influenciada pela porosidade, ou seja, pelo volume total de todos os vazios presentes, sendo estes o ar aprisionado, poros capilares e de gel e ar incorporado. Mehta e Monteiro (1994) explicam que vazios de ar incorporados ocorrem devido a um adensamento insuficiente ou a usos de aditivos que incorporem ar a massa fluida de concreto. Para entender a influência na resistência à compressão, observa-se que para concretos com alto teor de cimento, o aumento no teor de ar incorporado impacta sobre a resistência à compressão, reduzindo-a consideravelmente, enquanto que, para concretos com baixos teores de cimento, pode ocorrer tanto perda quanto ganho de resistência, dependendo da influência no volume de água.

### 3.4 DOSAGEM

Segundo Mehta e Monteiro (1994), a dosagem consiste em um processo técnico e econômico, pois se deve adequar o proporcionamento dos principais materiais (cimento, agregados, água e aditivos), para produzir um concreto que atenda as especificações técnicas pelo menor custo possível. Apesar da possibilidade de se usar traços já utilizados, é sempre interessante saber como dosar os concretos, para que se possa diminuir o custo do produto final, especialmente para obras de grande porte em que é utilizado um grande volume de concreto. Além disso, deve-se ter atenção quanto às características dos materiais, pois para locais diferentes, pode-se ter, por exemplo, areias mais úmidas e britas mais irregulares. Sendo assim, uma dosagem que funcionou em uma obra não tem, necessariamente, os mesmos resultados em outra.

Helene e Terzian (1993) explicam que, quando se calcula a dosagem do concreto, deve-se ter atenção especial quanto ao custo, trabalhabilidade (concreto fresco), resistência (concreto endurecido) e distribuição granulométrica. Reforçando essa ideia, apresentam em seu livro os parâmetros de dosagem que podem ser controlados e modificados para que se possa definir a dosagem que melhor se adequa para cada caso. Essas características podem ser variadas através de itens como o consumo de água utilizado para a mistura e a granulometria dos agregados, sendo demonstrado todos os itens no quadro 2.

Quadro 2 – Influência dos parâmetros de dosagem no concreto e seus custos

Parâmetros de dosagem	Concreto Fresco	Concreto Endurecido	Para redução de custo
	Para uma boa trabalhabilidade	Para uma boa resistência	
Granulometria do agregado graúdo	fina	grossa	grossa
Relação graúdo / miúdo	diminuir	aumentar	maior possível
Consumo de água	aumentar até certo ponto	diminuir	aumentar
Granulometria total	contínua	descontínua	disponível
Dimensão máxima característica do agregado	média	pequena	maior possível
Geometria do grão de agregado graúdo	esférica (pedregulho)	irregular (brita)	esférica

(fonte: adaptado de HELENE; TERZIAN, 1993)

### 3.5 CONCRETO DOSADO EM CENTRAL

Pela NBR 12655 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006, p. 3), pode-se definir o concreto dosado em central como:

Concreto dosado, misturado em equipamento estacionário ou em caminhão-betoneira, transportado por caminhão-betoneira ou outro tipo de equipamento, dotado ou não de dispositivo de agitação, para entrega antes do início de pega do concreto, em local e tempo determinados, para que se processem as operações subsequentes à entrega, necessárias à obtenção de um concreto endurecido com as propriedades especificadas.

Para Neville (1997), o concreto dosado em central tem vantagens especialmente associadas à canteiros de obra nos quais o espaço físico disponível não é muito grande, visto que há uma grande necessidade de armazenamento de materiais para outros serviços, seja para revestimento como materiais cerâmicos (pisos e azulejos), tintas ou para instalações hidráulicas e elétricas, como metais, canos, cabos e fiação. Dessa forma, não ter que estocar cimento, areia e brita na obra em quantidades suficientes para produzir o concreto, se torna um dos principais destaques, tornando o canteiro de obras mais limpo e organizado. Como vantagem, explica também, o fato da produção do concreto em central se assemelhar muito a uma indústria, com processos padronizados para a quantificação correta dos materiais, através da utilização de balanças para pesar materiais como brita e areia, peneiras para especificar certas granulometrias, entre outros equipamentos. Em obras, observa-se a falta de padronização dos processos para produzir o concreto, sendo cada dia feito de uma forma diferente, especialmente no que refere-se a quantidade de água, que tem relação direta e muito importante com a resistência à compressão, além da dificuldade, devido à mão de obra precária, de se adicionar aditivos e materiais específicos de forma adequada na dosagem.

Sobre as desvantagens do concreto dosado em central, pode-se citar a dificuldade em se manter a trabalhabilidade da mistura até o momento da aplicação, visto que muitas vezes as centrais dosadoras estão localizadas a grandes distâncias das obras (NEVILLE, 1997). Ainda sobre trabalhabilidade, Mehta e Monteiro (1994) ressaltam a importância dessa propriedade, pois uma mistura de concreto que não possa ser adequadamente lançada e adensada não atinge a resistência e durabilidade esperadas. Sendo assim, para concreto dosado em central, o transporte pelo caminhão betoneira deve ser feito o mais rápido possível para minimizar os efeitos do enrijecimento e perda de trabalhabilidade no momento de realizar o lançamento.

Isso deve também ser responsabilidade da equipe técnica da obra, visto que é comum encontrar-se concretagens paradas devido, por exemplo, a falhas nas fôrmas que recebem o concreto ou por qualquer outro inconveniente.

Segunda Mehta e Monteiro (1994), os caminhões betoneira associados ao bombeamento do concreto são muito efetivos devido a sua facilidade em lançar o concreto em praticamente qualquer ponto, o que se torna muito benéfico e produtivo quando trata-se de concretagens em alturas maiores ou em trechos de difícil acesso como fundações ou estruturas em sub-solos. Além disso, torna as concretagens mais seguras, visto que em algumas obras não há meios adequados para o transporte do concreto em locais de difícil acesso, sendo improvisadas, em alguns casos, rampas com tábuas mau apoiadas para realizar o serviço.

A NBR 12655 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006), define as responsabilidades associadas a estruturas de concreto em quatro itens:

- a) projeto (especificação de durabilidade e resistência);
- b) execução (escolha do tipo de concreto, dosagem);
- c) concreteira (produção e dosagem correta do concreto produzido);
- d) recebimento.

### 3.6 DURABILIDADE DE ESTRUTURAS DE CONCRETO

Sobre durabilidade do concreto, Neville (1997, p. 482) cita:

É essencial que as estruturas de concreto desempenhem as funções que lhe foram atribuídas, que mantenham a resistência e a utilidade que delas se espera, durante um período de vida previsto ou, pelo menos, razoável. Portanto, o concreto deve poder suportar o processo de deterioração ao qual se supõe que venha a ser submetido. Nessas condições, o concreto é considerado durável.

Sobre as causas da geração de uma baixa durabilidade, Neville (1997) explica que podem ser causadas por ações mecânicas (impacto, abrasão), químicas (reações internas do concreto) ou físicas. Além disso, Araújo (2003), refere-se a durabilidade do concreto em função dos estados limites últimos (ruína) e dos estados limites de utilização (serviço). Esses estados devem ser todos atendidos pois estão diretamente ligados com os requisitos de segurança da estrutura. Sendo, o primeiro, referente a casos mais graves e, o segundo, a questões que prejudiquem a estrutura, porém não a torne inutilizável. Entre os fatores prejudiciais estão instabilidade do equilíbrio e deformações excessivas. Para que a análise da durabilidade seja



feita adequadamente deve-se analisar todas as ações que estão agindo na estrutura, a fim de se encontrar as piores combinações possíveis. As ações podem ser de três tipos:

- a) permanentes (peso próprio da estrutura, empuxos de terra);
- b) variáveis (cargas acidentais);
- c) excepcionais (incêndios, enchentes).

Araújo (2003) relaciona a durabilidade de estruturas de concreto com sua vida útil, referindo-se a essa característica como um período no qual não devem ser necessárias intervenções de manutenção ou reparo. Complementando essa ideia, Mehta e Monteiro (1994) referem-se ao lado econômico associado à baixa durabilidade de estruturas de concreto, pois quando esse requisito não é atendido são necessárias medidas que podem envolver reparos com um alto custo financeiro.

Assim, para detalhar como são feitos os ensaios que avaliam a resistência à compressão nos concretos, no capítulo 4, apresentam-se as Normas que especificam os ensaios de corpos de prova de concreto, sendo abordadas todas as etapas, começando pela moldagem dos CP e terminando pelo rompimento e análise dos resultados. Também é abordado a definição de resistência à compressão e a importância da sua correta avaliação em estruturas de concreto armado.

## 4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO

Mehta e Monteiro (1994, p. 44) definem resistência como:

A **resistência** de um material é definida como a capacidade deste resistir à tensão sem ruptura. A ruptura é algumas vezes identificada com o aparecimento de fissuras. De qualquer modo, deve ser lembrado que, ao contrário da maioria dos materiais estruturais, o concreto contém microfissuras antes mesmo de ser submetido a tensões externa. No concreto, portanto, a resistência é relacionada com a tensão requerida para causar a fratura e é sinônimo do grau de ruptura no qual a tensão aplicada alcança seu valor máximo. No ensaio de tração, a fratura do corpo de prova normalmente significa ruptura; na compressão, o corpo de prova é considerado rompido mesmo quando não há sinal de fratura externa visível, porém a fissuração interna é muito avançada, tal que o corpo de prova é incapaz de suportar uma carga maior sem fraturar-se.

