

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS E CONSTRUÇÃO

**OS EFEITOS DA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA NAS MEDIDAS DE
RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL DO CONCRETO**

Autora: Letícia Couto de Aguiar
Orientador: Prof. Dr. Adriano de Paula e Silva
Coorientador: Prof. Dr. Enio José Pazini Figueiredo

Belo Horizonte
Setembro/2018

Letícia Couto de Aguiar

**OS EFEITOS DA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA NAS MEDIDAS DE
RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL DO CONCRETO**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Construção Civil. Área de concentração: Tecnologia na Construção Civil. Linha de pesquisa: Materiais de Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Adriano de Paula e Silva
Coorientador: Prof. Dr. Enio José Pazini Figueiredo

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2018

Letícia Couto de Aguiar

**OS EFEITOS DA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA NAS MEDIDAS DE
RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL DO CONCRETO**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Construção Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Construção Civil do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

Belo Horizonte, 10 de setembro de 2018.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Adriano de Paula e Silva
Orientador - UFMG/DEMC

Prof. Dr. Enio José Pazini Figueiredo
Coorientador - UFG/EECA

Prof. Dr. Luiz Antônio Melgaço Nunes
Branco
UFMG/DEMC

Prof.^a Dra. Maria Teresa Paulino
Aguiar
UFMG/DEMC

Prof. Dr. Augusto César da Silva Bezerra
CEFET-MG/POSMAT

RESUMO

A resistividade elétrica é uma importante propriedade física do concreto, diretamente relacionada com a sua capacidade de oposição à passagem de correntes originárias do processo corrosivo das armaduras. Os estudos relacionados à manutenção e previsão de vida útil das estruturas em concreto armado têm abordado cada vez mais a resistividade como parâmetro de durabilidade e qualidade. Sabe-se que a resistividade depende não só da microestrutura do material, mas também das condições ambientais no entorno da estrutura. Assim, o presente trabalho tem como objetivo analisar as variações da resistividade elétrica superficial do concreto ocasionadas por fatores intrínsecos e extrínsecos, com foco nas alterações ocasionadas pela mudança da temperatura. Para a realização do estudo foram realizadas três etapas experimentais. Na primeira etapa foram estudadas as mudanças que ocorrem ao longo da cura e em decorrência de diferentes relações água/cimento. Na segunda etapa foram avaliadas as variações que ocorrem normalmente nos valores de resistividade do concreto ao longo de diferentes horas do dia em uma estrutura que se encontra exposta ao meio ambiente. Na terceira etapa foi estudada a influência da temperatura como fator isolado e seu papel como agente causador de alterações na resistividade elétrica superficial do concreto. Os resultados obtidos revelam que a mudança de temperatura pode acarretar em variações expressivas nos valores de resistividade superficial do concreto.

Palavras-chave: Concreto. Resistividade elétrica superficial. Temperatura. Método Wenner.

ABSTRACT

The electrical resistivity is an important physical property of concrete, directly related to its ability to oppose the passage of electric currents, originating from the corrosive process of the reinforcement. Studies related to the maintenance and prediction of service life of structures of reinforced concrete have increasingly addressed resistivity as a parameter of durability and quality. It is known that the resistivity depends not only on the microstructure of the material, but also on the environmental conditions around the structure. Thus, the present work has as objective to analyze the variations of the surface electrical resistivity of concrete caused by intrinsic and extrinsic factors, focusing on the changes caused by the temperature variation. For the accomplishment of the study, three experimental stages were realized. During the first stage were verified the changes that occur along the cure and due to different water / cement ratios. During the second stage the variations that normally occur in the resistivity values of the concrete along different day hours in a structure that is exposed to the environment were evaluated. In the third step, the performance of temperature as an isolated factor was studied, and its role as an agent that causes changes in the surface electrical resistivity of the concrete. The results show that the temperature change can lead to significant variations in the surface resistivity values of the concrete.

Key words: Superficial electrical resistivity. Temperature. Wenner method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Variação da resistividade elétrica ρ em função da temperatura absoluta T (Young, 2009).....	7
Figura 3.2 – Resistividade elétrica x relação água cimento e consumo de cimento Portland comum, ensaiado a 28 dias (Neville, 1997 <i>apud</i> Hoppe, 2005).	11
Figura 3.3 – Efeito do teor do agregado na resistividade elétrica do concreto (Hughes <i>et al.</i> , 1985 <i>apud</i> Hoppe, 2005).....	13
Figura 3.4 – Variação da resistividade elétrica com o aumento do teor de cinza de casca de arroz aos 91 dias (Hoppe, 2005).....	14
Figura 3.5 – Influência da carbonatação na resistividade elétrica do concreto (Chi <i>et al.</i> , 2002).	17
Figura 3.6 – Relação entre o teor de umidade e resistividade elétrica em concretos contaminados com íons cloreto. (Saleem <i>et al.</i> ; 1996).....	18
Figura 3.7 – Efeito do teor de umidade na resistividade elétrica do concreto (Gjørnv <i>et al.</i> ; 1977, <i>apud</i> Hoppe 2005).	20
Figura 3.8 – Relação entre a condutividade e temperatura de diferentes tipos de concreto exposto a um ambiente com 80% de umidade relativa. (Bertolini e Polder, 1997).	22
Figura 3.9 – Esquema de ensaio para obtenção da resistividade volumétrica pelo método dos dois eletrodos. (Gjørnv, 2015).....	24
Figura 3.10 – Esquema elétrico do ensaio para obtenção da resistividade volumétrica pelo método dos três eletrodos, segundo a NBR 9402:2012 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012).	25
Figura 3.11 – Método dos quatro eletrodos para obtenção da resistividade superficial do concreto (Gjørnv, 2015; Gowers e Millard, 1999).....	26
Figura 4.1 - Curva de distribuição granulométrica do agregado miúdo	30
Figura 4.2 – Equipamento utilizado para obtenção das medidas de resistividade elétrica superficial do concreto.	33

Figura 4.3 – Equipamento de ultrassom utilizado.....	34
Figura 4.4 – Câmara de Intemperismo.....	35
Figura 4.5 – a) Corpos de prova após a moldagem; b) Corpos de prova mantidos submersos, separados por série.....	36
Figura 4.6 – Marcações nos corpos de prova feitas a cada 90°.	37
Figura 4.7 – Realização das medições de resistividade elétrica superficial.....	38
Figura 4.8 – Corpos de prova das Séries 1 e 2, secos e submersos com controle da temperatura e expostos ao ambiente externo.	40
Figura 4.9 – Realização de ultrassom nos corpos de prova.	42
Figura 4.10 – Local de armazenamento dos corpos de prova durante 12 meses.....	42
Figura 4.11 – Visor da câmara com a programação do teste de 40°C.	43
Figura 4.12 – Preparo das amostras conforme recomendação AASHTO T358-17.	45
Figura 4.13 – Amostras posicionadas na câmara de intemperismo antes e durante a realização dos testes.	45
Figura 4.14 – Realização das medições de resistividade elétrica superficial.....	46
Figura 5.1 – Valores de Resistividade Obtidos para as Séries S1 e S2.	50
Figura 5.2 – Gráfico Resistividade (kΩ.cm) x Tempo de Cura (dias).....	51
Figura 5.3 – Variação da resistividade elétrica superficial durante o tempo de exposição...	53
Figura 5.4 – Variação da temperatura durante o tempo de exposição.	55
Figura 5.5 – Box Plot com o resultado dos valores de velocidade de pulso ultrassônico. ...	58
Figura 5.6 – Comportamento da resistividade elétrica superficial para 4 horas de exposição a uma temperatura de 5°C.....	62
Figura 5.7 – Comportamento da resistividade elétrica superficial para 4 horas de exposição a uma temperatura de 40°C.....	62
Figura 5.8 – Resistividade Elétrica Superficial x Temperatura.	66
Figura 5.9 – Variação da resistividade por amostra para cada temperatura.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Valores de resistividade elétrica na temperatura de 20 °C (Young, 2009).	7
Tabela 4.1 - Caracterização do cimento.....	29
Tabela 4.2 - Caracterização do agregado miúdo	30
Tabela 4.3 - Caracterização do agregado graúdo	31
Tabela 4.4 - Caracterização dos traços.....	32
Tabela 4.5 - Resumo de variáveis – 1ª Etapa experimental	36
Tabela 4.6 - Resumo de variáveis – 2ª Etapa experimental	39
Tabela 4.7 - Resumo de variáveis – 3ª Etapa experimental	41
Tabela 4.8 – Medições para a determinação experimental do tempo teste.....	44
Tabela 4.9 – Medições para a determinação experimental do tempo de teste.	46
Tabela 5.1 – Resultados dos testes realizados nos dias 3 e 7 após a moldagem.....	48
Tabela 5.2 – Resultados dos testes realizados nos dias 14 e 28 pós a moldagem.	49
Tabela 5.3 – Resultados dos testes de resistividade em ambiente externo.	52
Tabela 5.4 – Valores de temperatura obtidos durante os testes em ambiente externo.	54
Tabela 5.5 – Resultados do ensaio de velocidade de pulso ultrassônico.....	57
Tabela 5.6 – Resultados do ensaio de resistência à compressão axial.....	59
Tabela 5.7 – Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade.	60
Tabela 5.8 – Resultados dos testes de tempo de exposição no interior da câmara de intemperismo nas temperaturas de 5°C e 40°C.	60
Tabela 5.9 – Resultados dos testes de variação de temperatura na câmara de intemperismo.	63
Tabela 5.10 – Valores de resistividade elétrica superficial medidos com a variação de temperatura em cinco níveis.	64
Tabela 5.11 - Comparação de médias, duas a duas, pelo método Turkey.....	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c	relação água/cimento
CPII F-32	Cimento Portland composto com filler. Classe de resistência 32.
CPIII RS-40	Cimento Portland de alto forno. Classe de resistência 40 resistente à sulfatos.
CPIV 32	Cimento Portland pozolânicos. Classe de resistência 32.
CPV – ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial.
CP	Corpo de Prova de concreto
NBR	Norma Brasileira
SI	Sistema Internacional de Unidades
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
LAEEES	Laboratório de Análise Experimental de Estruturas
S1	Série 1 com relação água/cimento de 0,65.
S2	Série 2 com relação água/cimento de 0,55.
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ANOVA	Análise de variância
d.m.s	Diferença mínima significativa

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVO.....	4
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1 Resistividade elétrica.....	5
3.2 Condutividade.....	6
3.3 Resistividade e temperatura.....	7
3.4 Resistividade elétrica no concreto armado.....	8
3.4 Fatores que podem influenciar resistividade elétrica do concreto.....	9
3.4.1 Relação água/cimento.....	10
3.4.2 Tipo de cimento.....	11
3.4.3 Agregados.....	12
3.4.4 Adições minerais e aditivos.....	13
3.4.5 Hidratação do cimento.....	15
3.4.6 Condições de cura.....	16
3.4.7 Carbonatação.....	16
3.4.8 Íons cloreto.....	17
3.4.9 Umidade.....	19
3.4.10 Temperatura.....	21
3.5 Avaliação da resistividade elétrica superficial e volumétrica do concreto.....	23
3.5.1 Método dos dois eletrodos.....	23
3.5.2 Método dos três eletrodos.....	24

3.5.3 Método dos quatro eletrodos (Wenner)	25
4 MATERIAIS E MÉTODOS	28
4.1 Caracterização dos materiais utilizados	29
4.2 Definição dos traços e grupos de ensaio	31
4.4 Equipamento de medição da resistividade superficial	32
4.5 Ensaio de ultrassom no concreto	33
4.6 Ensaio de compressão axial e módulo de elasticidade	34
4.7 Câmara de intemperismo	35
4.8 1ª Etapa experimental	35
4.9 2ª Etapa experimental	39
4.10 3ª Etapa experimental	40
5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	47
5.1 Resultados da 1ª etapa experimental	47
5.2 Resultados da 2ª etapa experimental	51
5.3 Resultados da 3ª etapa experimental	56
6 CONCLUSÕES	69
7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
APÊNDICE A – Resultados 1ª etapa experimental	76
APÊNDICE B – Resultados 2ª etapa experimental	80
APÊNDICE C – Resultados 3ª etapa experimental	85

1 INTRODUÇÃO

Durante muitos anos, a resistência à compressão, tem sido considerada como a principal propriedade do concreto armado, utilizada como parâmetro de sua qualidade. Nos projetos estruturais constavam, além das dimensões das peças e detalhamento das armaduras, apenas a referência a sua resistência à compressão. Destarte, se atendidas as resistências mínimas estipuladas pelo projetista, admitia-se que a estrutura estava adequada.

Com a evolução dos estudos acerca das propriedades do concreto ficou evidente que apenas o valor de resistência à compressão não era uma especificação suficiente para garantir o desempenho adequado da estrutura pelo período desejado. Comumente, depara-se com elementos de concreto armado, excessivamente debilitados, que, apesar de possuírem uma resistência à compressão adequada, apresentam fissuras, destacamentos e armaduras expostas em corrosão, necessitando de procedimentos de intervenção para a reabilitação da estrutura de maneira que ela possa voltar a desempenhar sua função com qualidade e, principalmente, segurança.

Os procedimentos de reabilitação estrutural em concreto armado possuem um valor muito elevado e a sua execução demanda uma logística com alto grau de complexidade, principalmente se o elemento em questão for uma obra de grande porte como uma ponte ou viaduto. Por esta razão, além de um projeto bem executado, o desenvolvimento de um planejamento adequado e a adoção de manutenções periódicas preventivas, revela-se numa medida mais econômica e eficiente para evitar a execução de desmensurados e dispendiosas reabilitações estruturais.

A crescente preocupação para que as estruturas sejam projetadas dentro de parâmetros de referência de vida útil e durabilidade tem originado, na Engenharia Civil, uma notável demanda por estudos técnicos mais aprofundados, voltados para as propriedades microestruturais e para o desempenho otimizado dos elementos

estruturais em concreto armado, considerando suas condições de uso e o meio ambiente no qual estão inseridos.

Qualquer elemento estrutural de concreto armado, por mais robusto que ele seja, terá como região mais vulnerável e, conseqüentemente importante, a camada mais superficial, responsável por fazer a proteção das armaduras contra os agentes agressivos do meio ambiente. O desempenho adequado da camada de cobrimento pode evitar a ocorrência dos tão alardeados processos deletérios que acometem as estruturas em concreto.

A maioria das manifestações patológicas nos elementos em concreto armado, acontece devido à penetração de agentes agressivos pela sua superfície, através da estrutura de poros de sua matriz cimentícia. Quanto maior a porosidade e a interconexão entre estes poros, mais rapidamente estes elementos prejudiciais alcançam as armaduras, diminuindo a vida útil destas estruturas.

Pela lei de Abrams, o volume água colocado na mistura, influencia diretamente a resistência à compressão axial, aumentando a sua porosidade e permeabilidade. Quando considerada a região mais superficial do concreto, a quantidade e interconexão entre os poros do elemento possui relação direta com os parâmetros de durabilidade do material. Deste modo, quanto maior a quantidade de vazios, conexos entre si, no interior do elemento, mais rapidamente penetrarão pelo concreto os agentes agressivos presentes na atmosfera.

A resistividade elétrica é uma propriedade que se encontra associada à porosidade do material analisado, e por isto está diretamente relacionada à durabilidade das estruturas de concreto armado, uma vez que ela determina a capacidade do material de oferecer oposição à passagem de corrente elétrica, essencial aos processos corrosivos deletérios. Assim, a resistividade elétrica do concreto, principalmente em sua camada mais superficial, pode ser considerada um parâmetro de sua susceptibilidade corrosiva, e está associada ao controle e qualidade do concreto.

A grande importância do estudo da resistividade elétrica para o ramo da Engenharia Civil, que estuda as estruturas de concreto e a sua durabilidade, é que os ensaios realizados em campo são rápidos, não destrutivos e possuem baixo custo, embora a análise para resultados deva ser feita de forma criteriosa.

Diferentes autores já publicaram trabalhos afirmando a importância dos estudos da resistividade elétrica. Polder (2001), afirma que a resistividade elétrica está relacionada com os principais estágios de vida útil de uma estrutura de concreto, uma vez que está associada ao transporte de agentes agressivos pelo material. Considerando uma mesma estrutura, os pontos com resistividade mais baixa, indicam onde a penetração destes agentes ocorre mais rapidamente. Hornbostel et al. (2013), reitera que a resistividade elétrica do concreto é vista como um dos parâmetros mais importantes para avaliar a corrosão do aço no interior do concreto.

Faz-se importante destacar que, no entanto, a resistividade é um parâmetro extremamente sensível e pode sofrer influência de diferentes fatores, inerentes ao próprio concreto ou ao meio no qual se encontra situado.

Este estudo busca através de três etapas experimentais analisar como os fatores intrínsecos e extrínsecos afetam as medidas de resistividade elétrica superficial do concreto, sendo o principal foco da pesquisa as variações de temperatura. Pretende-se analisar a camada mais externa por ser ela a de maior relevância na proteção das armaduras.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é entender de que forma a variação dos valores de temperatura do meio no qual o concreto está inserido influencia as suas medidas de resistividade elétrica superficial.

2.1 Objetivos específicos

São objetivos específicos desta pesquisa:

- Analisar o comportamento da elétrica superficial ao longo da cura do concreto.
- Avaliar a influência da relação água/cimento na resistividade elétrica superficial de concretos.
- Medir os valores de resistividade elétrica superficial de concretos expostos em ambiente fora de laboratório, em intervalos determinados de tempo, para acompanhar a tendência das alterações ao longo do dia em função da temperatura.
- Avaliar a influência da temperatura na resistividade elétrica superficial do concreto.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Resistividade elétrica

A resistividade elétrica é uma grandeza física que representa uma propriedade inerente a um determinado material. A resistividade ρ pode ser definida através da razão entre o campo elétrico e a densidade da corrente (Giroto e Santos, 2002). As unidades de resistividade elétrica pelo Sistema Internacional de Unidades (SI) são $\Omega.m$ (*ohm* vezes metro).

$$\rho = \frac{E}{J} \quad \text{Equação (3.1)}$$

Sendo: E = Diferença de potencial.

J = Intensidade da corrente.

Para certos materiais, em uma temperatura estabelecida, pode-se dizer que a densidade da corrente é quase diretamente proporcional ao campo elétrico, fazendo com que a razão entre (E) e (J) permaneça constante. Essa relação é denominada Lei de Ohm (Young, 2009). Os materiais que se comportam de acordo com essa lei são denominados condutores ôhmicos.

Considerando um material isotrópico, com características ôhmicas, é possível definir a resistência entre dois pontos através da aplicação de uma diferença de potencial (V) entre os pontos e medindo a corrente elétrica (i) que flui entre eles (Giroto e Santos, 2002).

$$R = \frac{V}{i} \quad \text{Equação (3.2)}$$

A resistência e a resistividade elétrica de um material podem ser relacionadas:

$$R = \frac{\rho \cdot L}{A} \quad \text{Equação (3.3)}$$

Sendo: R = Resistência.
 ρ = Resistividade elétrica.
 L = comprimento.
 A = Área da seção (reta e uniforme).

Assim, conclui-se que quanto maior a resistividade de um material maior será a resistência por ele oferecida à passagem de determinada corrente elétrica (Vilatte, 2012). Em outros termos, a resistividade elétrica de um material demonstra a sua capacidade de oposição à passagem de uma corrente elétrica.

3.2 Condutividade Elétrica

A condutividade também é uma grandeza física e pode ser definida como o inverso da resistividade elétrica (Giroto e Santos, 2002).

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad \text{Equação (3.4)}$$

Sendo: σ = Condutividade.
 ρ = Resistividade elétrica.

Os materiais podem ser classificados de acordo com a sua condutividade. Os metais e ligas metálicas geralmente são bons condutores de corrente apresentando, assim, menor resistividade elétrica. Os materiais isolantes se comportam de maneira inversa aos condutores, apresentando baixa capacidade condutiva e resistividade muito elevada, chegando a ser aproximadamente 10^{22} maior do que a do condutor. Aquele material cuja resistividade elétrica, bem como a capacidade condutiva, se encontram em um patamar intermediário entre condutores e isolantes são determinados semicondutores. (Giroto e Santos, 2002).

A tabela 3.1, exposta a seguir, indica alguns valores de resistividade elétrica em temperatura ambiente para diferentes substâncias.

Tabela 3.1 – Valores de resistividade elétrica na temperatura de 20 °C (Young, 2009).

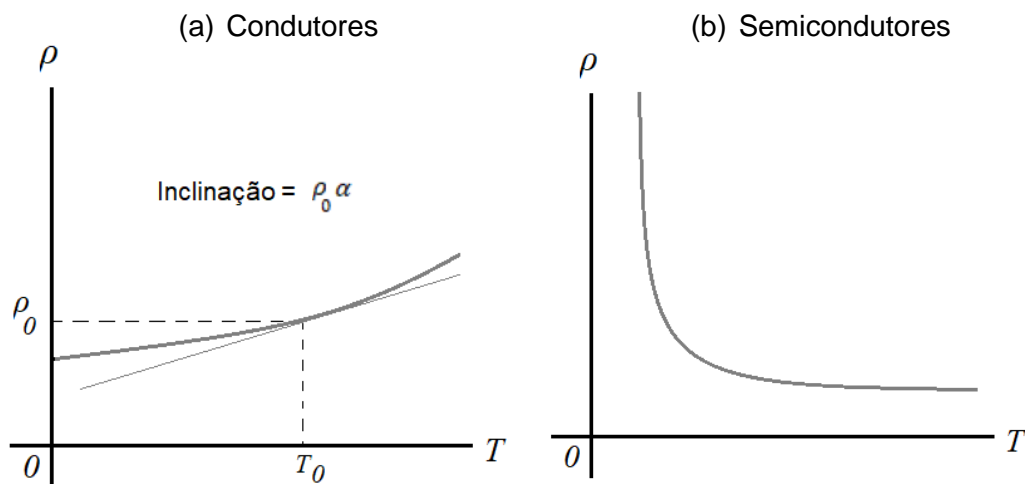
	Substância	ρ ($\Omega.m$)
Condutores	Cobre	$1,72 \times 10^{-8}$
	Alumínio	$2,75 \times 10^{-8}$
	Aço	$20,0 \times 10^{-8}$
Semicondutores	Carbono puro (Grafita)	$3,5 \times 10^{-5}$
	Germânio puro	0,60
	Silício puro	2300
Isolantes	Vidro	$10^{10} - 10^{14}$
	Madeira	$10^8 - 10^{11}$

3.3 Resistividade e temperatura

A classificação dos materiais em função de sua condutividade revela-se muito importante quando avaliado seu comportamento diante da variação de temperatura. Isto ocorre porque o desempenho de condutores e semicondutores em função de uma variação térmica ocorre de maneira muito diferente.

A variação da resistividade elétrica em função da temperatura para um condutor (metal normal) e um semicondutor é dada pelos seguintes gráficos, apresentados na figura 3.1.

Figura 3.1 – Variação da resistividade elétrica ρ em função da temperatura absoluta T (Young, 2009).



A análise dos gráficos permite constatar que condutores – metais comuns (a) e semicondutores (b) podem se comportar de maneira inversa. Para um metal normal a resistividade aumenta à medida que a temperatura também aumenta e para um semicondutor a resistividade diminui à medida que a temperatura aumenta.

Este fenômeno pode ser explicado da seguinte forma, segundo Young (2009). Nos condutores comuns (metais), à medida que a temperatura aumenta os íons vibram com amplitude mais elevada aumentando a probabilidade de colisão entre elétrons e íons, dificultando o arraste de elétrons através do condutor diminuindo a corrente. Em se tratando dos semicondutores, a diminuição da resistividade elétrica diminui pois com o aumento da temperatura os elétrons ficam mais fracamente ligados aos átomos e adquirindo maior mobilidade.

3.4 Resistividade elétrica no concreto armado

O concreto, devido aos seus próprios mecanismos de constituição, possui uma microestrutura complexa, formada por uma mescla de componentes sólidos e vazios, onde partículas de agregados de diferentes formas e tamanhos se encontram dispostos na pasta de cimento hidratada. As características microestruturais do concreto dependem diretamente de vários fatores, tais como, o tipo de cimento, qualidade e tamanho dos agregados e principalmente a quantidade de água colocada na mistura. Esta quantidade de água é retratada através da relação água/cimento (a/c) e está linearmente associada com a quantidade e a disposição dos poros no material (Metha e Monteiro, 2003).

O desempenho do concreto é altamente dependente da estrutura distribuição e do tamanho dos poros, principalmente quando considerada a sua durabilidade e resistência à penetração de agentes agressivos. A grande quantidade de vazios ou poros interconectados é extremamente relevante nos mecanismos de transporte no interior do concreto, que por sua vez influenciam diretamente nos fenômenos corrosivos (Ribeiro, 2014).

Como a durabilidade das estruturas de concreto armado está diretamente associada às suas características microestruturais, a resistividade elétrica tornou-se um importante parâmetro de monitoramento da corrosão nas armaduras. Isto ocorre porque a resistividade exerce uma influência direta no processo de corrosão das armaduras, descrevendo o fluxo de corrente entre as regiões do ânodo e do cátodo (Hornbostel et al., 2013).

Existem diversos estudos que propõe uma relação entre a resistividade elétrica e taxa de corrosão das armaduras. Estes estudos visam a utilização da resistividade como parâmetro para a análise da vida útil das estruturas. Segundo Hornbostel (2013), que em seu trabalho analisa vários destes estudos, o grande interesse em estabelecer esta relação se deve ao fato de que a resistividade é um parâmetro que pode ser facilmente medido em campo, através de metodologia simplificada. Assim, uma vez estabelecida uma relação consistente entre a resistividade elétrica e a taxa de corrosão, seria possível uma avaliação dos estágios de corrosão e vida útil das estruturas de maneira eficiente e economicamente mais viável.

No entanto, para o estudo adequado da resistividade no concreto armado é importante pontuar que os valores de resistividade elétrica podem ser afetados por diversos fatores.

3.4 Fatores que podem influenciar resistividade elétrica do concreto

Diferentes autores abordam a susceptibilidade da resistividade elétrica à fatores intrínsecos ao próprio concreto e a fatores extrínsecos, relacionados ao meio ambiente no qual a estrutura se encontra. Helene (1993) afirma que a resistividade elétrica controla o fluxo de íons difundidos no concreto através da solução aquosa presente nos poros sendo afetada por diferentes fatores, principalmente pelo teor de umidade de equilíbrio e à temperatura do concreto. Gowers and Millard (1999) também afirmam que vários fatores são conhecidos por afetar as medidas de resistividade elétrica do concreto sendo que os mais significativos são a temperatura e o teor de umidade.

São abordados a seguir alguns dos fatores que podem afetar a resistividade elétrica do concreto.

