

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL

ELVA WENDOLYN RAMÍREZ PÉREZ

INFLUÊNCIA DA IDADE E CURA DO CONCRETO NA RESISTIVIDADE
ELÉTRICA

Goiânia
2015

ELVA WENDOLYN RAMÍREZ PÉREZ

INFLUÊNCIA DA IDADE E CURA DO CONCRETO NA RESISTIVIDADE
ELÉTRICA

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Estruturas e Materiais de Construção da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, como exigência para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas e Materiais de Construção.

Orientador: Prof. Dr. Enio José Pazini Figueiredo

Goiânia

2015



Termo de Ciência e de Autorização para Disponibilizar as Teses e Dissertações Eletrônicas (TEDE) na Biblioteca Digital da UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás-UFG a disponibilizar gratuitamente através da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações - BDTD/UFG, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: **Dissertação** **Tese**

2. Identificação da Tese ou Dissertação

Autor(a):	Elva Wendolyn Ramírez Pérez		
CPF:	700.793.831-06	E-mail:	elvawendolyn@gmail.com
Seu e-mail pode ser disponibilizado na página? <input checked="" type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não			
Vínculo Empregatício do autor	Aluno Bolsista		
Agência de fomento:	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior	Sigla:	CAPES
País:	Brasil	UF:	GO
CNPJ:			
Título:	Influência da idade e cura do concreto na resistividade elétrica		
Palavras-chave:	Resistividade elétrica superficial; concreto; relação água/aglomerante; cura; grau de hidratação.		
Título em outra língua:	Influence of age and concrete cure in surface electrical resistivity		
Palavras-chave em outra língua:	Surface electrical resistivity; concrete; ratio water/binder ; cure; degree of hydration.		
Área de concentração:	Estruturas e Materiais de Construção		
Data defesa:	02/12/2015		
Programa de Pós-Graduação:	CMEC-EEC/UFG		
Orientador(a):	Enio José Pazini Figueiredo		
CPF:	632.428.770-04	E-mail:	epazini@terra.com.br
Co-orientador(a):	---		
CPF:	---	E-mail:	----

3. Informações de acesso ao documento:

Liberação para disponibilização?¹ **total** **parcial**

Em caso de disponibilização parcial, assinale as permissões:

Capítulos. Especifique: _____

Outras restrições: _____

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF ou DOC da tese ou dissertação. O Sistema da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações garante aos autores, que os arquivos contendo eletronicamente as teses e ou dissertações, antes de sua disponibilização, receberão procedimentos de segurança, criptografia (para não permitir cópia e extração de conteúdo, permitindo apenas impressão fraca) usando o padrão do Acrobat.

Assinatura do(a) autor(a)

Data: 07 / 12 / 2015

¹ Em caso de restrição, esta poderá ser mantida por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Todo resumo e metadados ficarão sempre disponibilizados.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a), sob orientação do Sibi/UFG.

RAMIREZ PEREZ, ELVA WENDOLYN
INFLUÊNCIA DA IDADE E CURA DO CONCRETO NA
RESISTIVIDADE ELÉTRICA [manuscrito] / ELVA WENDOLYN
RAMIREZ PEREZ. - 2015.
94 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Enio José Pazini Figueiredo.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de
Engenharia Civil (EEC) , Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil, Goiânia, 2015.
Bibliografia.
Inclui fotografias, gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

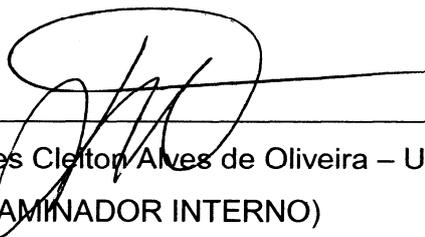
1. resistividade elétrica superficial. 2. concreto. 3. relação
água/aglomerante. 4. cura. 5. grau de hidratação. I. Pazini Figueiredo,
Enio José , orient. II. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação intitulada **"INFLUÊNCIA DA IDADE E CURA DO CONCRETO NA RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL"**, em nível de Mestrado, área de concentração em Estruturas e Materiais de Construção de autoria da mestranda **ELVA WENDOLYN RAMÍREZ PÉREZ**, defendida e aprovada em 02 de dezembro de 2015, pela banca examinadora constituída pelos seguintes professores:



Prof. Dr. Enio José Pazini Figueiredo – UFG
(ORIENTADOR)



Prof. Dr. Janes Cleiton Alves de Oliveira – UFG
(EXAMINADOR INTERNO)



Prof. Dr. Izelman Oliveira da Silva – PUC Goiás
(EXAMINADOR EXTERNO)

À Deus.

Meu sustento e meu senhor.

AGRADECIMENTOS

À Deus pela minha existência e por me amparar e sustentar nos momentos difíceis, me dar força interior para superar as dificuldades, mostrar os caminho nas horas incertas e me suprir em todas as minhas necessidades.

Ao meu orientador Professor Enio José Pazini Figueiredo, por acreditar em mim, me mostrar o caminho da ciência, fazer parte da minha vida nos momentos bons e ruins, por ser exemplo de profissional e sempre fará parte da minha vida.

À minha família, a qual amo muito, pelo carinho, paciência e incentivo.

Aos amigos que fizeram parte desses momentos sempre me ajudando e incentivando.

Aos meus amigos de mestrado Tiago e Marcello que me ajudaram com minha pesquisa.

Ao Professor Deusair Rodrigues Dos Santos e aos técnicos de laboratório Agnaldo e Manoel que participaram diretamente deste trabalho e me ajudaram em todos os momentos.

A todos os colegas e professores do CMEC/UFG, pelo convívio e aprendizado.

Ao Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal de Goiás e seus funcionários pela realização de vários ensaios.

Ao engenheiro Rodrigo, pelas dicas e materiais com os quais não seria possível realizar esse trabalho.

A empresa Realmix que fez a doação dos materiais para a pesquisa.

Ao Hugo Leonardo Esteves e a Cristiano Gonçalves (i.m), que no momento da pesquisa ajudaram nos ensaios incondicionalmente.

À Célia, Marcelo, Gabirel, Simone e Dona Cida pela enorme ajuda e apoio para poder terminar este mestrado, não tenho como agradecer.

À Rosalva que me ajudou até o ultimo dia.

À Alexa Wendolyn Esteves Ramirez, minha filha amada por ser o anjo que Deus mandou para ter uma razão para viver e me dar a força para lutar depois de todos os momentos difíceis.

RESUMO

A resistividade elétrica superficial do concreto nos estados fresco e endurecido pode ser influenciada por alguns fatores, como por exemplo grau de hidratação, relação água/aglomerante (a/ag), procedimento de cura, teor de agregado e existência de armadura. Este trabalho tem o objetivo de avaliar o desempenho e o comportamento da resistividade elétrica superficial do concreto tendo como base a influência do grau de hidratação, tempo de cura e relação a/ag . Os concretos dosados foram divididos em três grupos, onde C-0,81 representa o grupo de concretos com relação a/ag de 0,81 e 20 MPa de resistência à compressão; C-0,50 representa os concretos com relação a/ag de 0,50 e 40 MPa; e C-0,35 representa os concretos com 0,35 de relação a/ag e 60 MPa de resistência à compressão. Os procedimentos de cura aplicados aos três grupos foram: cura seca, cura submersa até os sete dias e cura submersa até os quatorze dias. No presente estudo, os resultados mostraram que quanto maior a relação a/ag , maior será a porosidade da mistura que, por sua vez, eleva a resistividade elétrica. No que tange ao procedimento de cura, os concretos curados a seco apresentaram maiores índices de resistividade que os concretos submersos. Os resultados ainda mostraram que quanto maior é o grau de hidratação, maior será a resistividade correspondente.

Palavra-Chave: resistividade elétrica superficial; concreto; relação água/aglomerante; cura; grau de hidratação.