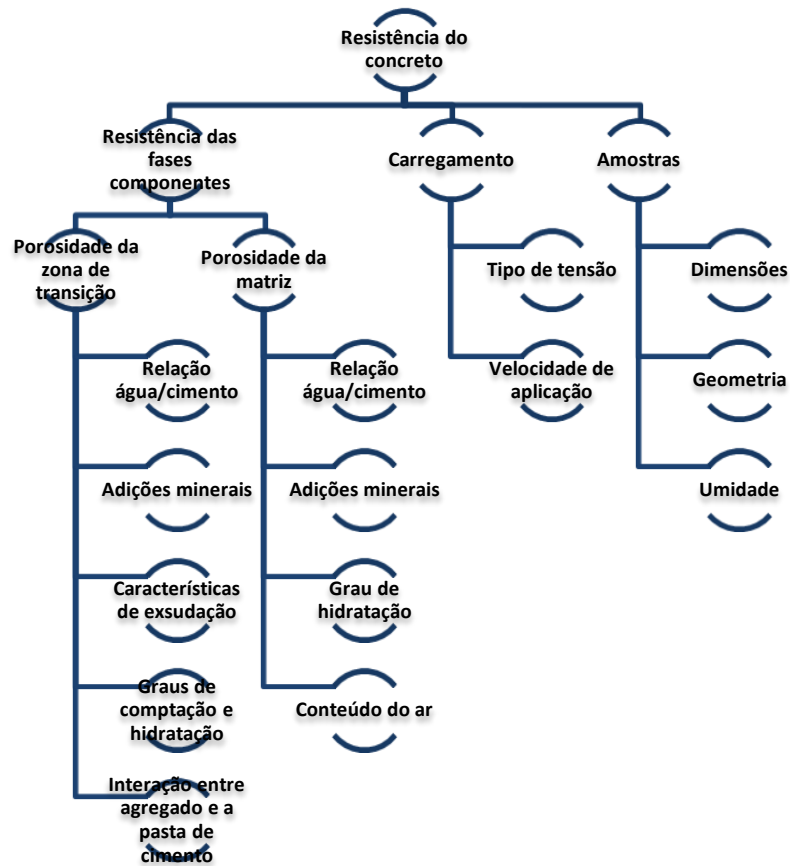
Além disso, Mehta e Monteiro (1994) apresentam um diagrama apresentando os principais fatores que influenciam na resistência final do concreto endurecido. O diagrama está representado na figura 3.

Helene e Terzian (1993), explicam que o método de avaliação da resistência do concreto passou por diversas modificações, sendo antes analisado de forma determinística e atualmente de uma forma probabilística através do método de Gauss, que trabalha com a média e o desvio padrão para uma determinada população de corpos de prova. O método atual, é o mais indicado para que se possa encontrar um valor mais preciso da resistência à compressão, pois considera nos seus métodos de cálculo a variabilidade que pode ocorrer na medida de resistência, pois como demonstrado na figura 3, há muitos fatores que podem influenciar os resultados.

Ainda sobre a importância da resistência à compressão, Mehta e Monteiro (1994, p. 44) citam:

No projeto de estruturas de concreto, resistência à compressão é a propriedade geralmente especificada. Isto porque, comparada com a maioria das propriedades, a resistência é relativamente fácil de ser ensaiada. Contudo, muitas propriedades do concreto, como o módulo de elasticidade, estanqueidade, impermeabilidade e resistência às intempéries incluindo águas agressivas, são diretamente relacionadas com a resistência e podem, portanto, ser deduzidas dos dados de resistência.

Figura 3 – Fatores que influenciam na resistência do concreto



(fonte: adaptado de MEHTA; MONTEIRO, 1994)

Nos itens 4.1 até o 4.6 são abordados conceitos referentes a ensaios de resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto. Dessa forma é possível demonstrar como as Normas brasileiras abordam o assunto e quais são as etapas principais do processo, bem como, a melhor maneira de realizá-las a fim de evitar variabilidades decorrentes do processo de moldagem. No item 4.6 são apresentados métodos para analisar os resultados através do coeficiente de variação e do controle estatístico do concreto.

#### 4.1 CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS DE CONCRETO

A moldagem e ruptura dos corpos de prova de concreto é normatizada pelas normas NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007) – Concreto – Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos – e, pela NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003) – Concreto – Procedimento para Moldagem e Cura de Corpos de Prova, devendo-se utilizar as duas normas para realizar o controle

tecnológico do concreto com precisão e segurança. Além dessas, é utilizada também a NBR 12655 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006) para recebimento e análise dos resultados.

Para Neville (1997), os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos são classificados como a resistência potencial do concreto. A resistência real é a encontrada na estrutura. Essa diferença de tratamento se deve especialmente a diferente massa de concreto que é colocada em teste na estrutura e nos corpos de prova. Dessa forma, deve-se ter atenção especial tanto na equipe que executa a estrutura de concreto quanto na equipe que faz o controle tecnológico, buscando sempre, uma empresa que não tenha relação com a concreteira escolhida.

Reforçando essa ideia, Helene e Terzian (1993) indicam que se tratando de corpos de prova de concreto, existem muitas variabilidades, como, por exemplo, a velocidade de carregamento durante o ensaio de ruptura que, se não for aplicada adequadamente, pode resultar em uma variação de até 10 % nos resultados, gerando uma informação incorreta sobre a resistência do concreto. No quadro 3, Helene e Terzian (1993) apresentam o grau de influência nos resultados de cada um dos processos do controle tecnológico de CP.

Quadro 3 – Grau de influência dos processos de moldagem e rompimento de CP

Causa	Grau de influência
Coleta imprecisa	-10%
Adensamento inadequado	-50%
Cura	+10% ou -10%
Retificação	-30% a -50%
Ruptura (velocidade de carregamento)	+10% ou -10%

(fonte: adaptado de HELENE; TERZIAN, 1993)

## 4.2 MOLDAGEM

O procedimento de moldagem de corpos de prova deve ser feita como descreve a NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003). Inicialmente recomenda-se a limpeza do molde e posteriormente a utilização de óleo mineral. A função desse óleo é permitir que o concreto, após endurecido, seja removido do molde sem aderir às paredes do mesmo, o que poderia gerar alguma deformação.

Outra recomendação desta Norma, refere-se ao adensamento, que como demonstrado no quadro 2, pode ter uma influencia em até 50% nos resultados de resistência à compressão de CP, o que comprova a importância dessa etapa. Na tabela 2, é apresentado o procedimento para a moldagem de CP cilíndricos, sendo o número de golpes necessários para o adensamento correto em função do diâmetro do CP utilizado, e também em função do tipo de adensamento.

Tabela 2 – Especificação do número de camadas em função do tipo de adensamento

Tipo de corpo de prova	Dimensão básica (mm)	Número de camadas em função do tipo de adensamento		Número de golpes para adensamento manual
		Mecânico	Manual	
Cilíndrico	100	1	2	12
	150	2	3	25
	200	2	4	50
	250	3	5	75
	300	3	6	100
	450	5	9	225

(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003)

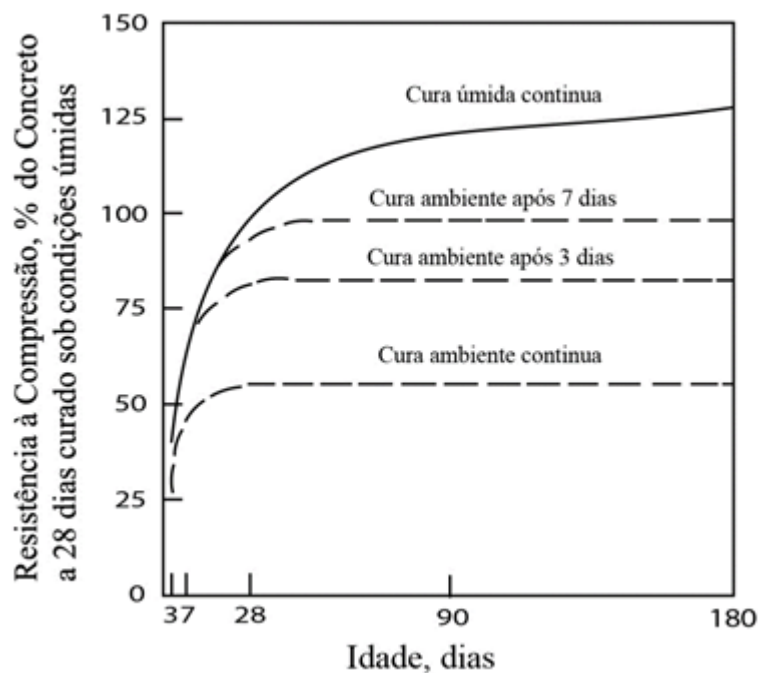
Ainda sobre adensamento, a NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, p. 3) cita em quais ocasiões deve ser utilizada a haste (adensamento manual) ou a vibração (adensamento mecânico), em função do abatimento do concreto, devendo ser:

- a) os concretos com abatimento compreendido entre 10 mm e 30 mm devem ser adensados por vibração;
- b) os concretos com abatimento compreendido entre 30 mm e 150 mm podem ser adensados com haste ou por vibração;
- c) os concretos com abatimento superior a 150 mm devem ser adensados com a haste.