3.4.1 Relação água/cimento

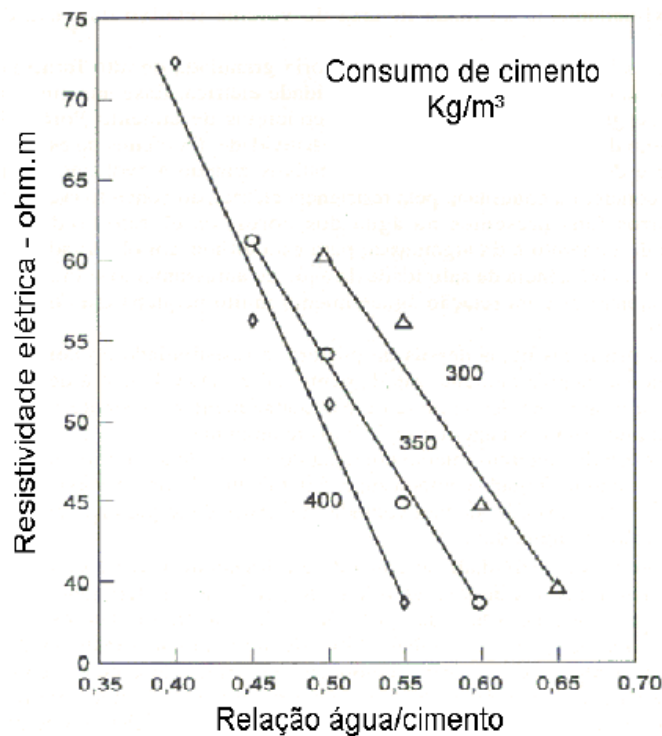
A relação a/c está diretamente ligada com a formação das estruturas de poros e interconexões do concreto. Quanto maior a quantidade de água em relação à quantidade de aglomerante, maior será a quantidade de poros e as interconexões entre eles, resultando em uma resistividade elétrica mais baixa (Santos, 2006).

A solução intersticial presente nos poros funciona como condutor elétrico na estrutura interna do concreto, explicam Medeiros-Junior *et al.* (2016). Deste modo, o aumento de água nas amostras juntamente com a maior permeabilidade do meio, ambos fatores decorrentes de uma maior relação água/cimento, contribuem para o aumento da condutividade no interior do concreto e resultam em menores valores de resistividade.

Sobre a relação água/cimento e a sua influência nos valores de resistividade elétrica do concreto, Neville (1997, *apud* Hoppe, 2005) também relata que o aumento no volume de água e da concentração de íons na solução aquosa dos poros diminui a resistividade da pasta de cimento. O autor ainda afirma que, para uma mesma relação água/cimento, uma redução no consumo de cimento resulta em aumento na resistividade elétrica. Desta forma, em uma relação a/c constante, mas com um consumo menor de cimento, a disponibilidade do eletrólito para a passagem de corrente elétrica fica reduzida.

A figura 3.2 ilustra como a diminuição da relação a/c provoca o aumento da resistividade elétrica.

Figura 3.2 – Resistividade elétrica x relação água cimento e consumo de cimento Portland comum, ensaiado a 28 dias (Neville, 1997 *apud* Hoppe, 2005).



Os autores Woelfl e Lauer (1979 *apud* Lencioni, 2011) também estudaram como a variação na relação a/c pode influenciar nas medidas de resistividade elétrica do concreto. A base do estudo consistiu na elaboração de três diferentes traços de concreto cuja a única diferença estava na relação água/cimento. Foram utilizadas os seguintes valores de a/c: 0,4, 0,5 e 0,6. Os autores tomaram como referência a relação a/c de 0,5 e concluíram que a resistividade elétrica do concreto diminui com o aumento da relação a/c, isso porque com o aumento da água na mistura, também aumenta o teor de íons constantes na água livre nos poros que é o principal condutor de eletricidade no interior do concreto.

3.4.2 Tipo de cimento

A resistividade elétrica do concreto é fortemente afetada pelo tipo de cimento utilizado na mistura, afirmam Medeiros-Junior e Lima (2016). Os autores elaboraram um estudo para analisar os principais tipos de cimento utilizados no Brasil: CII F-32 (contendo adição de filler calcário), CIII RS-40 (contendo adição

de escória de alto forno), CPIV-32 (contendo adições pozolânicas) e CPV-ARI (sem adições significativas).

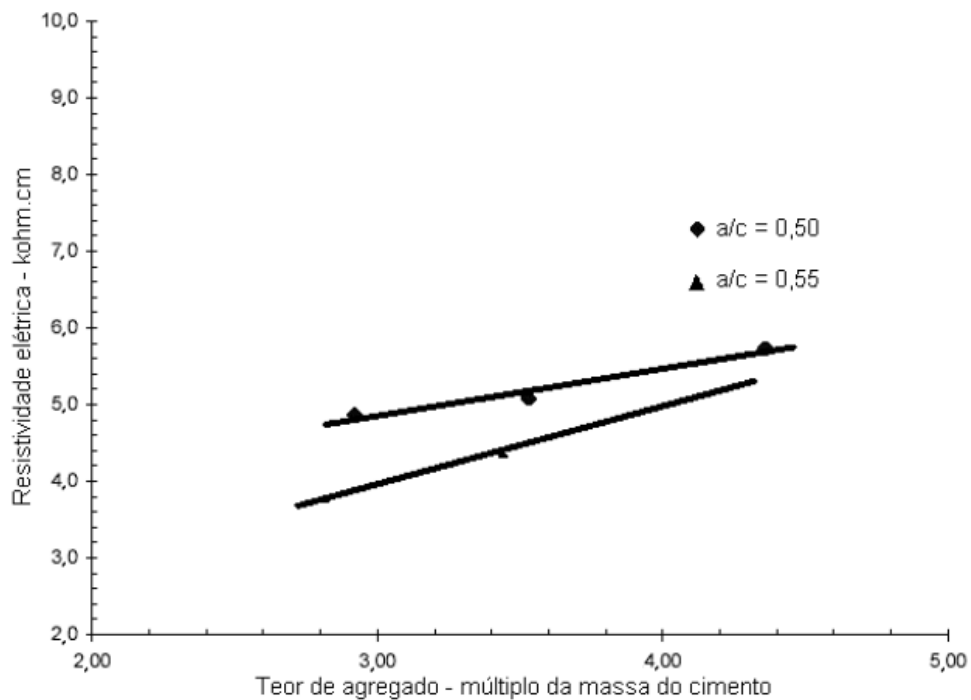
Sobre os diferentes tipos de cimento, o trabalho realizado constatou que as amostras de concreto elaboradas com o CP III - cimento contendo alto teor de escória de alto forno em sua composição, cerca de 60-70% - apresentaram os maiores valores de resistividade em comparação aos outros tipos de cimento. Este comportamento se deve ao fato de que a adição de escória no cimento contribui para o refinamento dos poros na microestrutura do concreto, diminuindo a condutividade e assim elevando os valores de resistividade elétrica do material. As amostras de concreto elaboradas com o cimento CP IV também apresentaram uma resistividade mais elevada, em função da adição de pozolanas que também atuam no refinamento dos poros e redução da permeabilidade do material, aumentando a resistividade. Na idade estudada, os cimentos CP II e CP V não apresentaram diferenças significativas em seus valores de resistividade elétrica.

3.4.3 Agregados

Assim como qualquer outro parâmetro microestrutural, a modificação do esquema granular do concreto afeta os seus valores de resistividade elétrica do concreto. Os autores Lenz *et. Al*, (2017) concluíram em seu trabalho que o aumento da proporção de agregados secos em relação ao conteúdo de cimento acarreta em um aumento da resistividade do concreto. Esta modificação na resistividade do material ocorre porque o aumento da relação agregados secos/cimento ocasiona uma diminuição da porosidade do material, diminuindo a sua condutividade e aumentando a resistividade elétrica.

Hughes et al. (1985, *apud* Hoppe, 2005), estudaram a influência do teor de agregados na resistividade elétrica do concreto. A figura 3.3 apresenta os resultados obtidos e demonstra que o aumento do teor do agregado acarreta em um aumento da resistividade elétrica do concreto.

Figura 3.3 – Efeito do teor do agregado na resistividade elétrica do concreto (Hughes et al., 1985 *apud* Hoppe, 2005).



O aumento da resistividade em razão do aumento da quantidade de agregados presente na mistura do concreto também foi analisado por Monfore (1968, *apud* SANTOS, 2006, p.27). O autor explica que a resistividade elétrica do agregado é muito superior à da pasta de cimento. Assim, a presença destas partículas não condutoras em meio à matriz cimentícia causa uma obstrução à passagem de corrente elétrica, o que aumenta a resistividade do concreto com maior teor de agregados.

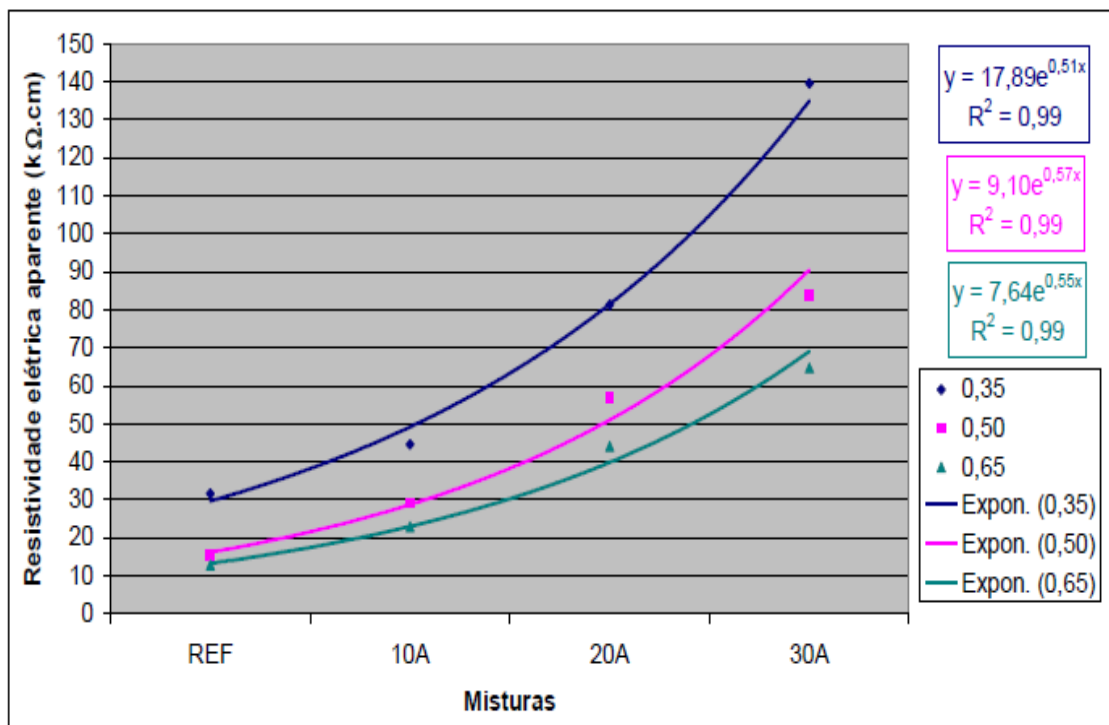
3.4.4 Adições minerais e aditivos

A relação entre a utilização de adições minerais e variações nas suas medidas de resistividade elétrica do concreto foram estudadas por Ghosh e Tran (2015). Os autores analisaram vinte e três tipos diferentes de misturas contendo variações de adições de metacaulim, sílica ativa e cinza volante. A pesquisa demonstrou que as adições ocasionam a diminuição da permeabilidade e porosidade do concreto fazendo com que este material atinja altos valores de resistividade.

O refinamento dos poros da matriz cimentícia ocasionado pelas adições acarretando no aumento da resistividade elétrica do concreto também foi abordado por Santos (2006).

Em seu estudo Hoppe (2005) analisou o efeito da adição de cinza de casca de arroz na resistividade elétrica do concreto. O autor constatou que ocorre uma evolução exponencial entre 0% e 30% de substituição nos valores de resistividade, como mostra a figura 3.4. Isto é reflexo do maior refinamento dos poros e da menor condutividade elétrica específica da solução no interior do concreto à medida que o teor de substituição aumenta.

Figura 3.4 – Variação da resistividade elétrica com o aumento do teor de cinza de casca de arroz aos 91 dias (Hoppe, 2005).



No que tange ao uso dos aditivos, ainda existem poucas pesquisas no cenário mundial. Uma vez que a utilização de aditivos pode afetar a microestrutura do concreto, é muito provável que afetem também de alguma maneira os valores de resistividade elétrica. Cita-se como exemplo a utilização de aditivos plastificantes e

superplastificantes, que reduzem a demanda de água ao melhorar a plasticidade do concreto, possibilitando a redução da relação água/cimento, fator que atua diretamente do aumento da resistividade elétrica.

De acordo com Whiting e Nagi (2003, *apud* Santos, 2006, p.29) espera-se que a influência dos aditivos seja apenas indireta e relacionada às alterações que eles promovem na microestrutura da matriz cimentícia, influenciando na disposição dos poros e atuando durante a hidratação do cimento.

3.4.5 Hidratação do cimento

A hidratação do cimento diz respeito à reação química que ocorre entre o cimento e a água, resultando em produtos que possuem características de pega e endurecimento. Durante o processo de endurecimento, ocorrem as reações químicas que promovem o preenchimento progressivo dos espaços vazios na pasta de resultando em uma redução da porosidade e permeabilidade, aumentando a resistência do material. (Metha e Monteiro, 2008). Assim, ao final do processo de endurecimento temos uma resistência elevada e baixos níveis de porosidade e permeabilidade.

No que tange a hidratação do cimento, é preciso considerar que os processos químicos de hidratação continuam ocorrendo ao longo do tempo, variando continuamente a porosidade e a permeabilidade do concreto, fatores que afetam os valores de resistividade elétrica do concreto. De uma maneira generalizada, a resistividade tende a aumentar ao longo do tempo acompanhando as reações de hidratação e endurecimento do concreto (Medeiros-Junior e Lima, 2016).

Apesar da tendência de ganho de resistividade elétrica ao longo do tempo, faz-se necessário pontuar que, dependendo do tipo de cimento e idade do concreto, podem ocorrer comportamentos específicos. (Medeiros-Junior e Lima, 2016; Pérez, 2015).

3.4.6 Condições de cura

O processo de cura é de extrema importância pois a sua realização inadequada resulta em uma menor durabilidade do concreto. Assim, o objetivo da cura no concreto é evitar a perda de umidade e controlar a temperatura até que o material atinja uma resistência suficiente (Metha e Monteiro, 2008). Assim, a cura é responsável por determinar a disposição da microestrutura do material, principalmente na superfície do concreto, por onde ocorre a saída de água para o meio ambiente.

Em sua pesquisa, Silva (2016) analisou a influência de diferentes tipos de cura na resistividade elétrica do concreto. Ao realizar a análise de concretos com a mesma relação água/cimento, verificou-se que processos de cura diversos influenciaram de maneira diferente a resistividade do material, sendo que concretos com maior tempo de cura apresentaram maiores valores de resistividade elétrica.

3.4.7 Carbonatação

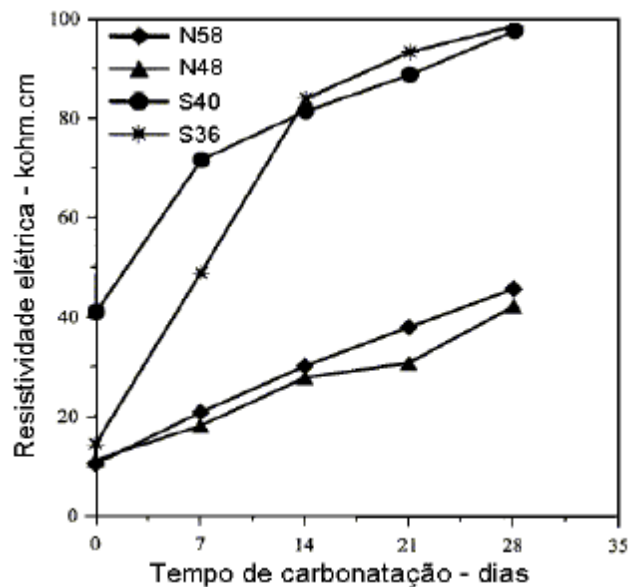
A carbonatação é um processo físico-químico que resulta na redução do pH do concreto. Esse processo ocorre com a difusão do CO_2 presente na atmosfera através dos poros do concreto que então reage com os compostos alcalinos, gerando ao final carbonato de cálcio (CaCO_3) e diminuindo o seu pH de aproximadamente 12,5 para um valor próximo a 8 (Figueiredo, 2005).

Esta precipitação de carbonato de cálcio nos poros aumenta a compactidade da superfície do concreto tornando-a mais densa e ocasionando, e em consequência disto, um aumento nos valores de resistividade elétrica em suas camadas mais superficiais. (Millard, 1991.; Hornbostel, 2013).

Chi et al. (2002) realizaram estudos sobre os efeitos da carbonatação nas propriedades mecânicas e durabilidade do concreto. A figura 3.5 apresenta os resultados obtidos a respeito da influência da carbonatação na resistividade elétrica do concreto. Foi constatado um aumento da resistividade com o tempo de

carbonatação, fato que pode ser explicado pela redução da porosidade da pasta decorrente da conversão de Ca(OH)_2 em CaCO_3 .

Figura 3.5 – Influência da carbonatação na resistividade elétrica do concreto (Chi et al, 2002).



3.4.8 Íons cloreto

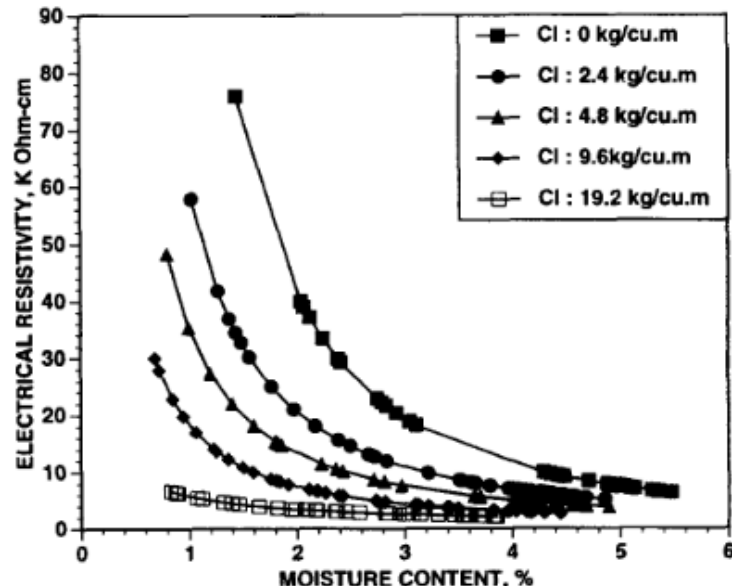
Os diferentes trabalhos publicados sobre o tema, divergem quanto à interferência exercida pelos íons cloreto nos valores de resistividade elétrica do concreto. Enquanto alguns autores afirmam, claramente, a existência de uma relação, outros autores acreditam que a influência gerada pelos íons não possui tanta relevância, sendo, inclusive, mascarada pela atuação de outros fatores mais preponderantes para a resistividade elétrica, como a microestrutura, por exemplo.

Polder (2001) afirma que os efeitos da penetração dos íons cloreto no concreto é relativamente pequena. Esta mesma constatação é feita por Morris et al. (2002), que em seu trabalho avaliou quatro diferentes misturas de concreto e não observou influência significativa da concentração de íons cloreto nos valores de resistividade elétrica. Lencioni (2016) também verificou uma influência insignificante na adição de 3% de cloretos ao concreto aos 28 dias.

Em sua tese, Helene (1993) afirma que, ao penetrarem no concreto os íons cloreto contribuem para a redução da resistividade elétrica aumentando a condutividade do eletrólito. Neville (1982) cita, inclusive, que a diferença de resistividade entre duas argamassas chega a ser 15 vezes menor no material que foi preparado com cloreto de cálcio.

Saleem et al. (1996) estudaram o papel da contaminação de íons cloreto na resistividade elétrica do concreto. A figura 3.6 mostra o efeito da umidade e teor de cloretos na resistividade elétrica do concreto. As curvas indicam um decréscimo exponencial na resistividade com a quantidade de umidade e com o aumento da concentração de cloretos na pasta de cimento. Esta diminuição da resistividade que se dá em função do aumento do teor de umidade e cloretos pode ser atribuída à condutividade iônica da corrente elétrica através do concreto.

Figura 3.6 – Relação entre o teor de umidade e resistividade elétrica em concretos contaminados com íons cloreto. (Saleem et al.; 1996).



Ao analisar misturas acrescidas de concentrações diferentes de íons Cl^- provenientes do acréscimo de CaCl_2 e NaCl no cimento, os autores Pruckner e Gjrv (2004) relatam que ao final de 56 dias, foi observada uma diferença na resistividade elétrica das misturas, sendo que o material acrescido com CaCl_2 apresentou resistividade menor do que a mistura acrescida com NaCl . Este fato se

deve à formação de NaOH como produto da reação química, que por sua vez aumenta a alcalinidade da pasta de cimento fator que resulta em uma matriz mais densa com estrutura de poros mais refinada. Os autores afirmam que a microestrutura mais compacta supera a concentração iônica da água nos poros aumentando ligeiramente a resistividade elétrica.

Sobre o papel da alcalinidade do concreto na resistividade elétrica Goñi et al. (1989) afirmam existir uma relação linear ente ambos os fatores, e que a contribuição dos íons Cl^- nos valores de resistividade do concreto são mais evidentes em níveis mais baixos de pH.

3.4.9 Umidade

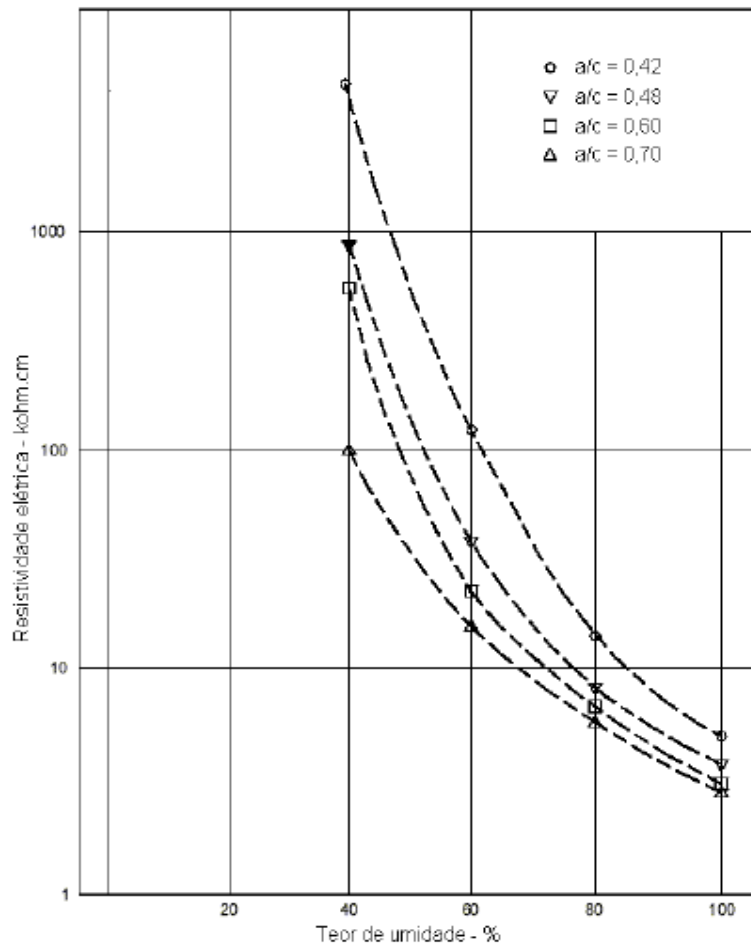
O grau de saturação na rede de poros do concreto pode variar em função das condições atmosféricas e variações da umidade relativa do ar no ambiente ao qual ele está exposto (Castellote et al., 2002).

Bertolini e Polder (1997), também afirmam que a resistividade elétrica do concreto está associada à migração elétrica de íons na solução aquosa contida nos poros da pasta de cimento. A quantidade de água disponível para este movimento dentro do concreto, depende da sua estrutura de poros e da condições ambientais tais como umidade relativa, temperatura e até mesmo a presença de chuvas. Em ambientes com umidade relativa do ar muito baixa (ou seja, <60%), a água é apenas absorvida na superfície da pasta de cimento hidratada, restringindo o fluxo de corrente iônica, aumentando a resistividade elétrica. Por outro lado, em ambientes com maior umidade relativa, a água pode se condensar, aumentando a quantidade de poros preenchidos por água, facilitando o movimento iônico e, assim, diminuindo a resistividade.

Em um estudo sobre os efeitos do teor de umidade na resistividade elétrica do concreto Gjørsv et al. (1977 apud, Hoppe, 2005) concluíram que o teor de umidade parece ser mais relevante para a variação da resistividade elétrica do que o efeito da relação água/cimento. A figura 3.7 demonstra que em um concreto saturado, a

resistividade varia de 4,5 a 7,0 k Ω .cm para as diferentes relações a/c sendo que em concretos com teor de umidade igual a 40%, os mesmos valores variaram de 100 a 700 k Ω .cm.

Figura 3.7 – Efeito do teor de umidade na resistividade elétrica do concreto (Gjørsv et al.; 1977, apud Hoppe 2005).



As condições de saturação do concreto podem alterar o seu comportamento condutivo. O concreto saturado de água comporta-se como um semicondutor, com resistividade da ordem de $10^2 \Omega$.m, enquanto que seco em estufa ventilada pode ser considerado isolante elétrico com resistividade da ordem de $10^6 \Omega$.m. A resistividade elétrica do concreto depende diretamente do grau de hidratação do cimento, aumentando com o aumento deste (Helene, 1993).

3.4.10 Temperatura

A importância da relação entre a temperatura e os valores de resistividade elétrica do concreto é pontuada por diferentes pesquisadores (Helene, 1993; Hornbostel, K., et al. 2013). A variação da temperatura afeta a resistividade elétrica do concreto através de mudanças na mobilidade iônica da pasta bem como através de alterações na concentração iônica no interior dos poros. (Bertolini e Polder, 1997; Castellote et al., 2002).