ABSTRACT

The surface electrical resistivity of the fresh and hardened concrete states can be influenced by factors such as degree of hydration, the water / binder ratio (w / b), aggregate content and existence of armour. This study objective is to evaluate the performance and behavior of the electrical resistivity of the concrete's surface based on the influence of hidratation process, curing time and the w/b ratio. The actual measured were divided into three groups, where C-0,81 represents the specific group with w/b ratio= 0.81 and compressive strength =20 MPa; C-0,50 is the concrete with w/b ratio= 0.50 and 40 MPa; and C-0,35 represents the concrete with the ratio of 0.35 and compressive strength of 60 MPa. The curing procedures applied to the three groups were: dry cure, cure submerged up to seven days and cure submerged up to fourteen days. This study the results showed that in the higher ratio w/b , the porosity of the sample is greater, and this increases the electrical resistivity. Regarding the dry cured concrete, it had higher resistivity vs submerged concrete. The results also showed that greater the degree hydration in the sample the greater the resistivity.

Keywords: electrical resistivity concrete, concrete, w/b ratio, curing, degree hydration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Evolução da resistência à compressão em função do tempo, dos componentes principais do clínquer portland (CANOVAS, 1991 apud REBOLLEDO, 2010).....	20
Figura 2.2 - Intervalo dimensional de sólidos e poros em uma pasta endurecida (MEHTA., MONTEIRO, 1994).	23
Figura 2.3 - Imagem da rede porosa de uma argamassa feita pore scanning acoustic microscope (200 x 200 µm (LIVINGSTON et. al, 1999, REBOLLEDO, 2010).	23
Figura 2.4 - Classificação dos diferentes tipos de água na pasta do cimento endurecido segundo diversos autores (REBOLLEDO, 2010)	24
Figura 2.5 - O desenvolvimento da curva para identificar a ação dos aditivos, e outros aspectos do tempo de pega (REBOLLEDO E ANDRADE, 2011 apud ANDRADE E D'ANDREA 2011).	25
Figura 3.1- A porosidade pode ser avaliada pela resistência ao movimento de cargas elétricas (iões) na fase aquosa dos poros de concreto. (ANDRADE E D'ANDREA 2011).	26
Figura 3.2 – Resistividade elétrica x relação água/cimento e consumo de cimento Portland comum, ensaiado aos 28 dias (NEVILLE, 1997).	28
Figura 3.3 - Misture proporções e propriedades do concreto (VILLAGRAN e DI MAIO, 2014).	28
Figura 3.4 -Resistividade relativa vs perda de peso por secagem na cura. Fernandez (2008 apud ANDRADE e D'ANDREA, 2011).....	31
Figura 3.5 - Resistividade elétrica vs temperatura. Hope et al. (1985 apud LUBECK, 2008).	34
Figura 3.6 - Efeito do tipo de cimento na resistividade elétrica do concreto (HAMMOND e ROBSON, apud HOPPE, 2005).....	35
Figura 3.7 – Resistividade elétrica de pastas de diferentes tipos de cimentos, a temperatura de 22°C e umidade relativa de 100 % (HANSSON E HANSSON, 1983).....	36
Figura 3.8 – Carbonatação versus resistividade elétrica (Chi et al., 2002 apud HOPPE 2005)	38
Figura 3.9 - Dependência da resistividade e o grau de saturação, usando como uma variável intermédia à umidade relativa (%) (FERNANDEZ, 2009).....	39
Figura 3.10 - Esquema de ocorrência de mecanismos acoplados que determinam o valor da resistividade elétrica nas primeiras idades. (FERNANDEZ, 2009).....	40
Figura 3.11 - Medição da resistividade elétrica do concreto utilizando o método dos eletrodos equidistantes 20 mm. (FERNANDEZ, 2009).....	41
Figura 3.12 – Método dos quatro eletrodos para medir a resistividade elétrica do concreto. “d” – distância entre eixos dos eletrodos (CARINO, 1998 apud HOPPE, 2005).....	42
Figura 3.13 - Esquema de montagem do corpo-de-prova para o ensaio de resistividade elétrica volumétrica, segundo a NBR 9204:1985 (ABREU, 1998).....	45
Figura 3.14 - Recomendações de parâmetros geométricos para ensaios de resistividade elétrica superficial.....	46
Figura 3.15 - Resistividade superficial em função da corrente (MILLARD et al., 1989 apud ABREU,1998).....	48
Figura 3.16 - Resistividade superficial em função da corrente (MILLARD et al., 1989 apud ABREU,1998).....	48