### 4.3 CURA

Segundo Mehta e Monteiro (1994, p. 345), “[...] os dois objetivos da cura são impedir a perda precoce de umidade e controlar a temperatura do concreto durante um período suficiente para que se alcance um nível de resistência desejado.”. Na figura 4, é apresentada a relação do aumento da resistência com o tempo, em função da cura ambiente e da cura úmida. Dessa forma observa-se que o concreto alcança resistências maiores com curas controladas (cura úmida), comparativamente com curas feitas no ambiente nos quais não se tem controle da umidade.

Figura 4 – Influência da cura úmida na resistência do concreto



(fonte: MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 58)

A NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, p. 5), define como deve ser a cura para os corpos de prova:

Imediatamente após sua identificação, os corpos de prova devem ser armazenados até o momento do ensaio em solução saturada de hidróxido de cálcio a  $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$  ou em câmara úmida à temperatura de  $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa do ar superior a 95 %. Os corpos de prova não devem ficar expostos à gotejamento nem à ação de água em movimento.

Sobre a influência da temperatura na cura do concreto, Mehta e Monteiro (1994) comparam um concreto curado em clima frio com outro em clima quente. Dessa forma, tem-se que em temperaturas maiores a resistência nos primeiros dias é maior devido a rápida hidratação do cimento, porém a resistência final é menor que a encontrada em climas frios. Além disso, Neville (1997) explica que para se obter uma cura adequada, que assegure a continuidade da hidratação do cimento, se deve impedir a perda de umidade do concreto que deve ser no mínimo igual a 80 %.

#### 4.4 RETIFICAÇÃO E CAPEAMENTO

A NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, p. 4) define retificação como:

[...] remoção, por meios mecânicos, de uma fina camada de material do topo a ser preparado. Esta operação é normalmente executada em máquinas especialmente adaptadas para essa finalidade, com a utilização de ferramentas abrasivas. A retificação deve ser feita de tal forma que se garanta a integridade estrutural das camadas adjacentes à camada removida, e proporcione uma superfície lisa e livre de ondulações e abaulamentos.

Fernandes (2011), cujo trabalho consistiu na verificação da influência do tipo de retificação do corpo de prova na resistência à compressão do concreto, concluiu que, para concretos de pequena e média resistência, o tipo de retificação (horizontal ou vertical) não influencia significativamente na resistência à compressão, sendo o único fator importante nessa avaliação, o tipo (modelo) de retífica utilizado, sendo analisadas as retificas do tipo horizontal, vertical e serra.

Para o capeamento, que consiste no revestimento de corpos de prova com uma fina camada de material (enxofre, argamassa de cimento, entre outros), podendo ser colado, não colado ou por desgaste mecânico, deve-se cumprir os seguintes requisitos segundo a NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, p. 4):

- a) aderência ao corpo de prova;
- b) compatibilidade química com o concreto;
- c) fluidez, no momento de sua aplicação;
- d) acabamento liso e plano após endurecimento;

- e) resistência à compressão compatível com os valores normalmente obtidos em concreto.

## 4.5 CARREGAMENTO

O ensaio de compressão é definido pela NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 3). Essa Norma refere-se a alguns itens, citados a seguir, como pré-requisitos para a execução do carregamento:

- a) os corpos de prova moldados devem atender ao estabelecido na ABNT NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003);
- b) os corpos de prova a serem ensaiados devem atender à relação altura/diâmetro nunca maior do que 2,02;
- c) até a idade de ensaio, os corpos de prova devem ser mantidos em processo de cura úmida ou saturada;
- d) antes da execução do ensaio, devem ser preparadas as bases dos corpos de prova, de acordo com o estabelecido na ABNT NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003).

Segundo a NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 3), “O carregamento do ensaio deve ser aplicado continuamente e sem choques, com a velocidade de carregamento de  $(0,45 \pm 0,15)$  MPa/s. A velocidade de carregamento deve ser mantida constante durante todo ensaio.”.

Na grande maioria dos casos, os CP são rompidos aos 28 dias. Segundo Neville (1997), os 28 dias não tem significado científico, e foi escolhido por se considerar que nessa idade, o concreto já tenha processado uma hidratação significativa do cimento. Reforçando essa ideia, Araújo (2003), descreve que, aos 28 dias, se convencionou que a estrutura deverá entrar em carga, sendo esse o motivo para a realização do rompimento dos CP com esse intervalo de tempo. Além disso, utilizando 28 dias a partir da moldagem, tem-se o rompimento exatamente quatro semanas após a moldagem, o que leva ao rompimento no mesmo dia da semana que foi moldado.



## 4.6 RESULTADOS

A resistência à compressão para cada CP deve ser obtida, segundo a NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007), como demonstrado na fórmula 2:

$$f_c = \frac{4F}{\pi \times D^2} \quad (\text{fórmula 2})$$

Onde:

$f_c$  é a resistência à compressão do concreto (MPa);

$F$  é a força máxima alcançada (N);

$D$  é o diâmetro do corpo de prova (mm).

Sendo essa fórmula válida somente para corpos de prova com relação altura/diâmetro (h/d) maior do que 1,94. Nos casos em que essa relação é menor que 1,94, deve-se multiplicar a força  $F$  contida na fórmula, por um fator de correção, conforme apresentado na tabela 3.

Tabela 3 – Fator de correção para diferentes relações altura / diâmetro

Relação h/d	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00
Fator de correção	1,00	0,98	0,96	0,93	0,87

(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007)

Os resultados dos ensaios devem conter as seguintes informações segundo NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 5):

- a) número de identificação do corpo de prova;
- b) data da moldagem;
- c) idade do corpo de prova;

- d) data do ensaio;
- e) dimensões do corpo de prova;
- f) tipo de capeamento empregado;
- g) classe da máquina de ensaio;
- h) resultado da resistência à compressão individual dos corpos de prova e do exemplar.

Nos próximos itens é demonstrado como é feita a análise dos resultados de resistência à compressão, sendo no item 4.6.1 apresentado o procedimento para se encontrar o coeficiente de variação dentro do ensaio, preconizado pela NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007), e, no item 4.6.2, a metodologia, através da NBR 12655 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006), para o cálculo do controle estatístico do concreto através da resistência estimada para uma determinada amostragem.

#### 4.6.1 Coeficiente de variação

A NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 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 fórmula 3:

$$s_e = \frac{\sum_{i=1}^n Ai}{d_2 \times n} \quad (\text{fórmula 3})$$

Onde:

$s_e$  é o desvio padrão (MPa);

$Ai$  é a amplitude de valores de resistência (MPa);

$n$  é o número de exemplares da amostra (un);

$d_2$  é o coeficiente tabelado, dependendo da quantidade de CP moldados, como demonstrado na tabela 4.

Tabela 4 – Valores para  $d_2$  em função da quantidade de CP moldados

Quantidade de CP	Coefficiente $d_2$
2	1,128
3	1,693
4	2,059
5	2,326
6	2,534

(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007)

A partir do desvio padrão ( $s_e$ ), se calcula o coeficiente de variação dentro do ensaio, através da fórmula 4:

$$cv_e = \frac{s_e}{f_{cm}} \quad (\text{fórmula 4})$$

Onde:

$cv_e$  é coeficiente de variação de ensaios de resistência à compressão de corpos de prova de concreto;

$f_{cm}$  é resistência média (MPa).

Dessa forma é possível avaliar o coeficiente de variação dos ensaios através dos intervalos apresentados no quadro 4, podendo variar de excelente a deficiente.

Quadro 4 – 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: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 9)

#### 4.6.2 Controle estatístico do Concreto

Segundo a NBR 12655 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006), o controle estatístico do concreto pode ser feito através do cálculo da resistência estimada das amostras ensaiadas. Sendo essa resistência definida como critério de aceitação ou rejeição dos lotes de concreto. Dessa forma os lotes devem ser aceitos somente quando a resistência estimada for maior ou igual a resistência característica do concreto ( $f_{ckest} \geq f_{ck}$ ).

Para esse ensaio tem-se o controle estatístico por amostragem parcial ou amostragem total. No primeiro caso (parcial), são retirados CP irmãos apenas de algumas betonadas e o cálculo do  $f_{ckest}$  é feito em função do número de exemplares ( $n$ ), como demonstrado na fórmula 5 para amostras que contém de 6 a 20 exemplares, e, na fórmula 6 para amostras que contém mais que 20 exemplares (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006):

$$f_{ckest} = 2x \frac{f_1 + f_2 + \dots + f_{m-1}}{m-1} - f_m \quad (\text{fórmula 5})$$

Onde:

$f_{ckest}$  é a resistência característica estimada (MPa);

$f_1, f_2, \dots, f_m$  são valores das resistências dos exemplares em ordem crescente (MPa);

$m = n / 2$  (un). Despreza-se o valor mais alto de  $n$ , se for ímpar.

$$f_{ckest} = f_{cm} - 1,65 \times s_d \quad (\text{fórmula 6})$$

Onde:

$f_{cm}$  é a resistência média dos exemplares do lote (MPa);

$s_d$  é o desvio padrão da amostra de  $n$  elementos, preestabelecidos na Norma em função das condições de preparo do concreto como demonstrado na tabela 5 (MPa).