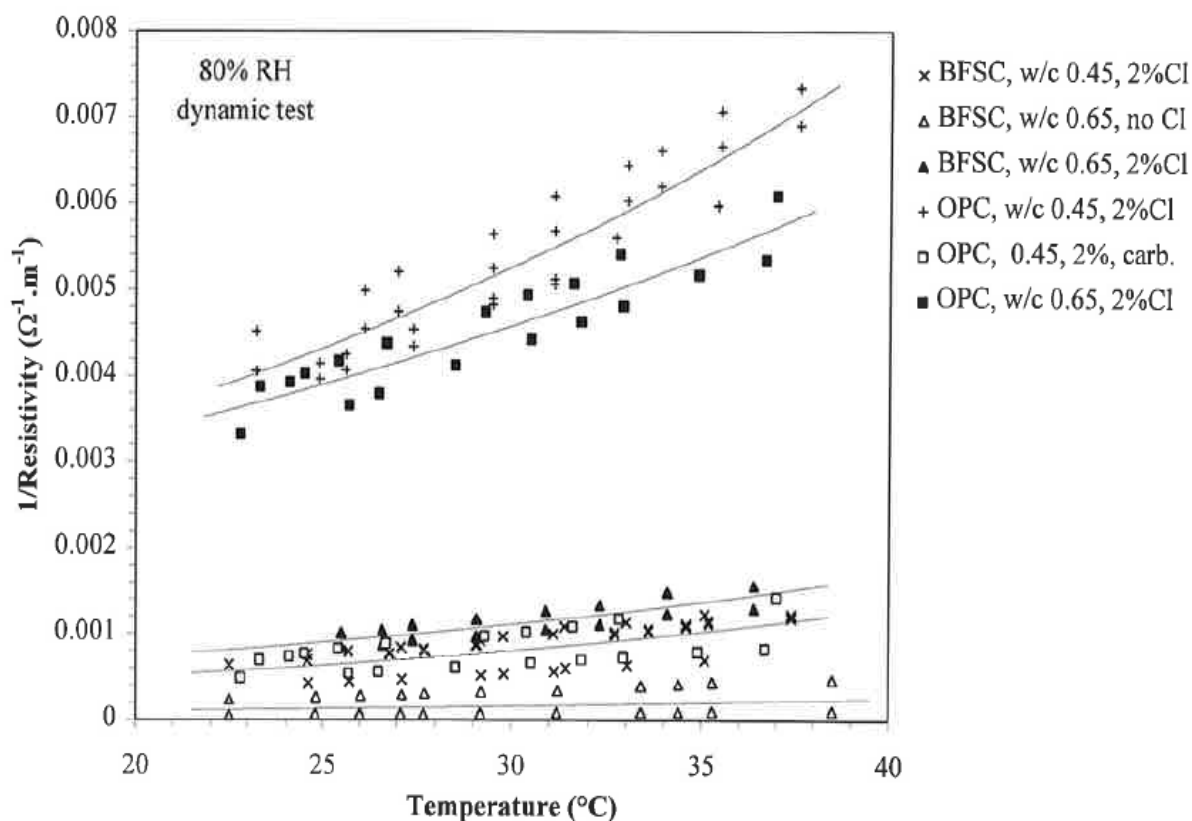
O aumento da temperatura pode ocasionar uma diminuição da resistividade elétrica em decorrência do aumento da difusividade. No entanto é importante atentar que o aumento da temperatura pode acarretar em uma maior evaporação na camada externa do concreto ocasionando um efeito contrário. (Andrade, 2004).

A diminuição da resistividade elétrica originada pelo aumento da temperatura, também pode ser explicada pelo comportamento do concreto como material semicondutor. Conforme explica Young (2009), em materiais semicondutores, o aumento da temperatura faz com que os elétrons fiquem mais fracamente ligados à estrutura atômica, adquirindo maior mobilidade ocasionando um decréscimo nos valores de resistividade do material.

Alguns trabalhos relacionando diretamente as variações da temperatura e resistividade elétrica no concreto foram publicados. Elkey e Sellevold (1995, apud Liu e Presuel-Moreno, 2014.) relataram que a variação de temperatura na proporção de 1 °C acarreta em variações de 3% na resistividade de concretos saturados e 5% para concretos não saturados – ambos produzidos com cimento Portland comum.

Bertolini e Polder (1997) realizaram diversos testes avaliando os efeitos da temperatura na resistividade elétrica do concreto. Os testes, feitos entre as temperaturas de 20°C e 40°C, indicaram a existência de uma relação exponencial entre a condutividade elétrica (que é o oposto da resistividade) e a temperatura, conforme demonstrado na figura 3.8 a seguir.

Figura 3.8 – Relação entre a condutividade e temperatura de diferentes tipos de concreto exposto a um ambiente com 80% de umidade relativa. (Bertolini e Polder, 1997).



Os pesquisadores Liu e Presuel-Moreno (2014) realizaram um estudo para a normalização dos efeitos da temperatura nas medidas de resistividade elétrica do concreto através do método da lei de Arrhenius – que permite calcular a variação da constante de velocidade de uma reação química com a temperatura. Foram estudados 200 corpos de prova e 54 diferentes tipos de misturas de concreto. Os autores concluem que a diminuição da resistividade com o aumento da temperatura é mais significativo em concretos mais resistivos e que uma vez fornecidos os valores de alcalinidade do concreto e relação de substituições - tipo de aditivos minerais, a metodologia desenvolvida por eles poderia fornecer um método simples e preciso para normalizar o efeito da temperatura na resistividade elétrica do concreto, independentemente de outras propriedades da mistura.

3.5 Avaliação da resistividade elétrica superficial e volumétrica do concreto

A avaliação da resistividade elétrica do concreto pode ser realizada através de diferentes técnicas e métodos de ensaio e cada um deles dá resultados diferentes. Dentre os métodos mais utilizados, dois se destacam por parecerem mais adequados para o controle de qualidade do concreto: o método dos dois eletrodos utilizado para a aferição da resistividade volumétrica do concreto e o método dos quatro eletrodos, também conhecido como método Wenner, que fornece os valores de resistividade superficial do concreto (Gjørv, 2015). Além destes dois métodos mencionados, destaca-se também o método dos três eletrodos, atualmente o único método para aferição da resistividade elétrica do concreto normalizado no Brasil.

3.5.1 Método dos dois eletrodos

O método de ensaio dos dois eletrodos consiste na determinação da resistividade elétrica do concreto endurecido através da aplicação de um campo elétrico através de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos, moldados ou extraídos, ensaios em condição saturada. (Lencioni, 2015).

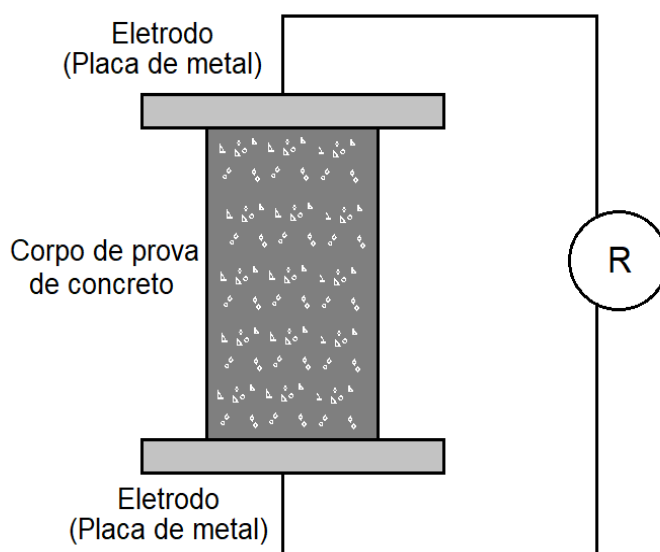
Nesta técnica a amostra de concreto é posicionada entre duas placas metálicas paralelas (eletrodos) por onde é aplicada uma corrente elétrica alternada - entre as superfícies utiliza-se uma esponja úmida para garantir uma conexão elétrica apropriada. A queda de potencial entre os dois eletrodos é medida e a resistência é observada por meio de um resistômetro em uma certa frequência, conforme figura 3.9 (Gjørv, 2015; Layssi H., 2015). A resistividade elétrica ρ pode ser definida através da equação 3.5.

$$\rho = R \cdot \frac{A}{t} \quad \text{Equação (3.5)}$$

Sendo: ρ = Resistividade elétrica
 R = Resistência
 A = Área da superfície
 t = Altura do corpo de prova

Esta técnica consiste em um método simples e confiável para medir a resistividade elétrica volumétrica em testes de controle de qualidade realizados em laboratório. As mesmas amostras de concreto cilíndricas preparadas para o teste de compressão podem ser usadas para medição de resistividade, e esse teste que não é destrutivo leva apenas alguns segundos. No entanto, a aplicação deste método para avaliações realizadas em campo é muito limitada, pois requer a extração de testemunhos da estrutura existente (Layssi H., 2015).

Figura 3.9 – Esquema de ensaio para obtenção da resistividade volumétrica pelo método dos dois eletrodos. (Gjørn, 2015).

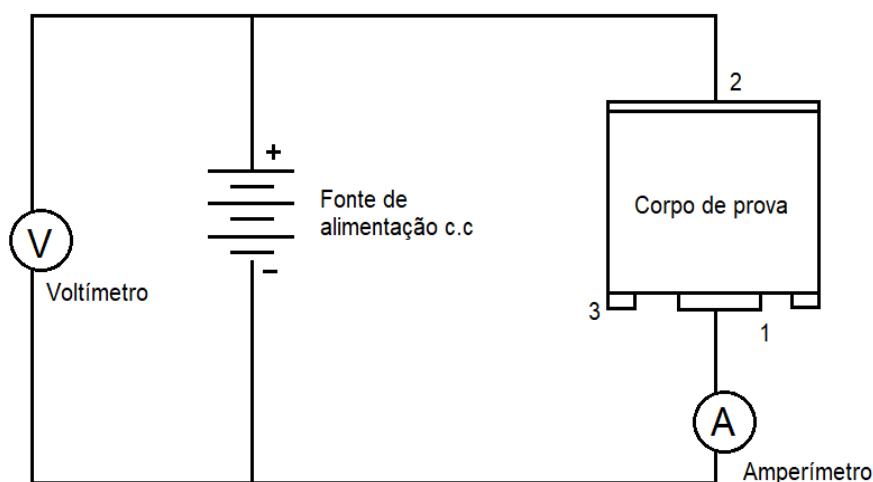


3.5.2 Método dos três eletrodos

É, atualmente, o único método para aferição da resistividade elétrica do concreto normalizado no Brasil - ABNT/NBR 9204:2012 Concreto endurecido - Determinação da resistividade elétrico-volumétrica - Método de Ensaio (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012). Este método é utilizado para a determinação da resistividade volumétrica do concreto em laboratório a partir de amostras moldadas ou extraídas em campo (Lencioni, 2011).

Para a realização do ensaio são utilizados um voltímetro, um miliamperímetro, uma fonte de alimentação de corrente contínua e três eletrodos de mercúrio metálico líquido (eletrodo principal ou blindado; eletrodo secundário ou não blindado; eletrodo de blindagem). Neste sistema é aplicada durante dez minutos uma tensão contínua de aproximadamente 50 V, conforme apresentado no esquema da figura 3.10.

Figura 3.10 – Esquema elétrico do ensaio para obtenção da resistividade volumétrica pelo método dos três eletrodos, segundo a NBR 9402:2012 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012).



- 1 - Eletrodo principal ou blindado
- 2 - Eletrodo secundário ou não blindado
- 3 - Eletrodo de blindagem

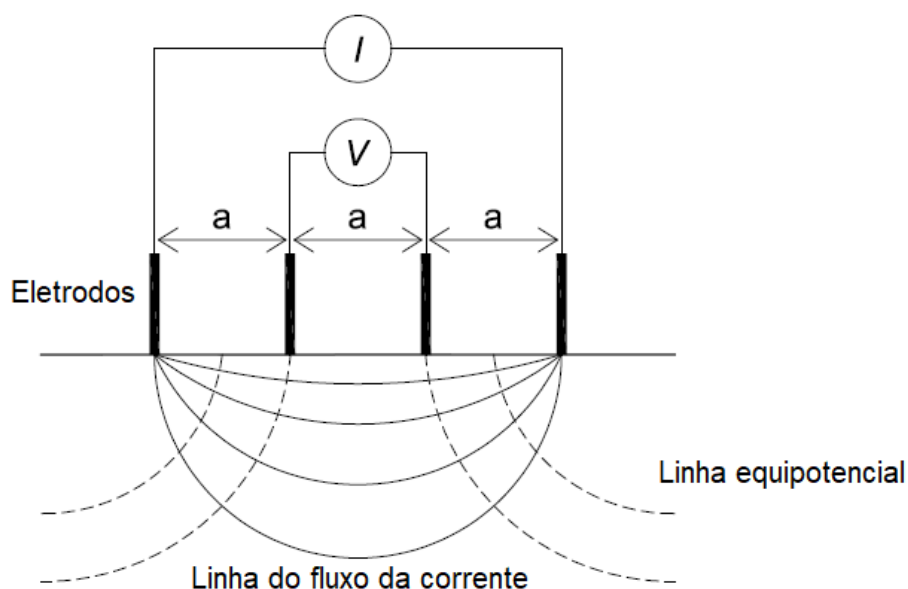
Cita-se como desvantagem deste método de ensaio, além da aplicabilidade apenas em laboratório, o fato de que para a sua realização é necessária a utilização de mercúrio, um metal tóxico e que oferece risco de contaminação ambiental. (Lencioni, 2015).

3.5.3 Método dos quatro eletrodos (Wenner)

Nesta técnica obtém-se os valores de resistividade superficial do concreto. Para a aquisição destes valores de resistividade elétrica da superfície são utilizados quatro eletrodos, dispostos em linha reta e igualmente espaçados, conforme exposto na figura 3.11. As medidas são baseadas na passagem de corrente elétrica alternada

de baixa frequência. Os dois eletrodos internos medem o potencial elétrico ou queda de voltagem (V) criado quando os eletrodos externos aplicam uma corrente alternada (I) ao concreto (Gjørnv, 2015; Layssi H., 2015).

Figura 3.11 – Método dos quatro eletrodos para obtenção da resistividade superficial do concreto (Gjørnv, 2015; Gowers e Millard, 1999).



A resistividade elétrica é dada pela equação

$$\rho = 2\pi \cdot a \cdot \frac{V}{I} \quad \text{Equação (3.6)}$$

Sendo: ρ = Resistividade elétrica
 a = espaçamento ente os eletrodos (cm)
 V = Queda e voltagem
 I = Densidade/Intensidade da corrente

Este método foi inicialmente desenvolvido para a verificação de resistividade de solos, mas a sua utilização em concreto já foi amplamente estudada e já existe um aparelho comercial específico para obtenção da resistividade elétrica superficial em concreto (Santos, 2006).

A grande vantagem deste método é a sua simplicidade, que permite a verificação da resistividade superficial de estruturas de concreto *in situ*, além de ser um ensaio

totalmente não destrutivo. Assim, a metodologia dos quatro eletrodos apresenta-se como altamente eficaz, fornecendo rapidamente os valores desejados e a preços baixos quando comparada a outros ensaios comumente realizados em concreto. (Lencioni, 2011; Hornbostel, 2013).

É importante ressaltar que este método pode sofrer influências em função dos parâmetros geométricos dos eletrodos. Milard (1991, *apud* Santos, 2006) aponta que a dimensão dos eletrodos pode influenciar as medidas de resistividade elétrica no método Wenner, mas que esta influência é pequena. O mesmo autor ainda afirma que um espaçamento de 50mm é suficiente para obter-se medidas relativamente precisas na maioria das estruturas de concreto.

A aplicação deste método em concreto não é normalizada no Brasil, mas existem recomendações técnicas e métodos de ensaios em documentos internacionais (Lencioni, 2011). Cita-se como principais diretrizes para a execução dos ensaios de resistividade elétrica superficial do concreto as seguintes recomendações: “*Test methods for on site measurement of resistivity of concrete*” (RILEM, 2000); *Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration - T358-17* (AASHTO, 2017); “*Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la resistividad eléctrica. Parte 2: Método de las cuatro puntas o de Wenner*” (UNE 83988-2:2014).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia deste trabalho objetiva a avaliação dos efeitos da variação da temperatura do meio ambiente nos valores de resistividade elétrica superficial do concreto, através do método dos quatro eletrodos (Wenner). A resistividade elétrica é um parâmetro muito sensível à diversos fatores. Deste modo, para viabilizar o estudo foi necessário o controle dos outros fatores intervenientes. O procedimento experimental adotado no presente trabalho foi dividido em três etapas, a saber:

- **Primeira etapa experimental:** A etapa inicial da pesquisa visou estudar como a quantidade de água presente na mistura do concreto influencia nos valores de resistividade superficial. Foram elaboradas duas séries de corpos de prova sendo a relação água/cimento a única variável entre elas. Foram adotadas as relações a/c de 0,45 e 0,65 para cada série.
- **Segunda etapa experimental:** Durante esta fase, o objetivo foi analisar as influências extrínsecas na resistividade elétrica superficial do concreto. Foram utilizadas as mesmas amostras da etapa precedente, porém desta vez, expostas em ambiente externo, sujeitas às variações de temperatura de ocorrem normalmente ao longo do dia.
- **Terceira etapa experimental:** A última parte deste trabalho teve como objetivo analisar, para uma única série de corpos de prova, com relação água/cimento igual a 0,65, os efeitos isolados da variação de temperatura na resistividade elétrica superficial do concreto. Para alcançar o objetivo pretendido, foi feita a utilização de uma câmara de intemperismo com controle preciso da temperatura e da umidade relativa em seu interior.

4.1 Caracterização dos materiais utilizados

Para a confecção dos corpos de prova estudos neste programa experimental, foram utilizados materiais de uso cotidiano na região de Belo Horizonte, facilmente encontrados em depósitos para a construção civil. Os concretos foram produzidos utilizando a estrutura disponível no laboratório de concreto do Departamento de Engenharia de Materiais e de Construção Civil da Universidade Federal de Minas Gerais.

Cimento

O cimento utilizado neste programa experimental foi o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI), produzido pela Cimento Nacional. A escolha por este tipo de cimento se deu em função do seu baixo teor de adições e a sua caracterização, apresentada na tabela 4.1, que foi fornecida pelo próprio fabricante.

Tabela 4.1 - Caracterização do cimento

Propriedades Determinadas CP V ARI		Resultados
Massa específica (g/cm ³)		3,10
Finura	Índice de finura #75µm (nº 200) (%)	0,34
	Resíduo na peneira #325 (%)	2,27
	Área específica (Blaine) (cm ² /g)	4742
Tempo de Pega	Início de pega (min)	102
	Fim de pega (min)	157
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	29,6
	3 dias	43,0
	7 dias	47,8
	28 dias	57,4

Areia

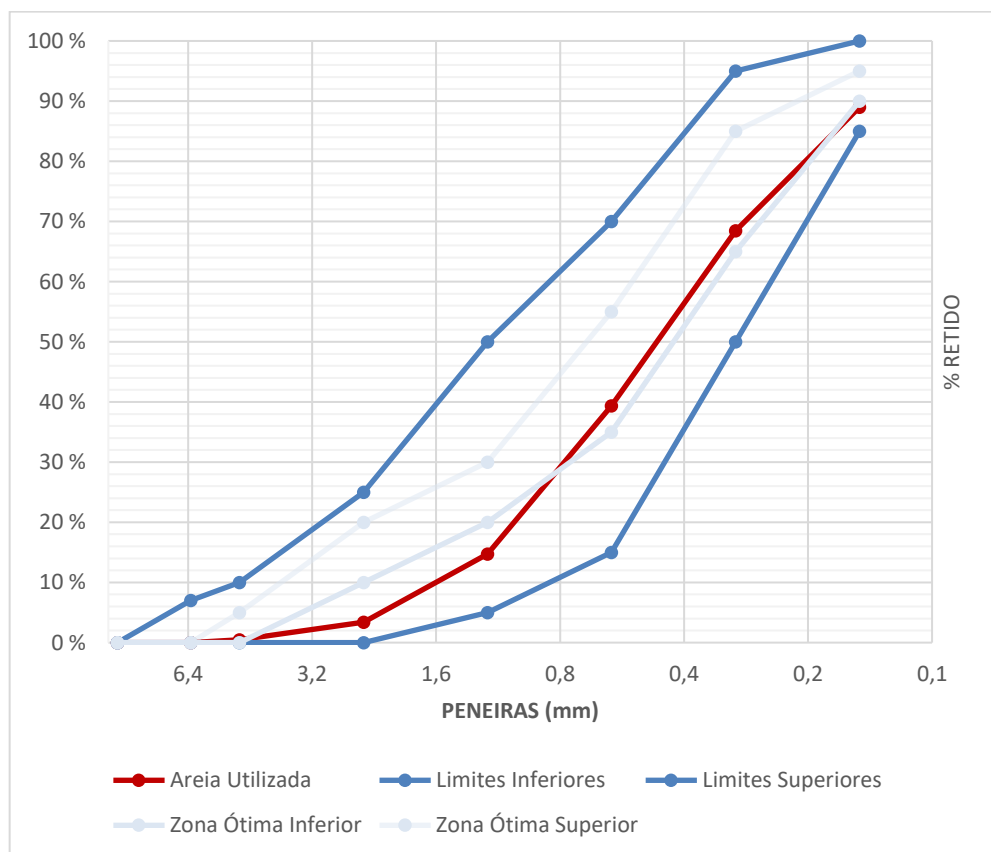
O agregado miúdo utilizado foi do tipo areia quartzosa fina. A caracterização deste material, apresentada na tabela 4.2, foi realizada no laboratório de concreto do Departamento de Engenharia de Materiais e de Construção Civil da UFMG.

Tabela 4.2 - Caracterização do agregado miúdo

Propriedades (Areia Quartzosa)		Resultados
Massa específica (g/cm ³)		2,58
Massa unitário no estado solto (Kg/dm ³)		1,26
Granulometria	Dimensão máxima (mm)	2,40
	Módulo de finura	2,15

A figura 4.1 mostra a curva de distribuição granulométrica da areia, conforme os limites determinados pela NBR 7211:1983.

Figura 4.1 - Curva de distribuição granulométrica do agregado miúdo



Brita

O agregado graúdo utilizado foi brita calcária, tipo 0. A caracterização deste material, apresentada na tabela 4.3, foi realizada no laboratório de concreto do

Departamento de Engenharia de Materiais e de Construção Civil da UFMG. Os valores referentes à granulometria foram informados pelo fornecedor.

Tabela 4.3 - Caracterização do agregado graúdo

Propriedades (Brita Calcária)		Resultados
Massa específica (g/cm ³)		2,67
Massa unitário no estado solto (Kg/dm ³)		1,47
Granulometria	Dimensão máxima (mm)	12,5
	Módulo de finura	5,74

Adições e Aditivos

Não foram utilizadas adições ou aditivos na confecção dos corpos de prova. O objetivo desta medida se deu para um melhor controle dos fatores que podem influenciar a resistividade do concreto.

Água

A água de amassamento utilizada neste programa experimental foi proveniente da rede de abastecimento da cidade de Belo Horizonte fornecida pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA).

4.2 Definição dos traços e grupos de ensaio

Os traços elaborados foram definidos de modo a possibilitar a confecção de duas séries de corpos de prova com características microestruturais distintas, utilizando apenas os mesmos materiais. A proporção de material seco foi mantida nas duas séries, sendo que toda a variação desejada na microestrutura do concreto foi obtida somente pela alteração de um único fator, a relação água/cimento de 0,45 e 0,65, conforme apresentado na tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Caracterização dos traços

	Traço 1	Traço 2
Dosagem do concreto	Consumo	Consumo
Cimento CP V - ARI (kg/m ³)	382	382
Areia Quartzosa (kg/m ³)	764	764
Brita Calcária (kg/m ³)	955	955
Água (l/m ³)	248	172
Relação a/c	0,65	0,45

4.3 Moldagem dos corpos de prova

Os procedimentos de moldagem das amostras seguiram as recomendações da Norma Brasileira NBR 5738:2015 - Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. A mistura foi feita em betoneira elétrica, os corpos de prova foram moldados em fôrmas metálicas cilíndricas, com diâmetro de 100mm e altura igual a 200mm. O adensamento foi feito de forma manual e a desmoldagem foi feita após 24 horas após a moldagem. A cura de todos os corpos de prova foi feita de maneira submersa em tanques de água da rede de abastecimento da cidade de Belo Horizonte fornecida pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA).

4.4 Medição da resistividade superficial

A presente dissertação aborda o estudo da resistividade elétrica superficial do concreto, assim, deste capítulo em diante, deve ser entendido que se trata sempre da resistividade elétrica, medida na superfície do elemento de concreto. Os ensaios para obtenção dos valores de resistividade elétrica superficial foram realizados através da utilização de uma sonda Wenner de quatro pontos, que opera pelo princípio dos quatro eletrodos, segundo figura 4.2. Foi usado o equipamento comercial de nome Resipod, da fabricante Proceq S.A. Este equipamento opera com uma corrente alternada, gerada digitalmente, com frequência de 40Hz e uma

diferença de potencial máxima de 38V. Em todas as medições feitas durante este procedimento experimental o aparelho foi utilizado em sua configuração padrão.

Figura 4.2 – Equipamento utilizado para obtenção das medidas de resistividade elétrica superficial do concreto.



Para a utilização correta do aparelho, foram observadas as instruções do fabricante, bem como a metodologia proposta pela “*American Association of State Highway and Transportation Officials - Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*” (AASHTO T358-17).

4.5 Ensaio de ultrassom no concreto

O ultrassom é um ensaio não destrutivo, baseado na propagação de ondas sonoras com frequência elevada pelo material avaliado. A sua utilização para a análise do concreto é muito eficiente para a caracterização do material uma vez que a microestrutura de poros e vazios atua diretamente na velocidade da onda sonora e nos valores obtidos pelo ultrassom.

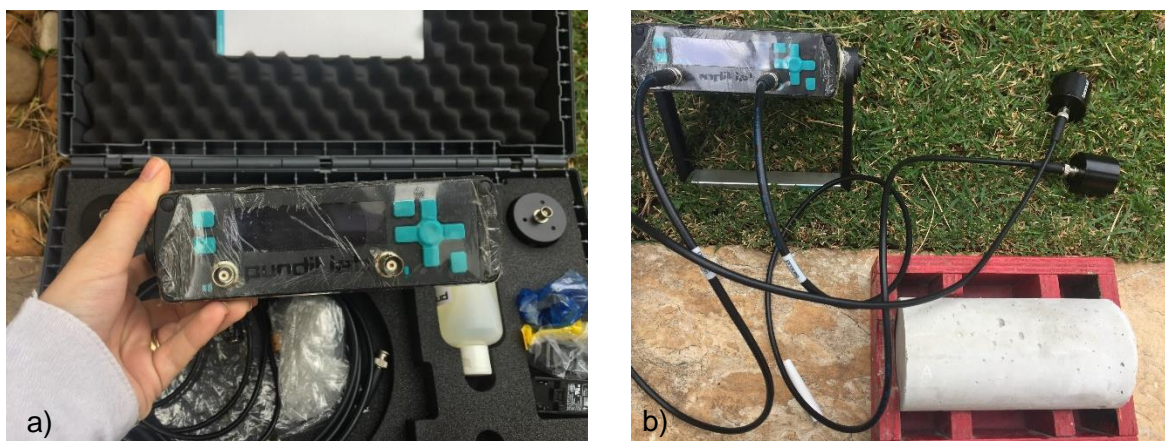
A realização deste ensaio no trabalho forneceu um importante parâmetro de homogeneidade entre diferentes corpos de prova de concreto, pertencentes à mesma série com o mesmo traço. Essa verificação da homogeneidade das amostras foi necessária devido à relevância da microestrutura do concreto nos valores de resistividade elétrica superficial.