Figura 3.17 -Efeito de uma camada superficial de baixa resistividade na determinação da resistividade elétrica pelo método dos quatro eletrodos. (GOWERS e MILLARD, 1999 apud HOPPE, 2005).....	50
Figura 3.18 - O desenvolvimento da curva para identificar a ação dos aditivos, e outros aspectos do tempo de pega (REBOLLEDO E ANDRADE, 2011 apud ANDRADE E D'ANDREA 2011).	51
Figura 4.1 Distribuição Granulométrica da areia grossa.....	55
Figura 4.2 mostra a distribuição granulométrica da areia fina.	58
Figura 4.3 - Gráfico da granulometria por peneiramento da brita 1.	61
Figura 4.4- Gráfico da granulometria por peneiramento da brita 0.....	64
Figura 4.5. Moldagem dos corpos de prova prismáticos.....	66
Figura 4.6. Moldagem dos corpos de prova cilíndricos.	68
Figura 4.7 Esquema da avaliação de resistividade elétrica superficial.	68
Figura 4.8 Medições de Resistividade Elétrica.....	68
Figura 4.9. Equipamento utilizado nas medidas de resistividade elétrica do concreto.....	69
Figura 5.1 - Resistências à compressão dos concretos de 20 MPa (relação água / aglomerante=0,81).....	71
Figura 5.2 - Resistências à compressão dos concretos C-0,50 (relação água / aglomerante=0,50)	71
Figura 5.3 - Resistências à compressão do concreto C-0,35 (relação água / aglomerante=0,34)	72
Figura 5.4 - CoMParação entre os crescimentos das resistências à compressão dos concretos de 20 MPa, 40MPa e C-0,35.	73
Figura 5.5 - Evolução da resistividade elétrica do concreto de 20 MPa nas primeiras 24 horas.	74
Figura 5.6 - Evolução da resistividade elétrica do concreto C-0,50 nas primeiras 24 horas.	74
Figura 5.7 - Evolução da resistividade elétrica do concreto C-0,35 nas primeiras 24 horas.....	75
Figura 5.8 - Perfil da evolução da resistividade elétrica dos tres tipos de concreto as primeiras 24 horas.	76
Figura 5.9 - Evolução da resistividade elétrica do concreto de 20 MPa de 1 a 7 dias.....	77
Figura 5.10 - Evolução da resistividade elétrica do concreto C-0,50 de 1 a 7dias.....	77
Figura 5.11 - Perfil da evolução da resistividade elétrica do concreto C-0,35 de 1 a 7 dias.	78
Figura 5.12 - Comparativo da resistividade elétrica das três misturas que não foram submetidas à cura (1-7 dias).	78
Figura 5.13 - Comparativo da resistividade elétrica das três misturas que foram submetidas à cura de 7 dias (1-7 dias).	79
Figura 5.14 - Evolução da resistividade elétrica do concreto das três misturas de 1-7 dias.	80
Figura 5.15 - Evolução da resistividade elétrica do concreto de 20 MPa de 7 a 14 dias.	80
Figura 5.16 - Evolução da resistividade elétrica do concreto de C-0,50 de 7 a 14 dias.	81