Tabela 5 – Desvio padrão a ser adotado em função da condição de preparo do concreto

Condições de preparo	Desvio padrão (MPa)
A	4,0
B	5,5
C	7,0

(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006, p. 15)

Além disso, não podem ser adotados para a resistência estimada ( $f_{ckest}$ ) valores menores do que  $\gamma_6 f_1$ , sendo  $\gamma_6$  adotado em função da condição de preparo do concreto, sendo a condição A aquela com maior controle de dosagem dos materiais e C a pior condição de dosagem, e do número de exemplares da amostra. Os principais valores para  $\gamma_6$  são apresentados na tabela 6.

Tabela 6 – Valores de  $\gamma_6$ 

Condição de preparo	Número de exemplares							
	2	4	6	8	10	12	14	$\geq 16$
A	0,82	0,89	0,92	0,95	0,97	0,99	1,00	1,02
B ou C	0,75	0,84	0,89	0,93	0,96	0,98	1,00	1,02

(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006, p. 17)

Para os casos em que se tem exemplares de todas as amassadas de concreto (amostragem total), também deve-se proceder para o cálculo da resistência estimada em função do número de exemplares ( $n$ ). Para isso primeiramente deve-se considerar apenas a resistência potencial de cada amostra e ordená-las em ordem crescente ( $f_1, f_2, \dots, f_n$ ). Então, tem-se que para  $n \leq 20$  amostras, o  $f_{ckest}$  é igual a  $f_1$  que representa o menor valor de resistência potencial ordenado em ordem crescente para essa amostra. Por outro lado, para casos onde  $n \geq 20$  amostras, considera-se que o  $f_{ckest} = f_{ij}$  onde  $i = 0,05n$ .

No capítulo 5 é apresentado o programa experimental realizado nesse trabalho, afim de demonstrar as etapas da moldagem dos CP realizados pelos três laboratórios, identificando os principais processos realizados.

## 5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Através dos resultados obtidos neste trabalho, pretende-se avaliar a variabilidade da resistência à compressão do concreto usinado fornecido pela concreteira A para uma determinada obra em Porto Alegre, e verificar se esta variabilidade pode ser associada ao laboratório que realizou o ensaio. Para que essa avaliação fosse possível, foram moldados corpos de prova irmãos que foram rompidos em três laboratórios, sendo aqui identificados como laboratórios 1, 2 e 3.

Para este experimento limitou-se ao concreto utilizado no pavimento tipo do edifício, com resistência característica de 30 MPa. Cada caminhão betoneira transportou 8 m<sup>3</sup> de concreto, sendo o traço unitário em massa, na ordem cimento, areia, brita e relação água cimento, 1:2,1:3,3:0,5. Os materiais e as respectivas quantidades utilizadas para cada caminhão, segundo informado pela concreteira A, são de:

- a) cimento CP IV 32 RS = 352 kg/m<sup>3</sup>;
- b) brita 0 = 231 kg/m<sup>3</sup>;
- c) brita 1 = 925 kg/m<sup>3</sup>;
- d) areia fina = 300 kg/m<sup>3</sup>;
- e) areia média = 450 kg/m<sup>3</sup>;
- f) meta-caulim = 28,16 kg/m<sup>3</sup>.

Os moldes metálicos utilizados têm como medidas, 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura (figura 5). Dessa forma, considera-se o fator de correção, segundo a Norma NBR 5739, para os resultados de resistência à compressão igual a 1 conforme tabela 3, pois a relação h/d (altura/diâmetro) é igual a 2.

Figura 5 – Moldes metálicos utilizados no experimento



(fonte: foto do autor)

Nos próximos itens, são apresentados, primeiramente, o empreendimento estudado, e após, detalhado como foi realizado o ensaio para cada um dos laboratórios, especificando o método de cura adotado, a retificadora utilizada e também o equipamento utilizado para o carregamento dos CP.

## 5.1 APRESENTAÇÃO DA OBRA

A obra estudada caracteriza-se por um edifício residencial, com 15 pavimentos, sendo 4 aptos por pavimento. Cada pavimento tipo contempla uma área de aproximadamente  $370 \text{ m}^2$ , sendo o pé direito de 2,63 m. As concretagens sempre eram planejadas para dois dias distintos para cada pavimento tipo, sendo a primeira contemplando lajes e vigas, totalizando  $58 \text{ m}^3$  de concreto, e a segunda contemplando os pilares, totalizando  $16 \text{ m}^3$  de concreto. Dessa forma, tem-se um total de  $74 \text{ m}^3$  por pavimento tipo e,  $1110 \text{ m}^3$  para executar todo o edifício (pavimentos tipo + térreo + sub solo). Em termos de custo, a estrutura representou em torno de 30% do custo total da obra.

## 5.2 LABORATÓRIO 1

O laboratório 1 foi contratado pela construtora para fazer o controle tecnológico do concreto usinado, por isso apresentou os resultados referentes à variabilidade da resistência à compressão do concreto no decorrer de toda a obra. Para que isso fosse possível, as moldagens ocorreram desde o início do empreendimento, sendo 2 CPs por caminhão betoneira, o que representa uma amostragem total segundo a Norma NBR 12655, visto que o concreto de todos os caminhões foi ensaiado. As moldagens iniciaram nas fundações e terminaram na laje da cobertura, porém, os resultados dos CPs das fundações (concreto com resistência característica de 25 MPa), lajes do sub-solo (concreto específico para piso polido) e cobertura não foram utilizados por se tratarem de um concreto diferente do restante da estrutura. Dessa forma foram moldados 304 CPs para essa avaliação, totalizando 152 exemplares com 2 CP cada. Os resultados de resistência à compressão dos CPs podem ser apresentados no anexo A.

A moldagem em obra foi feita por um profissional treinado pelo laboratório ligado a construtora. O CP foi moldado com três camadas de concreto até seu preenchimento e adensado manualmente com haste metálica, sendo executados 25 golpes para cada camada, conforme mostra a tabela 2 deste trabalho, baseada na Norma NBR 5738. Após moldagem, os CPs foram identificados (figura 6) e após 24h foram transportados ao laboratório 1 para passar por processo de cura em câmara úmida à temperatura de 26° C e umidade relativa de 95%, permanecendo por 28 dias nesse sistema. Após esse período o CP passou por um processo de retificação em uma retífica do tipo horizontal para que sua base e topo ficassem com a superfície plana e lisa, livre de ondulações permitindo que no momento da ruptura o carregamento fosse aplicado uniformemente. Os processos de cura e retificação podem ser visualizados na figura 7.

Para a determinação da resistência à compressão axial, os CP foram ensaiados seguindo os procedimentos já citados nesse trabalho, onde foram submetidos a uma carga constante até sua ruptura em uma prensa da marca MV MAQ com capacidade para até 150 toneladas e velocidade de carregamento de 0,45 MPa/s (figura 8), sendo então feita a leitura da resistência à compressão do CP testado.



Figura 6 – Vista geral de CPs identificados ainda dentro dos moldes metálicos



(fonte: foto do autor)

Figura 7 – (a) Vista geral dos CPs em processo de cura em câmara úmida e (b) CP posicionado para início do processo de retificação



(fonte: fotos do autor)

Figura 8 – Aspecto do CP após submetido a esforços de compressão



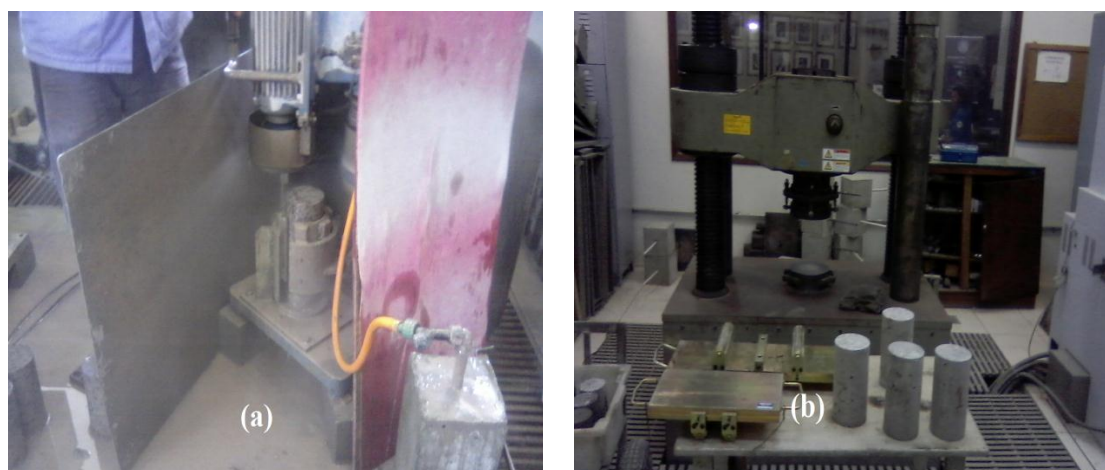
(fonte: foto do autor)

### 5.3 LABORATÓRIOS 2 E 3

Com vistas a comparar os resultados fornecidos pelo laboratório 1, responsável pelo controle tecnológico do concreto, a partir da laje do oitavo pavimento, foram moldados CP adicionais, os quais foram ensaiados pelo laboratório 3, totalizando 30 CP moldados (15 exemplares). Já o laboratório 2 forneceu os resultados encontrados nos ensaios realizados pelo laboratório ligado à concreteira A, que assim como no laboratório 1, realizou moldagens desde a primeira concretagem do edifício. Apesar de moldar CP irmãos, o laboratório 2, forneceu apenas um resultado, que é adotado pela concreteira A como o maior valor de resistência à compressão obtido nos 2 CPs ensaiados, representando a resistência potencial do concreto fornecido, estando de acordo com o preconizado pela NBR 12655 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006). Dessa forma, tem-se apenas uma amostragem parcial para os laboratórios 2 e 3, visto que apenas um caminhão foi ensaiado por concretagem.