A realização dos testes de velocidade de pulso ultrassônico foi importante para garantir que as amostras analisadas pudessem ser consideradas equivalentes, anulando possíveis interveniências geradas por particularidades inerentes à confecção e moldagem dos corpos de prova.

A figura 4.3 apresenta o do aparelho de ultrassom utilizado durante a terceira etapa experimental. Foi utilizado um instrumento de teste de velocidade de pulso ultrassônico comercialmente conhecido como Pundit Lab, da fabricante Proceq S.A.

Os procedimentos de verificação dos valores de velocidade do pulso ultrassônico foram executados em conformidade com os preceitos da Norma Brasileira NBR 8802:2013 - Concreto endurecido — Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.

Figura 4.3 – Equipamento de ultrassom utilizado.



4.6 Ensaio de resistência à compressão uniaxial e módulo de elasticidade

Os ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade foram realizados no Laboratório de Análise Experimental de Estruturas (LAEES) da Universidade Federal de Minas Gerais, com o objetivo de caracterizar o concreto.

4.7 Câmara de intemperismo

Para a análise das variações de temperatura, foi utilizada uma câmara de intemperismo, também pertencente ao Laboratório de Análise Experimental de Estruturas (LAEES) da Universidade Federal de Minas Gerais, apresentada na figura 4.4.

Figura 4.4 – Câmara de Intemperismo



4.8 Primeira etapa experimental

Para a realização da primeira etapa experimental foram confeccionados 28 corpos de prova, divididos em duas séries diferenciadas apenas pela relação água/cimento. O objetivo desta etapa foi estudar os efeitos das características microestruturais do concreto nos valores da resistividade elétrica superficial. Deste modo, procurou-se manter como única variável entre as séries a relação a/c. Não foram utilizados aditivos plastificantes ou adições nas misturas para evitar possíveis efeitos destes materiais nos valores de resistividade das amostras analisadas.

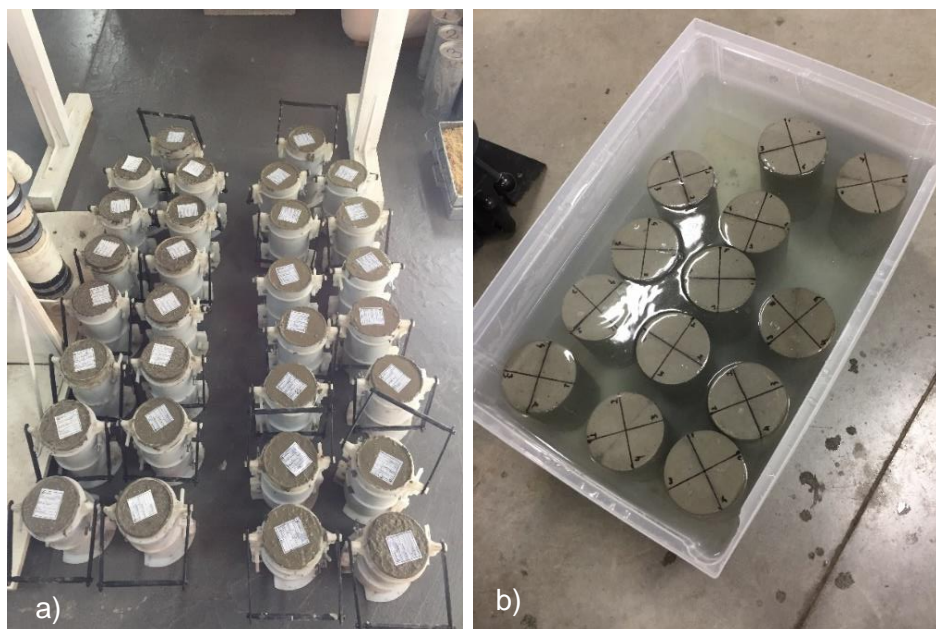
Ficou definida a seção circular com diâmetro igual a 100mm e altura de 200mm para os corpos de prova. O traço em massa utilizado foi 1:2:2,5, sendo que a denominada “Série 1”, foi elaborada com relação a/c igual a 0,65 e a “Serie 2” com a relação a/c igual a 0,45, segundo a tabela 4.5. A data de moldagem foi a mesma para ambas as series produzidas.

Tabela 4.5 - Resumo de variáveis – 1ª Etapa experimental

Resumo de Variáveis		
	Série 1	Série 2
Quantidade de Amostras	14	14
Relação a/c	0,65	0,45

Após 24 horas da moldagem, as amostras foram retiradas das fôrmas e colocadas em caixas de água, da rede de abastecimento, para a realização da cura submersa, por 28 dias, conforme figura 4.5. A opção por este tipo de cura se deu para garantir a saturação completa do concreto, evitando variações no conteúdo de umidade dos corpos de prova.

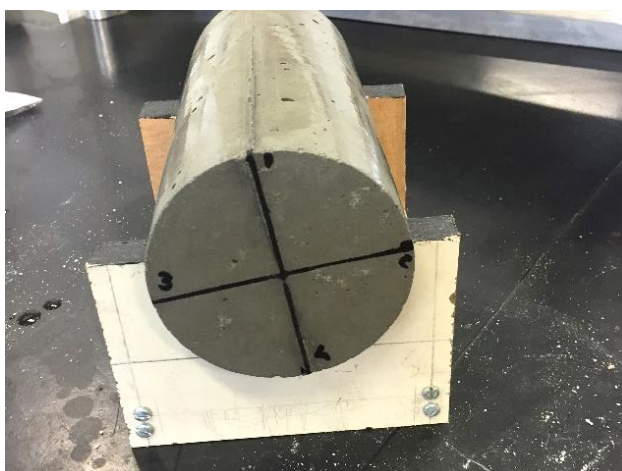
Figura 4.5 – a) Corpos de prova após a moldagem; b) Corpos de prova mantidos submersos, separados por série.



Foi adotada a metodologia de ensaio proposta pela American Association of State Highway and Transportation Officials - Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration” - AASHTO T358-17. Dentre as especificações mais relevantes do método de teste adotado nesta etapa experimental, destaca-se:

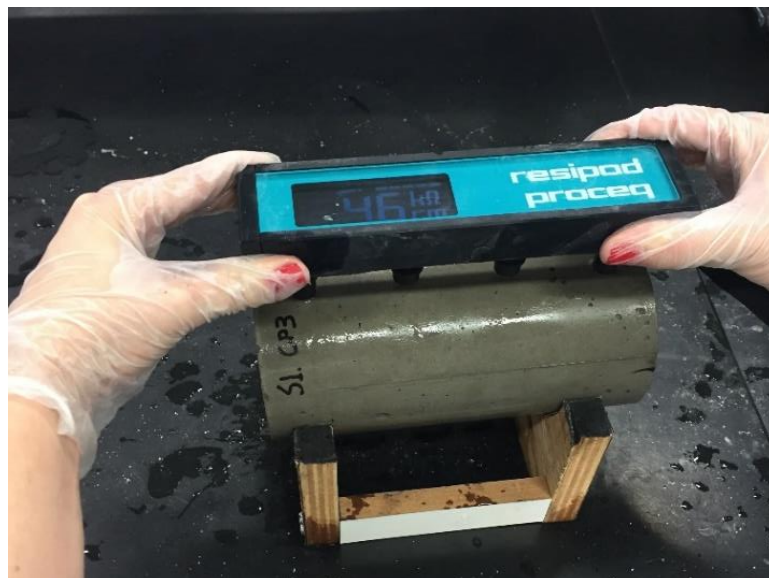
- A adoção do mesmo tipo de cura para evitar variações deste procedimento nos valores de resistividade elétrica superficial;
- Com exceção do momento de realização das medidas de resistividade elétrica superficial, os corpos de prova foram mantidos submersos para garantir o mesmo grau de saturação nas amostras. Isto porque este fator pode ter efeitos significativos sobre os valores de resistividade do concreto;
- Foi utilizada uma base de apoio para evitar a rotação dos corpos de provas durante os ensaios;
- O número de amostras de cada série foi determinado em quantidade muito superior ao mínimo sugerido pela AASHTO T-358-17, que é de três unidades para cada série de dados, para dar maior confiança aos resultados obtidos;
- Os corpos de prova foram marcados em sua face circular a cada 90°, como mostra a figura 4.6. Estas marcações tiveram como finalidade guiar o posicionamento do aparelho para garantir que as medições fossem feitas sempre no mesmo local.

Figura 4.6 – Marcações nos corpos de prova feitas a cada 90°.



- As medidas foram realizadas assim que as amostras eram retiradas da água, em uma janela de tempo de até cinco minutos. Para evitar erros de leitura, a superfície era devidamente preparada para que estivesse totalmente saturada, porém sem excesso de água – o que formaria um filme por cima da face do concreto.
- A Sonda Wenner foi posicionada longitudinalmente em relação ao corpo de prova, e eram então feitas quatro medidas, uma em cada marcação, e em seguida eram obtidas novas quatro medidas, totalizando 8 medições para cada uma das amostras, conforme figura 4.7.
- O valor resistividade elétrica superficial determinado para cada corpo de prova, foi obtido através da média simples das 8 aferições realizadas .

Figura 4.7 – Realização das medições de resistividade elétrica superficial.



Medidas de resistividade elétrica superficial foram feitas em todas as amostras, de ambas as séries, para observar o comportamento da resistividade elétrica ao longo da cura. As aferições foram realizadas nos dias 3, 7, 14 e 28 após a data da moldagem. Durante toda esta etapa, os corpos de prova foram mantidos saturados, e em ambiente de laboratório. Os resultados obtidos são apresentados no capítulo seguinte.

4.9 Segunda etapa experimental

Durante esta segunda etapa experimental, diferentemente da etapa anterior que analisou indiretamente, através da variação da relação água/cimento, parâmetros inerentes à confecção do concreto, objetivou-se analisar a influência de fatores extrínsecos ao material nas medidas de resistividade elétrica superficial. Foram verificados os efeitos das variações da temperatura do meio ambiente nos valores de resistividade elétrica superficial do concreto para as duas séries de corpos de prova elaboradas na etapa anterior.

Para a realização desta etapa, foram selecionados 6 corpos de prova de cada série. Estas amostras foram retiradas de laboratório e posicionadas em ambiente externo, sujeito às variações normais do meio ambiente, tais como temperatura, umidade, incidência solar, chuvas e ventos.

Parte das amostras foi mantida saturada, na mesma caixa com água utilizada na primeira etapa, para a realização do controle das condições de umidade. Estes corpos de prova submersos não estariam então sujeitos às variações de umidade, ficando sucessíveis apenas as mudanças relativas à temperatura ambiental. Assim, criaram-se duas situações de umidade diferentes dentro de um mesmo traço, como demonstrado na tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Resumo de variáveis – 2ª Etapa experimental

Resumo de Variáveis				
	Série 1		Série 2	
	Submerso	Seco	Submerso	Seco
Quantidade de Amostras	3	3	3	3
Relação a/c	0,65	0,65	0,45	0,45

Com os corpos de prova devidamente posicionados em ambiente externo e descoberto, conforme demonstra a figura 4.8, foram feitas medidas da resistividade elétrica superficial durante 48 horas. Para o controle da temperatura e umidade aos

quais as amostras estavam submetidas, foi utilizado um termo higrômetro. A obtenção dos valores de resistividade superficial elétrica seguiu as recomendações da AASHTO T358-17, e os procedimentos descritos na etapa anterior.

Figura 4.8 – Corpos de prova das Séries 1 e 2, secos e submersos com controle da temperatura e expostos ao ambiente externo.



4.10 Terceira etapa experimental

O objetivo da terceira etapa experimental foi avaliar os efeitos da variação da temperatura nos valores da resistividade elétrica superficial do concreto. O fato de a resistividade elétrica ser uma propriedade susceptível à diversos fatores, impõe a este trabalho o desafio de trabalhar os efeitos da temperatura de maneira isolada. Assim, buscou-se minimizar a influência de todos os outros parâmetros intervenientes.

Para esta última etapa foi escolhida uma única série de corpos de prova. Pela facilidade de confecção, e considerando que, em um concreto com maior porosidade superficial os efeitos da temperatura na resistividade elétrica seriam observados em menor tempo, optou-se em utilizar o mesmo traço da Série 1, com relação água/cimento igual a 0,65.

Foram fabricadas ao todo 20 amostras idênticas, com seção circular, diâmetro igual a 100mm e altura de 200mm, conforme tabela 4.7. Assim como nas outras etapas precedentes, os procedimentos de moldagem das amostras seguiram as recomendações da Norma Brasileira NBR 5738:2015 - Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Após 24 horas da moldagem, os corpos de prova foram desmoldados e submersos em água da rede de distribuição para a realização da cura.

Tabela 4.7 - Resumo de variáveis – 3ª Etapa experimental

Resumo de Variáveis	
	Série 1
Quantidade de Amostras	20
Traço (massa)	1:2:2,5
Relação a/c	0,65

O concreto é um material essencialmente heterogêneo e mesmo entre amostras provenientes de uma mesma concretagem é possível observar variações em sua microestrutura, decorrentes da própria natureza do material. Assim, para evitar que características individuais das amostras analisadas influenciassem nos valores de resistividade elétrica superficial analisados, foi necessário garantir uma homogeneidade entre o grupo estudado.

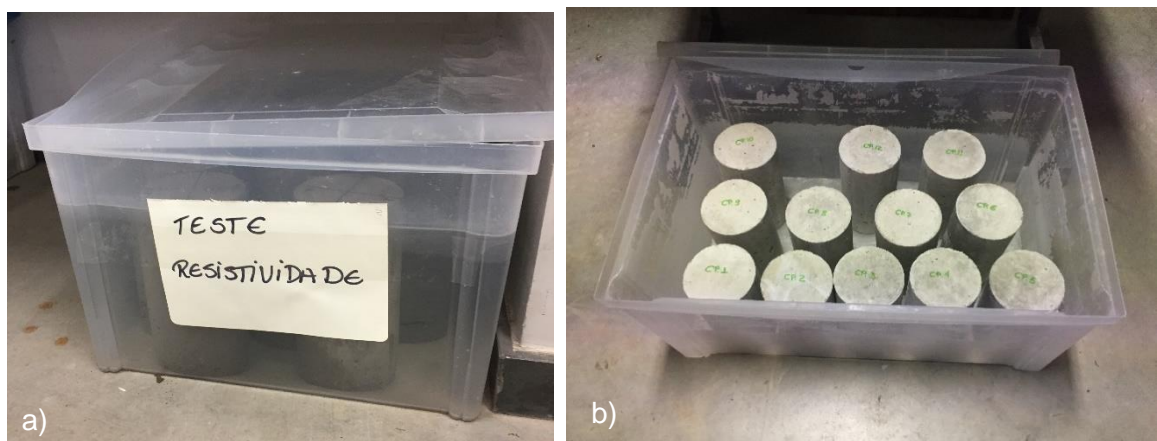
Desta forma, após o procedimento completo de cura, por 28 dias, as amostras foram retiradas da água e submetidas ao teste de ultrassom, segundo figura 4.9. Este ensaio teve como objetivo selecionar, dentre os 20 corpos de prova confeccionados, os 12 CPs com medidas de velocidade de pulso ultrassônico mais próximas, o que forneceu um parâmetro de suas características microestruturais. O resultado dos testes ultrassônicos é apresentado no capítulo seguinte.

Figura 4.9 – Realização de ultrassom nos corpos de prova secos.



Devido às reações de hidratação da pasta de cimento, os valores de resistividade elétrica do concreto variam muito nas primeiras idades. Em razão disto, outra medida utilizada, para mitigar a sobreposição de efeitos atuantes nos valores de resistividade superficial do concreto, foi aguardar o tempo de 12 meses entre a data da moldagem e o início das medições de resistividade. Para evitar a contaminação do concreto e a ocorrência de carbonatação ao longo deste período de 12 meses, as amostras selecionadas foram mantidas submersas em água potável dentro de ambiente de laboratório, segundo figura 4.10.

Figura 4.10 – Local de armazenamento dos corpos de prova durante 12 meses.

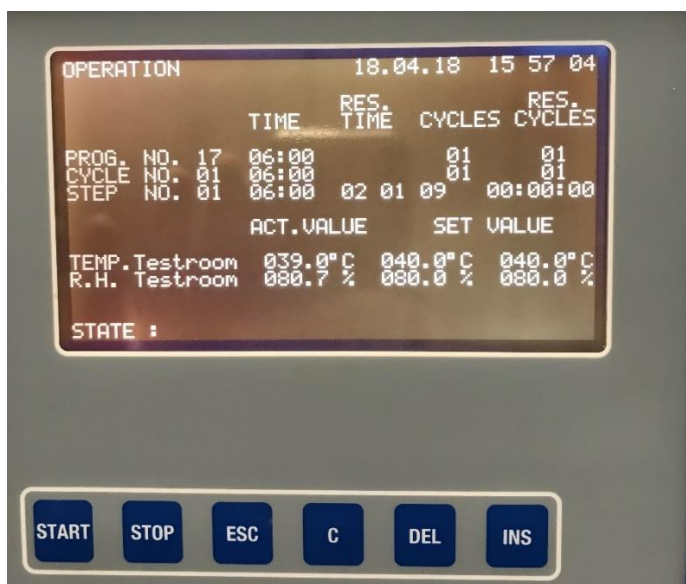


Após o período de espera, iniciaram-se os testes envolvendo a câmara de intemperismo e as variações dos valores de temperatura. A primeira medida adotada foi a determinação experimental do tempo de exposição ideal dentro da câmara. Esta definição foi feita através de testes para as temperaturas de 5°C e de 40°C.

A câmara foi programada para funcionar durante 6 horas ininterruptas, com temperatura igual a 5°C, e umidade relativa a 80%. Assim que o interior do equipamento alcançou as condições climáticas determinadas, foram então colocados em seu interior 3 corpos de prova, escolhidos dentre os 12 selecionados pelo ultrassom. Em intervalos regulares de tempo as amostras foram retiradas da câmara e seus valores de resistividade elétrica superficial foram aferidos com a sonda Wenner. Este procedimento continuou até que as medidas obtidas fossem consideradas constantes, o que se deu após 4 horas de exposição.

Para a confirmação de que o tempo de 4 horas seria o suficiente para que a temperatura da região superficial do concreto fosse considerada em equilíbrio com o ambiente da câmara, o mesmo procedimento foi repetido, sendo que desta vez foi estabelecida a temperatura de 40°C, segundo figura 4.11. Novamente, o tempo de equilíbrio das aferições de resistividade elétrica superficial foi igual a 4 horas.

Figura 4.11 – Visor da câmara com a programação do teste de 40°C.



Os resultados desta determinação experimental estão detalhados no próximo capítulo, para cada temperatura foram feitas 8 medições, conforme esquema detalhado na tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Medições para a determinação experimental do tempo teste.

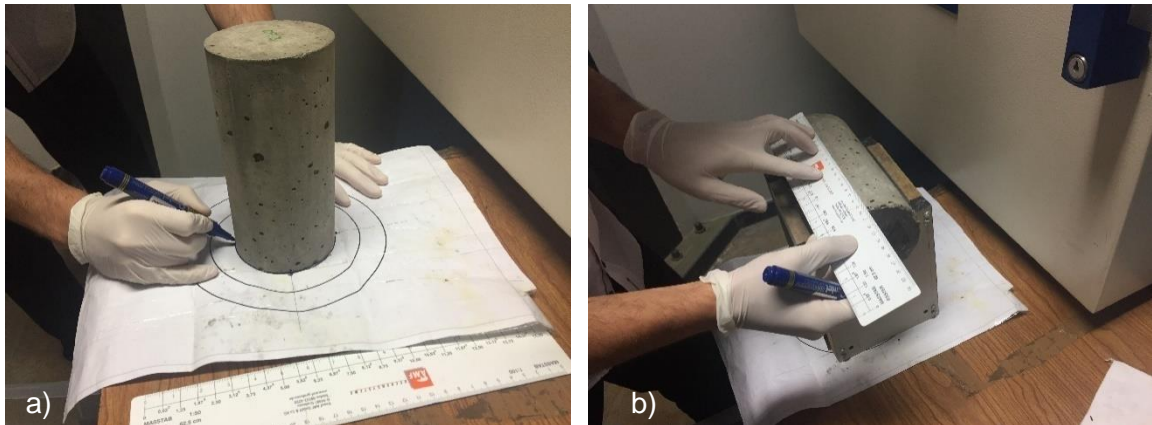
Temperaturas de 5°C e 40°C	
Nº Medição	Tempo (min)
1	0
2	15
3	30
4	45
5	60
6	120
7	180
8	240

Definidas as condições de contorno do ensaio, foram iniciados os testes que avaliaram as variações causadas na resistividade elétrica superficial do concreto causadas pela mudança de temperatura.

O local de realização dos testes foi devidamente preparado ao lado da câmara de intemperismo. Era importante que as medições de resistividade fossem feitas nas amostras imediatamente após serem retiradas da câmara para evitar perda da temperatura. Para os testes foram utilizados um suporte de madeira, com o intuito de evitar a rotação do corpo de prova, e uma bacia para umidificação dos eletrodos, além do aparelho para obtenção dos valores de resistividade elétrica superficial, a sonda Wenner que atua com o método dos quatro eletrodos.

Como nas etapas precedentes, foram cumpridas as recomendações metodológicas propostas pela American Association of State Highway and Transportation Officials - Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration" (AASHTO T358-17), inclusive quanto aos procedimentos de preparo das amostras, como mostra a figura 4.12.

Figura 4.12 – Preparo das amostras conforme recomendação AASHTO T358-17.



A câmara foi programada para funcionar durante 4 horas ininterruptas, com temperatura igual a 55°C, e umidade reativa a 80%. Quando atingida a temperatura e o teor de umidade estabelecidos, eram posicionados os doze corpos de prova no interior do equipamento, como na figura 4.13. Para garantir as mesmas condições de saturação, aos serem colocados na câmara, os CPs estavam submersos e em temperatura ambiente, dentro do laboratório onde se situava a câmara.

Figura 4.13 – Amostras posicionadas na câmara de intemperismo durante a realização dos testes.



As amostras ficaram então submetidas à mesma temperatura durante as 4 horas de ensaio e somente após a finalização do tempo de ensaio foram retiradas para

obtenção das medidas de resistividade elétrica superficial, segundo figura 4.14. Para manter a temperatura dos corpos de prova, eles foram ensaiados um e um, sendo que a porta de vedação da câmara de intemperismo foi mantida fechada para evitar a queda de temperatura em seu interior.

Este mesmo procedimento foi repetido para cada uma das temperaturas ensaiadas, sendo ensaiada uma de cada vez. Deste modo, foram obtidos os valores de resistividade elétrica superficial para cada um dos 12 corpos de prova nas temperaturas de 5° a 55° conforme esquema da tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Medições para a determinação experimental do tempo de teste.

Resistividade Elétrica Superficial		
Nº Medição	Quantidade de Amostras	Temperatura (°C)
1	12	5
2	12	10
3	12	25
4	12	40
5	12	55

Figura 4.14 – Realização das medições de resistividade elétrica superficial.



Os resultados obtidos são discutidos a seguir.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste item são apresentados, em tabelas e gráficos, os resultados obtidos em cada uma das três etapas experimentais realizadas. Visando facilitar a compreensão das diferentes fases da pesquisa optou-se por incluir a análise dos resultados, e demais considerações acerca dos dados obtidos, também neste capítulo e não em um tópico à parte.

5.1 Resultados da primeira etapa experimental

Nesta etapa foi analisada a variação da resistividade elétrica superficial do concreto ao longo do período de cura, durante 28 dias. Foram confeccionadas duas séries de amostras, sendo a relação água/cimento a única variável diferente entre elas.

As medições de resistividade elétrica superficial foram feitas aos 3, 7, 14 e 28 dias da data da moldagem. Ao longo de toda esta fase experimental os corpos de prova foram mantidos submersos em água para garantir a saturação completa das amostras.

As tabelas 5.1 e 5.2 apresentam uma síntese dos valores obtidos de resistividade elétrica superficial em $k\Omega.cm$. Os corpos de prova nomeados com a sigla "S1" são pertencentes à Série 1, com relação a/c de 0,65, e os nomeados com a sigla "S2" pertencem à Série 2, com relação a/c de 0,45. Os valores apresentados correspondem à média dos valores obtidos para cada amostras.

A tabela completa com todos os resultados se encontra ao final deste trabalho, no Apêndice A.

Tabela 5.1 – Resultados dos testes realizados nos dias 3 e 7 após a moldagem.

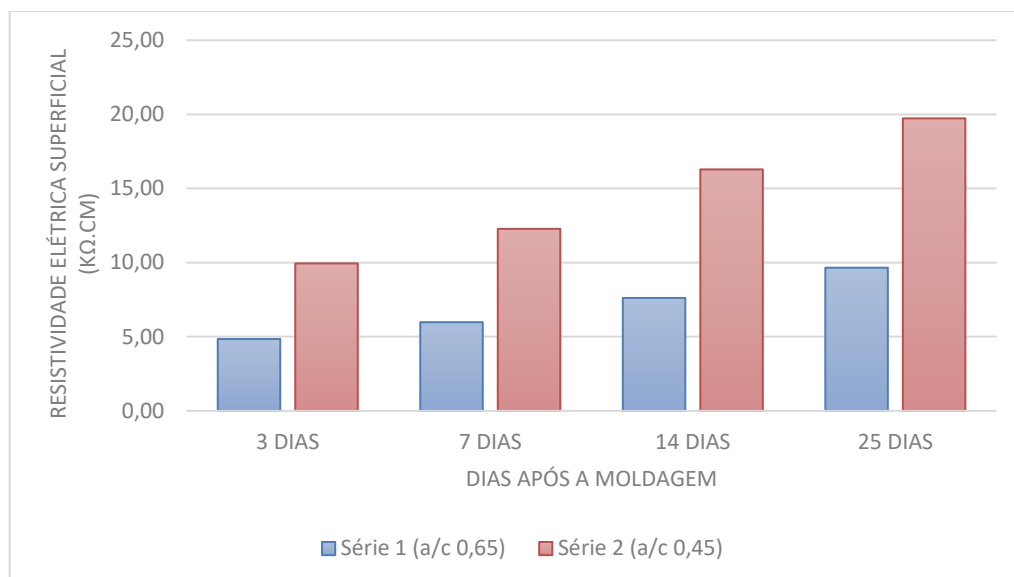
Resistividade Elétrica Superficial (kΩ.cm) – Dia 3 da moldagem				Resistividade Elétrica Superficial (kΩ.cm) – Dia 7 da moldagem			
Série 1 - a/c 0,65		Série 2 - a/c 0,45		Série 1 - a/c 0,65		Série 2 - a/c 0,45	
Nº CP	Média	Nº CP	Média	Nº CP	Média	Nº CP	Média
S1 - 1	5,15	S2 - 1	9,20	S1 - 1	6,03	S2 - 1	11,68
S1 - 2	4,78	S2 - 2	10,48	S1 - 2	5,88	S2 - 2	13,53
S1 - 3	4,58	S2 - 3	10,18	S1 - 3	6,03	S2 - 3	12,55
S1 - 4	4,95	S2 - 4	10,83	S1 - 4	6,01	S2 - 4	13,10
S1 - 5	4,85	S2 - 5	9,88	S1 - 5	5,85	S2 - 5	12,50
S1 - 6	5,05	S2 - 6	10,25	S1 - 6	6,25	S2 - 6	13,03
S1 - 7	4,88	S2 - 7	9,80	S1 - 7	6,18	S2 - 7	12,25
S1 - 8	4,78	S2 - 8	10,08	S1 - 8	5,98	S2 - 8	12,20
S1 - 9	5,03	S2 - 9	10,03	S1 - 9	6,03	S2 - 9	12,83
S1 - 10	4,60	S2 - 10	9,70	S1 - 10	6,03	S2 - 10	12,20
S1 - 11	4,95	S2 - 11	9,50	S1 - 11	5,95	S2 - 11	11,28
S1 - 12	4,90	S2 - 12	10,05	S1 - 12	5,88	S2 - 12	11,63
S1 - 13	4,73	S2 - 13	9,73	S1 - 13	6,05	S2 - 13	11,50
S1 - 14	4,75	S2 - 14	9,55	S1 - 14	5,95	S2 - 14	11,63
Média	4,85		9,95		5,98		12,28
Desvio Padrão	0,17		0,42		0,11		0,68

Tabela 5.2 – Resultados dos testes realizados nos dias 14 e 28 pós a moldagem.