Figura 5.17 - Evolução da resistividade elétrica do concreto C-0,35 de 7 a 14 dias.....	81
Figura 5.18 - Comparativo da resistividade elétrica das três misturas que não foram submetidas à cura (7-14 dias).	82
Figura 5.19 - Comparativo da resistividade elétrica das três misturas que foram submetidas à cura de 7 dias.	83
Figura 5.20 - Perfil comparativo da resistividade elétrica das três misturas que foram submetidas à cura de 14 dias (7-14 dias).	83
Figura 5.21 - Perfil da evolução da resistividade elétrica do concreto das três misturas de 7-14 dias.	84
Figura 5.22- Perfil da evolução da resistividade elétrica do concreto de 20 MPa de 14 a 91 dias.....	85
Figura 5.23 - Perfil da evolução da resistividade elétrica do concreto C-0,50 de 14 a 91 dias.	86
Figura 5.24 - Perfil da evolução da resistividade elétrica do concreto C-0,35 de 14 a 91 dias.	86
Figura 5.25 - Perfil comparativo da resistividade elétrica das três misturas que não foram submetidas à cura.	87
Figura 5.26 - Perfil comparativo da resistividade elétrica das três misturas que foram submetidas à cura de 7 dias.	88
Figura 5.27 - Perfil comparativo da resistividade elétrica das três misturas que foram submetidas à cura de 14 dias.	88
Figura 5.28 - Perfil da umidade relativa durante os 91 dias.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Massa unitária da areia grossa.....	52
Tabela 4.2 – Massa específica da areia grossa.	53
Tabela 4.3 – Composição granulométrica da areia grossa.	54
Tabela 4.4 – Massa unitária da areia fina.	55
Tabela 4.5 – Massa específica da areia fina.....	56
Tabela 4.6 – Composição granulométrica da areia fina.....	57
Tabela 4.7 – Massa unitária da brita 1.	59
Tabela 4.8 – Massa específica da brita 1.	59
Tabela 4.9 – Composição granulométrica da brita 1.	60
Tabela 4.10 – Massa unitária da brita 0.	62
Tabela 4.11 – Massa específica da brita 0.....	63
Tabela 4.12 – Composição granulométrica da brita 0.....	65
Tabela 4.13 Traços de dos 3 diferentes concreto	63
Tabela 4.14 Corpos de prova cilíndricos para cada tipo de cura e resistência à compressão.....	67
Tabela 5.1 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos.....	70

SUMARIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS	9
1. INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVO	16
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2. MICROESTRUTURA DO CONCRETO	17
2.1 HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND	18
2.2 ASPECTOS FÍSICOS DO PROCESSO DE PEGA E ENDURECIMIENDO	21
2.2.1 Enrijecimento	21
2.3 EVOLUÇÃO DA MICROESTRUTURA DO CONCRETO	22
2.3.1 Porosidade	22
2.3.2 Água na pasta do cimento hidratada	24
2.3.3 Propriedades condutoras do concreto	25
3 RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL	25
3.1 FATORES QUE INFLUENCIAM A RESISTIVIDADE ELÉTRICA	27
3.1.1 Relação água/cimento	27
3.1.2 Agregados	29
3.1.3 Hidratação do cimento	30
3.1.4 Adições Minerais	31
3.1.5 Umidade	33
3.1.6 Temperatura	34
3.1.7 Tipo de cimento	35
3.1.8 Aditivos	37
3.1.9 Íons Cloreto	37
3.1.10 Carbonatação	37
3.2 MEDIDA DA RESISTIVIDADE	38
3.2.1 Secagem do concreto	38
3.2.2 Método dos quatro eletrodos ou método de Wenner	41
3.3 FATORES IMPORTANTES RELACIONADOS COM O MÉTODO DE WENNER	45
3.3.1 Presença de Armadura	45
3.3.2 Parâmetros geométricos	46
3.3.3 Contato entre os eletrodos e o concreto	47
3.3.4 Tipo de onda, frequência e intensidade da corrente elétrica	47
3.3.5 Camadas superficiais	49
3.4 O ENDURECIMENTO NO ESTADO FRESCO	50
4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	51
4.1 MATERIAIS UTILIZADOS NA CONFECÇÃO DO CONCRETO DE REFERÊNCIA	52
4.1.1 Areia Grossa	52
4.1.2 Areia fina	55
4.1.3 Brita	58
4.1.4 BRITA 0	61
4.2 CONCRETO	65
4.3 PROCEDIMENTO DE MEDIDA DA RESISTIVIDADE SUPERFICIAL DO CONCRETO	68
4.4 EQUIPAMENTO	69