As etapas de moldagem e transporte do laboratório 3 seguiram o mesmo processo feito pelo laboratório 1, porém as dimensões dos moldes metálicos utilizados são de 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura, e, a cura foi feita com os CPs mergulhados em solução saturada de hidróxido de cálcio a temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ . O tipo de retífica utilizado também foi diferente, sendo nesse caso utilizado uma retífica do tipo horizontal (figura 9a). A prensa utilizada é da marca Shimadzu, com capacidade de 200 toneladas (figura 9b). A velocidade de carregamento aplicada foi a mesma adotada pelo primeiro laboratório, a fim de evitar variabilidades devido a esse processo, que deve ser de  $0,45\text{MPa/s}$  conforme definido na Norma NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007).

Figura 9 – (a) Retífica e (b) prensa utilizadas no experimento pelo laboratório 3



(fonte: foto do autor)

## 6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Após todos os processos descritos no programa experimental, neste capítulo são apresentados os resultados e as análises pertinentes ao trabalho a fim de se comprovar a hipótese inicialmente feita, ou seja, analisar, em termos de variabilidade, a significância dos resultados. Para isso, primeiramente os resultados foram avaliados estatisticamente através do método preconizado nas Normas NBR 12655 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006) e NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007). Após, foi feita uma segunda análise estatística dos resultados, através dos métodos de comparação múltipla de médias e análise de variâncias que possibilitam a comparação entre os laboratórios, mesmo com tamanho de amostras distintos.

Antes de apresentar as análises estatísticas, apresenta-se na tabela 7 algumas informações sobre os resultados obtidos em cada um dos laboratórios avaliados, sendo o laboratório 2, ligado à concreteira A, o que apresentou maior porcentagem de CPs moldados com resistências maiores ou iguais à resistência característica do concreto estudado. Observa-se também que o menor resultado da resistência à compressão encontrado foi de 22 MPa pelo laboratório 1, o que representa uma diferença de 8 MPa (27%) em relação a resistência mínima esperada para a estrutura.

Tabela 7 – Resistências à compressão mínimas e máximas obtidas nos três laboratórios

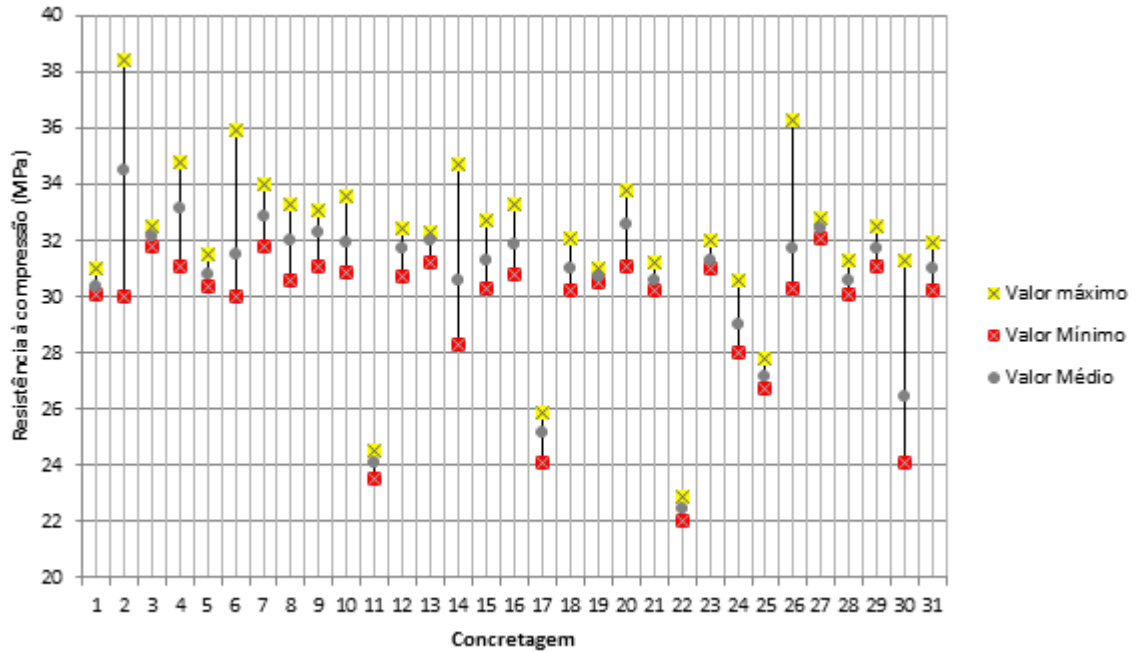
Laboratório	CP moldados	Resistência Média (MPa)	Menor Fck (MPa)	Maior Fck (MPa)	$F_{ck} \geq 30$ MPa (%)	$F_{ck} < 30$ MPa (%)
1	304	30,95	22,00	38,40	76,60%	23,40%
2	31	31,81	28,00	33,70	93,30%	6,70%
3	30	30,51	25,40	35,30	73,30%	26,70%

(fonte: elaborado pelo autor)

Para facilitar a visualização dos resultados, optou-se por demonstrar as resistências encontradas através de método gráfico. Dessa forma, apresenta-se o menor e maior valor encontrado para cada lote (concretagem) e seu valor médio para os laboratórios 1 e 3 (figuras 10 e 11), não sendo possível fazer essa análise para o laboratório 2 por ter-se disponível apenas a resistência potencial de cada amostragem.

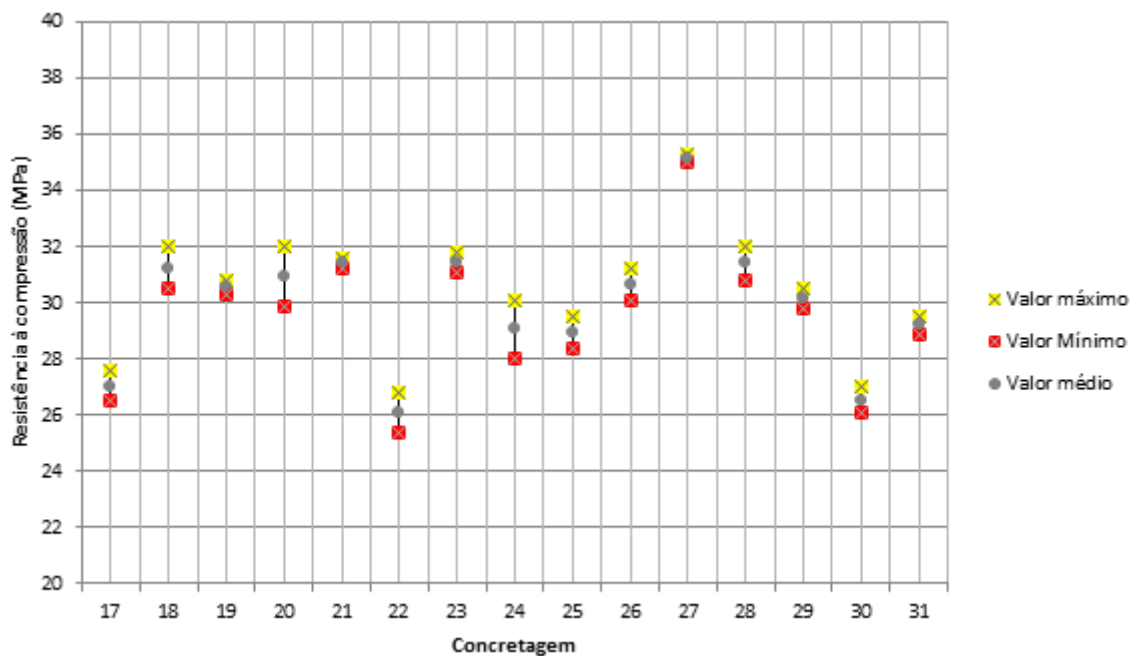
Observa-se que a maior amplitude encontrada para o laboratório 1 ocorreu na concretagem número 2, sendo de 8,4 MPa, já a menor foi encontrada na concretagem 19, sendo 0,5 MPa. Para o laboratório 3 tem-se menores amplitudes para uma mesma amostragem, isso pode estar associado ao fato de ter-se menos amostras representativas para cada lote de concreto, sendo a maior amplitude encontrada 2,1 MPa na concretagem 24.