Resistividade Elétrica Superficial (kΩ.cm) – Dia 14 da moldagem				Resistividade Elétrica Superficial (kΩ.cm) – Dia 28 da moldagem			
Série 1 - a/c 0,65		Série 2 - a/c 0,45		Série 1 - a/c 0,65		Série 2 - a/c 0,45	
Nº CP	Média	Nº CP	Média	Nº CP	Média	Nº CP	Média
S1 - 1	7,83	S2 - 1	14,85	S1 - 1	9,75	S2 - 1	18,83
S1 - 2	7,50	S2 - 2	16,40	S1 - 2	9,88	S2 - 2	19,78
S1 - 3	7,55	S2 - 3	16,25	S1 - 3	9,43	S2 - 3	20,40
S1 - 4	7,55	S2 - 4	16,58	S1 - 4	9,45	S2 - 4	20,80
S1 - 5	7,53	S2 - 5	15,58	S1 - 5	9,43	S2 - 5	19,83
S1 - 6	7,85	S2 - 6	16,03	S1 - 6	9,95	S2 - 6	20,98
S1 - 7	7,83	S2 - 7	16,63	S1 - 7	10,00	S2 - 7	19,75
S1 - 8	7,58	S2 - 8	17,55	S1 - 8	9,63	S2 - 8	20,00
S1 - 9	7,63	S2 - 9	16,38	S1 - 9	9,93	S2 - 9	20,13
S1 - 10	7,48	S2 - 10	15,03	S1 - 10	9,43	S2 - 10	19,50
S1 - 11	7,68	S2 - 11	15,05	S1 - 11	9,45	S2 - 11	18,90
S1 - 12	7,43	S2 - 12	17,35	S1 - 12	9,65	S2 - 12	19,53
S1 - 13	7,78	S2 - 13	16,90	S1 - 13	9,95	S2 - 13	18,85
S1 - 14	7,68	S2 - 14	17,48	S1 - 14	9,53	S2 - 14	18,98
Média	7,62		16,29		9,66		19,73
Desvio Padrão	0,14		0,90		0,23		0,70

Os dados acima foram organizados em um gráfico de barras para uma melhor visualização dos resultados obtidos, segundo a figura 5.1. O gráfico leva em consideração a média geral dos valores obtidos para as séries S1 e S2 para cada um dos dias de medição sendo eles D.3, D.7, D.14 e D.28.

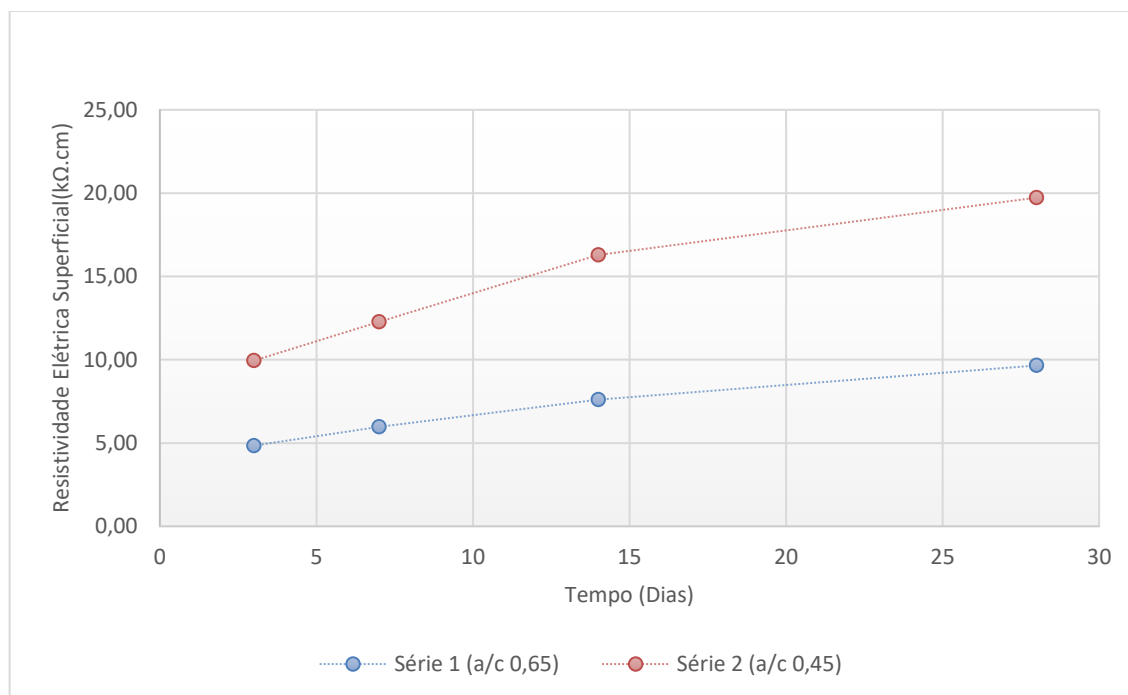
Figura 5.1 – Valores de Resistividade Obtidos para as Séries S1 e S2.



Observou-se para as duas séries estudadas um crescimento dos valores de resistividade ao longo dos 28 dias de cura, conforme demonstra melhor a figura 5.2. O aumento de resistividade elétrica superficial verificado entre os dias 28 e 3 da dada da moldagem, foi de aproximadamente 99% para ambas as séries.

De um modo geral, comparando-se os dois tipos de concreto, a mistura da Série 2, com menor relação água/cimento, igual 0,45, mostrou-se mais resistiva do que a mistura da Série 1, com relação a/c igual a 0,65. Este resultado foi verificado em todas as idades medidas.

Ao longo do período de cura, a Série 2 apresentou resistividade elétrica superficial superior à Série 1 em uma proporção média de 107%. Este comportamento é compatível com o esperado uma vez que o aumento de água na mistura está diretamente relacionado com a quantidade de poros e suas interconexões. Quanto maior a quantidade de água na mistura, maior será a porosidade, o que resulta em valores mais baixos de resistividade.

Figura 5.2 – Gráfico Resistividade ($k\Omega.cm$) x Tempo de Cura (dias).

A conexão entre a relação água/cimento e a resistividade elétrica é ainda mais relevante quando considerada de modo superficial uma vez que é através da superfície do concreto que ocorrem os processos de exsudação da água de hidratação, aumento a porosidade na face do concreto.

Os resultados obtidos nesta etapa comprovam que a resistividade elétrica superficial é uma propriedade extremamente sensível às mudanças que ocorrem no âmbito microestrutural do concreto.

5.2 Resultados da segunda etapa experimental

O objetivo desta etapa foi entender como fatores extrínsecos ao concreto, atuando de maneira conjunta e sem controle, afetam suas medidas de resistividade superficial elétrica. Foram analisados quatro diferentes grupos de amostras sendo:

- Série 1, com relação a/c de 0,65, em condição seca;
- Série 1, com relação a/c de 0,65, em condição úmida;
- Série 2, com relação a/c de 0,45, em condição seca;

- Série 2, com relação a/c de 0,45, em condição úmida;

Os resultados encontrados se encontram resumidos na tabela 5.3. A tabela completa contendo todos os resultados obtidos se encontra no Apêndice B, deste mesmo documento.

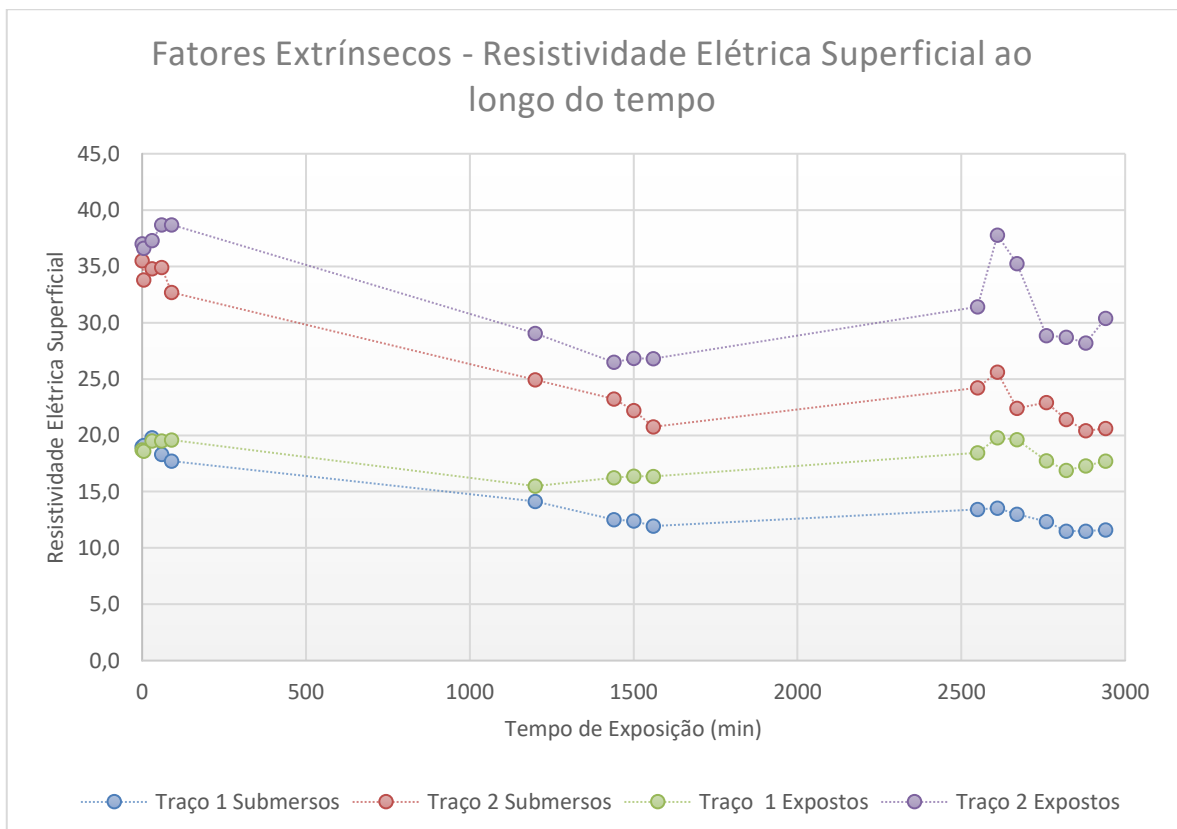
Tabela 5.3 – Resultados dos testes de resistividade em ambiente externo.

Resistividade Elétrica Superficial (kΩ.cm) – Ambiente Externo						
Dia	Horário	Tempo de Exposição (min)	Traço 1		Traço 2	
			Submersos	Expostos	Submersos	Expostos
25/01/2017	15:25	0	19,0	18,7	35,5	37,0
25/01/2017	15:30	5	19,1	18,6	33,8	36,6
25/01/2017	16:00	30	19,8	19,5	34,8	37,3
25/01/2017	16:30	60	18,3	19,5	34,9	38,7
25/01/2017	17:00	90	17,7	19,6	32,7	38,7
26/01/2017	11:30	1200	14,1	15,5	24,9	29,1
26/01/2017	15:30	1440	12,5	16,2	23,2	26,5
26/01/2017	16:30	1500	12,4	16,4	22,2	26,8
26/01/2017	17:30	1560	12,0	16,4	20,8	26,8
27/01/2017	10:00	2550	13,4	18,5	24,2	31,4
27/01/2017	11:00	2610	13,5	19,8	25,6	37,8
27/01/2017	12:00	2670	13,0	19,6	22,4	35,3
27/01/2017	13:30	2760	12,4	17,7	22,9	28,9
27/01/2017	14:30	2820	11,5	16,9	21,4	28,7
27/01/2017	15:30	2880	11,5	17,3	20,4	28,2
27/01/2017	16:30	2940	11,6	17,7	20,6	30,4

As medições de resistividade elétrica superficial realizadas neste procedimento experimental, foram integralmente feitas em ambiente externo, fora do laboratório, onde as amostras pudessem ficar expostas às variações normais que ocorrem no meio ambiente. Foram realizadas medidas em diferentes horários do dia, durante 48 horas para verificar possíveis variações de resistividade ao longo das horas do dia.

Os testes de resistividade elétrica superficial foram feitos durante pouco mais de 48 horas, o que englobou pelo menos de modo parcial, três dias. Observa-se que o horário de 15:30 foi comum aos três dias de estudo. Esperava-se que o mesmo horário correspondesse às medições similares de resistividade uma vez que agrega, de modo geral, as mesmas condições climáticas, mesmo em dias diferentes. No entanto essa tendência não foi observada como evidencia o gráfico da figura 5.3.

Figura 5.3 – Variação da resistividade elétrica superficial durante o tempo de exposição.



Ressalta-se que durante os ensaios foi feito um registro da temperatura no momento de realização de cada medida. Os valores encontrados estão elencados na tabela 5.4 e não revelaram grandes variações que pudessem ser diretamente relacionadas às modificações observadas na resistividade superficial das amostras.

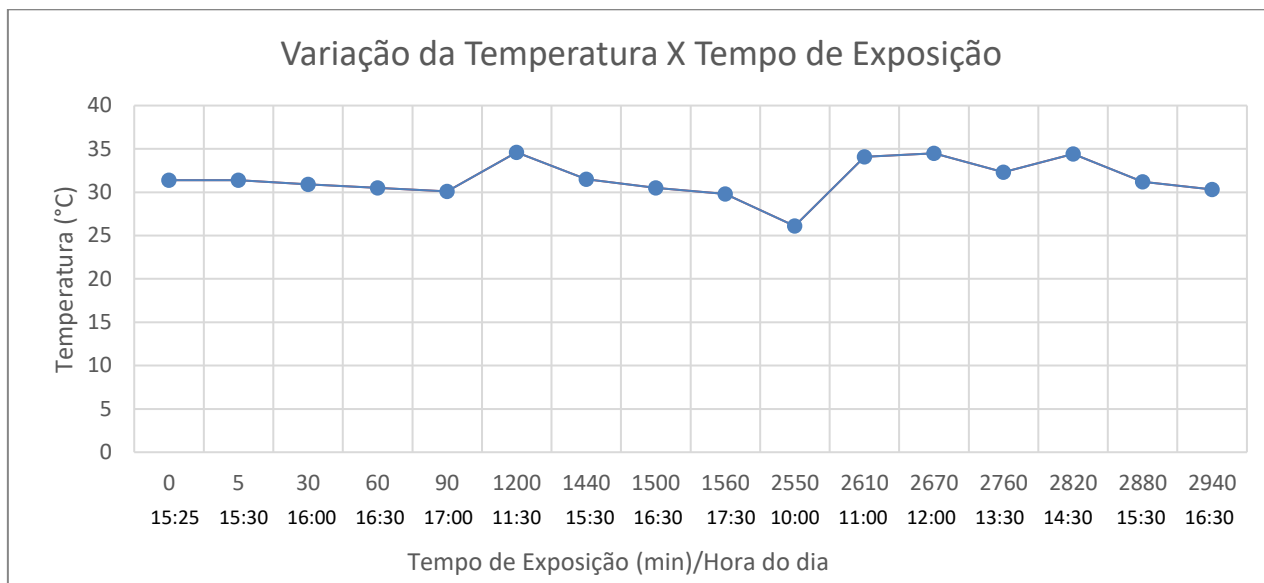
Tabela 5.4 – Valores de temperatura obtidos durante os testes em ambiente externo.

Resistividade Elétrica Superficial (k Ω .cm)			
Dia	Horário	Tempo de Exposição (min)	Temperatura (°C)
25/01/2017	15:25	0	31,4
25/01/2017	15:30	5	31,4
25/01/2017	16:00	30	30,9
25/01/2017	16:30	60	30,5
25/01/2017	17:00	90	30,1
26/01/2017	11:30	1200	34,6
26/01/2017	15:30	1440	31,5
26/01/2017	16:30	1500	30,5
26/01/2017	17:30	1560	29,8
27/01/2017	10:00	2550	26,1
27/01/2017	11:00	2610	34,1
27/01/2017	12:00	2670	34,5
27/01/2017	13:30	2760	32,3
27/01/2017	14:30	2820	34,4
27/01/2017	15:30	2880	31,2
27/01/2017	16:30	2940	30,3

A figura 5.4 contém o gráfico que mostra a variação da temperatura durante a realização do ensaio. Observa-se que as variações ocorrem de maneira muito discreta e não podem ser diretamente relacionadas com as alterações obtidas nos valores de resistividade elétrica superficial.

Com base nos resultados obtidos, observa-se que a variação da resistividade elétrica superficial ao longo de diferentes horários do dia não seguiu uma tendência lógica, variando junto da temperatura como esperado. Toma-se de referência o horário de 15:30, que variou consideravelmente nas três medições feitas.

Figura 5.4 – Variação da temperatura durante o tempo de exposição.



Apesar deste teste ser inconclusivo no que diz respeito à variação da resistividade elétrica superficial em relação às alterações naturais do meio ambiente, é possível observar que a diferença nos valores de resistividade entre as séries com diferentes relações água/cimento se manteve em todas as medidas feitas.

A Série 2, com menor relação água/cimento (0,45) possui valores mais elevados de resistividade elétrica superficial em relação à Série 1 (a/c de 0,65), para ambas as condições testadas - úmida e seca. Isso demonstra que a influência do fator microestrutural do concreto é de maior relevância que os outros fatores verificados (saturação da amostra, temperatura do meio ambiente).

Ressalta-se, porém, que a influência da saturação da amostra também possui relevância e pôde ser comprovada para ambas as séries "S1" e "S2" em todas as medidas realizadas durante as 48 horas de testes. Para uma mesma série, os valores de resistividade elétrica superficial da amostra úmida (saturada) são sempre inferiores aos da amostra seca (não saturada).

Os resultados obtidos nesta etapa mostraram que a execução da 3ª Etapa experimental, onde é analisada a influência da temperatura em uma câmara de intemperismo, foi de extrema importância para a conclusão deste estudo.

A resistividade é uma propriedade extremamente sensível, tanto aos fatores intrínsecos, quanto aos fatores extrínsecos ao concreto. Para a análise adequada de um determinado parâmetro, é necessário desconsiderar a atuação de qualquer outro elemento interveniente.

Deste modo, para o estudo adequado e preciso da influência da temperatura do meio ambiente nos valores de resistividade elétrica superficial, é preciso analisar este parâmetro de maneira isolada, o que se torna inviável quando o concreto está exposto ao meio externo. Isto porque, em um ambiente não controlado, sujeito à diversos fatores cuja influência sobre a resistividade no concreto ainda não é conhecida, fica inviável precisar qual elemento está influenciando as medidas obtidas. Pode-se citar como agentes extrínsecos, passíveis de ocasionar alterações nas medidas de resistividade elétrica do concreto além da temperatura, a umidade relativa do ar, incidência direta de luz solar, presença de vento ou de chuvas, entre outros.

5.3 Resultados da terceira etapa experimental

A terceira e última etapa de experimentos buscou analisar de maneira isolada a influência da temperatura do meio ambiente nos valores de resistividade elétrica superficial do concreto. Para isto foi feito o uso de uma câmara de intemperismo, que controla com precisão não somente a temperatura, mas também a umidade relativa do ar em seu interior.

O primeiro passo desta fase foi confecção de nova série de amostras, utilizando o mesmo traço de uma das séries utilizadas na primeira etapa experimental. Dentre as séries testadas anteriormente, optou-se por refazer o mesmo traço da Série 1, com relação água/cimento de 0,65. Esta escolha amparou-se no pressuposto que um concreto com maior porosidade superficial apresentaria resultados mais evidentes, em menor tempo de exposição dentro da câmara de intemperismo.

Foi executado um total de 20 corpos de prova, que foram então submetidos ao ensaio de velocidade de pulso ultrassônico, teste realizado para assegurar a homogeneidade das amostras entre si. Este ensaio de ultrassom serviu de

parâmetro da qualidade do concreto confeccionado e orientou a seleção das 12 amostras mais similares para serem submetidas aos testes na câmara de intemperismo. A quantidade de doze amostras foi definida de acordo com a capacidade do equipamento de variação térmica.

Os resultados do ensaio de velocidade de pulso ultrassônico, estão relacionados a seguir, na tabela 5.5.

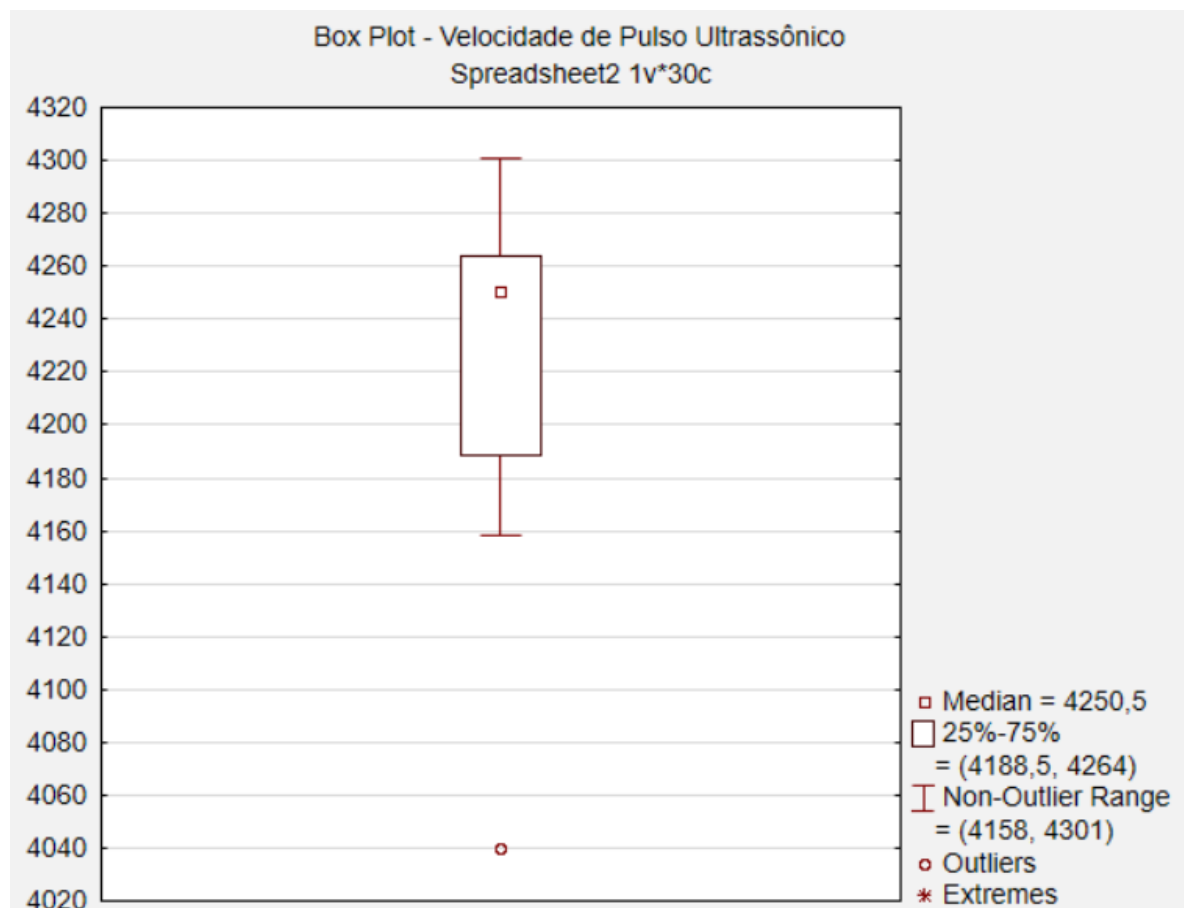
Tabela 5.5 – Resultados do ensaio de velocidade de pulso ultrassônico.

Teste de Velocidade de Pulso Ultrassônico				
Numeração Inicial	Tipo Leitura		Classificação da amostra	Numeração Definitiva
	T (μ/s)	V (μ/s)		
1	46,8	4274	Aprovado	1
2	47	4255	Aprovado	2
3	48,1	4158	Aprovado	-
4	47,1	4246	Aprovado	3
5	49,5	4040	Eliminado	
6	46,5	4301	Eliminado	
7	47,6	4202	Aprovado	4
8	48,1	4158	Aprovado	-
9	47	4255	Aprovado	5
10	46,8	4274	Aprovado	-
11	47,9	4175	Aprovado	6
12	47,5	4211	Aprovado	7
13	48	4167	Aprovado	8
14	47,4	4219	Aprovado	9
15	46,9	4264	Aprovado	10
16	46,7	4283	Eliminado	
17	48,9	4264	Eliminado	
18	46,9	4264	Aprovado	11
19	47,6	4202	Aprovado	12
20	48,9	4264	Eliminado	

Infere-se dos resultados que, dos vinte corpos de prova iniciais foram aprovados os quinze com menor variação entre si. Destas quinze amostras, foram escolhidas as doze com os valores de velocidade de pulso ultrassônico mais parecidos, amostragem considerada adequada.

A escolha das amostras teve como base um estudo estatístico, apresentado em forma de “Box-Plot” na figura 5.5. Este gráfico consiste em um retângulo definido pelo primeiro e pelo terceiro quartil de dados, e evidencia onde está localizada a maioria dos resultados. O valor central é dado pela mediana, que aparece no centro do retângulo. O gráfico ainda fornece os limites inferiores e superiores da amostra analisada eliminando automaticamente os resultados dispersos, considerados “outliers”.

Figura 5.5 – Box Plot com o resultado dos valores de velocidade de pulso ultrassônico.



