

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

**Mateus Monegat de Gaspari**

**DETERMINAÇÃO INSTANTÂNEA DA RELAÇÃO  
ÁGUA/CIMENTO ATRAVÉS DO MÉTODO DA  
RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM CONCRETOS NO ESTADO  
FRESCO**

Porto Alegre  
janeiro 2013

**MATEUS MONEGAT DE GASPARI**

**DETERMINAÇÃO INSTANTÂNEA DA RELAÇÃO  
ÁGUA/CIMENTO ATRAVÉS DO MÉTODO DA  
RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM CONCRETOS NO ESTADO  
FRESCO**

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**  
**Coorientador: Mauricio Mancio**

Porto Alegre  
janeiro 2013

**MATEUS MONEGAT DE GASPARI**

**DETERMINAÇÃO INSTANTÂNEA DA RELAÇÃO  
ÁGUA/CIMENTO ATRAVÉS DO MÉTODO DA  
RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM CONCRETOS NO ESTADO  
FRESCO**

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

Porto Alegre, janeiro de 2013

Profa. Angela Borges Masuero  
Dra. pela UFRGS  
Orientadora

Prof. Mauricio Mancio  
Dr. pela University of California  
Coorientador

Profa. Carin Maria Schmitt  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA**

Angela Borges Masuero

Mauricio Mancio

Abraão Bernardo Rohden

Lucilia Maria Silveira  
Bernardino da Silva

Dedico este trabalho a meus pais, Francisco José de Gaspari e Olides Monegat de Gaspari, que sempre me apoiaram e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente aos meus pais, Francisco José de Gaspari e Olides Monegat de Gaspari, pelo apoio e suporte durante toda minha vida e especialmente durante o período de realização deste curso. Obrigado por todo amor e carinho, pelas lições de vida e por serem pessoas honestas e humildes que serviram como exemplo para a formação do meu caráter.

À minha irmã, Samara Monegat de Gaspari, pelo apoio durante este período e pelos momentos de amizade e alegria durante (quase) toda minha vida.

Ao meu avô, Luis de Gaspari, pela sabedoria e ensinamentos compartilhados durante toda minha vida, e pelo apoio e palavras de motivação nos momentos de maiores dúvidas e dificuldades.

À Profa. Angela Borges Masuero, orientadora deste trabalho, e ao professor Mauricio Mancio, coorientador deste trabalho, pela confiança depositada em mim e principalmente pela paciência e disposição em ajudar nos momentos de dificuldades durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Luiz Carlos Pinto da Silva Filho, coordenador do Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais, por ceder os recursos do laboratório e oficina do LEME,; e Edgar Wallace Pereira Lucas, técnico do LEME, por ter auxiliado na montagem do equipamento utilizado nos ensaios deste trabalho.

Aos amigos do FBC, pela amizade sincera e absoluta durante todos esses anos. E por, sempre possível, me desviarem do caminho julgado correto pela minha mãe.

Aos meus amigos do Betonera F.C., pela amizade durante todo o período do curso, e pelo auxílio na constituição da mais longa série invicta jamais vista neste estado.

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

*Franklin D. Roosevelt*

## RESUMO

O concreto armado é conhecidamente o material mais utilizado na execução de estruturas. Como uma falha grave durante esta etapa da edificação pode levar à inviabilização do empreendimento, procedimentos para garantir a qualidade tanto do método executivo, quanto do concreto utilizado na execução dos elementos devem ser adotados. A relação água/cimento é um dos mais importantes parâmetros que regem a resistência e durabilidade do concreto, devido à sua relação com a porosidade e permeabilidade do material. Como os métodos para aceitação do concreto em obra estabelecidos nos dias de hoje não retornam informações diretas sobre a relação água/cimento (e sendo assim, sobre a resistência à compressão do concreto), procedimentos de determinação instantânea da relação água/cimento trariam um avanço importante para o controle tecnológico do concreto. Dentro deste contexto, o método da resistividade elétrica surge como uma alternativa interessante de contribuição nesta área. Este trabalho tem como objetivo montar um equipamento que relaciona a resistividade elétrica do concreto fresco com sua relação água/cimento, baseando-se na premissa de que a resistividade elétrica é função da concentração de íons da solução, que por sua vez é definida pela relação a/c do concreto. A calibragem do aparelho foi realizada através de ensaios em soluções de água com variadas concentrações conhecidas de sal, e permitiram a conversão das leituras de voltagem em resistividade elétrica. Uma relação empírica foi descoberta entre a resistividade elétrica do concreto fresco e sua relação água/cimento. O equipamento e a metodologia utilizada foi a de Mancio et al. (2010). Uma série de ensaios foi realizada com o aparelho, em concretos com variadas relações água/cimento conhecidas (0,48; 0,63 e 0,78), em traços dosados com dois tipos de cimentos (CP IV – 32 e CP V – ARI). Os dados dos ensaios foram estatisticamente tratados e uma correlação entre a relação água/cimento e a resistividade elétrica foi estabelecida, confirmando as expectativas de que o método pode ser usado como uma ferramenta para determinação da relação a/c em campo.

Palavras-chave: Controle de Qualidade do Concreto. Resistividade Elétrica de Concreto. Resistência à Compressão de Concreto. Definição da Relação Água/Cimento Através da Resistividade Elétrica.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Delineamento da pesquisa .....	18
Figura 2 – Procedimento de ensaio de abatimento de tronco de cone .....	23
Figura 3 – Ensaio de abatimento de tronco de cone realizado em obra .....	24
Figura 4 – Corpos de prova para ensaio de resistência à compressão moldados e identificados .....	25
Figura 5 – Curva de Gauss para distribuição de probabilidades .....	27
Figura 6 – Equipamento utilizado para ensaios de resistividade elétrica .....	39
Figura 7 – Esfera como fonte de corrente no espaço .....	41
Figura 8 – Representação esquemática do experimento .....	42
Figura 9 – Ilustração esquemática do circuito elétrico (a) e da sonda (b) .....	43
Figura 10 – Corpos de prova metálicos colocados sobre mesa vibratória .....	46
Figura 11 – Corpos de prova metálicos moldados para posterior ensaio à compressão ..	47
Figura 12 – Resistividade de soluções de NaCl .....	49
Figura 13 – Pesagem do NaCl para ensaios de calibração do equipamento .....	50
Figura 14 – Ensaios de calibração do equipamento .....	50
Figura 15 – Ensaios de resistividade elétrica em concretos .....	52
Figura 16 – Gráfico relação a/c x resistividade elétrica dos ensaios com cimento CP IV – 32 .....	57
Figura 17 – Gráfico relação a/c x resistividade elétrica dos ensaios com cimento CP V – ARI .....	58
Figura 18 – Correlação entre relação a/c x resistividade elétrica e relação a/c x resistência à compressão dos ensaios com CP IV – 32 .....	59
Figura 19 – Correlação entre relação a/c x resistividade elétrica e relação a/c x resistência à compressão dos ensaios com CP V – ARI .....	60



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores para formação de lotes para retirada de amostras de concreto indicados pela NBR 12655 .....	27
Tabela 2 – Composição dos cimentos empregados na .....	44
Tabela 3 – Traços dos concretos utilizados no ensaios .....	46
Tabela 4 – Dosagem das soluções de NaCl para calibração do equipamento .....	48
Tabela 5 – Resultados dos ensaios de calibração do equipamento .....	51
Tabela 6 – Traços dos concretos utilizados nos ensaios com cimento CP IV – 32 .....	53
Tabela 7 – Traços dos concretos utilizados nos ensaios com cimento CP V – ARI .....	53
Tabela 8 – Dados dos ensaios com traço 1:3,5 com cimento CP IV – 32 .....	54
Tabela 9 – Dados dos ensaios com traço 1:5,0 com cimento CP IV – 32 .....	54
Tabela 10 – Dados dos ensaios com traço 1:6,5 com cimento CP IV – 32 .....	55
Tabela 11 – Dados dos ensaios com traço 1:3,5 com cimento CP V – ARI .....	55
Tabela 12 – Dados dos ensaios com traço 1:3,5 com cimento CP V – ARI .....	56
Tabela 13 – Dados dos ensaios com traço 1:3,5 com cimento CP V – ARI .....	56
Tabela 14 – Dados dos ensaios com cimento CP IV – 32 .....	57
Tabela 15 – Dados dos ensaios com cimento CP V – ARI .....	57
Tabela 16 – Ensaios de resistência à compressão dos concretos com CP IV – 32 .....	57
Tabela 17 – Ensaios de resistência à compressão de concretos com CP V – ARI .....	57

## **LISTA DE SIGLAS**

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Inmetro – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Norie – Núcleo Orientado para Inovação da Edificação

## LISTA DE SÍMBOLOS

a/c – água/cimento

CP – corpo de prova

$f_{ck}$  – resistência característica à compressão do concreto (MPa)

$I_o$  – corrente elétrica que passa pelo circuito (A)

$V_o$  – tensão que alimenta o circuito (V)

$R_o$  – resistência elétrica do resistor conhecido ( $\Omega$ )

$R_c$  – resistência elétrica do concreto ( $\Omega$ )

$V_c$  – tensão elétrica que passa pela sonda (V)

$\rho_c$  – resistividade elétrica do concreto ( $\Omega\cdot m$ )

$\rho_s$  – resistividade elétrica do meio aquoso ( $\Omega\cdot m$ )

k – fator geométrico da sonda

$R_s$  – resistência elétrica do meio aquoso ( $\Omega$ )

$V_s$  – tensão que passa pelo meio aquoso (V)

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>2 DIRETRIZES DA PESQUISA</b> .....	16
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA .....	16
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA .....	16
<b>2.2.1 Objetivo Principal</b> .....	16
<b>2.2.2 Objetivos Secundários</b> .....	16
2.3 PRESSUPOSTO .....	17
2.4 PREMISA .....	17
2.5 DELIMITAÇÕES .....	17
2.6 LIMITAÇÕES .....	17
2.7 DELINEAMENTO .....	17
<b>3 MÉTODOS DE CONTROLE DE QUALIDADE DO CONCRETO</b> .....	20
3.1 CONTROLE DE QUALIDADE DO CONCRETO .....	20
<b>3.1.1 Descrição dos métodos atuais de controle de qualidade do concreto</b> .....	21
3.1.1.1 Ensaio de abatimento de tronco de cone ( <i>slump test</i> ) .....	21
3.1.1.2 Ensaio de resistência à compressão .....	24
<b>3.1.2 Problemas e limitações</b> .....	28
3.1.2.1 Problemas do ensaio de abatimento de tronco de cone ( <i>slump test</i> ) .....	28
3.1.2.2 Problemas do ensaio de resistência à compressão .....	29
3.2 IMPORTÂNCIA DA RELAÇÃO A/C .....	30
3.3 MÉTODOS EXISTENTES PARA DEFINIÇÃO DA RELAÇÃO A/C .....	32
3.4 O NOVO MÉTODO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA .....	33
<b>3.4.1 Química do concreto</b> .....	33
<b>3.4.2 Estudos preliminares ao desenvolvimento do método da resistividade elétrica para determinação da relação água/cimento</b> .....	36
<b>4 PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	38
4.1 DESENVOLVIMENTO DO EQUIPAMENTO, CALIBRAÇÃO DO EQUIPAMENTO E MÉTODO DE ENSAIO .....	38
<b>4.1.1 Desenvolvimento do equipamento</b> .....	38
<b>4.1.2 Determinação do fator geométrico k e calibração do equipamento</b> .....	40
4.1.2.1 Determinação empírica do fator geométrico k .....	40
4.1.2.2 Determinação teórica do fator geométrico k .....	40
<b>4.1.2 Método de ensaio</b> .....	42

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS .....	44
<b>4.1.1 Cimento .....</b>	<b>44</b>
<b>4.1.2 Agregados .....</b>	<b>44</b>
<b>4.1.3 Água .....</b>	<b>45</b>
4.3 DOSAGEM DO CONCRETO E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA .....	45
<b>5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E ANÁLISE .....</b>	<b>48</b>
5.1 ENSAIOS DE CALIBRAÇÃO DO EQUIPAMENTO .....	48
<b>5.1.1 Dosagem das soluções de NaCl .....</b>	<b>48</b>
<b>5.1.2 Resultado dos ensaios de calibração e análise .....</b>	<b>51</b>
5.2 RESULTADO DOS ENSAIOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM CONCRETOS .....	51
5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES .....	60
REFERÊNCIAS .....	63



## 1 INTRODUÇÃO

O concreto armado é atualmente o material mais utilizado para execução de estruturas de edificações e execução de grandes obras como pontes e viadutos. Sendo assim, o controle tecnológico dos materiais utilizados, bem como dos métodos executivos, são de suma importância na determinação do sucesso de um empreendimento, visto que a existência de uma falha na estrutura da edificação pode comprometer a qualidade final do projeto.

Em concretos convencionais, a característica mais importante na definição da qualidade é a resistência mecânica e durabilidade do material, que por sua vez é definida pela relação água/cimento (relação a/c) da mistura. Considerando o controle de qualidade do concreto utilizado em obra, para a execução das estruturas de uma edificação (pilares, vigas e lajes), como uma etapa fundamental, não existe na atualidade nenhum método difundido ou de fácil aplicação que determine a aceitação do concreto baseado, por exemplo, na obtenção da relação água/cimento do concreto, que efetivamente determina a resistência à compressão potencial do material.

O abatimento de tronco de cone, ou *slump test*, continua sendo o ensaio utilizado *in loco* que define o aproveitamento ou não do concreto recebido ou produzido em obra. O problema está em que, sendo caracteristicamente uma medida da consistência do concreto, o *slump test* tem seus resultados diretamente associados à trabalhabilidade e não efetivamente à resistência à compressão do concreto, que é na verdade a mais importante característica na definição da qualidade e durabilidade de uma estrutura (MANCIO et al., 2010, p. 586, tradução nossa). Ademais, o resultado do ensaio de abatimento de tronco de cone é influenciado pela destreza do operador na realização do mesmo, sendo possível que se obtenham resultados não condizentes com a real trabalhabilidade do material. Não bastassem as afirmações anteriores, ainda existem inúmeras situações nas quais, após a saída do caminhão betoneira da usina de concreto e momentos antes da concretagem, é feita uma adição de água à mistura pré-definida pelo engenheiro responsável pela determinação do traço do concreto, alterando dessa maneira as características do concreto usado na estrutura em relação ao que foi dosado na indústria concreteira.

A prática comumente utilizada para o controle da resistência à compressão do concreto, descrita pela norma NBR 12655/1996, é a moldagem de corpos de prova para posterior ruptura em laboratório. Entretanto, mesmo esses resultados podem apresentar considerável variabilidade, podendo existir tanto problemas na moldagem do corpo de prova quanto na execução do ensaio (BAUER et al., 2007). Além disso, se os resultados definitivos para os ensaios realizados apontarem a obtenção de uma resistência abaixo do necessário, os resultados são obtidos apenas 28 dias após a moldagem dos corpos de prova (CP). Nesse período, considerando a velocidade de execução dos empreendimentos atualmente, existe grande possibilidade de já se ter alguns pavimentos sobre os elementos estruturais executados com tal concreto. Caso os resultados dos ensaios à compressão apontem para lotes de concreto com resistência menor à exigida, corpos de prova devem ser retirados diretamente da estrutura executada para realização de novos ensaios de ruptura à compressão, com o objetivo de verificar se o concreto desenvolveu em obra a resistência esperada. Se os novos ensaios mostrarem que o concreto desenvolveu a resistência desejada, fica evidenciada a existência problemas na moldagem dos corpos de prova ou nos ensaios realizados em laboratório. Quando os ensaios realizados com os testemunhos retirados da estrutura resultarem em concretos com resistência menor à exigida, deve-se então efetuar procedimento de reforço estrutural ou, em casos extremos, demolição parcial da estrutura. Isso pode vir a causar problemas de atraso no cronograma, acarretando em uma despesa desnecessária para o realizador da obra.