Figura 10 – Valores máximos, mínimos e médios de resistência à compressão para cada lote do laboratório 1



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 11 – Valores máximos, mínimos e médios de resistência à compressão para cada lote do laboratório 3



(fonte: elaborado pelo autor)

Nos próximos itens, são apresentados os resultados encontrados após análise dos dados através das Normas apresentadas nesse trabalho e também através de uma análise estatística. Após são apresentadas as conclusões do trabalho.

## 6.1 CONTROLE ESTATÍSTICO DO CONCRETO CONFORME NORMA NBR 12655/2006

A primeira análise que foi feita conforme as Normas foi para obter o valor estimado da resistência característica de cada lote, sendo que nas concretagens de lajes e vigas, tem-se um lote formado por 16 CP visto que são 8 caminhões betoneira por concretagem e 2 CP por caminhão. Já no caso dos pilares tem-se um lote com 4 CPs devido a apenas dois caminhões serem o suficiente para transportar o volume necessário de concreto para essas concretagens.

O cálculo da resistência estimada foi feito conforme NBR 12655 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006), que para o laboratório 1, considera um controle estatístico do concreto por amostragem total (100%), o que significa dizer que uma parcela do concreto de todos os caminhões betoneira foi analisado. Dessa forma pode-se calcular a resistência estimada para cada lote ensaiado nas concretagens, considerando-se apenas a resistência potencial, ou seja, o maior valor de resistência encontrado para CP irmãos.

Tem-se que para todos os lotes o número de CP ( $n$ ) é inferior a 20, dessa forma procede-se ordenando os valores de resistências potenciais encontrados em ordem crescente e adota-se como resistência característica o primeiro valor dessa ordem, ou seja, a menor resistência encontrada. Se essa resistência for inferior à resistência característica do concreto, 30 MPa, o lote não deve ser aceito. Na tabela 8, pode ser visualizada a resistência potencial de cada um dos exemplares moldados. Já, na figura 12, é possível visualizar graficamente os resultados da resistência estimada para cada concretagem.

Na tabela 9 são apresentados a resistência estimada para cada concretagem e se o lote foi aceito. Dessa forma, tem-se que 7 lotes foram rejeitados, dos quais, 3 são de concretagens de pilares e 4 de lajes e vigas. O pior resultado de resistência estimada foi para a concretagem 22, resultando em 22,4 MPa o que representa uma diferença de 7,6 MPa em relação a resistência característica mínima exigida para essa estrutura. A maior resistência estimada encontrada é

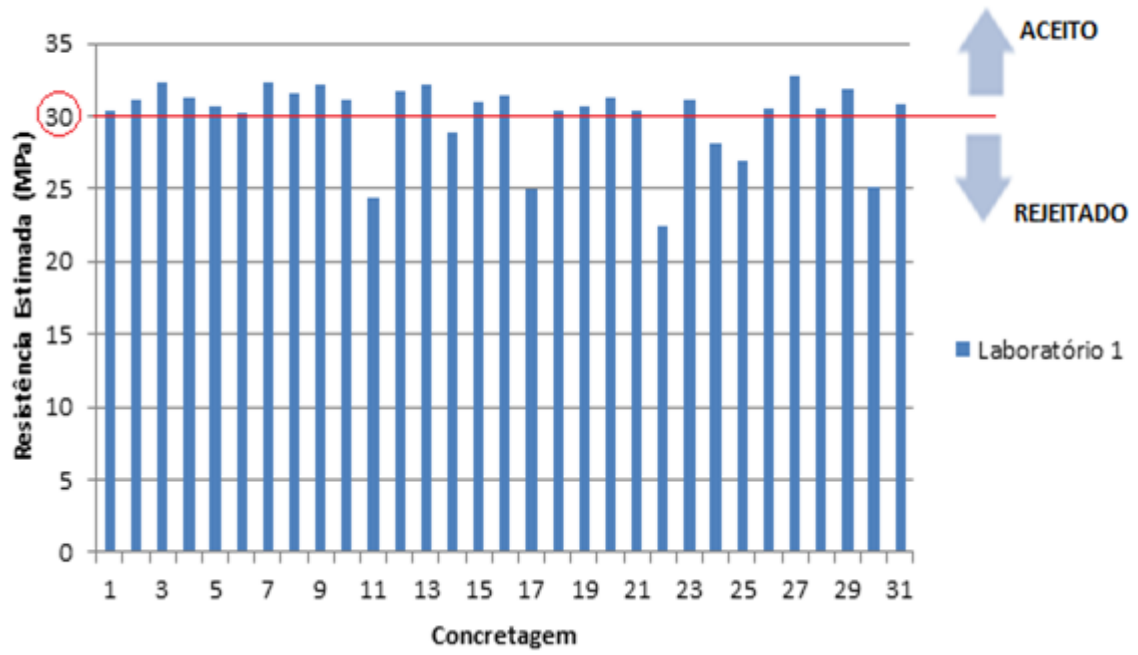
de 32,7 MPa que ocorreu na concretagem 27, sendo apenas 2,7 MPa acima da resistência mínima aceita. Na figura 13 é possível visualizar em termos de porcentagem a quantidade de lotes aceitos e recusados.

Tabela 8 – Resistência à compressão potencial do concreto, em MPa, para o laboratório 1

Concretagem/CP	1	2	3	4	5	6	7	8
1	30,4	31,0						
2	31,1	36,6	32,2	32,6	38,4	36,3	36,1	36,5
3	32,3	32,5						
4	34,2	34,2	34,8	33,3	33,7	32,8	31,3	33,5
5	31,5	30,6						
6	31,1	31,1	31,1	30,5	30,2	32,0	35,9	31,8
7	34,0	32,3						
8	31,8	31,8	32,3	33,3	32,0	33,1	31,5	32,8
9	32,2	33,1						
10	33,6	31,1	32,8	31,8	32,3	31,6	32,5	31,8
11	24,4	24,5						
12	32,2	31,8	32,0	31,7	32,3	32,2	32	32,4
13	32,3	32,2						
14	28,9	29,4	29,3	30,7	33,9	34,7	31,7	29,4
15	30,9	32,7						
16	31,4	31,9	32,4	31,6	33,3	33,3	31,8	32,0
17	25,9	25,0						
18	30,3	30,3	31,9	31,6	30,5	32,0	32,1	30,9
19	30,6	31,0						
20	31,3	32,9	33,0	33,3	33,1	33,8	33,1	32,6
21	30,4	31,2						
22	22,9	22,5	22,7	22,5	22,4	22,8	22,6	22,8
23	31,1	32,0						
24	28,2	30,6	30,1	29,2	29,5	28,3	29,0	29,4
25	26,9	27,8						
26	30,8	30,9	30,5	31,5	31,0	36,3	32,3	32,4
27	32,8	32,7						
28	30,5	31,3	30,5	30,8	30,7	30,5	30,8	31,0
29	31,8	32,5						
30	25,5	25,2	25,5	25,5	25,9	26,8	28,2	31,3
31	30,8	31,9						

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 12 – Resistências estimadas encontradas para o Laboratório 1



(fonte: elaborado pelo autor)

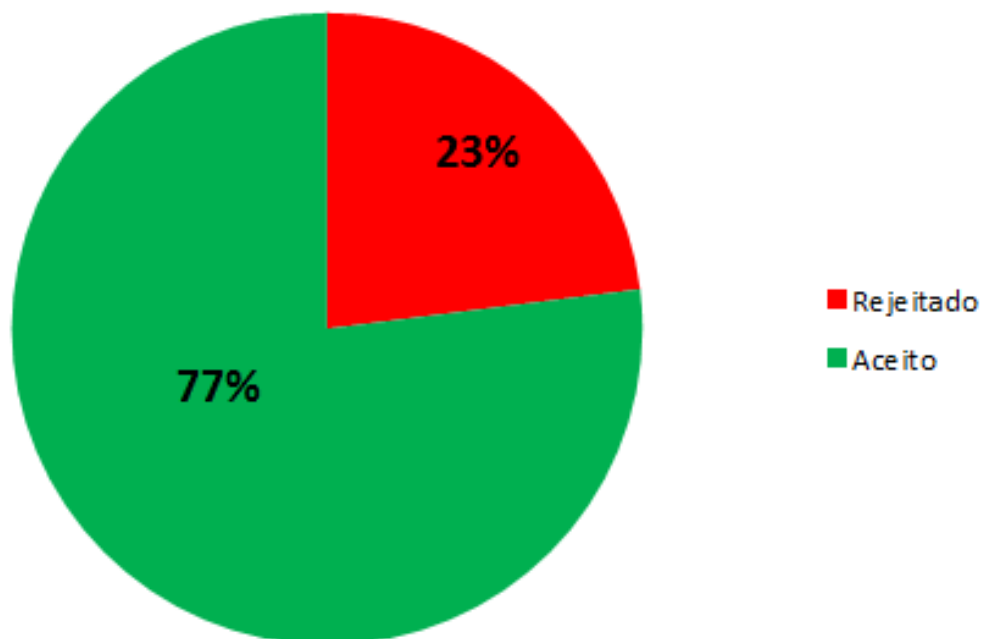


Tabela 9 – Resistência estimada e aceitação dos lotes do laboratório 1

Concretagem	Caminhões Ensaaiados	$f_{ck}$ estimado	Aceitação
1	2	30,4	Aceito
2	8	31,1	Aceito
3	2	32,3	Aceito
4	8	31,3	Aceito
5	2	30,6	Aceito
6	8	30,2	Aceito
7	2	32,3	Aceito
8	8	31,5	Aceito
9	2	32,2	Aceito
10	8	31,1	Aceito
11	2	24,4	Rejeitado
12	8	31,7	Aceito
13	2	32,2	Aceito
14	8	28,9	Rejeitado
15	2	30,9	Aceito
16	8	31,4	Aceito
17	2	25,0	Rejeitado
18	8	30,3	Aceito
19	2	30,6	Aceito
20	8	31,3	Aceito
21	2	30,4	Aceito
22	8	22,4	Rejeitado
23	2	31,1	Aceito
24	8	28,2	Rejeitado
25	2	26,9	Rejeitado
26	8	30,5	Aceito
27	2	32,7	Aceito
28	8	30,5	Aceito
29	2	31,8	Aceito
30	8	25,2	Rejeitado
31	2	30,8	Aceito