Com base na análise estatística, constata-se que o valor mediano encontrado é igual 4250,5 m/s, e a maioria dos valores da amostra se encontra entre 4188,5 m/s e 4264 m/s. Os corpos de prova selecionados foram aqueles cujos valores ficaram dentro ou mais próximos do quadrante principal (25%-75%) com a parte mais representativa das velocidades obtidas.

As amostras designadas como definitivas receberam nova numeração de 1 a 12, que foi utilizada durante os testes feitos na câmara de intemperismo.

Ainda sobre a qualidade e homogeneidade das amostras de concreto utilizadas nesta terceira etapa experimental, foram realizados os ensaios de módulo de elasticidade e resistência à compressão axial. Destaca-se que estes ensaios objetivaram a caracterização do concreto utilizado para a análise da variação da resistividade em decorrência da mudança de temperatura. Os ensaios feitos na câmara de intemperismo foram executados mais de um ano após a data da moldagem para evitar os efeitos intervenientes das reações de hidratação. Assim, o ensaio de módulo e compressão visaram a caracterização deste concreto, já com a idade de um ano, e, devido à característica destrutiva dos ensaios, estes foram executados somente após a finalização das medições feitas na câmara de intemperismo. Foram utilizadas três amostras, o mínimo segundo a AASHTO T358-17, para cada um dos ensaios de caracterização. Os resultados destes ensaios são apresentados nas tabelas 5.6 e 5.7.

Tabela 5.6 – Resultados do ensaio de resistência à compressão axial.

Resistência à Compressão Axial				
Nº CP	Diâmetro (mm)	Inc. Tensão (MPa/s)	Força Máx. (N)	Tensão (MPa)
CP 2	100	0,45	224497,17	28,5
CP 5	100	0,45	230603,86	29,3
CP 9	100	0,45	254267,28	32,3

Tabela 5.7 – Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade.

Módulo de Elasticidade					
Nº CP	Resistência Efetiva (MPa)	Tensão em 30% da Ruptura Prevista	Deformação em 30% da Ruptura Prevista	Deformação em 0,5 MPa	Módulo de Elasticidade (GPa)
CP 1	30,07	9,7	0,00049	0,00002	22,022
CP 3	26,8	9,7	0,00048	0,00002	21,743
CP 6	29,79	9,7	0,00055	0,00002	19,198

Com base nos resultados obtidos, verifica-se que a média dos valores de resistência à compressão axial (considerando as tensões obtidas as ambos os ensaios) é de 29,5 MPa, e o valor médio do módulo de elasticidade é de 21 GPa.

Antes do início dos testes de variação da temperatura na câmara de intemperismo, era primordial a definição do tempo de exposição das amostras dentro da câmara. A escolha do tempo foi feita com base em testes preliminares, onde foi medida a variação da resistividade elétrica superficial em três corpos de prova, escolhidos aleatoriamente dentre os 12 definitivos, em função do tempo de exposição para as temperaturas de 5°C e de 40°C. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Resultados dos testes de tempo de exposição no interior da câmara de intemperismo nas temperaturas de 5°C e 40°C.

Resistividade Elétrica Superficial – Valores Médios (kΩ.cm)									
Tempo em exposição dentro da câmara de intemperismo									
Tempo de Exposição	5°C				Média	40°C			Média
	CP 1	CP 2	CP 3	CP 1		CP 2	CP 3		
00:00	10,1	9,6	9,8	9,8	9,8	9,2	9,6	9,5	
00:15	11,8	11,1	11,4	11,4	7,8	7,3	7,8	7,7	
00:30	13,0	11,9	12,4	12,4	7,5	7,0	7,4	7,3	
00:45	13,3	12,2	12,8	12,7	7,4	7,0	7,3	7,2	
01:00	14,1	12,9	13,4	13,5	7,2	6,9	7,1	7,1	
02:00	15,0	13,8	14,3	14,4	7,1	6,8	6,9	6,9	
03:00	15,4	14,1	14,6	14,7	7,1	6,7	6,8	6,8	
04:00	15,5	14,2	15,1	15,0	6,9	6,6	6,9	6,8	

Baseando-se nos resultados obtidos, constatou-se que as maiores variações nos valores de resistividade elétrica superficial ocorrem ao longo da primeira hora de exposição. A partir da primeira hora de exposição ainda são identificadas variações na resistividade. No entanto, estas variações ocorrem de maneira mais sutil, e tendem a se equilibrar ao longo do tempo, sendo que, para a temperatura de 40°C, os valores encontrados na terceira e quarta hora podem ser considerados iguais.

Desta maneira, definiu-se como adequado o tempo de 4 horas para que as amostras fiquem no interior da câmara de intemperismo, sujeitas a uma temperatura específica, sendo feitas as medições de resistividade somente após decorrido este tempo.

Os gráficos dos perfis de comportamento dos valores de resistividade elétrica superficial, durante as quatro horas dentro da câmara, para ambas as temperaturas testadas, se encontram a seguir nas figuras 5.6 e 5.7

A análise dos gráficos permite concluir, ainda que preliminarmente, que a diminuição da temperatura ocasiona um aumento nos valores de resistividade elétrica superficial e que o comportamento contrário é observado quando ocorre o aumento da temperatura. As variações dos valores de resistividade elétrica superficial são analisadas mais detalhadamente adiante.

Observa-se que os valores de resistividade elétrica superficial da amostra identificada como "CP 2" são menores em todas as medições feitas, para ambas as temperaturas de 5°C e 40°C, ao passo que os valores do "CP1" foram também maiores em todas as verificações. Este fato se deve, possivelmente à organização microestrutural destas amostras.

Figura 5.6 – Comportamento da resistividade elétrica superficial para 4 horas de exposição a uma temperatura de 5°C.

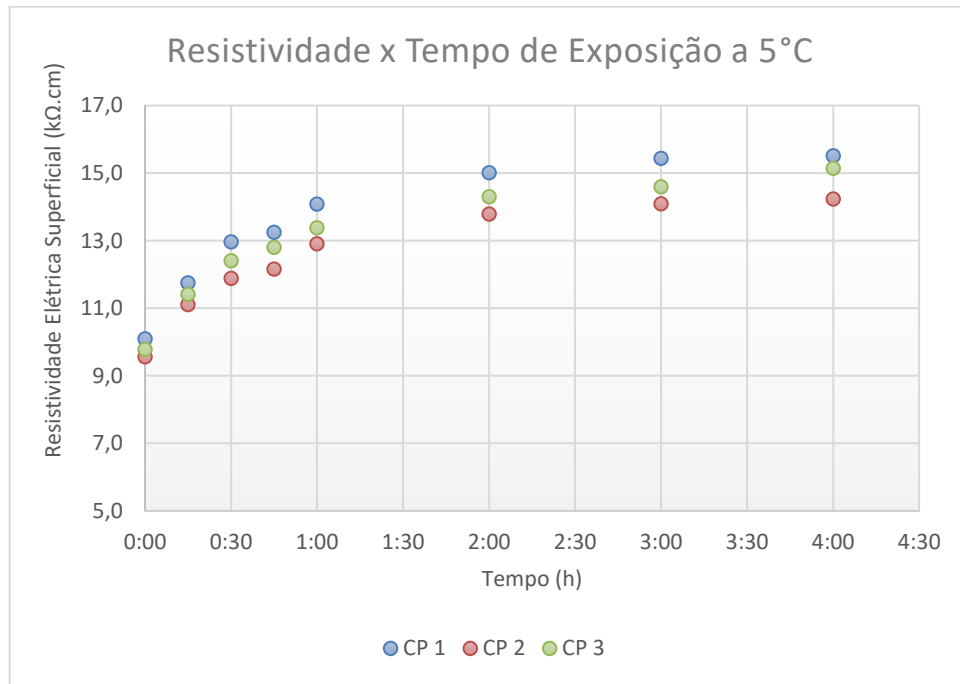
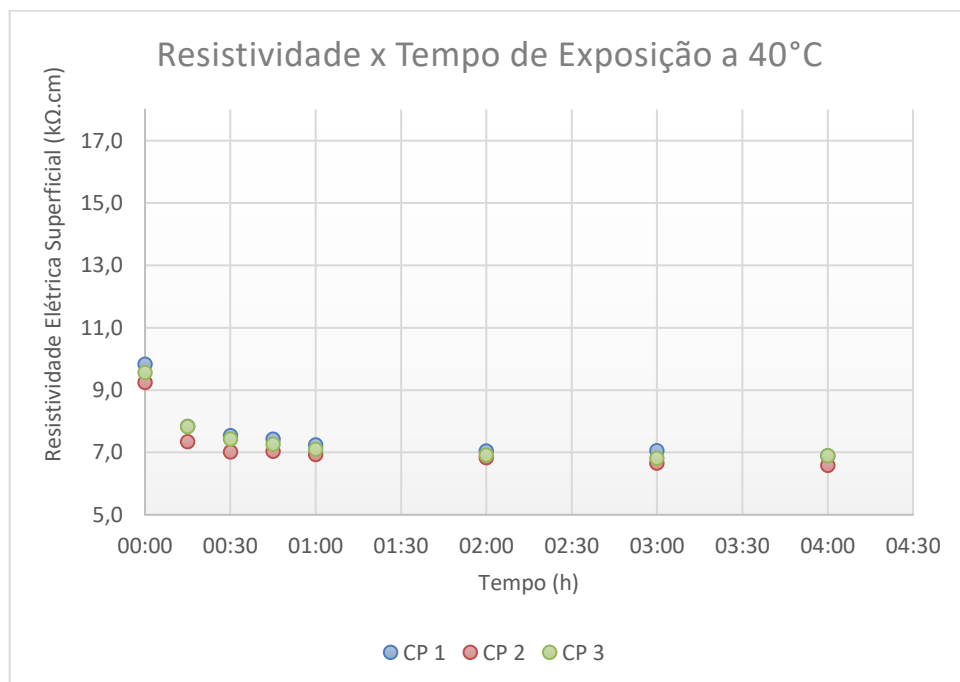


Figura 5.7 – Comportamento da resistividade elétrica superficial para 4 horas de exposição a uma temperatura de 40°C.



Definido o tempo de exposição, foi iniciada a última etapa deste trabalho experimental onde foram examinadas as variações dos valores de resistividade elétrica superficial do concreto ocasionadas por alterações nos valores de temperatura do ambiente. Os testes foram feitos separadamente para as temperaturas 5°C, 10°C, 22°C, 40°C e 55°C. Em todas as temperaturas, a umidade relativa do ar – no interior da câmara de intemperismo – foi mantida em 80%. Os resultados obtidos são evidenciados tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Resultados dos testes de variação de temperatura na câmara de intemperismo.

Resistividade Elétrica Superficial – Valores Médios (kΩ.cm)					
Nº CP	Temperatura				
	5°C	10°C	22°C	40°C	55°C
1	15,5	13,5	9,9	6,9	5,8
2	14,2	12,6	9,6	6,6	5,2
3	15,1	13,0	9,5	6,9	5,6
4	15,1	13,1	9,3	6,9	5,5
5	14,8	13,2	9,6	6,9	5,7
6	15,2	13,1	9,3	6,9	5,7
7	17,1	14,7	10,7	7,8	6,8
8	15,3	13,1	9,4	7,0	5,7
9	14,5	12,4	9,2	6,7	5,5
10	16,6	14,4	10,4	7,8	6,6
11	15,4	13,4	10,1	7,0	5,9
12	15,5	13,5	10,0	7,3	6,3
Média	15,4	13,3	9,7	7,1	5,9

Para a devida análise dos resultados obtidos nesta terceira etapa experimental, foi realizada análise estatística dos dados por meio da análise de variância (ANOVA), apresentada na tabela 5.10. Foi adotado um nível de confiança de 95%, significando que havia 95% de probabilidade de que o valor esperado da resistividade elétrica superficial se encontrava dentro do conjunto de valores apresentado.

Tabela 5.10 – Valores de resistividade elétrica superficial medidos com a variação de temperatura em cinco níveis.

ANOVA					
Causas de Variação	Soma dos Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade (ϕ)	Quadrado Médio (QM)	F_t Snedecor 5%	F calculado
Tratamentos	783,31	4	195,83	2,59	592,09
Resíduo	18,19	55	0,33		
Total	801,50	59			

Pela análise de variância foi demonstrado que a mudança de temperatura influencia nas medidas de resistividade elétrica superficial do concreto, já que F calculado foi maior que o F_t , evidenciando que existe uma diferença significativa entre as médias encontradas para cada temperatura.

De forma a demonstrar como as médias encontradas diferem entre si, foi realizada a comparação de médias, duas a duas, pelo método Turkey. O referido método fornece a diferença mínima significante (d.m.s) entre duas médias. Se o valor absoluto da diferença entre duas médias for maior do que a diferença mínima significante, as médias são consideradas estatisticamente diferentes ao nível de significância estabelecida.

A tabela 5.11, mostra a os resultados obtidos com a comparação das médias dos grupos de valores de resistividade elétrica superficial obtidos para cada temperatura testada.

Tabela 5.11 - Comparação de médias, duas a duas, pelo método Turkey

Comparação de médias para as temperaturas de 5°, 10°, 22°, 40° e 55°				
Comparação	Variação de temperatura (°C)	Diferença	d.m.s	Significante
5°C - 10°C	5°C	2,04	0,43	Sim
5°C - 22°C	17°C	5,61	0,43	Sim
5°C - 40°C	35°C	8,30	0,43	Sim
5°C - 55°C	50°C	9,50	0,43	Sim
10°C - 22°C	12°C	3,57	0,43	Sim
10°C - 40°C	30°C	6,26	0,43	Sim
10°C - 55°C	45°C	7,46	0,43	Sim
22°C - 40°C	18°C	2,69	0,43	Sim
22°C - 55°C	33°C	3,89	0,43	Sim
40°C - 55°C	15°C	1,20	0,43	Sim

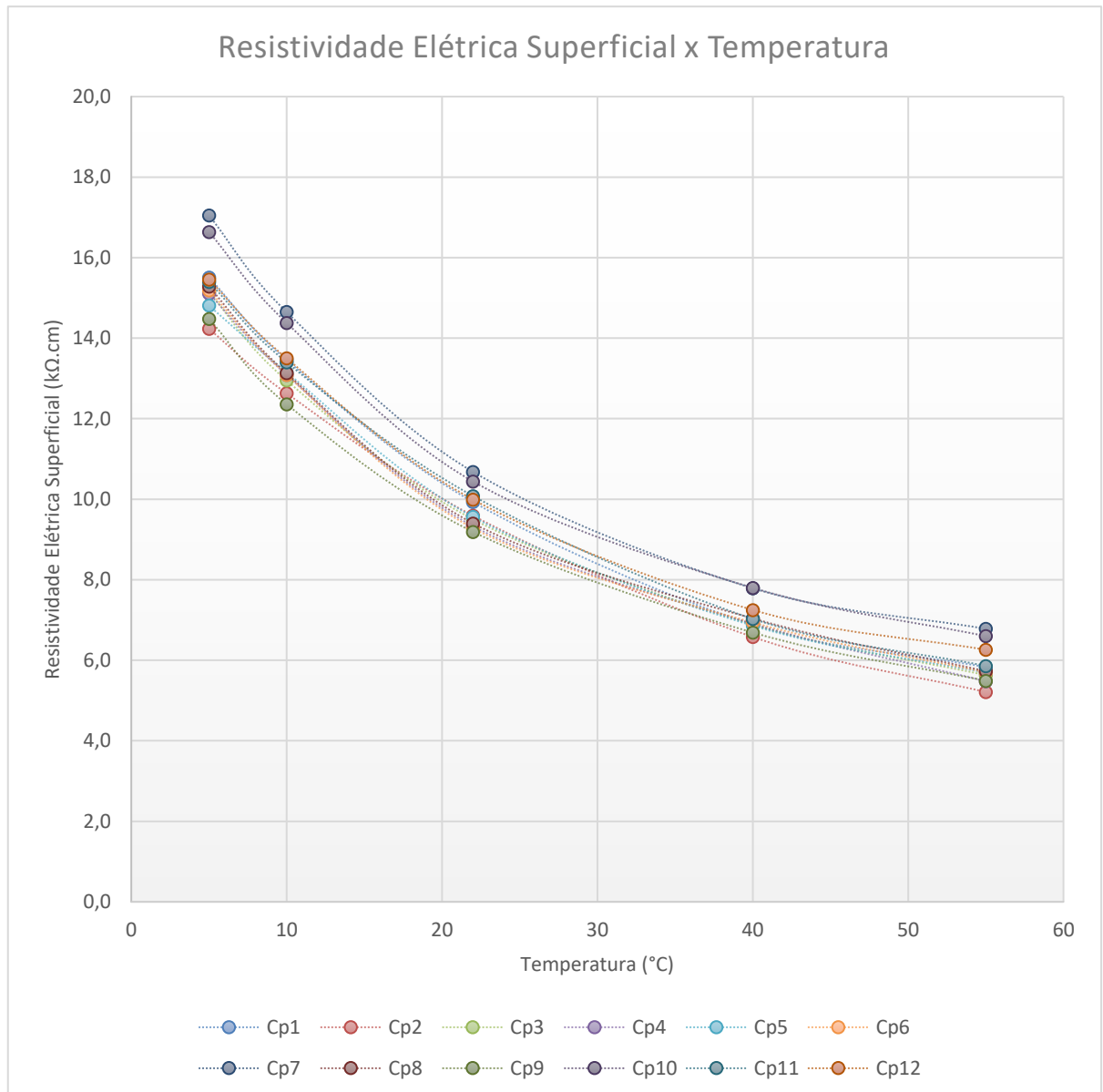
Com base na comparação de médias, observa-se que a temperatura afetou a variável resistividade elétrica superficial em todos os níveis de variações. Ou seja, em todos os grupos analisados foi constatada a influência da temperatura nos valores de resistividade, sendo que, quanto maior a variação de temperatura, maior a diferença nos valores de resistividade. A maior diferença foi constatada justamente entre os grupos de 5°C e 50°C.

Assim, com base nos resultados obtidos e análise estatística, verifica-se que, de uma maneira geral, os valores de resistividade elétrica superficial das doze amostras analisadas, variaram de maneira inversamente proporcional ao aumento de temperatura.

Ao serem submetidos por quatro horas à temperatura de 5°C, as amostras apresentaram seu valor máximo de resistividade, sendo o valor mínimo alcançado após a exposição à temperatura de 55°C. O gráfico apresentado na figura 5.8. mostra a variação de temperatura para cada um dos doze corpos de prova analisados. O comportamento observado é compatível com os resultados

encontrados por outros autores a respeito do tema, como pormenorizado no item 3.4.10 desta pesquisa.

Figura 5.8 – Resistividade Elétrica Superficial x Temperatura.



Constata-se que a variação da temperatura pode ocasionar alterações significativas nos valores de resistividade superficial do concreto. Neste teste realizado, o aumento da temperatura em 50°C, resultou em uma redução de quase 62% nos valores médios de resistividade das amostras de concreto. Pode-se dizer que a elevação temperatura do ambiente em 1°C acarretou uma redução de 1,23% na resistividade elétrica do concreto estudado.

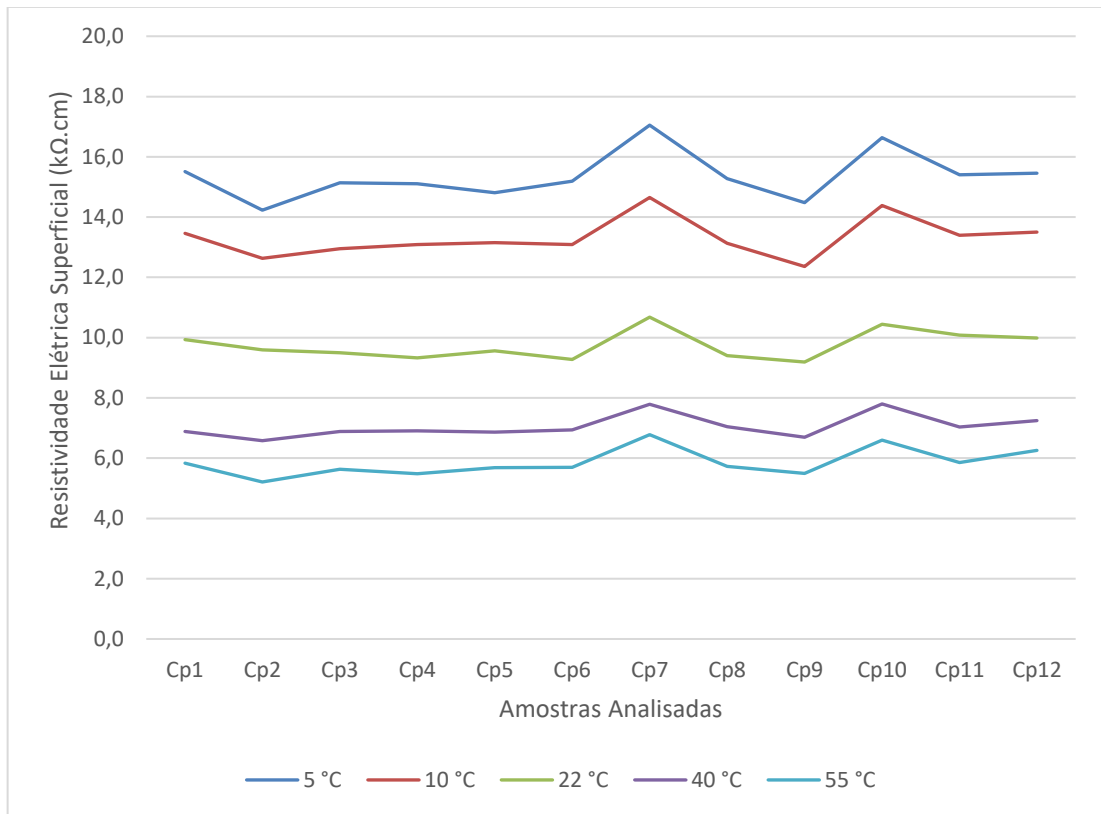
Esta variação pode ser atribuída às variações ocasionadas pela temperatura na mobilidade iônica do concreto. Em condição saturada, o concreto comporta-se como um material semicondutor, no qual o aumento da temperatura promove um enfraquecimento das ligações dos elétrons à estrutura atômica, aumentando a sua mobilidade o que conseqüentemente reduz a sua resistividade. Ressalta-se que a curva projetada pelo gráfico se assemelha fortemente com a curva que traduz o comportamento dos materiais semicondutores em relação aos parâmetros de resistividade x temperatura apresentada pela figura 3.1 desta pesquisa mesmo estudo.

O exame do gráfico permite também constatar que a a variação da relação água/cimento do concreto pode ser percebida independentemente das variações ocasionadas na resistividade elétrica superficial pela variação da temperatura.

Dentre o grupo de amostras de doze corpos de prova, teoricamente iguais pelo ponto de vista da engenharia civil, dois se apresentarem mais resistentes em todas as temperaturas, sendo eles o “CP 7” e o “CP 10”. Assim, como observado no teste de tempo de exposição, apesar de pertencerem a uma mesma série de amostras, constituídas pelo mesmo concreto, e possuírem valores de velocidade do pulso ultrassônico similares, as medidas de resistividade superficial consegue identificar diferenças existente na organização microestrutural de cada corpo de prova. Este fato leva à conclusão de que, o fator constitucional do material composto possui maior influência sobre os seus valores de resistividade elétrica superficial do que a variação da temperatura.

A figura 5.9 apresenta os mesmos resultados obtidos, organizados para cada amostra separadamente, possibilitando uma melhor visualização dos valores de resistividade elétrica de cada um deles para as cinco temperaturas testadas. Nota-se que as amostras denominadas “CP 7” e “CP 10” apresentam valores de resistividade mais elevados que as outras amostras em todas as temperaturas analisadas.

Figura 5.9 – Variação da resistividade por amostra para cada temperatura.



6 CONCLUSÕES

Esta pesquisa teve como objetivo principal a investigação dos efeitos causados na resistividade elétrica superficial pela variação da temperatura. Após a realização dos experimentos propostos e análise dos resultados obtidos, constatou-se que a resistividade elétrica superficial do concreto varia de forma inversamente proporcional à alteração da temperatura do meio ambiente no qual o material está inserido.

Um mesmo concreto, que em temperatura ambiente de aproximadamente 22°C apresenta valores de resistividade elétrica superficial em torno de 10,0 kΩ.cm, pode apresentar medidas de até 15,5 kΩ.cm a 5°C ou de 6,0kΩ.cm a 40°C. Conclui-se que a mudança de temperatura do ambiente pode acarretar em mudanças importantes na resistividade elétrica superficial do concreto e, caso este concreto esteja envolvendo uma armadura despassivada, pode acarretar mudanças importantes na cinética da corrosão.

Constatou-se, também, que a resistividade elétrica superficial é uma propriedade muito sensível às mudanças que ocorrem no âmbito microestrutural do concreto. Observou-se que quantidade de água disponível na mistura do concreto, ao afetar a estrutura de poros da matriz cimentícia, afeta de maneira significativa a resistividade do material. A redução da relação água/cimento de 0,65 para 0,45, ocasionou um aumento de aproximadamente 107% nos valores de resistividade elétrica superficial das amostras analisadas.

Conclui-se ainda no parâmetro microestrutural, que as reações de hidratação do cimento ocorridas durante o período de cura do concreto também afetam seus valores de resistividade elétrica superficial. Averiguou-se o aumento médio de 99% nos valores de resistividade, entre os dias 28 e 3 após a moldagem das amostras. Este aumento foi verificado para ambas as séries estudadas com relação água/cimento de 0,65 e 0,45.

Quando expostas em ambiente fora de laboratório, a série com menor relação água/cimento, igual a 0,45 apresentou valores mais elevados de resistividade elétrica superficial em relação à série com maior relação água/cimento, de 0,65 em todas as medições feitas, nas condições úmida e seca e em diferentes horários do dia.

Consta-se também que a influência da saturação da amostra também possui relevância nos parâmetros de resistividade elétrica superficial. Para uma mesma série, os valores de resistividade elétrica superficial da amostra úmida (saturada) foram em todas as medidas inferiores aos da amostra seca (não saturada).

A análise integrada dos resultados obtidos permite constatar que:

A técnica de obtenção dos valores de resistividade elétrica superficial é uma ferramenta capaz de fornecer importantes parâmetros sobre a qualidade do concreto. Entretanto, o conhecimento dos fatores que influenciam a resistividade é imprescindível para o entendimento adequado do comportamento do material.

Os parâmetros intrínsecos (microestruturais) são de extrema relevância para a análise da resistividade elétrica superficial do concreto. As variações ocasionadas por variações na matriz de poros do material permitiram a sua diferenciação, ao longo da cura, durante a sua exposição à ambiente externo fora do laboratório e durante as mudanças de temperatura, sendo que, neste caso foi possível até mesmo diferenciar amostras pertencentes a uma mesma série homogênea.