Tendo ciência de todas as consequências causadas pela utilização de um concreto de qualidade abaixo da mínima definida em projeto, e o impacto que a demora na avaliação da resistência à compressão do concreto tem nesse processo, o desenvolvimento de novas práticas para o controle de qualidade do concreto tornou-se uma necessidade. Segundo Neville (1999, p. 2, tradução nossa), “Considerando que os métodos existentes para determinar a relação  $a/c$  do concreto fresco são de difícil uso e frequentemente inconfiáveis, novas técnicas precisas e convenientes ao usuário deveriam ser investigadas.”. Como resposta a essa necessidade, algumas pesquisas têm sido desenvolvidas com o objetivo de fornecer uma solução para o problema. Dentre os métodos que surgiram, um dos mais promissores é o método da resistividade elétrica, que possibilita a obtenção de uma estimativa bastante aproximada da resistência à compressão potencial do concreto no momento do recebimento do material em obra, através da determinação da correlação entre a resistividade elétrica do material com a relação  $a/c$ , desde que se conheça a correlação entre a relação  $a/c$  e a



resistência à compressão. Este trabalho tem como objetivo obter as curvas, e as respectivas equações das correlações entre a relação água/cimento ( $a/c$ ) e a resistividade elétrica do concreto no estado fresco, antes do início de pega, através do método baseado na resistividade elétrica (MANCIO et al., 2010, tradução nossa), para concretos dosados conforme o procedimento IPT/EPUSP, com materiais comumente utilizados na região de Porto Alegre.

Ao contrário dos resultados do *slump test*, a relação  $a/c$  é um parâmetro determinante da resistência mecânica e da durabilidade de estruturas de concreto. Considerando que a correlação entre resistência à compressão e relação  $a/c$  é normalmente estabelecida durante a fase de dosagem, a determinação da relação  $a/c$  em obra poderia propiciar também uma estimativa da resistência à compressão esperada para cada lote específico, facilitando sobremaneira a decisão sobre aceitação ou não do material, o controle e a garantia da sua qualidade.

Após essa breve introdução, no segundo capítulo estão descritas as diretrizes de pesquisa do trabalho, no qual são apresentadas a questão de pesquisa, objetivos, pressuposto, premissa, delimitações, limitações e o delineamento do trabalho. O terceiro capítulo trata dos métodos de controle de qualidade do concreto adotados atualmente na prática da construção civil, seus problemas e limitações, e das primeiras tentativas de desenvolvimento de um método de controle de qualidade adotando a relação água/cimento como parâmetro de controle e da apresentação do método de controle de qualidade através da resistividade elétrica.

O quarto capítulo apresenta o método experimental utilizado nos ensaios, com a descrição das etapas de montagem e calibragem do equipamento e a metodologia de ensaios utilizada. No quinto capítulo, estão expostos os resultados obtidos através dos ensaios realizados em laboratório utilizando o método da resistividade elétrica, e são apresentadas as conclusões do trabalho e as sugestões para a continuidade dos estudos sobre o método da resistividade elétrica.

## **2 DIRETRIZES DA PESQUISA**

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

### **2.1 QUESTÃO DE PESQUISA**

A questão de pesquisa do trabalho é: quais são as curvas e as respectivas equações da correlação entre a relação água/cimento e a resistividade elétrica de concretos no estado fresco, antes do início de pega, dosados conforme o procedimento IPT/EPUSP, com materiais comumente utilizados na região de Porto Alegre?

### **2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA**

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundários e são descritos a seguir.

#### **2.2.1 Objetivo Principal**

O objetivo principal do trabalho é a elaboração dos gráficos e a definição das respectivas equações das curvas da correlação entre a relação água/cimento e a resistividade elétrica de concretos no estado fresco, antes do início de pega, no momento do seu recebimento em obra, através do novo método da resistividade elétrica, para concretos dosados com materiais comumente utilizados na região de Porto Alegre.

#### **2.2.2 Objetivos secundários**

Os objetivos secundários do trabalho são:

- a) montagem do aparelho (sonda) para a execução das medições de resistividade elétrica para definição da relação água/cimento de concretos;
- b) descrição do processo de calibragem do aparelho (sonda) para a execução das medições de resistividade elétrica para definição da relação água/cimento do concreto.

## 2.3 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que o método de medição da resistividade elétrica para obtenção instantânea da relação água/cimento descrito no artigo *Instantaneous In-Situ Determination of Water-Cement Ratio of Fresh Concrete* (MANCIO et al., 2010) é válido, e pode ser usado para determinar a resistividade elétrica dos corpos de prova ensaiados em laboratório.

## 2.4 PREMISSA

É premissa do trabalho que, conhecendo a relação água/cimento, é possível fazer uma estimativa da resistência à compressão com bastante precisão, e que o desenvolvimento de novos métodos e tecnologias para avaliar a relação água/cimento e, conseqüentemente, a resistência à compressão do concreto no momento do recebimento deste na obra é muito importante.

## 2.5 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se à obtenção dos dados da resistividade elétrica para definição da relação água/cimento de concretos com traços usuais na região de Porto Alegre.

## 2.6 LIMITAÇÕES

O trabalho limita-se à elaboração das curvas da correlação entre a relação água/cimento e a resistividade elétrica para os traços de concretos escolhidos pelo autor, ensaiados com o equipamento montado para este tipo de medição, para dois tipos de cimento apenas e de um único fabricante cada um.

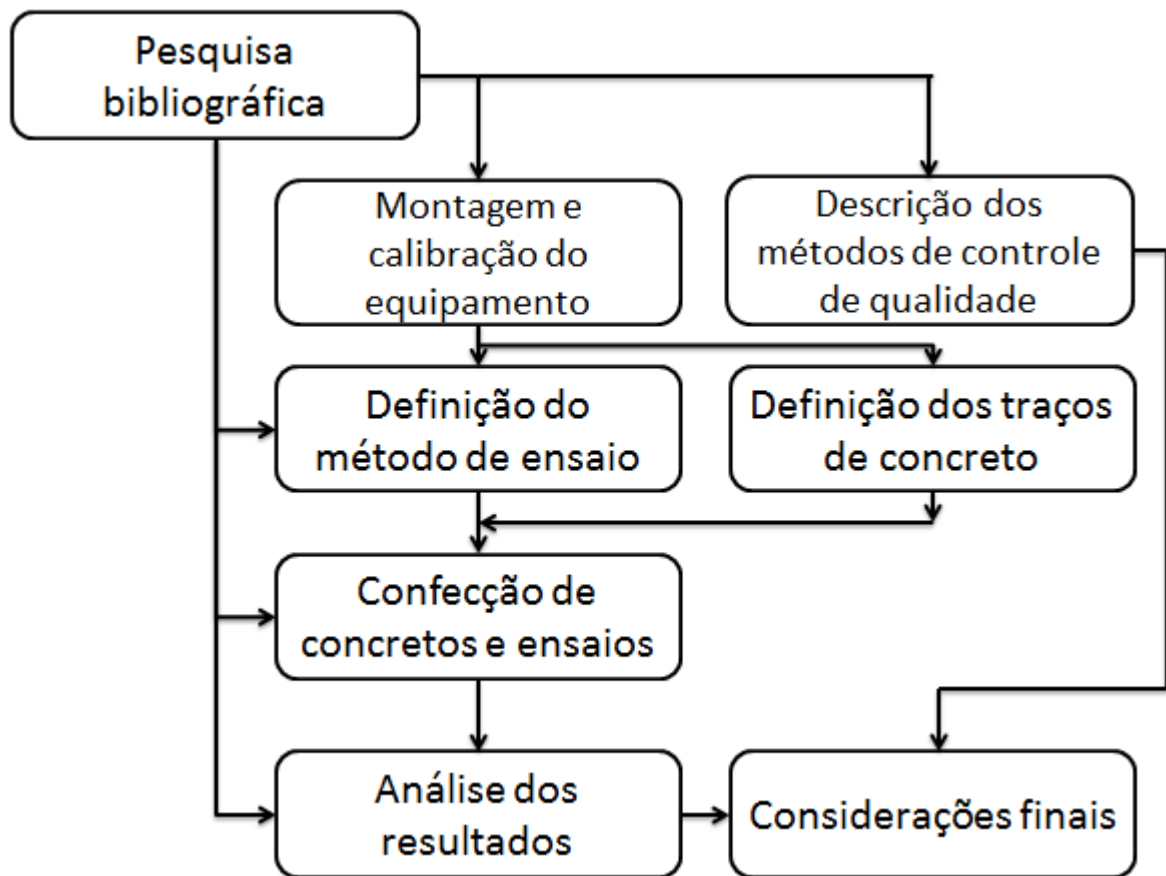
## 2.7 DELINEAMENTO

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) montagem e calibração do equipamento utilizado nos ensaios de resistividade elétrica;
- c) definição dos traços de concreto a serem estudados;
- d) definição do método de realização dos ensaios experimentais;
- e) ensaios laboratoriais dos traços de concreto definidos para estudo;
- f) análise dos resultados;
- g) considerações finais.

Figura 1 – Delineamento da pesquisa



(fonte: elaborada pelo autor)

Na etapa de pesquisa bibliográfica foram estudados os procedimentos de dosagem de concretos pelo método IPT/EPUSP, os procedimentos comumente adotados para o controle de qualidade dos concretos utilizados em elementos estruturais de concreto armado e o funcionamento do método de determinação instantânea da relação água/cimento através da resistividade elétrica e seus benefícios.

Na etapa seguinte, paralelamente à montagem e calibração do aparelho para realização dos ensaios, foi feita uma descrição dos métodos de controle de qualidade, tanto utilizando o método majoritariamente adotado na atualidade pelas empresas construtoras quanto o funcionamento do método da resistividade elétrica.

Após a montagem do aparelho, foram definidos quais os procedimentos e cuidados adequados aos ensaios, com o objetivo de obter resultados com a maior precisão possível. Paralelamente a esta etapa ocorreu a definição dos traços de concreto que foram ensaiados. Após, foram realizados os ensaios em laboratório para os traços de concreto escolhidos e a análise dos resultados obtidos, traçando-se as equações características para cada traço ensaiado.

Com os resultados dos ensaios em mãos, as informações foram analisadas e conclusões foram elaboradas sobre a efetividade do método de determinação instantânea da relação água/cimento através do método da resistividade elétrica.

### 3 MÉTODOS DE CONTROLE DE QUALIDADE DO CONCRETO

Neste capítulo são apresentados alguns conceitos importantes sobre a qualidade de concretos, métodos de controle de qualidade em obra, abordando os métodos normalizados e utilizados atualmente por empresas do setor da construção civil. Além disso, alguns métodos inovadores, que utilizam a relação *a/c* como padrão de referência de qualidade, dando maior ênfase ao método da resistividade elétrica, que é o tema central do trabalho.

#### 3.1 CONTROLE DE QUALIDADE DO CONCRETO

O objetivo do controle de qualidade de um produto é garantir um nível de qualidade preestabelecido pelo projeto. Controle de qualidade de um produto deve ser entendido como uma técnica que, geralmente apoiada em recursos matemáticos da estatística, tem por objetivo fornecer as informações essenciais para a manutenção do produto numa qualidade especificada, ao mínimo custo possível (HELENE; TERZIAN, 1993).

As propriedades do concreto podem ser avaliadas de várias formas, destacando-se ensaios de determinações mecânicas destrutivas e não destrutivas. Para a determinação da resistência mecânica do concreto normalmente utiliza-se um ensaio destrutivo, que consiste na compressão uniaxial de corpos de prova que são moldados, curados, preparados e ensaiados por procedimentos especificados por normas (BARBOSA et al., 2009)

A resistência à compressão é determinada pelo ensaio de corpos de prova moldados através de procedimentos definidos pela NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003) – Modelagem e Cura de Corpos de Prova Cilíndricos ou Prismáticos de Concreto - e ensaiados pelos procedimentos determinados pela NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007) – Concreto: Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos.

Mesmo que a construção civil seja um dos mais importantes setores da indústria, dentro do aspecto do controle de qualidade da produção, aparece como uma indústria atrasada em relação a outras, devido às suas características. Alguns aspectos, como a grande dificuldade de automatização de processos; o caráter itinerante, que impede uma constância de condições

de execução, matérias-primas e processos de execução; a inexistência da possibilidade de produção em cadeia de produtos seriados, tornando-a basicamente uma indústria de produção de produtos únicos; impedem que exista um rápido e eficiente aproveitamento das técnicas de controle de qualidade aplicadas em outros setores da indústria (HELENE; TERZIAN, 1993).

Todo projeto estrutural tem por objetivo obter uma estrutura que atenda com segurança às solicitações de uso com o mínimo custo. A resistência característica à compressão é a propriedade do concreto endurecido que geralmente é adotada como referência no dimensionamento de uma estrutura. Dessa forma, portanto, está diretamente ligada à segurança estrutural, devendo a obra ser construída com um concreto com resistência à compressão igual ou maior ao valor definido em projeto. Desse modo o controle da resistência à compressão do concreto possui uma necessidade de comprovação de que o material que está sendo utilizado obedece aos critérios exigidos pelo projeto estrutural. Embora seja um dos parâmetros mais importantes a ser controlado, o controle da resistência à compressão não deve ser confundido com o controle tecnológico das estruturas de concreto (HELENE; TERZIAN, 1993).

Mesmo que algumas empresas do ramo já tenham instituído dentro da sua organização uma equipe de profissionais responsáveis pela definição dos parâmetros mínimos de qualidade exigidos internamente, a etapa do controle de recebimento de materiais é feito em obra, por quem recebe os produtos e fiscaliza os serviços executados. Sendo assim, são necessários procedimentos que garantam o controle de qualidade do material recebido, eliminando a possibilidade de erro ou descaso do profissional responsável pelo recebimento dos materiais que serão utilizados no empreendimento (HELENE; TERZIAN, 1993).

Nos próximos itens são descritos o funcionamento e os problemas dos métodos de controle de qualidade de concretos utilizados em elementos estruturais empregados atualmente por empresas do setor da construção civil. Após, é feita uma análise sobre o porque de se escolher a relação água/cimento como parâmetro para o controle de qualidade de concretos e as questões que fundamentam o uso do método da resistividade elétrica.

### 3.1.1 Descrição dos métodos atuais de controle de qualidade do concreto

Basicamente, o procedimento para o controle de qualidade do concreto utilizado pelas empresas do setor da construção civil divide-se em duas etapas. Em um primeiro momento, quando o material é recebido ou produzido na obra, é realizado um ensaio de abatimento de tronco de cone (*slump test*), que define se as condições de trabalhabilidade do material estão de acordo com as necessárias para o lançamento do material na estrutura que será concretada. Paralelamente ao *slump test*, é realizada a moldagem dos corpos de prova para o lote em questão, com o objetivo de se obter a resistência potencial do material através de ensaios de compressão realizados, posteriormente, em laboratório.