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	69
5.1 RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO AXIAL.....	69
5.2 RESISTIVIDADE ELÉTRICA NAS PRIMEIRAS 24 HORAS.....	73
5.3 RESISTIVIDADE ELÉTRICA DA 24 ^a HORA ATÉ 168 HORAS (7 DIAS) ...	76
5.4 RESISTIVIDADE ELÉTRICA AOS 7 DIAS (168 HORAS) ATÉ 14 DIAS (336 HORAS).....	80
5.5 RESISTIVIDADE ELÉTRICA DOS 14 DIAS(336 H) ATE 91 DIAS(2184 H) 85	
6 CONCLUSÕES	89
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	90
Referencias Bibliográficas	92

1. INTRODUÇÃO

As obras civis embora sejam apropriadas para as exigências que foram projetadas, apresentam alguns problemas sérios que podem ter origem nas fases de projeto, fabricação de materiais, execução ou manutenção e uso.

O concreto armado é um material muito durável na maioria dos ambientes, mas tem alguns fatores que contribuem à degradação, tais como as variações de temperatura, ataque por ácidos, vibrações, erosão, ataque por cloretos, etc. A corrosão das armaduras, tanto pela ação dos cloretos quanto pela carbonatação ocupa um lugar importantíssimo nas estatísticas de manifestações patológicas nas estruturas de concreto.

A qualidade final de uma estrutura de concreto armado depende das propriedades do concreto no estado fresco e endurecido. Muitas vezes, o ensaio de compressão simples é tomado como parâmetro para garantir a qualidade do concreto no estado endurecido, limitando-se aos 28 dias de idade. O Ensaio de Abatimento do Tronco de Cone (Slump Test), que avalia a consistência do concreto em estado fresco, também é usado como parâmetro de controle de qualidade.

O estudo da evolução das propriedades do concreto durante as primeiras horas é importante para estimar as propriedades do concreto.

Nos últimos anos, se tenta relacionar os resultados obtidos com o uso de certos métodos de ensaio com as propriedades mecânicas do concreto nas primeiras idades, dando informação sobre as mudanças microestruturais e mecânicas, desde a cura até o endurecimento.

Os fabricantes de concreto e os usuários precisam de métodos não destrutivos que permitam um controle de qualidade durante as fabricações, assim como um método de monitoramento da evolução de certas propriedades do concreto.

A Resistividade elétrica é capaz dar informações sobre a microestrutura do concreto, sua porosidade e conteúdo da água no seu interior. O ensaio pode ser repetido

varias vezes sem interferir nas propriedades do material, sendo, portanto adequado para controle de produção e execução pelo fabricante e pelo controle de qualidade de recepção exercida pelo usuário.

No Brasil existe uma norma para ensaios de resistividade elétrica do concreto, sendo ABNT NBR 9204 (ASOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS, 2012), trata da resistividade elétrica volumétrica. O ensaio de resistividade elétrica superficial estes ensaios são baseado em normas estrangeiras tal como a UNE 83988-1 (2008).

Um dos métodos usados para o ensaio da resistividade elétrica superficial do concreto é o método de Wenner, ou também conhecido como método dos quatro pontos, o qual tem vantagens em relação aos ensaios de resistividade elétrica volumétrica, devido a que pode ser empregada tanto no laboratório quanto *in situ*, além de ser um método não destrutivo, requerendo poucos ou apenas um equipamento.

1.1 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da relação água/aglomerante, tempo de cura e grau de hidratação no desempenho e no comportamento da resistividade elétrica superficial do concreto. Para isto, investigaram-se concretos com relações água/aglomerante de 0,35, 0,50 e 0,81 e com diferentes condições de cura.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho é apresentado em seis capítulos. O primeiro capítulo trata da importância do tema da pesquisa e apresenta os objetivos propostos. E apresenta a estrutura da dissertação.