Para o estudo da influência dos fatores extrínsecos na resistividade elétrica superficial do concreto é necessário isolar todos os fatores intervenientes e analisá-los de maneira isolada. A resistividade pode sofrer interferências de diferentes elementos, sendo inviável entender a extensão e os efeitos de cada um deles de maneira combinada.

Ao longo de um único dia, podem ser observadas alterações nos valores de um mesmo elemento de concreto, *in loco*. A origem destas mudanças não pôde ser precisada com base nos experimentos feitos nesta pesquisa.

Ao se fazer uso da tecnologia de aferição da resistividade elétrica superficial de uma estrutura de concreto em campo, é muito importante a compreensão dos fenômenos que podem influenciar as medidas obtidas para a correta interpretação dos resultados.

7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Para a continuidade deste trabalho sugere-se:

- A realização de um estudo comparativo para analisar se a variação da resistividade ocasionada pela variação da temperatura acontece desta mesma forma para diferentes traços de concreto, com variações nos tipos de cimento e nas classes de resistência;
- elaboração de estudo que verifique a variação da resistividade em detrimento da temperatura em amostras carbonatadas ou contaminadas com íons cloreto e sulfato;
- o monitoramento da resistividade elétrica superficial de estruturas reais, situadas *in loco*, para entender como as medidas podem variar ao longo das horas do dia e até mesmo em diferentes meses do ano;
- a elaboração de estudos sobre outros fatores extrínsecos, principalmente a umidade relativa do ar, e a sua influência nos valores de resistividade superficial do concreto;
- a realização de testes em concreto armado para que sejam analisados os efeitos da presença de armaduras na resistividade elétrica superficial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9204**: Concreto endurecido – Determinação da resistividade elétrico-volumétrica – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

ANDRADE, C. **Calculation of initiation and propagation periods of service life of reinforcement by using the electrical resistivity**. In: International symposium on advances in concrete through science and engineering, RILEM. Evanston: 2004.

BERTOLINI, L.; POLDER, R. **TNO Report - 97-BT-R0574 - Concrete resistivity and reinforcement corrosion rate as a function of temperature and humidity of the environment**. TNO Building and Constructions Research. 1997

BILL, G.; KAWANAMI, I. **Influência da carbonatação na resistividade elétrica do concreto em face à variação da relação água/cimento**. Curitiba: UFP. 2016

CASTELLOTE, M.; ANDRADE, C.; ALONSO, C. **Standardization, to a reference of 25°C, of electrical resistivity for mortars and Concretes in saturated or isolated conditions**. ACI materials journal. v.99, n.2, 119-128. 2002.

CHI, J.; HUANG, R.; YANG, C. **Effects of carbonation on mechanical properties and durability of concrete using accelerated testing method**. Journal of marine science and technology. V.10, n.1, 14-20. 2002.

FIGUEIREDO, E. P. **Efeitos da carbonatação e de cloretos no concreto**. In: ISAIA, G. C. (Ed.) Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON, 2005, cap. 27.

GHOSH, P. TRAN, Q. **Influence of parameters on surface resistivity of concrete**. Cement & Concrete Composites. v. 62, 134-145. 2015.

GIROTTI, E. M.; SANTOS, I. A. **Medidas de resistividade elétrica dc em sólidos: como efetuá-las corretamente**. Química Nova, v. 25, n. 4, 639 – 647. 2002.

GJØRV, O. **Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade** – revisão técnica Enio Pazini Figueiredo e Paulo Helene – tradução Leda Maria Marques Dias Beck. São Paulo: Oficina de textos, 2015. p.238.

GOÑI, S. MORAGUES, A. ANDRADE, C. **Influencia de la conductividad y fuerza iónica de soluciones sintéticas que simulan la fase acuosa del hormigón em el fenómeno de la corrosión de armaduras**. Materiales de construcción. v.39, n.215, 19-28. 1989.

GOWERS, K. R.; MILLARD, S. G. **Measurement of concrete resistivity for assessment of corrosion severity of steel using Wenner technique.** ACI materials journal. V.96, n.5, 536-541, September-October 1999.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** São Paulo: USP, 1993.

HOPPE, T. F. **Resistividade elétrica de concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz.** Santa Maria: UFSM, 2005.

HORNBOSTEL, K.; LARSEN, C. K.; GEIKER, M. R. **Relationship between concrete resistivity and corrosion rate – A literature review.** Cement & Concrete Composites. v. 39, 60-72. 2013.

KEVERN. J, HALMEN. C, HUDSON. D. **Evaluation of resistivity meters for concrete quality assurance.** Final Report - Project TR201414 - Prepared for the Missouri Department of Transportation Construction & Materials research section. University of Missouri-Kansas City, Kansas City, MO. USA. 2015.

LAYSSI, H.; GHODS, P.; ALIZADEH, A.; SALEHI, M. **Electrical resistivity of concrete – concepts, applications and measurement techniques.** Concrete International. May – 2015. 41-46.

LENCIONI. J.W. **Estudos sobre resistividade elétrica superficial em concreto: análise e quantificação de parâmetros intervenientes nos ensaios.** São José dos Campos: ITA, 2011.

LENZ, L.; LONDERO, C.; KLEIN, N.; MAZER, W.; PEREIRA, D.; **Avaliação da influência do empacotamento dos agregados na durabilidade de concretos através de ensaios não destrutivos: resistividade elétrica e propagação de ondas de ultrassom.** Revista técnico-científica do CREA -PR. Ed. Especial.18p. 2017.

LIU, Y.; PRESUEL-MORENO, F. **Normalization of temperature effect on concrete resistivity by method using Arrhenius law.** ACI materials journal. v.111, n.4, 433-442. 2014.

MEDEIROS-JUNIOR, R.; LIMA, M. **Electrical resistivity of unsaturated concrete using different types of cement.** Construction and Building materials. v. 107, 11-16. 2016.

MEDEIROS-JUNIOR,R.; LIMA, M.; MEDEIROS, M.; REAL, L. **Investigação da resistência à compressão e da resistividade elétrica de concretos com diferentes tipos de cimento.** Revista Alconpat. v.4 n. 2, 116-132. 2014.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO. P.J.M. **Concreto – Microestrutura, propriedades e materiais.** 3ª Ed. São Paulo: Ibracon, 2008.674p.

MILLARD, S. G. **Reinforced concrete resistivity measurement techniques.** Proceedings of Institute if Civil Engineers. Vol. 91, parte 2, (1991), p. 71-88.

MORRIS, W.; MORENO, E.; SAGÜÉS A. **Practical evaluation of resistivity of concrete in test cylinders using a Wenner probe**. Cement and research, v. 26, n.12, 1779-1787. 1996.

MORRIS, W.; VICO M.; SANCHEZ. **Corrosion of reinforcing steel evaluated by means of concrete resistivity measurements**. Corrosion Science. v. 44, 81-99. 2002.

NEVILLE. A.M. **Propriedades do concreto** – Tradução Salvador E. Giammusso. São Paulo: Pini, 1982.

PÉREZ, E. **Influência da idade e cura do concreto na resistividade elétrica**. Goiania: UFG. 2015.

POLDER. R. **Test methods for onsite measurement of resistivity of concrete – a RILEM TC-154 technical recommendation**. Construction and building materials. v.15. 125-131. 2001.

PRUCKNER, F.; GJØRV, O. **Effect of CaCl₂ and NaCl additions on concrete corrosivity**. Cement and concrete research. v.34 1209-1217. 2004.

RIBEIRO. D; SALES A.; SOUSA. C.; ALMEIDA. F.; CUNHA. M.; LOURENÇO. M.; HELENE. P. **Corrosão em estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análise / organização Daniel Vêras Ribeiro**. 1ª Ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. 282p.

SALEEM, M.; SHAMEEM, M.; HUSSAIN, S.E.; MASLEHUDDIN, M. **Effect of moisture, chloride and sulfate contamination on the electrical resistivity of Portland cement concrete**. Construction and Building material. V.10 n.3. 209-214. 1996.

SANTOS. L.; **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto**. Brasília:UnB, 2006.

SILVA, L.M.A. **Resistividade elétrica superficial do concreto: Influência da cura**. Goiânia: UFG. 2016

VILLATE, E. J. **Física 2. Eletricidade e Magnetismo**. Porto: Jaime E. Villate, 2012. 224p.

YOUNG, Hugh D. **Física III: Eletromagnetismo/Young e Freedman**; 12ªEd. [colaborador A. Lewis Ford]; tradução Sonia Midori Yamamoto; revisão técnica Adir Moysés Luiz. São Paulo: Addison Wesley, 2009. 425p.

APÊNDICE A – Resultados 1ª etapa experimental

Tabelas com os resultados obtidos durante a primeira etapa experimental.

Valores de resistividade elétrica superficial para a Série 1 (a/c 0,65) e Série 2 (a/c 0,45), no dia 3 da data da moldagem. Valores em kΩ.cm.

Resistividade Elétrica Superficial – Dia 3 da moldagem (kΩ.cm)										
Série	Nº CP	Medição 1 0°	Medição 2 90°	Medição 3 180°	Medição 4 270°	Medição 5 0°	Medição 6 90°	Medição 7 180°	Medição 8 270°	Média
1	1	5,2	5,1	5,0	5,2	5,2	5,1	5,1	5,3	5,15
1	2	5,0	4,6	4,7	4,9	4,7	4,7	4,8	4,8	4,78
1	3	4,6	4,5	4,5	4,7	4,5	4,6	4,5	4,7	4,58
1	4	5,0	4,9	5,1	4,9	4,8	5,0	5,1	4,8	4,95
1	5	4,9	4,8	4,8	4,7	5,0	4,8	4,9	4,9	4,85
1	6	5,0	5,1	4,8	5,0	5,1	4,9	5,2	5,3	5,05
1	7	4,9	4,9	5,0	4,8	4,9	5,0	4,8	4,7	4,88
1	8	4,7	4,7	4,8	4,7	4,8	4,8	4,8	4,9	4,78
1	9	5,1	5,2	4,9	4,9	5,0	5,1	5,1	4,9	5,03
1	10	4,7	4,6	4,6	4,4	4,7	4,7	4,6	4,5	4,60
1	11	5,1	4,9	4,7	4,8	4,8	4,9	5,3	5,1	4,95
1	12	5,1	4,9	4,9	4,7	4,8	5,1	5,0	4,7	4,90
1	13	4,6	4,9	4,8	4,7	4,6	4,8	4,8	4,6	4,73
1	14	4,7	4,8	4,9	4,7	4,8	4,6	4,9	4,6	4,75
1	15	4,6	4,6	4,8	4,6	4,8	4,7	4,7	4,8	4,70
2	1	9,4	9,0	9,3	9,2	9,3	9,1	9,2	9,1	9,20
2	2	10,6	10,3	10,7	10,4	10,6	10,3	10,6	10,3	10,48
2	3	10,5	10,0	10,2	10,3	10,1	10,1	10,2	10,0	10,18
2	4	10,3	11,3	10,8	10,5	10,9	10,8	11,1	10,9	10,83
2	5	10,0	10,4	9,3	10,1	9,6	9,7	10,1	9,8	9,88
2	6	9,9	10,3	10,6	10,2	10,2	10,5	10,1	10,2	10,25
2	7	9,7	10,2	9,6	10,1	10,1	9,6	9,4	9,7	9,80
2	8	9,9	9,9	9,9	10,2	10,3	9,9	9,9	10,6	10,08
2	9	10,2	9,8	9,4	10,0	10,1	9,6	10,4	10,7	10,03
2	10	9,5	9,8	9,7	9,7	9,6	9,6	9,9	9,8	9,70
2	11	9,7	9,8	9,1	9,2	9,8	9,7	9,3	9,4	9,50
2	12	10,5	10,1	10,0	10,2	10,3	9,9	9,8	9,6	10,05
2	13	10,2	9,7	9,7	9,5	9,6	10,2	9,6	9,3	9,73
2	14	9,9	9,4	9,3	9,5	9,6	9,9	9,2	9,6	9,55

Valores de resistividade elétrica superficial para a Série 1 (a/c 0,65 e Série 2 (a/c 0,45), no dia 7 da data da moldagem. Valores em kΩ.cm.

Resistividade Elétrica Superficial – Dia 7 da moldagem (kΩ.cm)										
Série	Nº CP	Medição 1 0°	Medição 2 90°	Medição 3 180°	Medição 4 270°	Medição 5 0°	Medição 6 90°	Medição 7 180°	Medição 8 270°	Média
1	1	6,1	6,4	5,4	5,6	6,2	6,4	5,9	6,2	6,03
1	2	5,9	6,1	5,8	6,2	5,7	5,7	5,9	5,7	5,88
1	3	6,1	5,9	6	6,1	5,8	5,9	6,3	6,1	6,03
1	4	5,7	6	5,8	6,1	5,9	6,3	6,2	6,1	6,01
1	5	5,8	5,9	5,8	6,1	6,1	5,6	5,6	5,9	5,85
1	6	6,2	6,2	6,3	6,5	6,2	6,1	6,2	6,3	6,25
1	7	6	6,1	6,3	6,4	6,1	6,3	6,1	6,1	6,18
1	8	5,9	6,1	6,1	5,8	5,7	6,2	6,2	5,8	5,98
1	9	5,9	6,1	5,9	6,1	6,3	5,8	5,9	6,2	6,03
1	10	6,1	6,2	5,8	5,8	5,9	6,2	6,2	6	6,03
1	11	6	6,2	5,8	5,9	6,2	6,1	5,6	5,8	5,95
1	12	5,9	5,9	5,9	6,1	5,7	5,8	5,9	5,8	5,88
1	13	6	6,1	6,2	5,8	6,1	6,2	6,1	5,9	6,05
1	14	5,9	6	6	6,1	6,2	5,8	5,7	5,9	5,95
1	15	5,6	5,5	5,8	5,8	5,9	5,5	5,4	5,7	5,65
2	1	11,3	12,4	11,3	11,8	11,4	11,6	11,9	11,7	11,68
2	2	13,7	12,8	14,5	13,7	13,2	13,9	13,3	13,1	13,53
2	3	12,4	12,4	12,7	12,5	12,6	12,3	12,8	12,7	12,55
2	4	12,4	13,5	13,4	12,8	12,7	13,1	13,8	13,1	13,10
2	5	12,7	12,4	12,1	12,5	12,4	12,9	12,2	12,8	12,50
2	6	12,7	13,3	12,9	13,1	12,6	12,8	13,6	13,2	13,03
2	7	12,1	12,7	12,7	11,9	12,6	12,3	12,2	11,5	12,25
2	8	12,6	11,8	11,9	12,4	11,7	12,1	12,6	12,5	12,20
2	9	12,8	13	12,4	12,7	12,8	12,8	13	13,1	12,83
2	10	11,8	12,8	12,3	12,1	12,2	12,7	11,8	11,9	12,20
2	11	11,6	11,5	11	11,2	11,3	11,1	11,5	11	11,28
2	12	11,2	11,9	11,6	11,8	11,2	11,6	11,9	11,8	11,63
2	13	11,5	11,5	11,6	11,8	11,3	11,2	11,7	11,4	11,50
2	14	11,6	11,1	12,1	11,8	11,4	11,7	11,6	11,7	11,63

Valores de resistividade elétrica superficial para a Série 1 (a/c 0,65 e Série 2 (a/c 0,45), no dia 14 da data da moldagem. Valores em k Ω .cm.

Resistividade Elétrica Superficial – Dia 14 da moldagem (k Ω .cm)										
Série	Nº CP	Medição 1 0°	Medição 2 90°	Medição 3 180°	Medição 4 270°	Medição 5 0°	Medição 6 90°	Medição 7 180°	Medição 8 270°	Média
1	1	7,9	7,6	7,5	7,8	8,1	7,9	7,8	8	7,83
1	2	8	7,3	7,9	7,2	7,3	7,6	7,2	7,5	7,50
1	3	7,5	7,4	7,7	7,6	7,6	7,3	7,4	7,9	7,55
1	4	7,6	7,6	7,2	7,4	7,9	7,7	7,7	7,3	7,55
1	5	7,5	7,5	7,8	7,3	7,2	7,8	7,4	7,7	7,53
1	6	7,9	7,8	8,1	7,8	7,9	7,6	7,7	8	7,85
1	7	8	7,8	7,7	7,9	7,6	8,1	8	7,5	7,83
1	8	7,5	7,6	7,8	7,8	7,4	7,3	7,6	7,6	7,58
1	9	7,8	7,4	7,4	7,4	7,9	7,8	7,8	7,5	7,63
1	10	7,5	7,6	7,7	7,5	7,3	7,4	7,4	7,4	7,48
1	11	8	7,6	7,9	7,6	7,8	7,4	7,6	7,5	7,68
1	12	7,4	7,6	7,7	7,5	7,3	7,2	7,4	7,3	7,43
1	13	7,6	7,9	7,5	7,8	7,9	7,9	7,7	7,9	7,78
1	14	8	7,5	7,9	7,8	7,4	7,6	7,6	7,6	7,68
1	15	7,4	7,5	7,2	7,5	7,6	7,2	7,2	7,4	7,38
2	1	15,8	14,1	14,9	14,9	14,7	14,9	14,5	15	14,85
2	2	16,6	16,9	16,1	16,5	16,7	15,5	17,3	15,6	16,40
2	3	16,4	16	16,3	16,2	16,2	16,3	16,1	16,5	16,25
2	4	16,3	16,8	16,5	16,4	16,9	16,5	16,7	16,5	16,58
2	5	14,7	15,9	16,1	15,5	15,5	15,2	15,1	16,6	15,58
2	6	16,1	16,3	15,9	16,2	16,1	15,9	15,6	16,1	16,03
2	7	14,6	16,6	17,4	15,8	15,9	17,4	18	17,3	16,63
2	8	17,1	17,5	17,3	17,6	17,4	17,9	17,3	18,3	17,55
2	9	17,2	16	16,3	16,3	16,8	16,1	15,6	16,7	16,38
2	10	16,2	14,8	15,1	15,2	14,9	14,9	14,7	14,4	15,03
2	11	15,2	14,9	15,1	15,3	14,9	14,9	14,8	15,3	15,05
2	12	17,4	17,5	17,2	17,1	17,6	17,5	17,7	16,8	17,35
2	13	17,6	15,7	16,8	16,9	17,2	16,7	17,4	16,9	16,90
2	14	17,8	17,7	17,4	17,4	17,5	17,6	17,2	17,2	17,48

Valores de resistividade elétrica superficial para a Série 1 (a/c 0,65 e Série 2 (a/c 0,45), no dia 28 da data da moldagem. Valores em k Ω .cm.

Resistividade Elétrica Superficial – Dia 28 da moldagem (k Ω .cm)										
Série	Nº CP	Medição 1 0°	Medição 2 90°	Medição 3 180°	Medição 4 270°	Medição 5 0°	Medição 6 90°	Medição 7 180°	Medição 8 270°	Média
1	1	10	9,2	10,1	9,8	9,7	10,1	9,4	9,7	9,75
1	2	10,1	9,8	9,6	9,6	9,9	10,1	9,9	10	9,88
1	3	9,4	9,1	9,4	9,6	9,2	9,2	9,7	9,8	9,43
1	4	9,5	9,5	9,1	9,7	9,6	9,3	9,2	9,7	9,45
1	5	9,4	9,3	9,3	9,2	9,5	9,6	9,4	9,7	9,43
1	6	9,9	10,1	9,7	9,6	10,2	9,9	10,1	10,1	9,95
1	7	10	10,3	10	10,2	10,1	9,9	9,8	9,7	10,00
1	8	9,3	9,6	9,8	9,9	9,6	9,3	9,7	9,8	9,63
1	9	10,3	9,9	9,7	10,1	10,1	9,6	9,9	9,8	9,93
1	10	10	9,4	9,1	9,5	9,6	9,3	9,3	9,2	9,43
1	11	9,7	9,3	9,1	9,5	9,4	9,7	9,2	9,7	9,45
1	12	9,9	9,6	9,5	9,6	9,3	9,8	9,9	9,6	9,65
1	13	9,8	10	10,2	9,7	9,9	10,3	9,9	9,8	9,95
1	14	9,7	9,6	9,7	9,3	9,8	9,8	9,2	9,1	9,53
1	15	9,5	9,5	9,5	9,6	9,8	9,1	9,2	9,2	9,43
2	1	19,6	18,8	18,8	18,3	19,2	18,9	18,9	18,1	18,83
2	2	19,5	19,4	19,8	19,6	19,7	19,9	19,9	20,4	19,78
2	3	20,6	20,1	20,7	19,9	20,4	20,6	20,7	20,2	20,40
2	4	20,8	21,5	20,8	20,9	20,5	20,9	20,9	20,1	20,80
2	5	19,5	20,2	18,9	19,8	19,9	18,9	20,7	20,7	19,83
2	6	21,1	20,7	21,3	21,1	21,3	20,6	20,9	20,8	20,98
2	7	19,3	20,2	20,1	19,7	19,8	19,9	19,6	19,4	19,75
2	8	20,3	19,9	19,7	19,9	19,9	19,8	20,4	20,1	20,00
2	9	20,3	19,5	19,2	20,4	19,7	19,7	20,7	21,5	20,13
2	10	19	20,4	19,4	19,4	19,4	19,9	19,3	19,2	19,50
2	11	19,2	18,9	18,2	19,4	18,9	18,8	18,5	19,3	18,90
2	12	19,9	19,8	19,9	19,6	19,9	19,3	19,3	18,5	19,53
2	13	19,6	18,9	18,9	18,9	18,9	19,2	18,4	18	18,85
2	14	19,6	18,7	18,6	18,9	19,3	18,8	18,9	19	18,98

APÊNDICE B – Resultados 2ª etapa experimental

Tabelas com os resultados obtidos durante a segunda etapa experimental.

Valores de resistividade elétrica superficial para a Série 1 - Úmida e Seca (a/c 0,65 e Série 2 – Úmida e Seca (a/c 0,45), expostos ao ambiente externo, ao longo do tempo.

Resistividade Elétrica Superficial – Teste Fatores Extrínsecos (kΩ.cm)								
Tempo Exposição (min)	Série	Nº CP	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Média por CP	Média Geral
			0°	90°	180°	270°		
0	1-U	1	21,3	20,3	22,4	20,7	21,2	19,0
	1-U	2	17,1	16,8	19,2	18,4	17,9	
	1-U	3	17,4	17,7	19,1	17,3	17,9	
	1-S	4	19,2	19,8	18,2	18,9	19,0	18,7
	1-S	5	17,9	20,2	18,6	18,0	18,7	
	1-S	6	18,0	19,1	17,9	19,0	18,5	
	2-U	1	37,3	32,3	32,5	33,4	33,9	35,5
	2-U	2	35,1	37,8	37,3	32,2	35,6	
	2-U	3	33,4	40,8	38,0	35,6	37,0	
	2-S	4	35,8	34,2	37,9	41,1	37,3	37,0
	2-S	5	39,7	36,7	32,8	36,0	36,3	
	2-S	6	34,7	36,3	37,4	40,8	37,3	
5	1-U	1	21,0	21,4	21,9	19,8	21,0	19,1
	1-U	2	19,4	18,2	19,0	18,1	18,7	
	1-U	3	17,7	18,4	17,4	16,9	17,6	
	1-S	4	19,1	20,5	18,0	19,3	19,2	18,6
	1-S	5	18,2	18,5	18,6	18,3	18,4	
	1-S	6	17,8	18,7	17,5	18,5	18,1	
	2-U	1	35,2	32,7	34,4	31,9	33,6	33,8
	2-U	2	33,5	33,5	35,0	32,3	33,6	
	2-U	3	32,4	34,8	36,1	34,0	34,3	
	2-S	4	35,1	33,6	35,6	38,4	35,7	36,6
	2-S	5	37,0	36,1	32,5	36,4	35,5	
	2-S	6	34,6	40,1	39,3	40,0	38,5	
30	1-U	1	21,6	21,7	20,4	22,2	21,5	19,8
	1-U	2	20,1	19,1	19,8	18,7	19,4	
	1-U	3	19,0	18,6	17,6	19,0	18,6	
	1-S	4	19,8	21,8	21,0	20,0	20,7	19,5
	1-S	5	17,6	19,2	19,0	19,0	18,7	
	1-S	6	19,1	19,3	18,2	19,5	19,0	
	2-U	1	35,6	34,8	33,4	33,6	34,4	34,8

	2-U	2	35,2	35,1	36,6	33,3	35,1	
	2-U	3	33,8	36,6	35,3	34,7	35,1	
	2-S	4	36,8	39,6	36,1	42,3	38,7	
	2-S	5	32,0	34,5	35,1	37,1	34,7	37,3
	2-S	6	40,1	35,8	40,3	37,8	38,5	
60	1-U	1	20,1	19,1	19,2	19,0	19,4	
	1-U	2	18,5	17,5	19,0	18,2	18,3	18,3
	1-U	3	16,7	17,3	16,8	17,6	17,1	
	1-S	4	20,4	21,2	20,1	19,8	20,4	
	1-S	5	19,0	19,2	18,5	19,2	19,0	19,5
	1-S	6	19,0	19,4	18,8	19,8	19,3	
	2-U	1	34,5	33,7	34,7	32,5	33,9	
	2-U	2	35,0	33,6	36,7	34,7	35,0	34,9
	2-U	3	37,8	34,7	35,5	35,1	35,8	
	2-S	4	41,8	37,6	40,7	41,8	40,5	
	2-S	5	33,7	37,1	37,1	36,8	36,2	38,7
	2-S	6	36,8	40,7	39,8	40,7	39,5	
90	1-U	1	19,2	19,7	18,8	18,4	19,0	
	1-U	2	17,1	15,8	18,4	16,9	17,1	17,7
	1-U	3	17,7	16,6	16,6	17,1	17,0	
	1-S	4	20,2	20,2	20,9	19,4	20,2	
	1-S	5	19,0	19,1	19,4	19,0	19,1	19,6
	1-S	6	20,2	19,2	18,9	19,1	19,4	
	2-U	1	31,1	31,9	31,4	31,1	31,4	
	2-U	2	33,0	35,2	33,3	32,2	33,4	32,7
	2-U	3	33,1	33,2	34,0	32,5	33,2	
	2-S	4	37,6	42,5	39,5	40,8	40,1	
	2-S	5	33,7	36,8	35,8	37,4	35,9	38,7
	2-S	6	40,3	37,6	41,4	40,7	40,0	
1200	1-U	1	15,0	14,1	14,4	14,5	14,5	
	1-U	2	14,7	13,1	14,0	14,1	14,0	14,1
	1-U	3	13,6	14,5	13,7	13,9	13,9	
	1-S	4	15,3	14,9	15,0	16,0	15,3	
	1-S	5	14,9	15,6	15,5	15,5	15,4	15,5
	1-S	6	16,1	15,8	15,6	15,7	15,8	
	2-U	1	26,0	23,4	23,6	23,8	24,2	
	2-U	2	24,1	23,8	24,1	24,7	24,2	24,9
	2-U	3	27,7	25,5	26,1	26,5	26,5	
	2-S	4	30,4	27,1	31,3	29,2	29,5	
	2-S	5	27,5	30,0	24,8	28,0	27,6	29,1
	2-S	6	29,7	31,5	28,3	31,0	30,1	
1440	1-U	1	13,0	13,1	13,0	12,7	13,0	
	1-U	2	12,2	11,9	13,2	12,0	12,3	12,5
	1-U	3	12,3	12,2	11,8	12,6	12,2	
	1-S	4	18,2	16,8	16,2	16,5	16,9	16,2
	1-S	5	15,2	15,3	15,1	15,8	15,4	