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

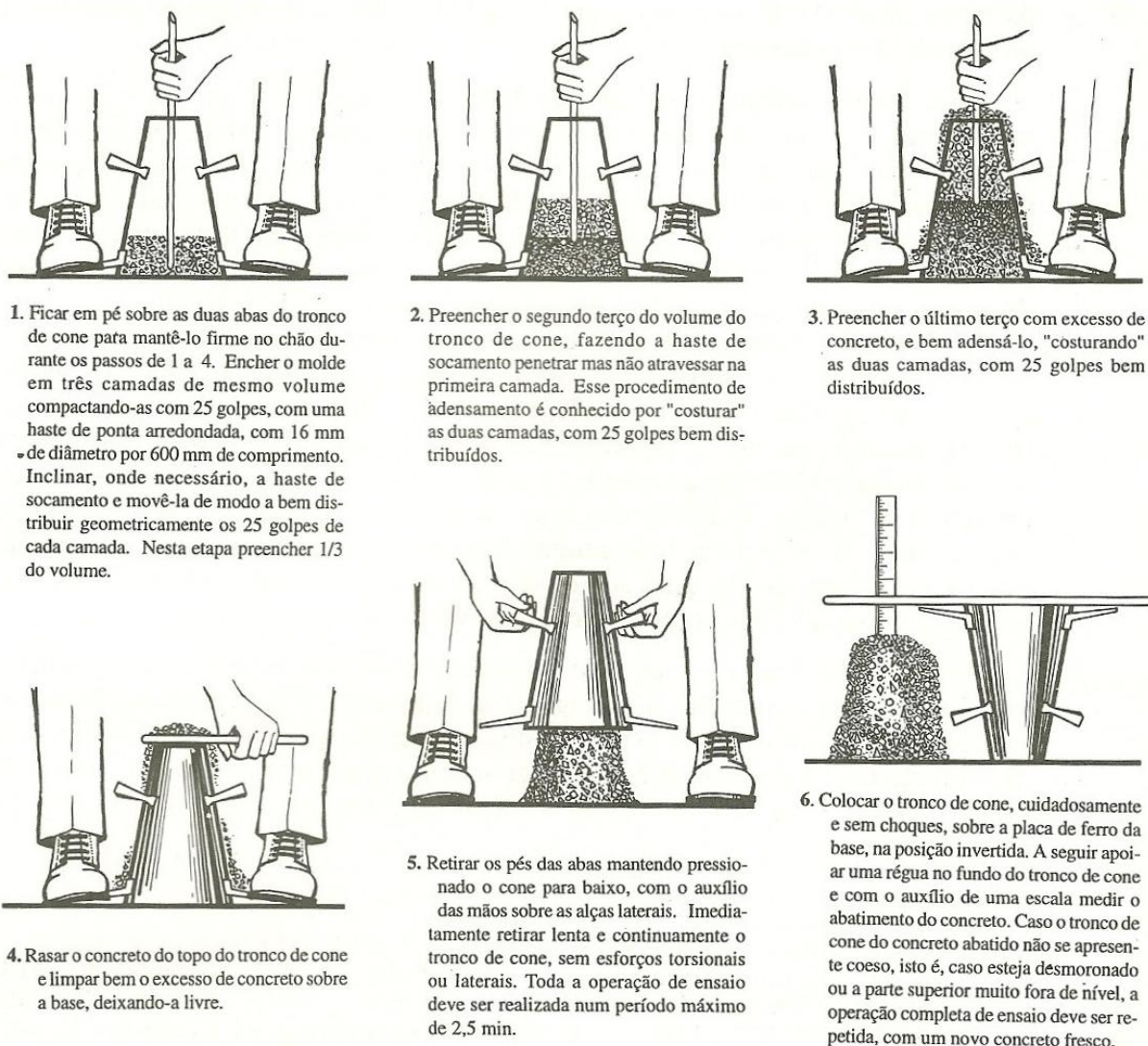
Segundo a NBR 12655 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006), Concreto – Preparo, Controle e Recebimento, devem ser realizados ensaios de consistência pelo abatimento de tronco de cone conforme a NBR NM 67/1998, ou pelo espalhamento de tronco de cone, conforme a NBR NM 68/1998.

Para concreto preparado em canteiro, a NBR 12655 recomenda que o ensaio de abatimento de tronco de cone deva ser realizado sempre que houver alterações na umidade dos agregados, na primeira amassada do dia, ao se reiniciar a produção de concreto após uma interrupção da jornada de concretagem de pelo menos 2 horas, na troca de operadores e cada vez que forem moldados corpos de prova. Para concretos fornecidos por empresa de serviços de concretagem, o ensaio de consistência deve ser realizado a cada betonada (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006).

De acordo com Mehta e Monteiro (1994, p. 349), o equipamento para o ensaio de abatimento de tronco de cone é realmente muito simples. Consiste de uma haste de socamento e de uma fôrma metálica em forma de tronco de cone de 300 mm de altura, 100 mm de diâmetro no topo e 200 mm de diâmetro na base. O tronco de cone é preenchido com concreto, e depois, vagarosamente, suspenso. O concreto sem suporte abate-se pelo seu próprio peso. A diminuição da altura do tronco de cone é chamada de abatimento do concreto. Detalhes do procedimento são mostrados na figura 2. Na figura 3, o resultado de um teste de abatimento de tronco de cone realizado em obra é apresentado.



Figura 2 – Procedimento de ensaio de abatimento de tronco de cone



(fonte: MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 350)

O ensaio de abatimento de tronco de cone não é adequado para medir a consistência de concretos muito fluídos ou muito secos. A principal finalidade deste teste é fornecer um método simples para controlar a uniformidade do processo de produção do concreto. Uma variação imprevista no resultado do ensaio pode significar uma mudança na dosagem da mistura (traço), granulometria do agregado ou teor de água do concreto. Desta forma, permite-se ao operador da central de concreto verificar e remediar a situação. O enrijecimento prematuro do concreto fresco pode causar problemas como aderência de concreto na caçamba da betoneira ou caminhão-betoneira, dificuldade de bombeamento e/ou lançamento do concreto na estrutura, dificuldade do trabalho da mão de obra e consequente diminuição da

produção, necessidade de acréscimo de água à mistura e possível perda de resistência e durabilidade do concreto em caso de acréscimo de água excessivo ou não misturado homogeneamente.

A diminuição do abatimento do concreto, ou diminuição de fluidez do concreto fresco, é uma reação normal a todos concretos e resulta do enrijecimento gradual e pega da pasta de cimento Portland hidratada. Ocorre quando a água livre da mistura de concreto é consumida nas reações de hidratação, por adsorção na superfície dos produtos de hidratação e por evaporação (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Figura 3 – Ensaio de abatimento de tronco de cone realizado em obra



(fonte: foto do autor)

### 3.1.1.2 Ensaio de resistência à compressão

O controle da resistência à compressão do concreto é realizado por um procedimento normalizado, definido pelas normas NBR 5738/2003 para a etapa de moldagem e cura dos CP, e para o processo de ruptura pela NBR 5739/2007. Estas duas Normas, juntamente com as recomendações da NBR 6118/2007 – Projeto de Estruturas de Concreto (que descreve os requisitos de desempenho em serviço e durabilidade das estruturas de concreto armado), indicam boa parte das operações necessárias para o controle de qualidade do concreto, que tem como objetivo o ensaio dos corpos de prova de concreto para obtenção da resistência potencial do material ensaiado.

A seguir, na figura 4, é apresentado um exemplo de alguns corpos de prova moldados em obra e identificados segundo o lote de concreto, para realização de ensaio de resistência à compressão em laboratório.

Figura 4 – Corpos de prova para ensaio de resistência à compressão moldados e identificados



(fonte: foto do autor)

Segundo a NBR 5738/2003, os corpos de prova devem ser moldados na quantidade de dois exemplares para cada idade de rompimento, moldados no mesmo ato. Conforme a NM 33/1998, as amostras devem ser coletadas aleatoriamente durante a operação de concretagem. A resistência tomada como referência é o maior valor entre os dois obtidos no ensaio de resistência à compressão para a idade do concreto ensaiada, desde que os corpos de prova sejam submetidos às mesmas condições de cura. Portanto, é aceito que o maior resultado foi menos afetado pelas operações de moldagem e ensaio, e representa melhor a resistência potencial do concreto (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1998).

Ainda segundo a NM 33, é recomendado que, para a moldagem dos corpos de prova, o concreto utilizado seja retirado após a descarga de 15% do material e antes da descarga de 85% do volume da betonada. Por exemplo, em uma betoneira de eixo inclinado com 300 dm<sup>3</sup>, não devem ser tomados para fins de amostragem os 45 dm<sup>3</sup> iniciais, geralmente com maior proporção de agregados graúdos, nem os 45 dm<sup>3</sup> finais, geralmente com maior proporção de argamassa. Portanto, devem ser utilizados para moldar os corpos de prova os 100 dm<sup>3</sup> intermediários, geralmente mais homogêneos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1998).

Para concreto fornecido por usina, o procedimento adotado deve ser o recomendado na NBR 7212/2012. Para ensaios, o texto recomenda que não sejam utilizados os 15% iniciais e finais do volume total de concreto contido no caminhão-betoneira, sendo retirados os corpos de prova dos 70% intermediários. O texto ainda recomenda que sejam moldados um número de exemplares igual ou superior ao volume entregue. Ou seja, de uma entrega de 6 m<sup>3</sup>, retirar 6 corpos de prova para ensaio. Segundo Mehta e Monteiro (1994, p. 152), essa medida é excessiva, sendo suficiente a retirada da porção necessária para a moldagem dos corpos de prova em um único momento e do volume intermediário ( $\pm 70\%$  do volume total do caminhão-betoneira).

Para concretos fornecidos por empresa de serviços de concretagem, devem ser moldados corpos de prova para cada caminhão-betoneira que chega à obra, sendo, deste modo, um lote constituído por um caminhão-betoneira. Segundo a NBR 12655, para concreto produzido em obra, os lotes devem ser divididos conforme os valores apresentados na tabela 1, exceto para casos excepcionais (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996).

A precisão de um resultado não pode ser assegurada por um único teste, sendo recomendado um número maior de resultados para fins de conformidade e segurança nos dados (DEWAR; ANDERSON, 1992).

A variação que se observa nos resultados dos ensaios de resistência à compressão de corpos-de-prova evidência que os dados obtidos devem ser interpretados em termos estatísticos, baseados em conceitos de probabilidade (NEVILLE, 1997).

Tabela 1 – Valores para formação de lotes para retirada de amostras de concreto indicados pela NBR 12655

Limites superiores	Solicitação principal em elementos da estrutura	
	Compressão ou compressão e flexão	Flexão simples
Volume de concreto	50 m <sup>3</sup>	100 m <sup>3</sup>
Número de andares	1	1
Tempo de concretagem	3 dias de concretagem 1	

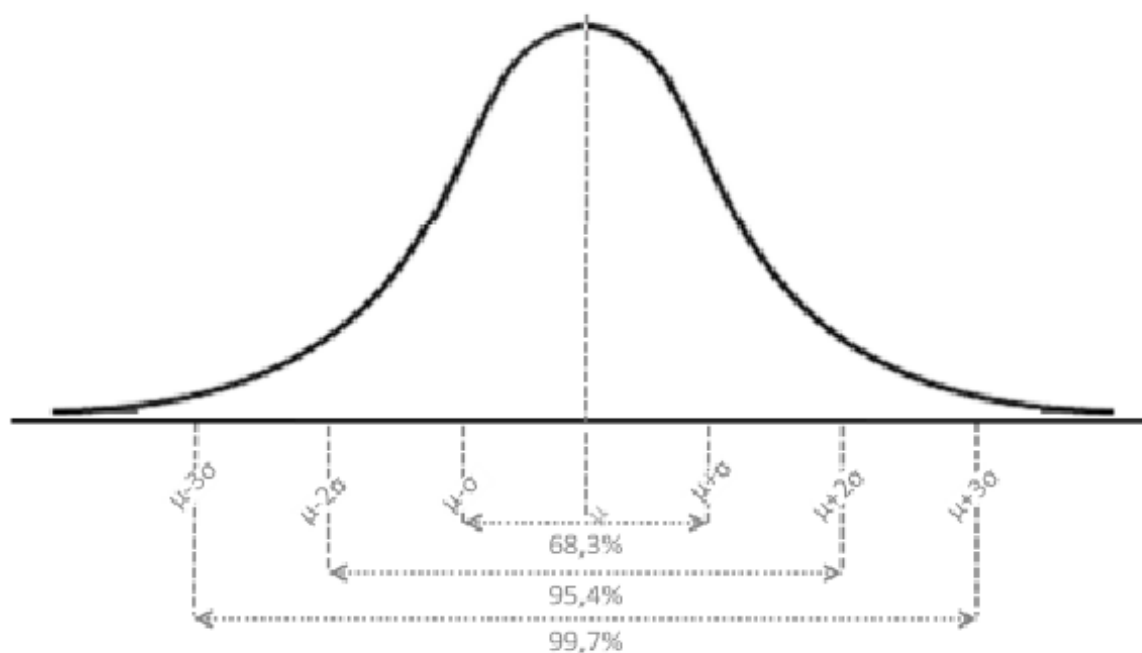
1 Este período deve estar compreendido no prazo total máximo de sete dias, que inclui eventuais interrupções para tratamento de juntas.

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996)

Atualmente sabe-se que os resultados de resistência do concreto, produzido sob condições usuais e constantes, obedecem a uma distribuição de probabilidade considerada distribuição normal ou de Gauss, a qual é descrita por dois parâmetros estatísticos: a média ( $\mu$ ) e o desvio padrão ( $\sigma$ ) (HELENE; TERZIAN, 1993).

A distribuição gaussiana dos resultados da resistência à compressão do concreto é simétrica em relação ao seu ponto central, determinado pela média ( $\mu$ ) dos dados analisados, configurando um gráfico de distribuição com o formato aproximado de um sino. O valor do desvio padrão ( $\sigma$ ) determina a largura da distribuição, dessa maneira quanto mais dispersos os valores da resistência analisados mais achatado será o gráfico, e do contrário, quanto mais concentrados os valores obtidos mais estreita será a figura com um pico acentuado para o valor de maior frequência (MASCOLO, 2012).

Figura 5 – Curva de Gauss para distribuição de probabilidades



(fonte: MASCOLO, 2012)

O valor da resistência potencial é o valor de referência para dimensionamento da estrutura, e deve ser um valor único e bem definido, a fim de permitir a ligação entre as etapas de projeto e execução das estruturas. É necessário considerar a dispersão probabilística dos resultados e

definir um valor de confiança. Este valor será adotado como característico para a resistência à compressão do concreto e deve representar a propriedade do concreto com segurança (HELENE; TERZIAN, 1993).

A partir da curva normal de probabilidade associa-se um determinado nível de confiança requerido para a resistência do concreto, normalmente de 95%, e então se define o valor do  $f_{ck}$  (resistência característica do concreto à compressão). Isso equivale dizer que há uma probabilidade de 5% de não atingir o valor característico de resistência à compressão, ou ainda que 5% dos resultados ensaiados de uma amostra podem conter valores abaixo do  $f_{ck}$ . Níveis de confiança superiores tendem a ser antieconômicos e por isso normalmente adota-se 95%, que oferece um risco aceitável de não conformidade, considerado nos critérios de projeto estrutural, a um custo acessível (DEWAR; ANDERSON, 1992).

### 3.1.2 Problemas e limitações

Nesta seção são discutidos os problemas dos ensaios que caracterizam o controle de qualidade de concretos, abatimento de tronco de cone e ensaio de resistência à compressão, apresentados na seção anterior.

#### 3.1.2.1 Problemas do ensaio de abatimento de tronco de cone (*slump test*)

O resultado do ensaio de abatimento de tronco de cone, ou *slump test*, é ainda o parâmetro usado para aceitação ou não do material que será aplicado na estrutura, seja este concreto produzido em obra ou por empresa terceirizada. O problema deste tipo de ensaio é que, sendo basicamente um ensaio da consistência do concreto, o resultado do *slump test* está intrinsecamente relacionado à trabalhabilidade do material, que apenas é necessária para validar a possibilidade de lançamento do concreto na estrutura, e não objetivamente às características de resistência potencial e durabilidade que o concreto testado apresenta, que são na verdade os parâmetros mais importantes para garantir a qualidade do concreto que é usado em estruturas (MANCIO et al., 2010, tradução nossa).