A revisão bibliográfica é apresentada no segundo e terceiro capítulos. Para melhor entendimento desta pesquisa, o Capítulo 2 aborda aspectos os princípios relacionados com a microestrutura do concreto, o Capítulo 3 trata da resistividade

elétrica do concreto, dando ênfase aos métodos de medida e aos fatores que influenciam a resistividade.

No Capítulo 4 é detalhado o procedimento experimental para a obtenção dos objetivos da dissertação, apresentando a caracterização dos materiais, os traços empregados e os grupos de ensaios realizados.

Os resultados encontram-se no Capítulo 5 onde também são apresentadas as discussões e análises e as correlações obtidas a partir dos resultados.

No Capítulo 6 encontram-se as conclusões relacionadas ao objetivo da dissertação, assim como sugestões para futuras pesquisas.

2. MICROESTRUTURA DO CONCRETO

O concreto, em um sentido amplo, é qualquer produto de massa feita usando qualquer meio cimentante. Geralmente, este meio é o produto da reação entre cimento hidráulico e água. Mas, na atualidade a definição pode cobrir uma ampla gama de produtos: concreto é feito com vários tipos de cimento e também pode conter pozolanas, como cinza volante, escória de alto-forno, sílica ativa, adições minerais, agregados de concreto reciclados, aditivos, polímeros e fibras (NEVILLE e BROOKS, 2013).

Existem três principais razões para o concreto ser o material mais largamente usado na engenharia. A primeira é porque possui uma excelente resistência à água, sem deterioração seria o que faz dele um material ideal para estocar transportar água, ao contrário da madeira ou do aço comum. A segunda razão é a versatilidade que tem o concreto para conseguir executar elementos estruturais numa variedade de formas e tamanhos. E a terceira razão, é porque se considera um material relativamente barato e de fácil disponibilidade na obra (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

2.1 *HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND*

O cimento Portland anidro não aglomera areia e agregado graúdo; ele só adquire a propriedade adesiva quando misturado à água. Isto acontece porque a reação química do cimento com a água, comumente chamada de hidratação do cimento, gera produtos que possuem característica de pega e endurecimento (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Segundo Neville e Brooks (2013), há duas formas de reação entre os constituintes do cimento e a água: a) hidratação propriamente dita, ao incorporar diretamente algumas moléculas de água, e b) hidrólise, já que ocorre uma quebra e dissolução de determinados componentes do cimento, um exemplo seria o gesso que disponibiliza íons sulfato ao sistema.

Como o cimento Portland é constituído por mistura de vários compostos, no processo de hidratação ocorrem reações simultâneas dos compostos anidros com água. No entanto, esses compostos não se hidratam na mesma velocidade (KIHARA e CENTURIONE, 2005). O conhecimento da velocidade de reação é importante, porque determina o tempo de pega e endurecimento (BRUNAUER e COPELAND, 1964 apud MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Segundo Mehta e Monteiro (1994), os aluminatos se hidratam muito mais rápido que os silicatos, sendo a hidratação dos aluminatos quem determina o enrijecimento (perda de consistência) e a pega (solidificação), e as características de endurecimento (taxa de desenvolvimento da resistência, é determinado por reações de hidratação envolvendo silicatos, que correspondem aproximadamente ao 75% do cimento Portland.

A pasta endurecida de cimento sofre ação dos agentes intempéricos, como percolação de água, umidade e temperatura, bem como rochas aparentemente são que não se encontram sob condições de estabilidade, já que foram formadas em profundidades, sob condições diversas, e sofrem ação desses mesmos agentes físico-químicos de superfície (KIHARA e CENTURIONE, 2005).

Assim, o concreto a base de cimento encontra-se em continua transformação. Sua durabilidade é longa no contexto de uma obra, porém limitada no contexto histórico (CENTURIONE et. al, 2003).

É importante lembrar também que a hidratação do cimento Portland além de depender dos componentes mineralógicos do clínquer e das adições ativas do cimento, também influenciam os fatores físicos como finura, relação água-cimento, temperatura e procedimentos de cura, e outros (KIHARA e CENTURIONE, 2005).