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 13 – Porcentagem de lotes aceitos e rejeitados com base nos resultados obtidos pelo laboratório 1



(fonte: elaborado pelo autor)

Para os laboratórios 2 e 3 tem-se amostragens parciais pois apenas o concreto de um caminhão betoneira é ensaiado, ou seja, há apenas uma amostragem para cada concretagem. Dessa forma, para esses laboratórios não é possível calcular o  $f_{ck}$  estimado, pois o mínimo exigido, segundo a NBR 12655 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006), são 6 exemplares para que seja possível fazer um controle estatístico por amostragem parcial.

## 6.2 AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DE DESEMPENHO DO ENSAIO CONFORME NBR 5739/2007

Para essa avaliação é necessário seguir o procedimento estabelecido conforme NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007), apresentado no capítulo 4.6.1 deste trabalho que avalia a qualidade dos processos de ensaio através do coeficiente de variação. Dessa forma, tem-se para o laboratório 1 que os processos de moldagem, cura, retificação e carregamento tiveram pouquíssima influência na variabilidade dos resultados, pois, como é possível visualizar na tabela 10, o coeficiente de variação foi menor que 3 para 30 concretagens, e ficou entre 3 e 4 para apenas uma, o que caracteriza o ensaio como excelente e muito bom, conforme demonstrado no quadro 3. Para os cálculos foi considerado

coeficiente  $d_2$  igual a 1,128 visto que são 2 CP por exemplar (tabela 4), e o número de exemplares por amostra igual a 8 para concretagens de lajes e vigas, e 2 para pilares.

Para o laboratório 2 não foi possível calcular o coeficiente de variação pois para isso necessita-se da amplitude de cada amostragem e esse laboratório forneceu apenas a resistência potencial.

Tabela 10 – Coeficiente de variação para os lotes do laboratório 1 conforme NBR 5739

Concretagem	Soma das amplitudes	Desvio padrão	$f_{cm}$	$cv_e$	Resultado
1	1,2	0,5	30,40	1,75	Excelente
2	6,6	0,7	34,47	2,12	Excelente
3	0,9	0,4	32,18	1,24	Excelente
4	5,9	0,7	33,13	1,97	Excelente
5	0,9	0,4	30,83	1,29	Excelente
6	2,9	0,3	31,48	1,02	Excelente
7	1,2	0,5	32,85	1,62	Excelente
8	3,7	0,4	32,01	1,28	Excelente
9	1,4	0,6	32,30	1,92	Excelente
10	5,2	0,6	31,91	1,81	Excelente
11	1,4	0,6	24,10	2,57	Excelente
12	4,2	0,5	31,74	1,47	Excelente
13	1,1	0,5	31,98	1,52	Excelente
14	8,8	1,0	30,56	3,19	Muito Bom
15	1,9	0,8	31,33	2,69	Excelente
16	5,9	0,7	31,84	2,05	Excelente
17	1,2	0,5	25,15	2,11	Excelente
18	4,0	0,4	31,01	1,43	Excelente
19	0,4	0,2	30,70	0,58	Excelente
20	4,9	0,5	32,60	1,67	Excelente
21	1,0	0,4	30,55	1,45	Excelente
22	2,3	0,3	22,46	1,13	Excelente
23	1,1	0,5	31,28	1,56	Excelente
24	3,8	0,4	29,01	1,45	Excelente
25	0,8	0,4	27,15	1,31	Excelente
26	2,8	0,3	31,71	0,98	Excelente
27	1,3	0,6	32,43	1,78	Excelente
28	2,1	0,2	30,59	0,76	Excelente
29	1,6	0,7	31,75	2,23	Excelente
30	4,8	0,5	26,46	2,01	Excelente
31	1,5	0,7	30,98	2,15	Excelente

(fonte: elaborado pelo autor)

Para o laboratório 3 tem-se algumas condições diferentes em relação ao laboratório 1, pois foi coletada apenas 1 amostra com 2 CP para cada concretagem acompanhada. Os resultados do laboratório 3 podem ser visualizados na tabela 11. Para esse laboratório tem-se uma maior variabilidade nas condições do ensaio, especialmente na concretagem 24 e 20 que pela avaliação do quadro 3 resultaram em um ensaio deficiente. Exclui-se o adensamento como

fator dessa deficiência, pois o processo de moldagem e adensamento foi feito pelo mesmo profissional do laboratório 1 que obteve resultados ótimos, sendo o processo feito de forma padronizada para todos os CP. Atribui-se, então, erros devido aos processos de cura, retificação e carregamento do laboratório 3.

Tabela 11 – Coeficiente de variação para os lotes do laboratório 3 conforme NBR 5739

Concretagem	Soma das amplitudes	Desvio padrão	$f_{cm}$	$cv_e$	Resultado
17	1,1	0,98	27,05	3,61	Muito Bom
18	1,5	1,33	31,25	4,26	Bom
19	0,5	0,44	30,55	1,45	Excelente
20	2,1	1,86	30,95	6,02	Deficiente
21	0,4	0,35	31,40	1,13	Excelente
22	1,4	1,24	26,10	4,76	Bom
23	0,7	0,62	31,45	1,97	Excelente
24	2,1	1,86	29,05	6,41	Deficiente
25	1,1	0,98	28,95	3,37	Muito Bom
26	1,1	0,98	30,65	3,18	Muito Bom
27	0,3	0,27	35,15	0,76	Excelente
28	1,2	1,06	31,40	3,39	Muito Bom
29	0,7	0,62	30,15	2,06	Excelente
30	0,9	0,80	26,55	3,01	Muito Bom
31	0,6	0,53	29,20	1,82	Excelente

(fonte: elaborado pelo autor)

### 6.3 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS TRÊS LABORATÓRIOS ATRAVÉS DE ANÁLISE DE VARIÂNCIAS E COMPARAÇÃO ENTRE MÉDIAS

Para que fosse possível realizar uma análise entre os três laboratórios, utilizou-se uma ferramenta estatística que permite a comparação entre grupos com diferente número de amostras. Esse método é conhecido como ANOVA fator único que calcula um fator F que consiste na razão entre a variação das médias das amostras (tratamento) pela variação dentro das amostras (erro). Através desse coeficiente é possível determinar o valor p que define se a variância dos resultados é significativa. Para realização dos cálculos utilizou-se ferramentas estatísticas do programa Excel sendo os resultados apresentados na tabela 12.

Para esse cálculo toma-se a resistência à compressão como variável dependente e o laboratório como variável independente. Dessa forma tem-se que se o valor de  $p$  for inferior a 0,05 (5%), o laboratório utilizado tem significância nos valores de resistência à compressão. Visto que o resultado encontrado é de 0,284, conclui-se que a diferença entre os resultados dos laboratórios não foi significativa, utilizando-se uma confiabilidade de 95%.

Tabela 12 –Tabela ANOVA calculada para o experimento

Fonte de variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	$F_{\text{crítico}}$	Valor P
Entre grupos	24,08	2	12,04	3,04	21 %
Dentro das amostras	1503,03	195	7,71		
Total	1527,10	197			

(fonte: elaborado pelo autor)

Para fazer uma melhor análise dos dados da tabela ANOVA e verificar se realmente há significância entre os resultados dos laboratórios, adotou-se um método de comparação entre médias. Nesse método calcula-se um limite de decisão que deve ser comparado com a diferença das médias de cada laboratório. Para isso deve-se primeiro ordenar as resistências médias encontradas em ordem crescente e calcular a diferença entre elas. Se a diferença for maior que o limite de decisão calculado então o resultado é significativo.

Para o experimento encontrou-se um limite de decisão de 1,46 MPa e comparando-se os laboratório através das resistências em ordem crescente tem-se que as diferenças são inferiores a esse limite, portanto, não é significativa a diferença entre eles (tabela 13).

Tabela 13 – Análise de significância através da comparação entre médias

Laboratório	$F_{\text{ckmédio}}$	Diferença	Ld	Resultado
3	30,51	0,44	1,46	Diferença não significativa
1	30,95	0,86	1,46	Diferença não significativa
2	31,81			

(fonte: elaborado pelo autor)

## 6.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O experimento realizado teve por objetivo analisar a qualidade do concreto usinado fornecido pela concreteira A em Porto Alegre, através das principais Normas que constituem os ensaios de resistência à compressão de CP, e, também, através de uma análise estatística para verificar se o laboratório escolhido para realizar o teste tem influência nos resultados obtidos.