Ao medir duas ou mais vezes o abatimento de uma amostra representativa de uma amassada de concreto, utilizando os mesmos equipamentos e mão-de-obra, é muito improvável que se obtenham pares de valores idênticos para os resultados, ou mesmo que a média de pares de resultados de diferentes amostras seja igual. O mesmo ocorre no caso de alterar equipamentos

e mão-de-obra no processo de ensaio e ao testar diferentes amassadas de concretos com mesmo traço, que teoricamente deveriam ser idênticas (DEWAR; ANDERSON, 1992).

Ademais, não é raro ocorrer uma adição de água no concreto antes do seu uso, com o objetivo de repor a água evaporada no caminhão-betoneira ou similar durante o processo de transporte do material da central de concreto até o local da concretagem. Esse fato já é suficiente para alterar, mesmo que minimamente, as características da mistura pré-definida pelo engenheiro responsável pela determinação do traço do concreto que será usado na estrutura em relação ao que foi dosado na indústria concreteira. Sendo assim, o controle de qualidade da resistência à compressão e durabilidade do concreto fica submetido aos resultados obtidos nos ensaios de rompimento dos corpos de prova moldados na obra no momento do recebimento do concreto (MANCIO et al., 2010, tradução nossa).

### 3.1.2.2 Problemas do ensaio de resistência à compressão

A obtenção dos dados sobre a resistência à compressão do concreto fica condicionada ao rompimento dos dois corpos de prova para a idade de 28 dias, submetidos às condições de cura especificadas na NBR 5738/2008 – Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova, e rompidos segundo os procedimentos estabelecidos pela NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007).

Contudo, os resultados obtidos através dessa ferramenta de controle tecnológico podem apresentar variabilidade. Podem existir problemas que influenciam nos resultados finais dos ensaios tanto na etapa de moldagem do concreto (os CP podem ter sido mal moldados pelo funcionário encarregado, o concreto utilizado na moldagem pode ter sido retirado de porções do caminhão-betoneira fora dos limites recomendados e citados anteriormente, etc.), quanto na etapa de ensaio dos exemplares (dispersões na cura, capeamento e ruptura dos CP) (MANCIO et al., 2010, tradução nossa).

O não atendimento do  $f_{ck}$  pode estar relacionado com problemas no processo tecnológico, como a falta de cuidados na moldagem, retificação ou capeamento dos corpos de prova, ou ainda à baixa confiabilidade de alguns laboratórios, entre outros fatores. Ademais, as amostras moldadas e ensaiadas não refletem exatamente as características do concreto presente na obra. Isto ocorre pelo fato de que as condições de cura dos corpos de prova são diferentes das

condições do concreto lançado em obra, submetendo o material a um estado de tensões diferentes da estrutura real. Dessa forma, os corpos de prova são somente indicativos, que provam que o concreto que está sendo produzido está dentro de uma faixa aceitável (FARIA, 2009).

Alguns dos problemas dos ensaios de resistência à compressão que vem sendo estudados nos últimos tempos é a retificação (FERNANDES, 2011) e o capeamento (CHIES, 2011) de corpos de prova de concreto. O fato é que os concretos utilizados nas obras não estão atingindo, nos ensaios em laboratórios, a resistência à compressão exigida nos projetos estruturais. Em seus estudos, Fernandes (2011) concluiu que o tipo de retífica utilizado para a preparação dos corpos de prova influencia nos resultados dos ensaios de resistência à compressão. Já Chies (2011) comprova, com os resultados de seus ensaios feitos em laboratório, que o tipo de material utilizado para o capeamento dos corpos de prova altera os valores obtidos nos ensaios de compressão, sendo inclusive importante observar a classe de resistência do concreto ensaiado no momento de decidir qual é o material mais indicado para a realização do capeamento.

Outro grande problema desse procedimento de controle de qualidade é o tempo de espera necessário para obtenção dos resultados dos ensaios. Como já dito anteriormente, são necessários um mínimo de 28 dias de espera para a realização do ensaio de ruptura dos corpos de prova. Dada a velocidade de execução dos empreendimentos atualmente, pode-se afirmar com segurança que quando os resultados forem obtidos, existirão alguns pavimentos sobre os elementos estruturais executados com tal concreto (desde que, é claro, assim seja especificado no projeto) (MANCIO et al., 2010, tradução nossa).

Após a moldagem, cura e rompimento dos CP, os resultados dos ensaios são enviados para os responsáveis pela obra, que por sua vez repassam as informações para o responsável pelo projeto estrutural. Caso exista(m) ensaio(s) com valor(es) de  $f_{ck}$  do concreto abaixo do especificado, o projetista estrutural fica encarregado de avaliar a necessidade ou não da retirada de testemunhos da estruturada concretada. Se após os ensaios dos testemunhos, os resultados da resistência à compressão do concreto ainda forem abaixo do aceitável, deve-se submeter a estrutura à um reforço estrutura ou, em último caso, até a demolição parcial das peças executadas com concreto de baixa qualidade (HELENE; TERZIAN, 1993).



### 3.2 IMPORTÂNCIA DA RELAÇÃO A/C

Vários são os fatores que influenciam na resistência à compressão do concreto da estrutura. Desde a heterogeneidade dos materiais, representada pelos agregados, o cimento, a água e eventualmente os aditivos, até o seu transporte, lançamento adensamento e cura (HELENE; TERZIAN, 1993, p. 112). Apesar disso, a relação água/cimento é um dos parâmetros mais importantes na determinação da qualidade de materiais à base de cimento.

De acordo com Helene e Terzian (1993; p. 128), “[...] fixado certo grau de hidratação, a resistência à compressão passa a ser função exclusiva da relação água/cimento, sempre que se tratar de concretos correntes amassados com agregados convencionais e de boa resistência.”. Os mesmos autores ainda afirmam que “Num estudo laboratorial, no entanto, se mantida a relação água/cimento, a resistência à compressão passa a ser dependente exclusivamente do tipo de cimento considerado e da idade escolhida para o ensaio de compressão axial.”.

Neville (1999, tradução nossa), por outro lado, afirma que se deve ter cautela ao adotar a relação água/cimento como parâmetro único de determinação das propriedades de resistência à compressão e durabilidade do concreto visto que, atualmente, cada vez mais as misturas cimentícias tendem a incorporar outros elementos que reagem com água, como cinza volante, escória de alto forno, sílica ativa e metacaulim. Porém, o próprio autor reconhece que uma exceção pode ser feita para o uso exclusivo da relação água/cimento como parâmetro de obtenção das características citadas quando a análise for feita nas primeiras idades do concreto, quando os demais elementos da dosagem ainda não passaram por significantes reações químicas, que seriam suficientes para influenciar os resultados dos testes para determinação da resistência do concreto realizados. O autor ainda indica que, apesar de tudo, a relação água/cimento é uma forma de avaliar as propriedades de uma mistura no momento de sua concepção, tendo em conta a natureza de todos os materiais cimentícios sendo usados, e que o fato de não ser possível obter-se todas as informações sobre a mistura não serve como desculpa para não se obter nenhuma, e por isso o uso da relação água/cimento como parâmetro de avaliação da qualidade de um concreto não deve ser descontinuado, desde que sempre se leve em consideração suas limitações.

Para a dosagem dos concretos ensaiados em laboratório foi utilizada o método IPT/EPUSP. Neste método é apresentado um roteiro para dosagem de concretos convencionais que é usado

como referência nacionalmente até os dias atuais. Logo no início de seu estudo teórico, os autores afirmam que a relação  $a/c$  é o parâmetro mais importante do concreto estrutural, e que, definidos uma relação  $a/c$  e certos materiais, a resistência e a durabilidade do concreto passam a ser únicas. Na continuação do texto que apresenta o procedimento de dosagem para concretos, após algumas seções que definem a resistência à compressão que deve ser adotada para o concreto levando em consideração as variações no processo de produção, os autores afirmam que determinar a correlação entre a compressão axial e a relação água/cimento do concreto é uma fase bastante importante do processo de dosagem, e aconselham o uso das curvas com as correlações entre as duas características obtidas por Helene<sup>1</sup> (1987 apud HELENE; TERZIAN, 1993, p. 237) em seu estudo de alcance nacional para vários tipos de cimentos existentes, apresentando na sequência uma série de curvas e equações que correlacionam a relação água/cimento dos concretos com suas respectivas resistências à compressão para as idades nas quais os concretos foram ensaiados.

### 3.3 MÉTODOS EXISTENTES PARA DEFINIÇÃO DA RELAÇÃO A/C

A medição instantânea em obra da relação  $a/c$  do concreto fresco é um desafio não resolvido que tem motivado engenheiros e pesquisadores há várias décadas. Uma série de estudos têm explorado vários métodos para determinação da relação  $a/c$  de concretos. Dentre as várias tentativas surgiram técnicas baseadas em cloretos e titulação de cálcio, pulsos ultrassônicos e separação dos componentes do concreto para determinar a relação  $a/c$  do material, todas sem obter resultados promissores. Um método com medidor nuclear chegou a ser desenvolvido, apresentando resultados precisos, todavia, apenas profissionais treinados poderiam operar o dispositivo, o que acabou por limitar a aceitação do método e o seu uso generalizado (MANCIO et al., 2010, tradução nossa).

Um dos métodos propõe o uso de um forno de micro-ondas. Talvez seja dos mais práticos métodos desenvolvidos até agora, no qual uma amostra de concreto fresco é pesada e, em seguida, aquecida em um forno de micro-ondas para evaporar a água. A diferença de peso entre as amostras seca e úmida, fornecendo a percentagem de água, e a relação água/cimento pode ser calculada quando esta informação é combinada com o teor de cimento à partir da

---

<sup>1</sup> HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estabelecimento de parâmetros para dosagem e controle dos concretos de cimento Portland**. 1987. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987.

mistura especificada no projeto. O teste de micro-ondas é um método relativamente simples, mas com algumas limitações importantes. Ele só mede a quantidade de água, leva em torno de 15 a 30 minutos para secar uma amostra de concreto, e preocupações em relação à segurança devido à presença de metais em alguns agregados continuam sendo um problema (MANCIO et al., 2010, tradução nossa).

### 3.4 O MÉTODO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Nesta seção são apresentados os resultados de experimentos que levaram ao desenvolvimento do método da obtenção instantânea da relação água/cimento através do método da resistividade elétrica. É apresentado também o método que é usado para a realização dos ensaios de amostras de concreto fresco dosados com o método IPT/EPUSP e materiais típicos da região de Porto Alegre.

#### 3.4.1 Química do concreto

O concreto é um material compósito essencialmente formado pelos seguintes ingredientes: um meio de ligação (tipicamente cimento ou outros materiais de cimento), água, agregado miúdo (areia) e agregado graúdo (tipicamente rochas ou cascalho), e minerais e/ou aditivos químicos. O cimento liga todos os componentes através da formação de produtos de hidratação, uma vez que reage com a água. Agregados influenciam grandemente o módulo de elasticidade, a estabilidade dimensional, reduzem o teor de cimento e proporcionam viabilidade econômica (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Cimento é composto de clínquer pulverizado e sulfato de cálcio (gipsita). Clínquer é um composto que consiste, principalmente, de silicatos de cálcio e aluminatos, especificamente C3S, C2S, C3A e C4AF. Quando a água é adicionada ao cimento, seus compostos de cálcio dissolvem e dispersam espécies iônicas no líquido (MEHTA; MONTEIRO, 2006). Este líquido iônico poroso concede ao concreto fresco o valor de resistividade característica que é o princípio fundamental do método da resistividade elétrica (MANCIO et al., 2010, tradução nossa).

Pequenos cristais de tri-sulfoaluminato de cálcio hidratado (etringita, primeiro produto da hidratação do concreto) começam a se formar dentro de alguns minutos após a dissolução.

Produtos de hidratação de maior dimensão, como o hidróxido de cálcio e de cristais de hidrato de silicato de cálcio se formam algumas horas mais tarde. A formação de produtos de hidratação, e não a evaporação de água, constituem o endurecimento do cimento. A resistência do concreto encontra-se nas forças de Van der Waals entre os produtos de hidratação da pasta de cimento e outros sólidos. Esta força aumenta com o tempo, em proporção com o volume dos produtos de hidratação formada (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Um dispositivo ou método que pode quantificar com precisão a resistividade elétrica do concreto fresco pode correlacionar esta resistividade com a proporção de íons de cimento dissolvidos e, assim, determinar a relação água/cimento e a resistência final do concreto fresco (MANCIO et al., 2010, tradução nossa).

A resistividade de massa de concreto fresco está diretamente relacionada com a resistividade do fluido poroso, tal como expresso pela Lei de Archie (fórmula 1)

(fórmula 1)

Onde:

$\rho_b$  = resistividade da massa de concreto fresco;

$\rho_f$  = resistividade do fluido poroso;

= volume da fracção poros;

a e m = constantes empíricas (ARCHIE, 1942; MORRISON et al., 2004 apud MANCIO et al., 2010, tradução nossa).

Concreto fresco em um fluido poroso mais resistivo irá apresentar uma maior resistividade elétrica. Assim, existe a possibilidade de que o concreto fresco com uma maior relação água/cimento irá também apresentar uma resistividade superior. A relação entre estas propriedades, bem como o desenvolvimento de uma sonda de resistividade precisa e prático que pode fornecer uma medição instantânea, formam a base do presente estudo (MANCIO et al., 2010, tradução nossa).

Neville (1997 apud MANCIO et al., 2010, tradução nossa) afirma que para o concreto mantido úmido durante a cura, a uma determinada idade e temperatura, a relação a/c é um dos

fatores mais importantes para determinar a resistência final do material. Com o aumento da proporção de cimento, a relação água/cimento diminui, e ocorre o aumento da resistência à compressão do concreto. Assim, a força e a relação a/c estão inversamente relacionadas.

A conhecida Lei de Abrams para a relação água/cimento corrobora a afirmação de Neville, como pode ser observado na fórmula 2.

\_\_\_\_\_ (fórmula 2)

Onde:

a/c = relação água/cimento da mistura de concreto;

$k_1$  e  $k_2$  = constantes empíricas (MANCIO et al., 2010, tradução nossa).

Mehta e Monteiro (2006) atribuem a correlação entre a relação água/cimento e a resistência do concreto para o fato de que uma matriz extremamente porosa, como por exemplo uma mistura que possui uma alta relação a/c, não é tão forte como uma matriz menos porosa, com uma menor relação a/c.

Engenheiros que trabalham em canteiros de obras devem verificar a relação água/cimento de uma mistura de concreto fresco para prever com precisão a resistência final do material. A utilização da relação água/cimento como um meio de prever a resistência à compressão final do concreto torna-se cada vez mais importante, juntamente com o desenvolvimento da tecnologia para mistura de concretos e da indústria da construção. O advento das misturas permitiu que concretos frescos com variadas quantidades de água (e de relações a/c) exibam a mesma trabalhabilidade (NEVILLE, 1997). O ensaio de abatimento de tronco de cone, como já foi discutido anteriormente, é uma medida da consistência do material e fornece apenas uma indicação aproximada e qualitativa de uma relação a/c do concreto, sendo muito impreciso e ficando ainda mais sujeito a erros devido ao uso cada vez mais comum de adições e aditivos nos concretos utilizados atualmente. Funcionários que desejam avaliar com precisão a qualidade e prever a resistência do concreto fresco devem adotar um teste de campo mais confiável do que o *slump test*. O desenvolvimento de um dispositivo que

determina com precisão a relação a/c apresentaria uma solução para este problema crescente na indústria (MANCIO et al., 2010, tradução nossa).