	1-S	6	16,4	16,8	16,1	16,5	16,5	
	2-U	1	23,8	22,8	21,7	21,7	22,5	
	2-U	2	20,9	24,1	23,6	23,2	23,0	23,2
	2-U	3	24,5	23,7	23,5	25,3	24,3	
	2-S	4	29,4	27,8	29,8	26,0	28,3	
	2-S	5	24,5	23,9	23,4	25,5	24,3	26,5
	2-S	6	25,9	26,8	28,3	26,5	26,9	
	1-U	1	12,8	12,7	12,6	12,2	12,6	
	1-U	2	12,7	13,1	12,1	13,2	12,8	12,4
	1-U	3	11,7	12,4	11,5	11,7	11,8	
	1-S	4	17,2	17,1	16,7	17,9	17,2	
	1-S	5	15,5	15,9	15,4	16,0	15,7	16,4
	1-S	6	16,0	16,5	16,1	16,4	16,3	
1500	2-U	1	23,6	21,5	21,4	20,7	21,8	
	2-U	2	22,3	22,4	22,5	21,2	22,1	22,2
	2-U	3	22,7	22,5	21,8	23,8	22,7	
	2-S	4	28,1	28,5	26,1	29,4	28,0	
	2-S	5	26,1	23,4	26,1	25,6	25,3	26,8
	2-S	6	26,5	28,0	27,5	26,8	27,2	
	1-U	1	12,4	12,1	12,1	12,4	12,3	
	1-U	2	12,6	11,9	12,2	11,7	12,1	12,0
	1-U	3	12,1	11,2	11,5	11,3	11,5	
	1-S	4	16,7	17,3	16,5	16,4	16,7	
	1-S	5	16,0	16,1	15,8	16,3	16,1	16,4
	1-S	6	16,0	16,4	16,5	16,3	16,3	
1560	2-U	1	19,8	19,6	20,1	21,2	20,2	
	2-U	2	20,5	18,8	19,8	21,1	20,1	20,8
	2-U	3	22,5	22,0	21,3	22,5	22,1	
	2-S	4	28,3	27,0	27,2	28,3	27,7	
	2-S	5	27,0	25,4	26,4	23,6	25,6	26,8
	2-S	6	27,9	26,0	27,4	27,1	27,1	
	1-U	1	13,8	13,9	13,7	13,8	13,8	
	1-U	2	14,4	13,2	14,1	13,9	13,9	13,5
	1-U	3	12,6	13,0	12,7	13,2	12,9	
	1-S	4	20,3	20,8	17,8	20,2	19,8	
	1-S	5	18,5	19,7	19,3	19,5	19,3	19,8
	1-S	6	20,8	18,9	21,1	20,5	20,3	
2550	2-U	1	24,6	24,4	26,7	25,2	25,2	
	2-U	2	23,9	24,8	25,9	25,2	25,0	25,6
	2-U	3	27,6	25,7	27,5	26,0	26,7	
	2-S	4	37,0	33,3	34,1	34,1	34,6	
	2-S	5	39,0	36,3	37,0	37,3	37,4	37,8
	2-S	6	39,2	41,5	40,1	44,4	41,3	
	1-U	1	13,6	12,8	13,7	13,5	13,4	
2610	1-U	2	12,6	12,8	13,4	13,7	13,1	13,0
	1-U	3	12,8	12,7	12,2	12,3	12,5	

	1-S	4	19,7	19,4	19,7	19,9	19,7	
	1-S	5	18,5	19,1	18,9	19,3	19,0	19,6
	1-S	6	19,7	20,6	19,3	21,2	20,2	
	2-U	1	22,5	21,6	20,9	21,8	21,7	
	2-U	2	21,8	20,8	22,7	21,9	21,8	22,4
	2-U	3	23,4	24,4	23,1	24,1	23,8	
	2-S	4	34,0	35,1	35,5	35,5	35,0	
	2-S	5	33,4	34,9	34,1	34,2	34,2	35,3
	2-S	6	39,0	37,5	36,2	33,6	36,6	
	1-U	1	12,5	12,2	12,5	12,7	12,5	
	1-U	2	12,8	12,8	12,5	12,6	12,7	12,4
	1-U	3	12,0	11,8	11,6	12,2	11,9	
	1-S	4	17,8	18,6	18,0	18,2	18,2	
	1-S	5	17,2	16,9	16,7	17,4	17,1	17,7
	1-S	6	18,3	17,4	18,4	17,9	18,0	
2670	2-U	1	21,5	22,4	21,2	21,6	21,7	
	2-U	2	22,6	23,3	23,4	22,1	22,9	22,9
	2-U	3	24,1	23,9	24,3	24,7	24,3	
	2-S	4	32,1	27,3	30,0	30,1	29,9	
	2-S	5	27,8	27,5	27,7	25,0	27,0	28,9
	2-S	6	29,6	30,7	28,3	30,3	29,7	
	1-U	1	12,0	11,8	11,3	11,7	11,7	
	1-U	2	12,2	11,3	11,9	11,5	11,7	11,5
	1-U	3	11,6	11,3	10,8	10,9	11,2	
	1-S	4	16,4	17,1	16,1	16,1	16,4	
	1-S	5	16,9	16,3	16,7	16,3	16,6	16,9
	1-S	6	18,3	17,3	17,8	17,7	17,8	
2760	2-U	1	20,9	18,8	19,6	19,5	19,7	
	2-U	2	21,9	22,4	21,5	21,8	21,9	21,4
	2-U	3	23,1	23,5	21,0	23,0	22,7	
	2-S	4	31,0	25,6	28,2	27,9	28,2	
	2-S	5	32,5	25,7	28,6	26,7	28,4	30,5
	2-S	6	33,6	35,4	35,2	35,5	34,9	
	1-U	1	11,7	11,5	11,6	11,2	11,5	
	1-U	2	12,2	11,9	12,0	11,2	11,8	11,5
	1-U	3	11,1	10,9	10,7	11,5	11,1	
	1-S	4	16,6	16,5	16,5	16,6	16,6	
	1-S	5	16,3	18,1	16,7	17,6	17,2	17,3
	1-S	6	18,7	18,0	17,0	18,7	18,1	
2820	2-U	1	23,3	23,2	22,7	21,6	22,7	
	2-U	2	22,4	24,9	25,0	24,0	24,1	24,3
	2-U	3	26,2	25,9	27,1	25,4	26,2	
	2-S	4	37,2	34,1	35,0	36,2	35,6	
	2-S	5	31,5	35,3	32,8	33,9	33,4	35,3
	2-S	6	37,8	37,4	36,3	35,8	36,8	
2880	1-U	1	11,5	10,9	11,6	11,2	11,3	11,1

	1-U	2	10,8	11,7	11,0	11,7	11,3	
	1-U	3	11,0	10,9	10,6	10,8	10,8	
	1-S	4	21,5	20,4	19,6	19,5	20,3	
	1-S	5	20,5	19,4	20,5	18,5	19,7	20,0
	1-S	6	21,0	19,6	19,7	20,0	20,1	
	2-U	1	21,7	20,1	21,6	23,0	21,6	
	2-U	2	23,8	23,7	23,2	23,2	23,5	22,9
	2-U	3	23,9	24,3	23,8	22,1	23,5	
	2-S	4	36,0	41,7	36,7	38,7	38,3	
	2-S	5	31,0	35,2	34,1	35,1	33,9	35,8
	2-S	6	36,3	35,3	34,9	34,4	35,2	
	1-U	1	11,9	12,1	11,6	12,0	11,9	
	1-U	2	12,5	12,3	12,4	12,1	12,3	11,9
	1-U	3	11,5	11,5	12,1	11,3	11,6	
	1-S	4	21,7	24,8	22,7	21,7	22,7	
	1-S	5	22,5	21,9	21,3	21,6	21,8	22,1
	1-S	6	22,2	20,6	22,4	22,0	21,8	
2940	2-U	1	23,7	22,2	21,0	22,4	22,3	
	2-U	2	24,5	25,3	24,6	24,3	24,7	24,0
	2-U	3	25,2	26,1	24,2	24,8	25,1	
	2-S	4	38,5	38,6	37,5	42,1	39,2	
	2-S	5	38,1	34,4	37,3	34,5	36,1	37,5
	2-S	6	37,6	36,4	36,3	38,6	37,2	

APÊNDICE C – Resultados 3ª etapa experimental

Tabelas com os resultados obtidos durante a terceira etapa experimental.

Valores obtidos durante o teste de velocidade de pulso ultrassônico para a seleção das amostras mais homogêneas entre si.

Numeração Inicial	Tipo de Leitura		Razão em relação à média geral	Classificação da amostra	Numeração Definitiva
	T (μ/s)	V (μ/s)			
1	46,8	4274	0,986	Aprovado	1
2	47	4255	0,991	Aprovado	2
3	48,1	4158	1,014	Aprovado	-
4	47,1	4246	0,993	Aprovado	3
5	49,5	4040	1,043	Excluído	
6	46,5	4301	0,980	Excluído	
7	47,6	4202	1,003	Aprovado	4
8	48,1	4158	1,014	Aprovado	-
9	47	4255	0,991	Aprovado	5
10	46,8	4274	0,986	Aprovado	-
11	47,9	4175	1,009	Aprovado	6
12	47,5	4211	1,001	Aprovado	7
13	48	4167	1,012	Aprovado	8
14	47,4	4219	0,999	Aprovado	9
15	46,9	4264	0,988	Aprovado	10
16	46,7	4283	0,984	Excluído	
17	48,9	4264	1,031	Excluído	
18	46,9	4264	0,988	Aprovado	11
19	47,6	4202	1,003	Aprovado	12
20	48,9	4264	1,031	Excluído	

Valores obtidos durante o teste de tempo de exposição à temperatura de 5°C no interior da câmara de intemperismo.

Resistividade Elétrica Superficial – Temperatura 5°C (kΩ.cm)										
Tempo em exposição dentro da câmara de intemperismo: 0:00h										
Nº CP	Medição 1 0°	Medição 2 90°	Medição 3 180°	Medição 4 270°	Medição 5 0°	Medição 6 90°	Medição 7 180°	Medição 8 270°	Média	Média Geral
1	9,7	10	10,2	10,6	9,9	9,8	10,1	10,4	10,1	
2	9,4	9,7	10	9,5	9,1	9,7	9,8	9,3	9,6	9,8
3	10	10	9,3	9,8	9,9	10	9,3	9,9	9,8	

Resistividade Elétrica Superficial – Temperatura 5°C (kΩ.cm)										
Tempo em exposição dentro da câmara de intemperismo: 0:15h										
Nº CP	Medição 1 0°	Medição 2 90°	Medição 3 180°	Medição 4 270°	Medição 5 0°	Medição 6 90°	Medição 7 180°	Medição 8 270°	Média	Média Geral
1	12,4	11,7	11,7	11,4	12,1	11,6	11,6	11,5	11,8	
2	11,2	10,8	11,1	11,3	11,3	10,7	11,2	11,3	11,1	11,4
3	11,6	11,6	11,1	11,3	11,3	11,6	11,4	11,4	11,4	

Resistividade Elétrica Superficial – Temperatura 5°C (kΩ.cm)										
Tempo em exposição dentro da câmara de intemperismo: 0:30h										
Nº CP	Medição 1 0°	Medição 2 90°	Medição 3 180°	Medição 4 270°	Medição 5 0°	Medição 6 90°	Medição 7 180°	Medição 8 270°	Média	Média Geral
1	12,9	12,3	13,5	13,2	13,1	12,5	13,1	13,1	13,0	
2	11,7	11,7	12,4	12,1	11,5	11,5	12	12,1	11,9	12,4
3	12,2	12,6	12,5	11,9	12,4	12,6	12,8	12,2	12,4	

Resistividade Elétrica Superficial – Temperatura 5°C (kΩ.cm)										
Tempo em exposição dentro da câmara de intemperismo: 0:45h										
Nº CP	Medição 1 0°	Medição 2 90°	Medição 3 180°	Medição 4 270°	Medição 5 0°	Medição 6 90°	Medição 7 180°	Medição 8 270°	Média	Média Geral
1	13,6	12,9	13,6	13,2	13,3	13,2	13,3	12,9	13,3	
2	12,7	12	11,9	12,3	12,2	12	11,7	12,5	12,2	12,7
3	12,7	12,8	12,6	12,4	13,1	13,3	13,1	12,4	12,8	

Resistividade Elétrica Superficial – Temperatura 5°C (kΩ.cm)										
Tempo em exposição dentro da câmara de intemperismo: 1:00h										
Nº CP	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5	Medição 6	Medição 7	Medição 8	Média	Média Geral
	0°	90°	180°	270°	0°	90°	180°	270°		
1	14,9	14,2	13,5	14,3	14,5	13,4	13,7	14,1	14,1	
2	12,7	13,1	13,6	12,6	12,5	13,1	13,4	12,3	12,9	13,5
3	13,1	13,8	13,7	13,6	12,8	13,2	13,6	13,2	13,4	

Resistividade Elétrica Superficial – Temperatura 5°C (kΩ.cm)										
Tempo em exposição dentro da câmara de intemperismo: 2:00h										
Nº CP	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5	Medição 6	Medição 7	Medição 8	Média	Média Geral
	0°	90°	180°	270°	0°	90°	180°	270°		
1	15,6	14,8	14,7	15,2	15,3	14,7	14,5	15,3	15,0	
2	14,1	14,1	13,5	13,5	14,2	14,1	13,4	13,4	13,8	14,4
3	13,8	14,8	13,9	14,9	14,6	14,6	13,9	13,9	14,3	

Resistividade Elétrica Superficial – Temperatura 5°C (kΩ.cm)										
Tempo em exposição dentro da câmara de intemperismo: 3:00h										
Nº CP	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5	Medição 6	Medição 7	Medição 8	Média	Média Geral
	0°	90°	180°	270°	0°	90°	180°	270°		
1	15,4	15,6	15,1	15,3	15,8	15,5	15,1	15,7	15,4	
2	14,1	14,1	14,5	14,1	13,9	13,7	14,3	14	14,1	14,7
3	13,8	14,8	14,7	14,8	14,7	14,2	14,7	15	14,6	

Resistividade Elétrica Superficial – Temperatura 5°C (kΩ.cm)										
Tempo em exposição dentro da câmara de intemperismo: 4:00h										
Nº CP	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5	Medição 6	Medição 7	Medição 8	Média	Média Geral
	0°	90°	180°	270°	0°	90°	180°	270°		
1	15,5	15,4	15,4	15,3	15,3	16,4	15,3	15,5	15,5	
2	13,9	14,1	14,6	14,5	14	14	14,7	14	14,2	15,0
3	15,6	15,5	14,4	15,6	15,4	14,8	14,4	15,4	15,1	

Valores obtidos durante o teste de tempo de exposição à temperatura de 40°C no interior da câmara de intemperismo.

Resistividade Elétrica Superficial – Temperatura 40°C (kΩ.cm)										
Tempo em exposição dentro da câmara de intemperismo: 0:00h										
Nº CP	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5	Medição 6	Medição 7	Medição 8	Média	Média Geral
	0°	90°	180°	270°	0°	90°	180°	270°		
1	10,1	9,8	10	9,7	9,8	9,9	9,7	9,6	9,8	
2	9	9,5	9,7	9,2	9	9	9,1	9,4	9,2	9,5
3	9,5	9,7	9,8	9,1	9,6	10	9,8	9	9,6	

Resistividade Elétrica Superficial – Temperatura 40°C (kΩ.cm)										
Tempo em exposição dentro da câmara de intemperismo: 0:15h										
Nº CP	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5	Medição 6	Medição 7	Medição 8	Média	Média Geral
	0°	90°	180°	270°	0°	90°	180°	270°		
1	7,9	7,7	7,8	8	7,9	7,8	7,7	7,9	7,8	
2	7,3	7	7,6	7,7	7	7,1	7,5	7,5	7,3	7,7
3	7,8	8	8	7,4	8	8	8	7,4	7,8	

Resistividade Elétrica Superficial – Temperatura 40°C (kΩ.cm)										
Tempo em exposição dentro da câmara de intemperismo: 0:30h										
Nº CP	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5	Medição 6	Medição 7	Medição 8	Média	Média Geral
	0°	90°	180°	270°	0°	90°	180°	270°		
1	7,5	7,5	7,6	7,7	7,5	7,4	7,6	7,5	7,5	
2	7	7	6,9	7	7,3	7,1	6,9	6,9	7,0	7,3
3	6,9	7,5	7,6	7,6	7	7,6	7,6	7,6	7,4	

Resistividade Elétrica Superficial – Temperatura 40°C (kΩ.cm)										
Tempo em exposição dentro da câmara de intemperismo: 0:45h										
Nº CP	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5	Medição 6	Medição 7	Medição 8	Média	Média Geral
	0°	90°	180°	270°	0°	90°	180°	270°		
1	7,4	7,4	7,7	7,5	7,3	7,2	7,4	7,5	7,4	
2	7,3	7,1	7	6,8	7,2	7,3	6,8	6,8	7,0	7,2
3	7,3	7,4	7,4	6,9	7,3	7,4	7,5	6,9	7,3	

Resistividade Elétrica Superficial – Temperatura 40°C (kΩ.cm)										
Tempo em exposição dentro da câmara de intemperismo: 1:00h										
Nº CP	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5	Medição 6	Medição 7	Medição 8	Média	Média Geral
	0°	90°	180°	270°	0°	90°	180°	270°		
1	7,4	7,4	7,1	7,1	7,2	7,2	7,3	7,2	7,2	
2	7	6,8	7	6,9	6,8	6,9	7,1	6,9	6,9	7,1
3	7,1	7,4	6,8	7,3	7,2	7,2	6,7	7,1	7,1	

Resistividade Elétrica Superficial – Temperatura 40°C (kΩ.cm)										
Tempo em exposição dentro da câmara de intemperismo: 2:00h										
Nº CP	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5	Medição 6	Medição 7	Medição 8	Média	Média Geral
	0°	90°	180°	270°	0°	90°	180°	270°		
1	7,1	7,4	6,8	6,9	7	7,1	7,2	6,9	7,1	
2	6,8	6,7	7,1	6,8	6,7	6,7	7	6,8	6,8	6,9
3	6,7	7	6,8	7,2	6,6	7	6,9	7,1	6,9	

Resistividade Elétrica Superficial – Temperatura 40°C (kΩ.cm)										
Tempo em exposição dentro da câmara de intemperismo: 3:00h										
Nº CP	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5	Medição 6	Medição 7	Medição 8	Média	Média Geral
	0°	90°	180°	270°	0°	90°	180°	270°		
1	7,1	6,7	7,1	7,1	6,9	7	7,3	7,3	7,1	
2	6,6	6,4	6,7	7,1	6,6	6,4	6,8	6,7	6,7	6,8
3	6,9	6,9	6,8	6,9	6,7	6,8	6,7	6,8	6,8	

Resistividade Elétrica Superficial – Temperatura 40°C (kΩ.cm)										
Tempo em exposição dentro da câmara de intemperismo: 4:00h										
Nº CP	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5	Medição 6	Medição 7	Medição 8	Média	Média Geral
	0°	90°	180°	270°	0°	90°	180°	270°		
1	6,9	6,8	7,1	6,7	7,1	6,6	7	6,9	6,9	
2	6,5	6,7	6,5	6,3	6,5	6,9	6,8	6,4	6,6	6,8
3	6,8	7,2	6,5	6,7	7	7,3	6,6	7	6,9	

Resultados obtidos com a variação de temperatura de 5°C a 55°C na câmara climática após quatro horas de exposição em uma mesma temperatura.

Resistividade Elétrica Superficial – Temperatura 5°C (kΩ.cm)										
Nº CP	Medição 1 0°	Medição 2 90°	Medição 3 180°	Medição 4 270°	Medição 5 0°	Medição 6 90°	Medição 7 180°	Medição 8 270°	Média	Média Geral
1	15,5	15,4	15,4	15,3	15,3	16,4	15,3	15,5	15,5	15,4
2	13,9	14,1	14,6	14,5	14	14	14,7	14	14,2	
3	15,6	15,5	14,4	15,6	15,4	14,8	14,4	15,4	15,1	
4	14,8	15,4	16,5	14,2	14,2	15,6	16	14,2	15,1	
5	14,9	14,7	14,3	15	15	15	14,6	15	14,8	
6	14,9	15,6	14,6	16	14,8	14,8	15,2	15,6	15,2	
7	17,5	16,4	16,3	18	17,4	16,3	16,7	17,8	17,1	
8	15,3	15,4	14,6	16,1	15,8	15,3	14,5	15,2	15,3	
9	14,7	14,4	14,4	14,9	14,5	14	14,3	14,6	14,5	
10	16,3	16,4	16,9	16,5	16,7	16,7	16,9	16,7	16,6	
11	15,3	15,2	15,3	15,3	15,4	16,1	15,2	15,4	15,4	
12	15,3	15,2	15,9	15,4	15,3	15,9	15,6	15,1	15,5	

Resistividade Elétrica Superficial – Temperatura 10°C (kΩ.cm)										
Nº CP	Medição 1 0°	Medição 2 90°	Medição 3 180°	Medição 4 270°	Medição 5 0°	Medição 6 90°	Medição 7 180°	Medição 8 270°	Média	Média Geral
1	13,5	14,2	13,8	13,1	13,1	12,8	13,8	13,4	13,5	13,3
2	12,8	12,4	12,3	12,7	12,8	12,4	12,2	13,4	12,6	
3	13	13,3	12,7	12,8	12,9	13,1	13,2	12,6	13,0	
4	12,9	12,5	13,4	13,8	12,6	12,5	13,1	13,9	13,1	
5	13,1	13	13,5	13,4	12,9	12,8	13,6	12,9	13,2	
6	12,8	13	13,4	13,3	12,9	12,9	13,2	13,2	13,1	
7	14,7	15,2	14,9	13,9	14,8	15	14,8	13,9	14,7	
8	13,6	12,7	12,9	13,5	13,5	12,3	13	13,5	13,1	
9	12,4	12,4	12,3	12,3	12,6	12,2	12,5	12,2	12,4	
10	14,7	14,3	13,9	14,6	14,5	14,4	14,4	14,2	14,4	
11	13,7	13,3	13,5	13,3	13,4	13,1	13,4	13,5	13,4	
12	13,8	13,9	13,5	12,6	13,7	13,8	13,4	13,3	13,5	

Resistividade Elétrica Superficial – Temperatura 22°C (kΩ.cm)										
Nº CP	Medição	Medição	Medição	Medição	Medição	Medição	Medição	Medição	Média	Média Geral
	1 0°	2 90°	3 180°	4 270°	5 0°	6 90°	7 180°	8 270°		
1	10	10	10,1	9,8	9,8	10,2	9,8	9,7	9,9	9,7
2	9,2	9,7	10,2	9,7	9,1	10	9,4	9,4	9,6	
3	9,9	9,8	9,1	9,4	9,6	9,7	9,1	9,4	9,5	
4	9,4	9,9	9,4	8,9	9,2	9,8	9,3	8,7	9,3	
5	9,8	9,4	9,8	9,7	9,5	9,5	9,4	9,4	9,6	
6	9,5	9,3	9	9,1	9,6	9,4	9,3	9	9,3	
7	10,8	11,1	10,5	10,6	11	10,6	10,3	10,5	10,7	
8	9,7	9,4	9,3	9,6	9,5	9,6	9	9,1	9,4	
9	9,2	9,6	9	9,2	9,1	9,2	9	9,2	9,2	
10	10,5	10,7	10,5	10,5	10,3	10,2	10,2	10,6	10,4	
11	9,9	9,9	10	10,5	10	9,7	10	10,6	10,1	
12	10	9,5	10,2	9,9	9,7	10,4	10,1	10,1	10,0	

Resistividade Elétrica Superficial – Temperatura 40°C (kΩ.cm)										
Nº CP	Medição	Medição	Medição	Medição	Medição	Medição	Medição	Medição	Média	Média Geral
	1 0°	2 90°	3 180°	4 270°	5 0°	6 90°	7 180°	8 270°		
1	6,9	6,8	7,1	6,7	7,1	6,6	7	6,9	6,9	7,1
2	6,5	6,7	6,5	6,3	6,5	6,9	6,8	6,4	6,6	
3	6,8	7,2	6,5	6,7	7	7,3	6,6	7	6,9	
4	6,7	6,7	6,9	7,4	6,9	6,5	6,8	7,4	6,9	
5	6,9	7	6,3	7	7,1	7	6,8	6,8	6,9	
6	6,9	6,8	7	7,1	7	6,9	6,9	6,9	6,9	
7	8	8	7,3	7,4	8,3	8,1	7,4	7,8	7,8	
8	6,9	6,7	7,2	7,2	7,1	6,5	7,5	7,2	7,0	
9	6,7	6,7	6,7	6,5	7	6,7	6,7	6,5	6,7	
10	7,4	7,7	7,9	7,7	7,9	7,9	8	7,9	7,8	
11	6,9	7,2	6,8	6,9	6,9	7,4	7	7,1	7,0	
12	7,2	6,9	7,4	7,2	7,1	7,2	7,5	7,5	7,3	

Resistividade Elétrica Superficial – Temperatura 55°C (kΩ.cm)										
Nº CP	Medição	Medição	Medição	Medição	Medição	Medição	Medição	Medição	Média	Média Geral
	1 0°	2 90°	3 180°	4 270°	5 0°	6 90°	7 180°	8 270°		
1	5,8	5,6	5,7	6	5,9	6	5,6	6	5,8	5,9
2	5,2	5,2	5	5,5	5,2	5,1	5,1	5,4	5,2	
3	5,6	5,8	5,7	5,5	5,6	5,7	5,8	5,3	5,6	
4	5,8	5,3	5,2	5,4	5,9	5,4	5,4	5,4	5,5	
5	5,6	5,7	5,7	5,9	6	5,8	5,5	5,3	5,7	
6	5,3	5,8	5,7	5,8	5,7	5,8	5,7	5,8	5,7	
7	6,8	6,6	6,8	6,9	6,9	6,5	6,6	7,1	6,8	
8	5,6	5,8	5,8	5,4	5,8	5,8	6	5,6	5,7	
9	5,3	5,6	5,5	5,6	5,3	5,6	5,4	5,6	5,5	
10	6,4	6,5	6,4	7,1	6,4	6,4	6,5	7,1	6,6	
11	5,8	6,1	5,7	5,8	5,8	6,1	5,7	5,9	5,9	
12	6,3	6,4	6,1	6,2	6,1	6,5	6,3	6,2	6,3	