Tendo como base as informações obtidas nesse experimento, conclui-se que a concreteira A não conseguiu manter um nível satisfatório para o concreto fornecido para essa determinada obra em estudo, visto que os resultados obtidos pelo laboratório 1 apresentaram grandes variabilidades tendo 23% dos lotes rejeitados pelo preconizado em Norma, o que é muito significativo. Além disso, tem-se grandes amplitudes de resistência para um mesmo lote, chegando até a 8,4 MPa para uma mesma concretagem.

Pode-se dizer também que essa variabilidade encontrada, estava associada a concreteira A e não devido as operações de ensaio do laboratório 1, visto que o ensaio foi realizado de forma padronizada e eficiente. Fato comprovado pois praticamente todas as amostragens ensaiadas foram qualificadas com o nível de excelencia pela Norma NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007), não influenciando significativamente nos resultados.

Para análise comparativa dos laboratórios 1, 2 e 3 conclui-se que os laboratórios escolhidos para esse experimento não tem significância nos resultados de resistência à compressão de CP de concreto. Conclusão apoiada pela análise de variância da tabela ANOVA e pela comparação entre médias, considerando 95% de confiabilidade nos resultados.

## REFERÊNCIAS

ARAÚJO, J. M. de. **Curso de concreto armado**. 2. ed. Rio Grande: Dunas, 2003. v. 1.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 12655**: concreto – preparo, controle e recebimento. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739**: concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

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

FERNANDES, M. C. **Influência da retificação de superfícies de corpo de prova na variabilidade da resistência à compressão no controle tecnológico do concreto**. 2011. 70 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia) – Curso de Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini, 1993.

ISAIA, G. C. O concreto: da era clássica à contemporânea. In: \_\_\_\_\_ (Ed.). **Concreto**: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: Ipisis, 2005. p. 1-43.

KIHARA, Y.; CENTURIONE, S.L. O cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto**: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: Ipisis, 2005. p. 295-322.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: estrutura, propriedades e materiais. 1. ed. (4 tiragem) São Paulo: Pini, 1994 (tiragem 2001).

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. rev. e atual. São Paulo: Pini, 1997.

SCANDIUZZI, L.; ANDRIOLO, R. A. **Concreto e seus materiais**: propriedades e ensaios. São Paulo: Pini, 1986.



## ANEXO A - DADOS COLETADOS PELO LABORATÓRIO 1

LABORATÓRIO 1																	
Estrutura	Pavimento	1		2		3		4		5		6		7		8	
		CP 1	CP 2	CP 1	CP 2	CP 1	CP 2	CP 1	CP 2	CP 1	CP 2	CP 1	CP 2	CP 1	CP 2	CP 1	CP 2
Pilares	Sub - Terreo	30,40	30,10	30,10	31,00												
Lajes e vigas	Térreo	30,00	31,10	35,40	36,60	32,20	31,30	32,40	32,60	38,40	37,70	34,90	36,30	36,10	35,80	36,50	34,20
Pilares	T - 2	32,30	32,10	32,50	31,80												
Lajes e vigas	2°	33,30	34,20	33,30	34,20	33,60	34,80	33,00	33,30	33,40	33,70	32,80	32,00	31,30	31,10	32,50	33,50
Pilares	2° - 3°	31,50	30,80	30,60	30,40												
Lajes e vigas	3°	31,10	30,80	31,10	30,80	30,90	31,10	30,00	30,50	30,20	30,00	31,30	32,00	35,90	34,90	31,30	31,80
Pilares	3° - 4°	34,00	33,30	32,30	31,80												
Lajes e vigas	4°	31,30	31,80	31,30	31,80	31,70	32,30	33,30	32,90	32,00	31,80	33,10	32,60	31,50	30,60	32,80	31,30
Pilares	4° - 5°	32,20	31,10	32,80	33,10												
Lajes e vigas	5°	32,50	33,60	31,00	31,10	32,80	32,00	31,80	30,90	32,30	32,00	31,30	31,60	32,00	32,50	31,80	31,40
Pilares	5° - 6°	24,00	24,40	23,50	24,50												
Lajes e vigas	6°	32,00	32,20	31,50	31,80	32,00	31,60	31,00	31,70	32,00	32,30	32,20	31,00	30,70	32,00	32,40	31,50
Pilares	6° - 7°	32,30	32,20	31,20	32,20												
Lajes e vigas	7°	28,90	28,60	28,90	29,40	29,00	29,30	28,30	30,70	33,90	32,70	33,30	34,70	30,90	31,70	29,40	29,20
Pilares	7° - 8°	30,90	30,30	31,40	32,70												
Lajes e vigas	8°	31,40	31,10	31,90	31,00	32,40	31,80	31,60	30,80	32,40	33,30	33,30	32,30	31,80	31,30	31,10	32,00
Pilares	8° - 9°	25,90	25,60	24,10	25,00												
Lajes e vigas	9°	30,20	30,30	30,20	30,30	31,90	30,90	31,60	30,90	30,30	30,50	31,80	32,00	31,80	32,10	30,40	30,90
Pilares	9° - 10°	30,60	30,50	31,00	30,70												
Lajes e vigas	10°	31,10	31,30	32,90	32,60	32,50	33,00	32,50	33,30	33,10	32,80	32,30	33,80	33,10	32,80	31,90	32,60

LABORATÓRIO 1																	
Estrutura	Pavimento	1		2		3		4		5		6		7		8	
		CP 1	CP 2	CP 1	CP 2	CP 1	CP 2	CP 1	CP 2	CP 1	CP 2	CP 1	CP 2	CP 1	CP 2	CP 1	CP 2
Pilares	10° - 11°	30,20	30,40	31,20	30,40												
Lajes e vigas	11°	22,50	22,90	22,50	22,30	22,60	22,70	22,30	22,50	22,40	22,00	22,80	22,10	22,00	22,60	22,80	22,40
Pilares	11° - 12°	31,10	31,00	31,00	32,00												
Lajes e vigas	12°	28,20	28,00	30,60	30,30	30,10	30,00	28,20	29,20	28,70	29,50	28,00	28,30	28,60	29,00	28,10	29,40
Pilares	12° - 13°	26,90	26,70	27,80	27,20												
Lajes e vigas	13°	30,30	30,80	30,90	30,70	30,30	30,50	31,20	31,50	31,00	30,80	35,40	36,30	31,40	32,30	31,60	32,40
Pilares	13° - 14°	32,80	32,10	32,10	32,70												
Lajes e vigas	14°	30,10	30,50	31,30	31,00	30,50	30,40	30,40	30,80	30,70	30,30	30,50	30,50	30,10	30,80	31,00	30,60
Pilares	14° - 15°	31,10	31,80	32,50	31,60												
Lajes e vigas	15°	25,40	25,50	25,20	24,60	25,50	24,10	25,40	25,50	25,00	25,90	26,80	26,60	27,80	28,20	31,30	30,50
Pilares	15° - C	30,80	30,20	31,00	31,90												

LABORATÓRIO 2		
Estrutura	Pavimento	CP 1
Pilares	Sub - Terreo	31,40
Lajes e vigas	Térreo	31,00
Pilares	T - 2	33,30
Lajes e vigas	2°	33,00
Pilares	2° - 3°	32,40
Lajes e vigas	3°	31,50
Pilares	3° - 4°	33,70

LABORATÓRIO 2		
Estrutura	Pavimento	CP 1
Lajes e vigas	4°	32,50
Pilares	4° - 5°	32,00
Lajes e vigas	5°	33,40
Pilares	5° - 6°	29,00
Lajes e vigas	6°	33,20
Pilares	6° - 7°	33,00
Lajes e vigas	7°	31,00
Pilares	7° - 8°	31,60
Lajes e vigas	8°	31,00
Pilares	8° - 9°	30,00
Lajes e vigas	9°	31,40
Pilares	9° - 10°	31,00
Lajes e vigas	10°	32,60
Pilares	10° - 11°	31,80
Lajes e vigas	11°	28,00
Pilares	11° - 12°	32,40
Lajes e vigas	12°	31,00
Pilares	12° - 13°	30,40
Lajes e vigas	13°	32,30
Pilares	13° - 14°	33,10
Lajes e vigas	14°	32,70
Pilares	14° - 15°	33,50
Lajes e vigas	15°	31,40
Pilares	15° - C	31,60

LABORATÓRIO 3			
Estrutura	Pavimento	CP 1	CP2
Pilares	8° - 9°	27,6	26,5
Lajes e vigas	9°	30,5	32,0
Pilares	9° - 10°	30,8	30,3
Lajes e vigas	10°	29,9	32,0
Pilares	10° - 11°	31,2	31,6
Lajes e vigas	11°	26,8	25,4
Pilares	11° - 12°	31,1	31,8
Lajes e vigas	12°	28,0	30,1
Pilares	12° - 13°	29,5	28,4
Lajes e vigas	13°	31,2	30,1
Pilares	13° - 14°	35,0	35,3
Lajes e vigas	14°	30,8	32,0
Pilares	14° - 15°	29,8	30,5
Lajes e vigas	15°	26,1	27,0
Pilares	15° - C	29,5	28,9