### **3.4.2 Estudos preliminares ao desenvolvimento do método da resistividade elétrica para determinação da relação água/cimento**

Houve dois esforços significativos para descrever a relação a/c de pastas de cimento frescas e misturas de concreto através de medições de resistividade. Wei e Li<sup>2</sup> (2006 apud MANCIO et al., 2010, tradução nossa) estudaram o início do processo de hidratação de pastas de cimento Portland utilizando um dispositivo sem contato para medições da resistividade elétrica. No dispositivo montado para o experimento, a pasta de cimento foi inserida em um molde, em forma de anel de seção retangular, e uma corrente elétrica de fluxo foi induzida por um transformador externo. Com base nos resultados obtidos, os autores concluíram que medições de resistividade elétrica podem ser utilizadas como uma ferramenta para obtenção da relação água/cimento de pastas de cimento fresco. No entanto nenhum ensaio com concreto ou argamassa foi realizado (MANCIO et al., 2010, tradução nossa).

Esse estudo forneceu valiosas informações sobre os mecanismos de hidratação do concreto, especialmente em relação à dissolução de íons em soluções e sua relação com a resistividade elétrica. Contudo, os resultados tem limitada aplicação quando a resistividade elétrica do concreto é considerada. Apesar da pasta de cimento (cimento mais água) ser um componente essencial do concreto, concretos são materiais compósitos que necessariamente incluem agregados (geralmente finos e graúdos) e, muitas vezes, aditivos minerais e/ou químicos. Isso faz com que pastas de cimento e concretos tenham comportamentos muito diferentes, tanto no estado fresco (úmido) quanto no estado endurecido (MANCIO et al., 2010, tradução nossa).

MacDonald e Northwood<sup>3</sup> (2000 apud MANCIO et al., 2010, tradução nossa) tentaram caracterizar a correlação entre a relação a/c e a resistividade elétrica através de ensaios com algumas dosagens de concretos. Apesar de o tamanho do agregado ter sido mantido constante em todas as misturas ensaiadas, a consistência, e conseqüentemente o teor de água das

<sup>2</sup> WEI, X.; LI, Z. Early Hydration Process of Portland Cement paste by Electrical Measurement. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Madison, v. 18, n. 1, p. 99-105, 2006.

<sup>3</sup> MACDONALD, K. A.; NORTHWOOD, D. O. **Rapid Estimation of Water-Cementitious Ratio and Chloride Ion Diffusivity in Hardened and Plastic Concrete by Resistivity Measurement**: water-cement ratio and other durability parameters – techniques for determination. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2000.

misturas, variou significativamente. A avaliação dos resultados revelou que a variação da resistividade elétrica observada foi causada principalmente por mudanças na porosidade, que é aproximadamente igual ao teor de água no estado fresco, e não devidas às mudanças na relação a/c do concreto. O estudo ainda inclui uma exploração da difusividade de íons cloreto em concreto, e os autores concluíram em última análise que é possível determinar a difusividade do concreto endurecido medindo a resistividade elétrica. Os pesquisadores, porém não recomendam medidas de resistividade elétrica como um meio para estimar a relação a/c do concreto fresco, e observaram que trabalho adicional seria necessário para desenvolver um método de campo.

Os resultados dos dois estudos citados nos parágrafos anteriores, que sugeriram existir uma relação direta entre relação água/cimento de materiais cimentícios e a sua resistividade elétrica, serviram como base para o desenvolvimento do método de controle de qualidade de concretos utilizados na construção civil através da resistividade elétrica, descrito a seguir.

## **4 PROGRAMA EXPERIMENTAL**

Este capítulo refere-se ao detalhamento do programa experimental utilizado para os ensaios dos corpos de prova de concreto, com o objetivo de obter-se a resistividade elétrica dos mesmos e conseqüentemente a relação água/cimento. Estão aqui detalhados os materiais utilizados nos ensaios, o método de dosagem dos concretos, a montagem e calibração do equipamento utilizado e o procedimento adotado nos ensaios dos CP.

### **4.1 DESENVOLVIMENTO DO EQUIPAMENTO, CALIBRAÇÃO DO EQUIPAMENTO E MÉTODO DE ENSAIO DOS CONCRETOS**

O processo de desenvolvimento e montagem do equipamento (sonda) utilizado nos ensaios está descrita nesta seção. É explicado também como ocorreu a calibração do equipamento, com a determinação da constante geométrica por método empírico e teórico. Por último é descrito o procedimento de ensaio adotado para determinação da resistividade elétrica das misturas de concreto.

#### **4.1.1 Desenvolvimento do equipamento**

Um dispositivo de medição de resistividade elétrica foi projetado e construído para este estudo. O equipamento (figura 6) é basicamente um arranjo Wenner com quatro eletrodos. O arranjo Wenner é um arranjo bem-estabelecido e normalmente utilizado em explorações geofísicas. Os eletrodos são de aço inoxidável, separados por uma distância de 2,5 cm por um material plástico não condutor, obtendo-se um aparelho similar ao usado por Mancio et al. (2010) em seus ensaios em concretos dosados segundo à norma de dosagem da ACI.

O corpo do equipamento é composto por barras de nylon (material plástico, não condutor elétrico), sendo a barra interna com diâmetro de 10 mm e 420 mm de comprimento; e a externa com diâmetro de 16 mm e 320 mm de comprimento. Na parte externa da barra com diâmetro de 10 mm foram feitas pequenas ranhuras para permitir a passagem dos quatro cabos elétricos que foram ligados em cada eletrodo. A barra externa de 16 mm foi usinada de



maneira a formar um anel, permitindo a passagem da barra e dos cabos elétricos pelo seu interior.

Os eletrodos foram feitos de aço inoxidável, com diâmetro de 16 mm e 5 mm de largura cada. Todos os eletrodos foram usinados a partir de uma barra de aço e transformados em anéis, de modo a permitir o encaixe na barra de nylon de 10 mm e a passagem dos cabos elétricos. Os eletrodos estão separados entre si pelas barras de nylon, por uma distância de 25 mm desde o centro de cada eletrodo.

Os cabos elétricos foram ligados a um cabo manga com quatro fios internos na saída da parte interna da sonda, facilitando dessa forma a ligação da sonda com o circuito que foi usado na calibração do equipamento e ensaios dos concretos. A vedação do aparelho foi feita com silicone, impedindo a passagem de água que resultaria em falhas nos valores obtidos nos testes de resistividade.

Figura 6 – Equipamento utilizado para ensaios de resistividade elétrica



(fonte: foto do autor)

## 4.1.2 Determinação do fator geométrico k e calibração do equipamento

### 4.1.2.1 Determinação empírica do fator geométrico k

A geometria da sonda determina seu fator geométrico. Para determinar experimentalmente o valor dessa constante, a sonda foi submersa em soluções cuidadosamente preparadas de resistividades conhecidos,  $\rho_s$ . As quedas de tensão correspondentes no resistor conhecido ( $V_o$  e  $R_o$ ) e nos eletrodos internos ( $V$ ) permitiram a aplicação da fórmula 3 para determinar k.

— ————— (fórmula 3)

Nove soluções de cloreto de sódio de três resistividades diferentes (três soluções de cada uma de aproximadamente 1  $\Omega$ -m, 5  $\Omega$ -m, e 10  $\Omega$ -m) foram utilizadas. Cada amostra de solução foi colocada em um corpo de prova plástico com forma cilíndrica e dimensões de 10 x 20 cm (resultando em volume de 1,57 litros), o mesmo tipo de recipiente que foi usado para os ensaios com concreto fresco para as medições de resistividade. A sonda foi então inserida dentro da solução e as quedas de tensão correspondentes foram medidas para determinar k por meio da fórmula 3.

### 4.1.2.2 Determinação teórica do fator geométrico k

Segundo Mancio et al. (2010, tradução nossa), a determinação teórica do fator geométrico verifica o valor empírico. Integração das expressões para fluxo elétrico através de uma esfera (Equação 3-3, deixaram lado) e taxa de tempo de mudança no ponto de injeção de carga (fórmula 4, lado direito):

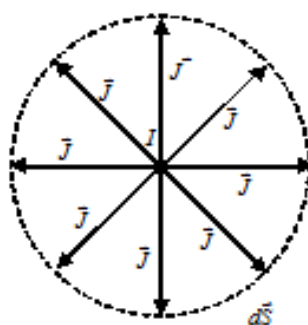
— (fórmula 4)

produz a seguinte expressão (fórmula 5) para a corrente ao longo de um espaço esférico.

(fórmula 5)

onde  $J$  é a densidade de corrente, e  $A$  é a área da superfície de todo o espaço esférico (amostra de concreto fresco ou solução de cloreto de sódio) (MANCIO et al., 2010, tradução nossa). Esta relação pode ser visualizada na figura 7.

Figura 7 – Esfera como fonte de corrente no espaço



(fonte: MANCIO et al., 2010)

No entanto, o potencial elétrico é apenas mensurável como uma diferença entre dois pontos. O potencial elétrico em cada um dos dois eletrodos interiores é um reflexo da corrente que flui a partir dos dois eletrodos exteriores. Assim, se os eletrodos exteriores são identificados por A e B e os interiores M e N, e os eletrodos estão igualmente espaçados por uma distância  $a$  (como mostrado na figura 8), a corrente através do eletrodo A é a mesma corrente através do eletrodo, B ( $I_a = I_b$ ). A subtração dos dois potenciais produz a diferença de potencial (V) após simplificação:

(fórmula 6)

Resolvendo essa expressão para a resistividade ( $\rho$ ) revela a expressão teórica para o fator geométrico,  $k$ .

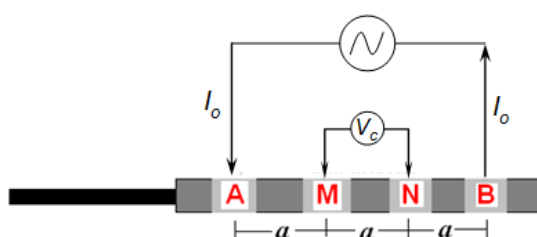
(fórmula 7)

Assim, o fator geométrico teórico deve ser.

(fórmula 8)

Em um recipiente de amostragem ideal, o fator geométrico é uma função apenas do espaçamento entre os eletrodos (MORRISON et al., 2004 apud MANCIO et al., 2010, tradução nossa).

Figura 8 – Representação esquemática do experimento



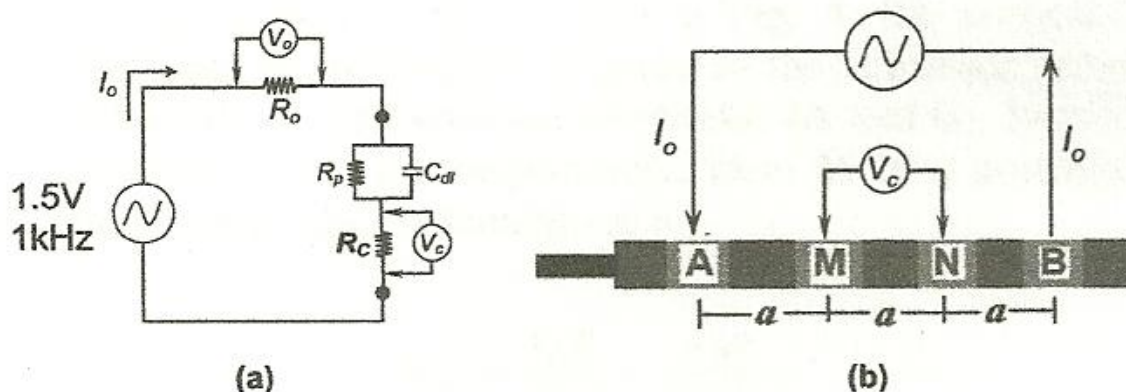
(fonte: MANCIO et al., 2010)

### 4.1.3 Método de ensaio

Para os testes em laboratório foi necessária uma fonte de alimentação externa, um resistor com resistência conhecida, conectado em série com a sonda e conhecimento da resistividade do equipamento. Os dois eletrodos das pontas da sonda estarão conectados ao circuito, e a fonte externa fornecerá uma corrente AC com 1,5 V, 1 Hz e onda senoidal.

O usuário submerge a sonda em uma amostra de concreto fresco, fazendo a corrente fluir pelo material. Como mostrado na figura 9, volímetros conectados em paralelo com o resistor conhecido e os eletrodos centrais mostram a queda de tensão correspondente pelos elementos (MANCIO et al., 2010, tradução nossa).

Figura 9 – Ilustração esquemática do circuito elétrico (a) e da sonda (b)



(fonte: MANCIO et al., 2010)

A corrente  $I_o$  passando pelo circuito é dada por  $V_o/R_o$ , e a resistência elétrica da amostra de concreto fresco ( $R_c$ ) é dada por  $V_c/I_o$ . A resistividade elétrica  $\rho_c$  do concreto, uma propriedade do material, independente da geometria da amostra é dada por  $\rho_c = k \times R_c$ , sendo  $k$  é o fator geométrico (um parâmetro determinado pela geometria da sonda usada). Como demonstrado em Mancio et al. (2010), o valor de  $k$  da sonda imersa no concreto é determinada pela distância entre os eletrodos. Foram feitas também verificações experimentais do fator geométrico calculado, submergindo a sonda e realizando medições da resistividade elétrica de soluções aquosas com resistividade conhecida. Obtém-se, desse modo, o valor do fator geométrico  $k$  através da expressão  $k = \rho_s \times R_s$ , sendo  $\rho_s$  resistividade da solução aquosa e  $R_s$  a sua resistência, medida pela relação  $V_s \times I_o$ , que representa o potencial elétrico medido através do dois eletrodos centrais dividido pela corrente que é introduzida através do circuito. O fator geométrico  $k$  é uma constante que depende somente da geometria da sonda usada nas medições da resistividade elétrica, devendo ser calculado apenas uma vez, no estágio de desenvolvimento do equipamento (MANCIO et al., 2010, tradução nossa).

Para investigar a relação entre a resistividade elétrica e a relação água/cimento do concreto fresco, foram ensaiadas seis amostras com diferentes relações a/c, preparadas através do método de dosagem de concretos do IPT/EPUSP. Considerou-se que a água utilizada na dosagem dos concretos manteve sua resistividade constante durante todos os ensaios, mas nenhum teste foi realizado para validar esta hipótese. Após a mistura do concreto, uma parte do material é colocada em cilindros plásticos de concreto para realização das medições ao longo do tempo. Em todas as medições, a sonda foi submergida verticalmente na amostra e

centralmente localizada dentro do cilindro plástico. Foram realizadas medições da resistividade elétrica do material a cada 10 minutos, num intervalo de aproximadamente 1 hora e 40 minutos (MANCIO et al., 2010, tradução nossa).

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais utilizados na dosagem dos traços de concreto para os ensaios de resistividade elétrica são característicos da região da cidade de Porto Alegre – Rio Grande do Sul. Na sequência, está apresentada a caracterização de cada material.

### 4.2.1 Cimento

O cimentos utilizados foram do tipo Portland pozolânico (CP IV), e de alta resistência inicial (CP V – ARI). A tabela apresenta um resumo da composição dos cimentos adotados nesta pesquisa, segundo as respectivas normas brasileiras.

Tabela 2: Composição dos cimentos empregados na pesquisa

Tipo de cimento Portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma brasileira
		Clínquer + gesso (sulfato de cálcio)	Escória granulada de alto forno	Material pozolânico	Material carbonático	
Pozolânico	CP IV	85 - 45	-	15 - 50	0 - 5	NBR 5736
Alta resistência inicial	CP V-ARI	100 - 95	-	-	0 - 5	NBR 5733

(fonte: elaborada pelo autor)

### 4.2.2 Agregados

Para o proporcionamento dos concretos foram utilizados agregados miúdo (areia) e graúdo (brita), provenientes da região de Porto Alegre – Rio Grande do Sul. Conforme as características dos materiais geralmente utilizados na Região, a areia é de origem quartzosa natural, com distribuição granulométrica contínua. O agregado graúdo que foi utilizado consiste de uma brita 0 de origem basáltica.

### 4.2.3 Água

A água utilizada nos ensaios foi proveniente do sistema de abastecimento público da cidade de Porto Alegre (RS).

## 4.3 DOSAGEM DO CONCRETO E MOLGEM DOS CORPOS DE PROVA

Por falta de tempo hábil, não foi realizado pelo autor um estudo de dosagens para os traços dos concretos utilizados nos ensaios. Dessa forma, foi utilizado o estudo de dosagem feito por Cordeiro (2012) para ensaios de outra pesquisa recentemente realizada no Norie.

A dosagem adotada para a realização da pesquisa seguiu o método IPT/EPUSP, proposto por Helene e Terzian (1993) onde os parâmetros utilizados foram a obtenção de um abatimento de tronco de cone conforme indicado na tabela 3, definido com base em especificações de projeto, e um teor de argamassa ( $\alpha$ ) de 55% determinado experimentalmente. Os traços utilizados foram os normalmente utilizados em dosagens de concreto, sendo adotadas as proporções (cimento:agregados) de 1:3,5; 1:5,0; e 1:6,5. Para estas proporções de materiais, foram utilizadas também diferentes relações água/cimento, sendo elas inicialmente 0,46; 0,55 e 0,68.

Tabela 3 – Traços dos concretos utilizados no ensaios

Dosagem (traço)	$\alpha$ (%)	relação a/c	Consumo cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Consumo água (L/m <sup>3</sup> )	H(%)	slump (cm)
1:3,5	55	0,46	490,74	225,52	0,102	12
1:5,0		0,55	374,36	205,69	0,092	9
1:6,5		0,68	298,81	203,41	0,091	8

(fonte: CORDEIRO, 2012)

Os traços ensaiados sofreram alterações na quantidade de água utilizada, com o objetivo de manter o valor do abatimento de tronco de cone definido na dosagem dos traços com variação de 20 mm para mais ou para menos. As quantidades de água que foram adicionadas aos traços foram definidas pela experiência do operador da betoneira, com o objetivo de alcançar o abatimento de tronco de cone desejado.

O processo de mistura dos materiais foi efetuado em uma betoneira de eixo vertical, previamente imprimada com uma mistura de cimento, areia e água. A colocação dos materiais na betoneira seguiu a mesma ordem para todos os traços. A ordem de mistura se deu da seguinte forma: agregado graúdo; aproximadamente 30% de água; cimento; aproximadamente 30% de água; aproximadamente 40% de água.

Os corpos de prova referentes a cada traço de concreto foram moldados simultaneamente. O processo de adensamento adotado foi mecânico, com o auxílio de uma mesa vibratória. Para o ensaio de resistência à compressão (NBR 5739/2007) foram moldados corpos de prova cilíndricos, de dimensões 9,5 x 19 cm. Além do material colocado em corpos de prova plásticos para os ensaios de resistividade elétrica, foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos para ensaios de compressão (3 para rompimento aos 7 dias e 3 para rompimento aos 28 dias).

Figura 10 – corpos de prova metálicos colocados sobre a mesa vibratória



(fonte: foto do autor)



Figura 11 – Corpos de prova metálicos moldados para posterior ensaio à compressão



(fonte: foto do autor)

## 5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS E ANÁLISE

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios de calibração e de resistividade elétrica do equipamento utilizado na realização do trabalho. À partir destes resultados foi avaliada através dos ensaios de calibração a precisão do equipamento e foi feita uma análise dos dados medidos, buscando estabelecer uma correlação entre a relação  $a/c$  dos concretos ensaiados, a resistividade elétrica e a resistência à compressão.

### 5.1 ENSAIOS DE CALIBRAÇÃO DO EQUIPAMENTO

#### 5.1.1 Dosagem das soluções de NaCl

As soluções de cloreto de sódio foram dosadas conforme informações de gráficos que relacionam a resistividade das soluções de NaCl e a quantidade de NaCl que deve ser adicionada à água para que se obtenha a resistividade elétrica desejada dessa solução de acordo com temperatura do ambiente. A temperatura adotada para os ensaios foi de 30°C.

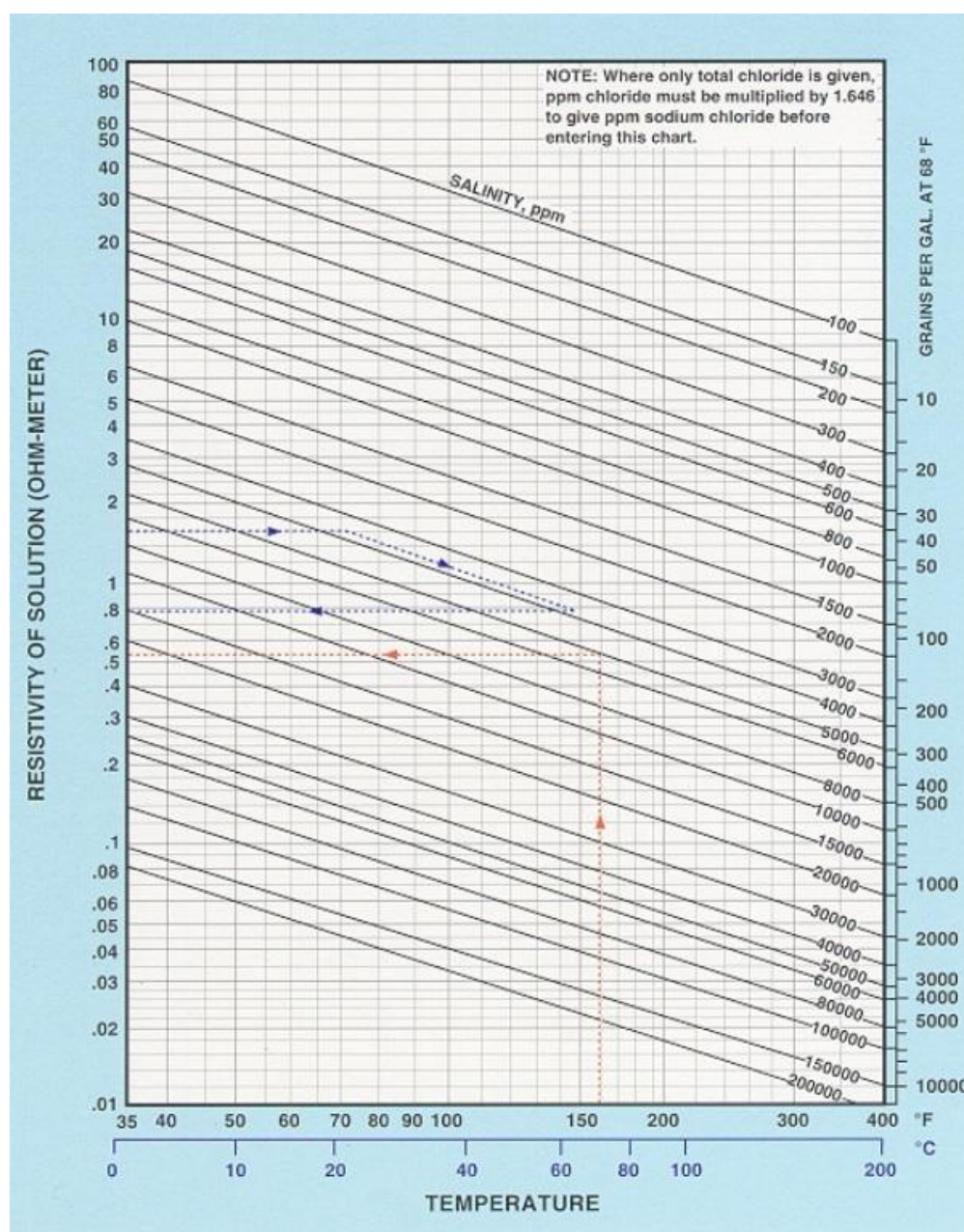
As quantidades de NaCl adicionadas foram calculadas com base nas informações do gráfico da figura 7 e no volume dos corpos de prova utilizados. Os valores estão explicitados na tabela 4:

Tabela 4: Dosagem das soluções de NaCl para calibração do equipamento

Resistividade da solução	Volume recipiente (dm <sup>3</sup> )	Concentração (mg/L)	Quantidade de NaCl (mg)
$\rho = 10 \Omega.m$	1,57	400	628
$\rho = 5 \Omega.m$		900	1413
$\rho = 1 \Omega.m$		5000	7850

(fonte: elaborado pelo autor)

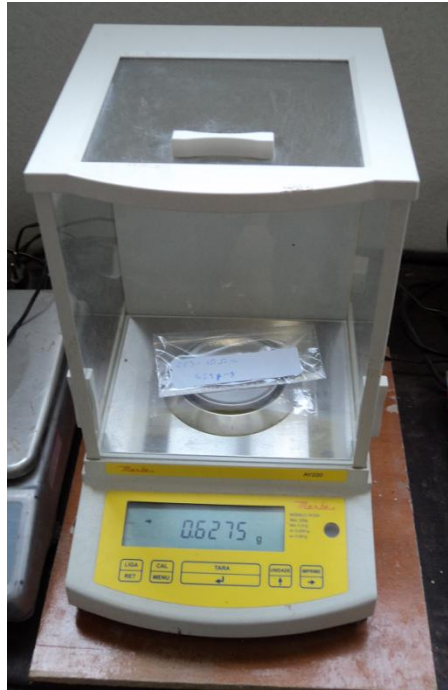
Figura 12 – Resistividade de soluções de NaCl



(fonte: TUCKER ENERGY, 2012)

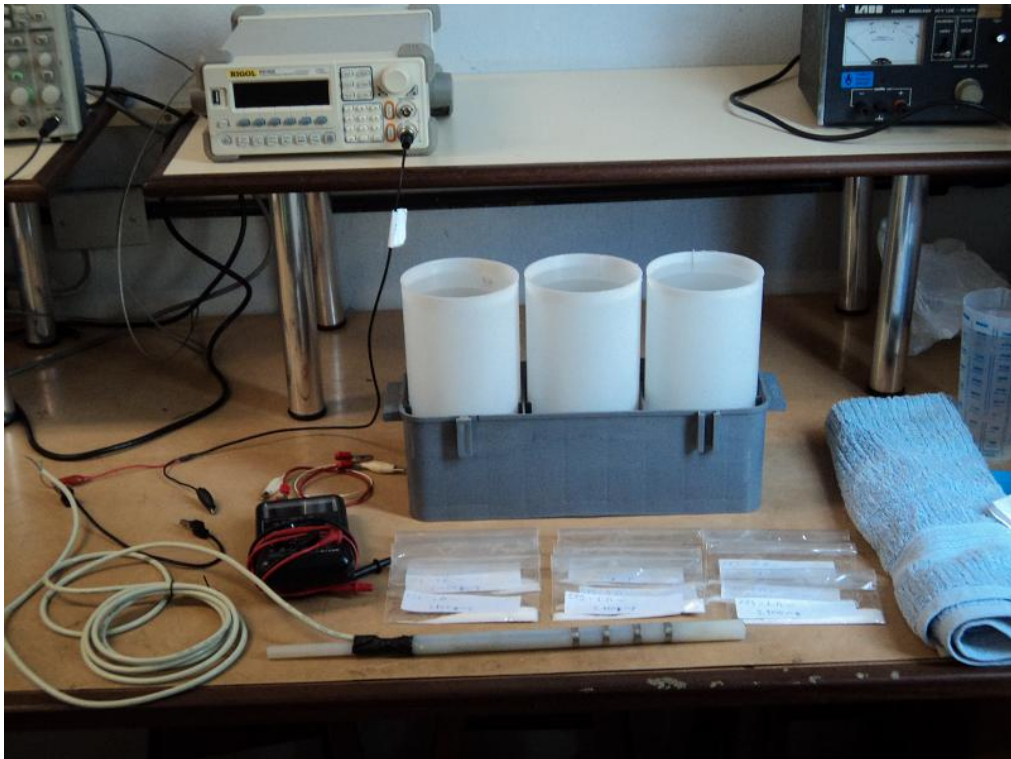
As quantidades de sal foram determinadas com o auxílio de uma balança de precisão e separadas em pequenas embalagens plásticas devidamente identificadas. Para os ensaios, procedeu-se a colocação de água nos corpos de prova plásticos e após a adição do cloreto de sódio para a resistividade de 10  $\Omega$ -m inicialmente, por ser a solução que exigia a menor quantidade de NaCl. Após os ensaios realizados para a solução de 10  $\Omega$ -m, foram adicionadas as quantidades de cloreto de sódio necessárias para se obter a concentração das soluções com resistividade de 5  $\Omega$ -m e 1  $\Omega$ -m e as soluções foram ensaiadas novamente.

Figura 13 – Pesagem de NaCl para ensaios de calibração do equipamento



(fonte: foto do autor)

Figura 14 – aparelhos e equipamentos utilizados nos ensaios de calibração do equipamento



(fonte: foto do autor)

### 5.1.2 Resultados dos ensaios de calibração e análise

Na tabela à seguir estão explicitados os resultados obtidos nos ensaios de calibração do equipamento com soluções de cloreto de sódio para verificação empírica do fator geométrico do equipamento:

Tabela 5: Resultados dos ensaios de calibração do equipamento

$\rho_s$ ( $\Omega.m$ )	k1	k2	k3	$\rho_{s1}$	$\rho_{s2}$	$\rho_{s3}$
10,00	0,3010	0,2942	0,3018	10,43	10,67	10,41
5,00	0,2823	0,2790	0,2868	5,56	5,63	5,47
1,00	0,2911	0,2889	0,2879	1,08	1,09	1,09
Fator geométrico médio =					0,2903	
Desvio em relação à determinação teórica =					7,54%	

(fonte: elaborado pelo autor)

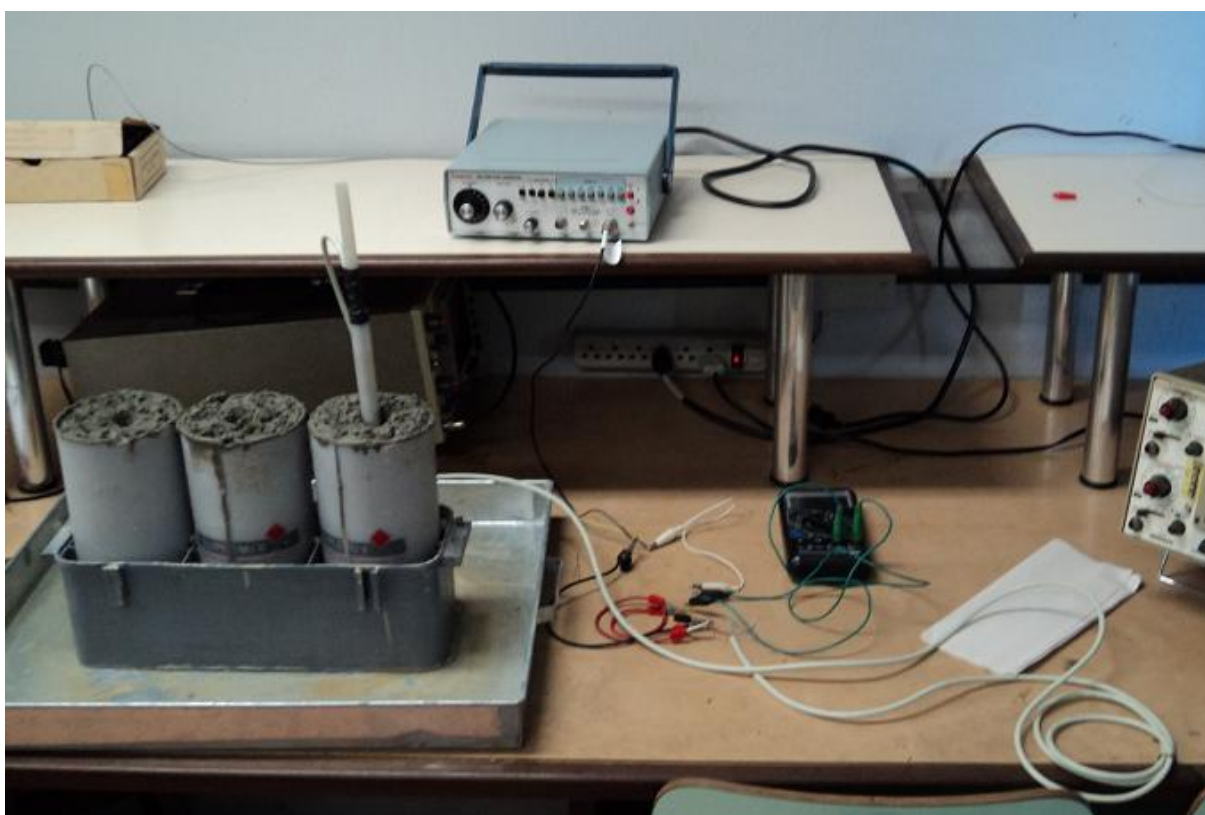
Nove soluções foram dosadas para a determinação do valor do fator geométrico. O valor médio para k encontrado foi de 0,2903, resultando em um valor 7,54% menor do que o valor teórico de 0,314 previamente calculado. É válido lembrar que o fator geométrico k é uma constante dependente somente da geometria do equipamento, e precisa ser determinado apenas uma vez, no estágio de desenvolvimento do aparelho.

## 5.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA DE CONCRETOS

As amostras dos concretos utilizados foram dosadas e adensadas no laboratório do Norie, colocadas nos corpos de prova cilíndricos plásticos e então transportadas para uma sala de estudos para alunos da Engenharia Elétrica que possuía todos os equipamentos necessários para a montagem do circuito e realização dos ensaios de resistividade elétrica, onde foram ensaiadas com a sonda em intervalos de 10 minutos durante um período de 1 hora e 40 minutos. Todos os ensaios foram realizados utilizando o aparelho descrito anteriormente. Alguns dos traços ensaiados sofreram alterações na quantidade de água utilizada na dosagem. Essas alterações ocorreram com o objetivo de manter os valores do abatimento de tronco de

cone do concreto o mais próximo possível dos valores determinados pelo estudo de dosagem realizado. Mesmo que essas alterações tenham impossibilitado a comparação do comportamento da resistividade elétrica para dosagens semelhantes de concretos (somente com tipo de cimento utilizado diferente) os usos de concretos mais trabalváveis possibilitou uma melhor inserção do equipamento nas amostras ensaiadas. O material plástico (barras de nylon) utilizado na confecção do equipamento não tem rigidez suficiente para permitir a inserção do equipamento em misturas muito densas.

Figura 15 – realização dos ensaios de resistividade elétrica em concretos



(fonte: foto do autor)

As tabelas a seguir explicitam os traços dos concretos ensaiados após a alteração da quantidade de água dos traços e os resultados obtidos nos ensaios, bem como as quantidades de material utilizadas e os valores do *slump test* obtidos.

Tabela 6 – Traços dos concretos utilizados nos ensaios com cimento CP IV – 32

Dosagem (traço)	TRAÇO				Qtide de material (kg/m <sup>3</sup> )					slump (cm)
	cim	a	p	m	cim	a	p	água	a/c	
1:3,5	1	1,48	2,02	3,5	9,90	14,65	20,00	4,11 (-440 ml)	0,42	13,5
1:5,0	1	2,3	2,7	5,0	7,41	17,04	20,00	4,07	0,55	9,5
1:6,5	1	3,13	3,37	6,5	5,93	18,58	20,00	4,58 (+540 ml)	0,77	9,0

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 7 – Traços dos concretos utilizados nos ensaios com cimento CP V – ARI

Dosagem (traço)	TRAÇO				Qtide de material (kg/m <sup>3</sup> )					slump (cm)
	cim	a	p	m	cim	a	p	água	a/c	
1:3,5	1	1,48	2,02	3,5	9,90	14,65	20,00	4,35 (-200 ml)	0,44	12,0
1:5,0	1	2,3	2,7	5,0	7,41	17,04	20,00	4,07	0,55	8,5
1:6,5	1	3,13	3,37	6,5	5,93	18,58	20,00	4,04	0,68	7,0

(fonte: elaborado pelo autor)

A sequência de tabelas a seguir registra os valores obtidos nos ensaios de resistividade elétrica nos concretos durante o intervalo de tempo definido. Foram efetuadas medições das quedas de tensões no resistor conhecido ( $V_o$ ) e nos concretos, medidos através dos eletrodos centrais do equipamento ( $V$ ). Os valores medidos foram aplicados na fórmula 3 para se obter os dados da resistividade elétrica dos concretos. As tabelas com os resultados estão colocadas na ordem em que os concretos foram ensaiados. Na primeira série de medições, realizadas com o CP IV – 32 para o traço de 1:3,5, os ensaios foram realizados somente por uma hora e meia, e os ensaios no CP3 somente durante uma hora e 10 minutos. Isso aconteceu porque após esse tempo as amostras de concreto começaram a entrar em pega, impossibilitando a inserção da sonda nos corpos de prova.

Tabela 8 – Dados dos ensaios com traço 1:3,5 com cimento CP IV – 32

Tempo do Ensaio	CP1		CP2		CP3	
	Vo	V	Vo	V	Vo	V
00:00:00	0,141	0,018	0,141	0,017	0,141	0,018
00:10:00	0,143	0,016	0,145	0,016	0,145	0,016
00:20:00	0,143	0,018	0,143	0,018	0,143	0,018
00:30:00	0,144	0,018	0,144	0,017	0,144	0,018
00:40:00	0,145	0,017	0,146	0,017	0,145	0,018
00:50:00	0,133	0,016	0,127	0,017	0,038	0,007
01:00:00	0,149	0,007	0,149	0,014	0,144	0,014
01:10:00	0,150	0,019	0,150	0,018	0,136	0,017
01:20:00	0,132	0,018	0,152	0,017	Dados não coletados	
01:30:00	0,150	0,018	0,151	0,017		
Desv. padrão =	0,0064	0,0035	0,0072	0,0011	0,0371	0,0038
M + 2*DP =	0,156	0,023	0,159	0,019	0,204	0,023
M - 2*DP =	0,130	0,010	0,130	0,015	0,055	0,008
Média =	0,1430	0,0165	0,1468	0,0171	0,1426	0,0170

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 9 – Dados dos ensaios com traço 1:5,0 com cimento CP IV – 32

Tempo do Ensaio	CP1		CP2		CP3	
	Vo	V	Vo	V	Vo	V
00:00:00	0,142	0,016	0,142	0,016	0,143	0,016
00:10:00	0,145	0,020	0,146	0,020	0,146	0,021
00:20:00	0,148	0,021	0,148	0,020	0,148	0,021
00:30:00	0,149	0,022	0,150	0,022	0,150	0,023
00:40:00	0,150	0,018	0,151	0,018	0,151	0,018
00:50:00	0,151	0,018	0,152	0,017	0,151	0,017
01:00:00	0,152	0,018	0,152	0,017	0,152	0,018
01:10:00	0,152	0,018	0,153	0,017	0,153	0,017
01:20:00	0,152	0,017	0,152	0,017	0,152	0,017
01:30:00	0,153	0,017	0,153	0,017	0,153	0,017
01:40:00	0,152	0,017	0,153	0,017	0,152	0,018
Desv. padrão =	0,0034	0,0019	0,0035	0,0018	0,0032	0,0022
M + 2*DP =	0,157	0,022	0,157	0,022	0,156	0,023
M - 2*DP =	0,143	0,015	0,143	0,014	0,144	0,014
Média =	0,1504	0,0184	0,1509	0,0180	0,1508	0,0185

(fonte: elaborado pelo autor)



Tabela 10 – Dados dos ensaios com traço 1:6,5 com cimento CP IV – 32

Tempo do Ensaio	CP1		CP2		CP3	
	Vo	V	Vo	V	Vo	V
00:00:00	0,158	0,015	0,157	0,015	0,157	0,015
00:10:00	0,159	0,016	0,159	0,016	0,159	0,016
00:20:00	0,161	0,028	0,161	0,027	0,161	0,027
00:30:00	0,160	0,027	0,162	0,027	0,162	0,027
00:40:00	0,160	0,024	0,161	0,024	0,160	0,025
00:50:00	0,163	0,026	0,163	0,026	0,163	0,027
01:00:00	0,163	0,027	0,163	0,027	0,163	0,027
01:10:00	0,161	0,024	0,165	0,024	0,165	0,024
01:20:00	0,168	0,024	0,167	0,025	0,168	0,024
01:30:00	0,171	0,019	0,172	0,019	0,172	0,019
01:40:00	0,170	0,014	0,170	0,016	0,170	0,015
Desv. padrão =	0,0045	0,0052	0,0045	0,0049	0,0047	0,0051
M + 2*DP =	0,172	0,033	0,173	0,032	0,173	0,033
M - 2*DP =	0,154	0,012	0,155	0,013	0,154	0,012
Média =	0,1631	0,0222	0,1636	0,0224	0,1636	0,0224

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 11 – Dados dos ensaios com traço 1:3,5 com cimento CP V – ARI

Tempo do Ensaio	CP1		CP2		CP3	
	Vo	V	Vo	V	Vo	V
00:00:00	0,171	0,008	0,171	0,008	0,171	0,008
00:10:00	0,161	0,013	0,161	0,013	0,161	0,013
00:20:00	0,165	0,014	0,164	0,013	0,162	0,014
00:30:00	0,160	0,014	0,160	0,014	0,160	0,014
00:40:00	0,166	0,014	0,168	0,014	0,168	0,014
00:50:00	0,161	0,013	0,162	0,014	0,162	0,013
01:00:00	0,162	0,014	0,163	0,015	0,163	0,015
01:10:00	0,161	0,014	0,163	0,013	0,163	0,013
01:20:00	0,161	0,014	0,162	0,014	0,160	0,015
01:30:00	0,163	0,014	0,159	0,014	0,162	0,014
01:40:00	0,168	0,014	0,169	0,015	0,167	0,015
Desv. padrão =	0,0035	0,0018	0,0039	0,0019	0,0036	0,0020
M + 2*DP =	0,171	0,017	0,172	0,017	0,171	0,017
M - 2*DP =	0,156	0,010	0,156	0,010	0,156	0,010
Média =	0,1635	0,0138	0,1638	0,0126	0,1635	0,0140

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 12 – dados dos ensaios com traço 1:5,0 com cimento CP V – ARI

Tempo do Ensaio	CP1		CP2		CP3	
	Vo	V	Vo	V	Vo	V
00:00:00	0,168	0,016	0,168	0,017	0,168	0,016
00:10:00	0,158	0,016	0,158	0,015	0,159	0,015
00:20:00	0,157	0,018	0,159	0,017	0,159	0,016
00:30:00	0,159	0,018	0,160	0,018	0,160	0,017
00:40:00	0,157	0,016	0,159	0,016	0,160	0,015
00:50:00	0,159	0,016	0,160	0,015	0,160	0,015
01:00:00	0,159	0,015	0,160	0,015	0,160	0,015
01:10:00	0,159	0,016	0,157	0,016	0,160	0,015
01:20:00	0,156	0,016	0,159	0,015	0,159	0,015
01:30:00	0,160	0,017	0,160	0,016	0,161	0,016
01:40:00	0,153	0,017	0,160	0,017	0,161	0,017
Desv. padrão =	0,0037	0,0009	0,0028	0,0010	0,0025	0,0008
M + 2*DP =	0,166	0,018	0,166	0,018	0,166	0,017
M - 2*DP =	0,151	0,015	0,154	0,014	0,156	0,014
Média =	0,1577	0,0165	0,1592	0,0161	0,1599	0,0172

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 13 – Dados dos ensaios com traço 1:6,5 com cimento CP V – ARI

Tempo do Ensaio	CP1		CP2		CP3	
	Vo	V	Vo	V	Vo	V
00:00:00	0,151	0,032	0,152	0,027	0,151	0,026
00:10:00	0,152	0,022	0,152	0,021	0,152	0,022
00:20:00	0,153	0,020	0,154	0,019	0,153	0,020
00:30:00	0,154	0,019	0,155	0,020	0,155	0,019
00:40:00	0,154	0,021	0,155	0,021	0,155	0,020
00:50:00	0,153	0,020	0,155	0,021	0,157	0,020
01:00:00	0,156	0,022	0,156	0,019	0,157	0,021
01:10:00	0,156	0,021	0,148	0,018	0,151	0,020
01:20:00	0,156	0,020	0,155	0,020	0,151	0,020
01:30:00	0,149	0,020	0,161	0,019	0,161	0,020
01:40:00	0,152	0,026	0,161	0,025	0,163	0,025
Desv. padrão =	0,0022	0,0038	0,0038	0,0027	0,0041	0,0023
M + 2*DP =	0,158	0,030	0,162	0,026	0,163	0,026
M - 2*DP =	0,149	0,015	0,147	0,015	0,147	0,017
Média =	0,1533	0,0211	0,1549	0,0185	0,1551	0,0212

(fonte: elaborado pelo autor)

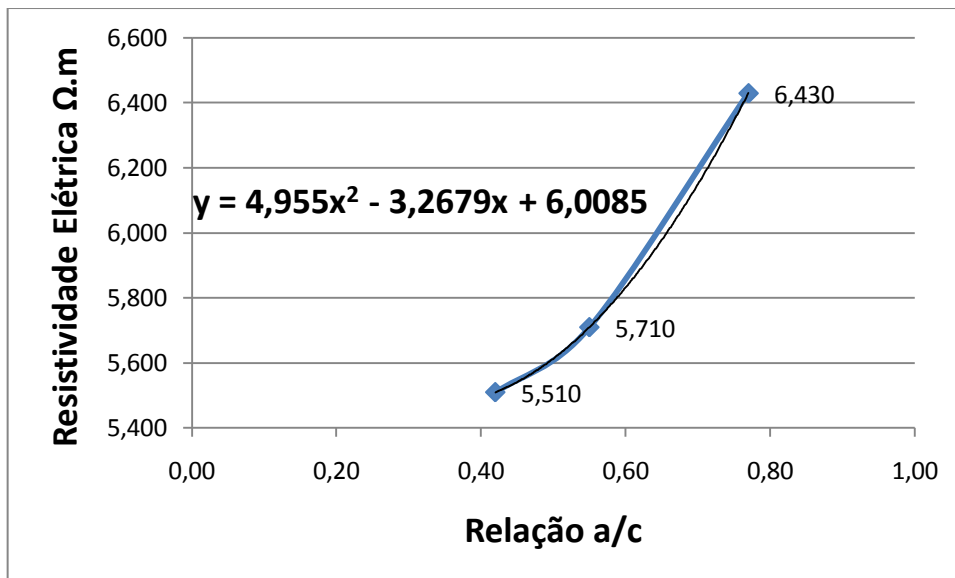
Os dados de todos os ensaios foram tratados estatisticamente, sendo considerados para o cálculo do valor médio da resistividade somente os dados de  $V_o$  e  $V$  que ficaram até dois desvios padrões distante da média dos valores.

Tabela 14 – Ensaio com cimento CP IV – 32

Relação a/c	$V_o$ médio	$V$ médio	$\rho_s$ médio
0,42	0,1441	0,0169	5,510
0,55	0,1507	0,0183	5,710
0,77	0,1635	0,0223	6,430

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 16 – Relação a/c x resistividade elétrica dos ensaios com cimento CP IV – 32



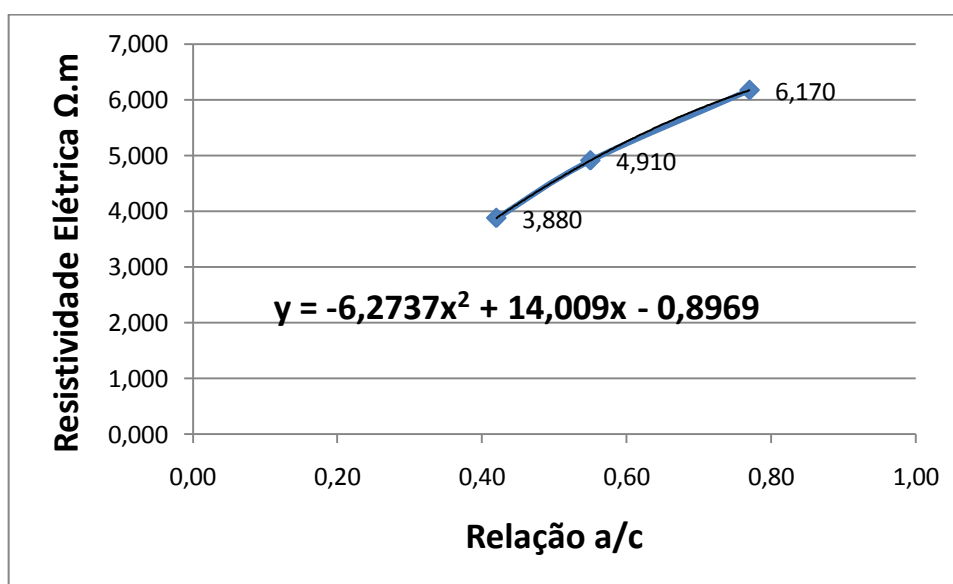
(fonte: foto do autor)

Tabela 15 – Ensaio com cimento CP V – ARI

Relação a/c	$V_o$ médio	$V$ médio	$\rho_s$ médio
0,44	0,1636	0,0135	3,880
0,55	0,1589	0,0166	4,910
0,68	0,1544	0,0202	6,170

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 17 – Relação a/c x resistividade elétrica dos ensaios com cimento CP V – ARI



(fonte: foto do autor)

Cabe salientar que, tanto para os ensaios de calibração quanto para os ensaios com concretos, as medições da queda de tensão no resistor conhecido e nos eletrodos centrais do equipamento foram realizadas com apenas um voltímetro e, portanto, em momentos diferentes. Outro fator que deve ser ressaltado é que, mesmo quando estáveis, após a inserção da sonda nas soluções, as medições da queda de tensão sofreram leves flutuações nos seus resultados, na ordem de milivolts, cabendo ao autor escolher o resultado que seria utilizado. Essas variações foram sempre entre dois valores próximos, não acarretando, entretanto, uma grande margem de erro na escolha de um ou de outro.

Como dito anteriormente, juntamente com a moldagem dos corpos de prova plásticos foram moldados corpos de prova cilíndricos para rompimento por compressão. Os valores obtidos nos ensaios à compressão compõem as tabelas 16 e 17. As figuras 18 e 19 apresentam os gráficos da correlação entre a relação água/cimento e a resistividade elétrica; e a relação água/cimento e a resistência à compressão. Nestas figuras os valores da resistência à compressão foram utilizados como negativos somente para melhorar a apresentação do gráfico.

Tabela 16 – Ensaio de resistência à compressão do concretos com CP IV – 32

Amostra	Traço		
	1 : 3,5	1 : 5,0	1 : 6,5
CP 1	14,00	20,60	32,40
CP 2	12,30	21,40	32,10
CP 3	13,20	21,70	33,00
Média =	13,17	21,23	32,50

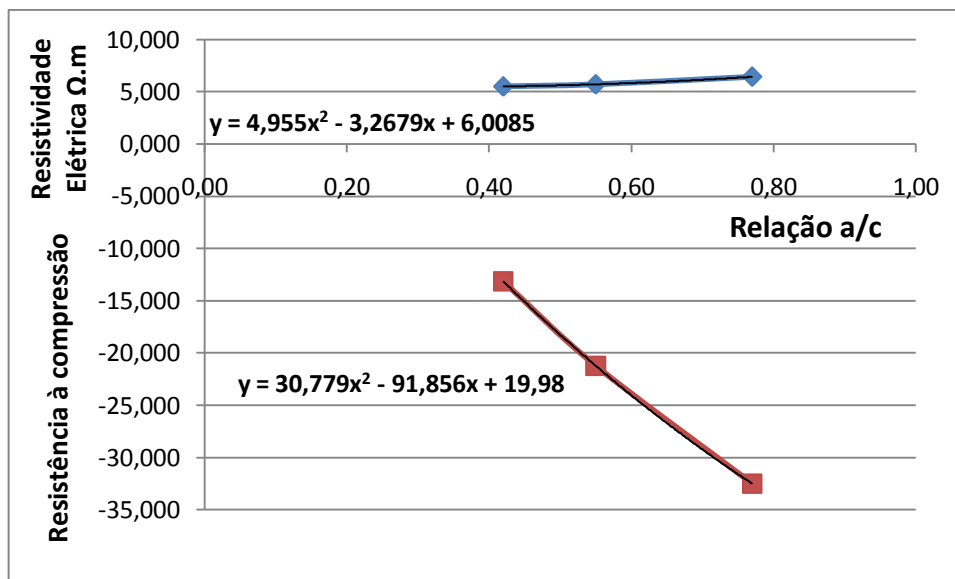
(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 17 – Ensaio de resistência à compressão de concretos com CP V – ARI

Amostra	Traço		
	1 : 3,5	1 : 5,0	1 : 6,5
CP 1	46,40	34,30	23,60
CP 2	45,20	34,80	24,70
CP 3	42,20	33,60	23,60
Média =	44,60	34,23	23,97

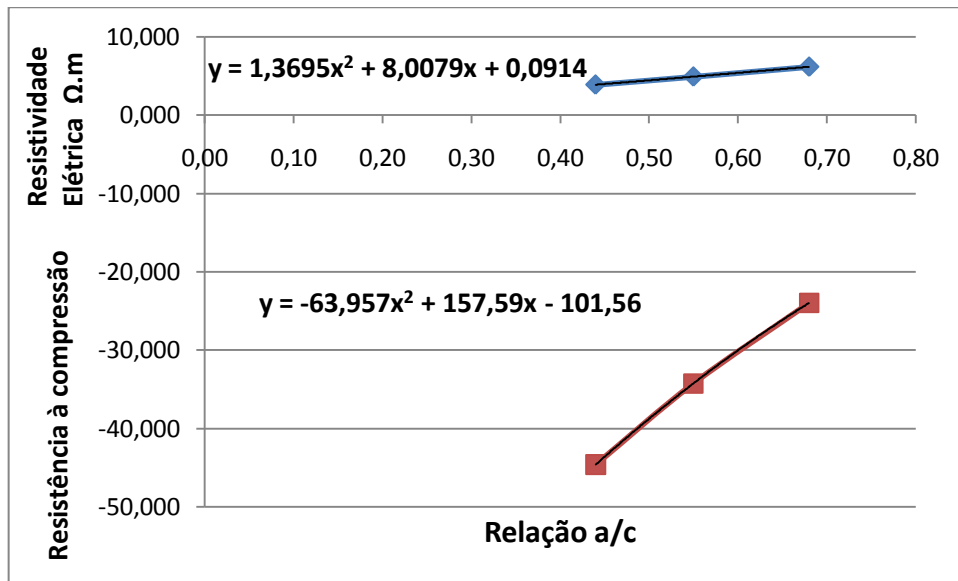
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 18 – Correlação entre relação a/c x resistividade elétrica e relação a/c x resistência à compressão dos ensaios com CP IV – 32



(fonte: foto do autor)

Figura 19 – Correlação entre relação a/c x resistividade elétrica e relação a/c x resistência à compressão dos ensaios com CP V – ARI



(fonte: foto do autor)

### 5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES

Um equipamento foi construído para a realização dos ensaios de resistividade elétrica em concretos no estado fresco. Após a determinação teórica e empírica do fator geométrico, ensaios foram realizados em amostras de concreto fresco com dois tipos de cimento e diferentes relações água/cimento.

Os ensaios de calibração para verificação empírica do fator geométrico da sonda foram feitos com soluções de cloreto de sódio com concentrações e resistividades elétricas controladas. Os resultados apontaram para um fator geométrico médio de 0,2903, o que consiste em um erro de 7,54% com relação ao valor obtido na determinação teórica para a constante (0,314). Esse erro pode ser atribuído a imprecisões nos ensaios da resistividade elétrica do equipamento e ao fato de que os eletrodos foram considerados como fontes pontuais de corrente na determinação teórica do fator geométrico.

Para os ensaios com concretos, a fonte de alimentação utilizada foi um equipamento mais antigo do que o equipamento utilizado nos ensaios de calibração. Na data da realização dos ensaios com concretos a fonte digital que havia sido utilizada anteriormente para os ensaios de calibração não se encontrava disponível no laboratório, sendo necessária a utilização de uma fonte analógica, com regulação manual. Mesmo com o uso de um osciloscópio para a

regulagem do equipamento, podem ter ocorrido pequenos erros na definição da voltagem e frequência fornecida.

Diferentemente da curva obtida para os ensaios com o cimento CP V – ARI, para os ensaios com o cimento CP IV – 32 observa-se uma distorção na curva em relação às obtidas por Mancio et al. (2010) durante os ensaios de desenvolvimento do método da resistividade elétrica. Esta distorção pode ser atribuída à alteração considerável da quantidade de água em dois dos traços ensaiados. Contudo, não podemos afirmar que o gráfico encontrado é incorreto, uma vez que não existem outras pesquisas sobre o comportamento da resistividade elétrica para concretos com o cimento ensaiado.

Foi comprovada a eficácia do método e a existência de uma correlação entre a relação água/cimento e a resistividade elétrica para concretos dosados com os materiais utilizados na região de Porto Alegre. Embora o método da resistividade elétrica não elimine a necessidade de ensaios de abatimento de tronco de cone, pode ser considerado como um método eficaz para a estimativa da resistência à compressão de concretos no estado fresco no momento do recebimento do material em obra.

Observa-se que a resistividade elétrica aumentou com o aumento da relação a/c. Em menores relações água/cimento, as menores resistividades elétricas (ou maiores condutividades) podem ser explicadas por uma maior concentração de íons na solução, enquanto que para uma maior relação água/cimento a maior resistividade elétrica pode ser atribuída a uma menor concentração de íons na solução da mistura. De fato, como foi comprovado por Wei e Li <sup>4</sup> (apud MANCIO et al., 2010), a resistividade elétrica da solução aumenta com o aumento da relação a/c. Todos os testes foram conduzidos antes do tempo de pega do concreto e demonstraram uma consistência de resultados razoável. As descobertas mais importantes do estudo foram:

- 1) a resistividade elétrica do concreto pode ser utilizada para determinar a relação água/cimento da mistura;
- 2) concretos dosados com CP IV – 32 apresentam uma resistividade elétrica maior do que os dosados com CP V – ARI;
- 3) o tempo não altera consideravelmente a resistividade elétrica de concretos antes do tempo de pega;

---

<sup>4</sup> WEI, X.; LI, Z. Early Hydratation Processo of Portland Cement paste by Electrical Measurement. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Madison, v. 18, n. 1, p. 99-105, 2006.

- 4) pode-se correlacionar a resistividade elétrica e a resistência à compressão de concretos através da relação água/cimento.

Para futuros estudos, existe uma grande quantidade de possibilidades a serem pesquisadas. Dentre as possibilidades, sugere-se a variação das relações água/cimento para um alcance maior das curvas e equações desenvolvidas; a variação dos tipos de cimento utilizados, ou utilizando cimentos de mesmo tipo e fabricante de lotes diferentes; observação nas variações da resistividade elétrica com a alteração dos agregados utilizados; alterações que o uso de adições e aditivos podem causar; entre outros. Conforme se pode observar nas tabelas com os dados das quedas de tensão medidas, as variações nas quedas de tensão observadas não são significantes enquanto o concreto está no estado fresco. Mesmo assim, sugere-se fortemente a utilização de um laboratório mais próximo do laboratório de dosagem dos concretos, permitindo o ensaio do concreto imediatamente após a mistura dos materiais e durante um período maior de tempo antes do início de pega do concreto. Recomenda-se também a utilização de aparelhos digitais, que permitam uma regulagem e operação mais precisa dos equipamentos durante os ensaios.

O objetivo de futuros estudos deve ser a elaboração das curvas correlacionando a relação água/cimento e a resistividade elétrica, com a finalidade de se estabelecer a correlação entre a resistividade elétrica e a resistência à compressão. O propósito final deve ser o desenvolvimento de um equipamento que possa ser facilmente levado para o campo, alimentado por uma bateria que forneça a corrente e calcule internamente a resistividade elétrica do concreto e retorne informações sobre a relação água/cimento e a resistência à compressão.



## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 68**: concreto – determinação da consistência pelo espalhamento na mesa de Graff. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738**: procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2003.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NM 33**: concreto – amostragem de concreto fresco – procedimento. Rio de Janeiro, 1998.

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

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

BAUER, E.; KRAUSS, E.; MOTA, N. M. B.; COSTA, C. M. C.; PEREIRA, M. S. Discussão da Variabilidade do Concreto e dos Estimadores da Resistência Característica – estudo de caso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49., 2007, Bento Gonçalves. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2007. p. 1-16.

BARBOSA, F. R.; MOTA, J. M. F.; COSTA E SILVA, A. J.; OLIVEIRA, R. A. Análise da influência do capeamento de corpos de prova cilíndricos na resistência à compressão do concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 51., 2009, Curitiba. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2009. P. 1-16.

CHIES, J. A. **Corpos de prova submetidos à compressão**: influência do tipo de preparação das faces para diferentes níveis de resistência do concreto. 2011. 87 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia) – Curso de Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

CORDEIRO, L. N. P. Publicação eletrônica [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <mateus.degaspari@gmail.com> em 28 nov. 2012.

DEWAR, J. D.; ANDERSON, R. **Manual of Ready-Mixed Concrete**. 2nd ed. London: Chapman & Hall, 1992.

FARIA, R. Análise concreta : para professor, atendimento do fck de projeto não deve ser visto isoladamente. **Revista Técnica**, São Paulo: Pini, ano 17, n. 152, p. 22-27, nov. 2009.

FERNANDES, M. C. **Influência da retificação de superfícies de corpos de prova na variabilidade da resistência à compressão no controle tecnológico de 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**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1993.

MANCIO, M.; MOORE, J. R.; BROOKS, Z.; MONTEIRO, P. J. M., GLASER, S. D. Instantaneous In-Situ Determination of Water-Cement Ratio of Fresh Concrete. **ACI Materials Journal**, Farmington Hills, v. 107, n. 6, p. 586-592, Nov.-Dec. 2010.

MASCOLO, R. **Concreto Usinado**: análise da variabilidade da resistência à compressão e de propriedades físicas ao longo do caminhão betoneira. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: estrutura, propriedade e materiais. 1. ed. São Paulo: Pini, 1994.

\_\_\_\_\_. **Concrete**: Microstructure, Properties and Materials. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2006.

NEVILLE, A.M. How Useful is the Water-Cement Ratio? **ACI Materials Journal**, Farmington Hills, v. 21, n. 9, p. 69-70, Sep. 1999.

\_\_\_\_\_. **Propriedades do Concreto**. São Paulo: Pini, 1997.

TUCKER ENERGY SERVICES. [Resistivity of NaCl Solutions]. Disponível em <[http://www.tuckerenergy.com/Services/Tucker\\_chartbook/general/resistivity\\_of\\_NaCl.htm](http://www.tuckerenergy.com/Services/Tucker_chartbook/general/resistivity_of_NaCl.htm)> . Acesso em: 12 out. 2012.