A hidratação da alita (C_3S) e da belita (βC_2S) no cimento Portland produz uma família de silicatos de cálcio hidratados estruturalmente similares, mas que variam largamente quanto à relação cálcio/sílica e ao teor de água quimicamente combinada (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Os dois silicatos de cálcio (C_3S e C_2S) são os principais compostos cimentícios do cimento. o C_3S "impuro" e conhecido como alita, o C_2S "impuro", como belita.

Os silicatos C_3S e C_2S são os compostos mais importantes, sendo responsáveis pela resistência da pasta de cimento hidratada (NEVILLE e BROOKS, 2013). Ambos silicatos de cálcio reagem com velocidades diferentes e o C_3S é o responsável pela contribuição de resistência notável nos primeiros dias, o C_2S é importante no longo prazo (REBOLLEDO, 2010). Como se ilustra na Figura 2.1.

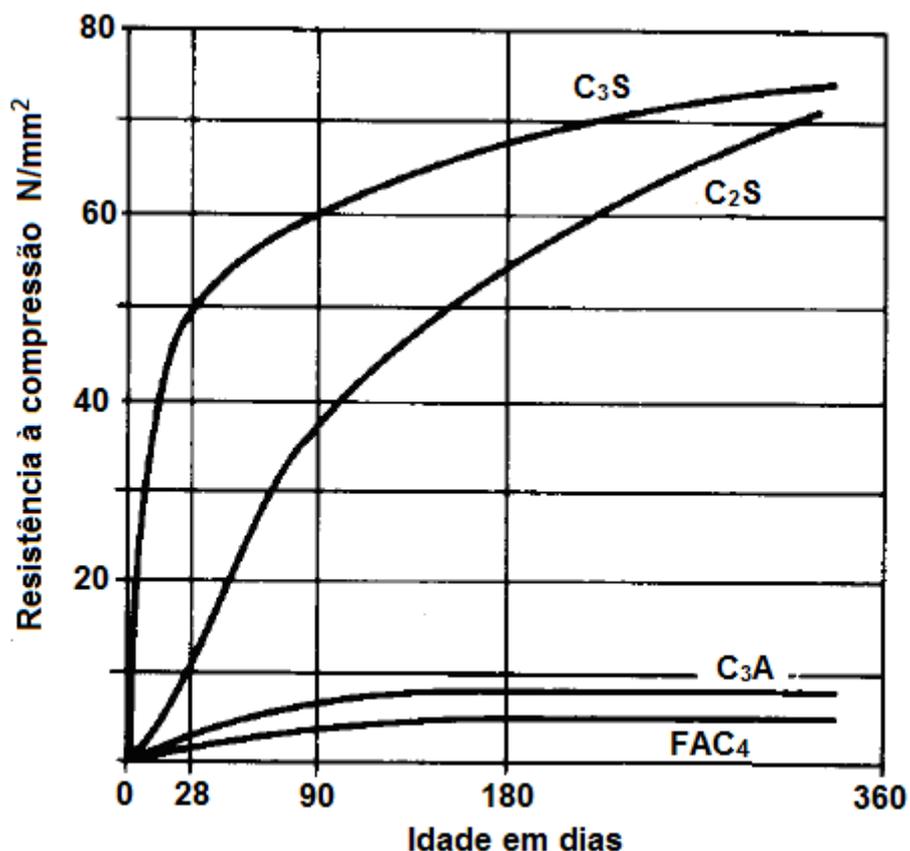
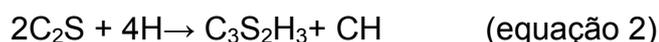
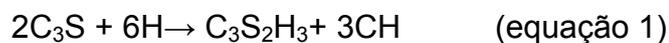


Figura 2.1 - Evolução da resistência à compressão em função do tempo, dos componentes principais do clínquer portland (CANOVAS, 1991 apud REBOLLEDO, 2010).

As reações estequiométricas para pastas completamente hidratadas de C₃S e C₂S podem ser expressas a seguir (MEHTA e MONTEIRO, 1994).



O produto da hidratação do C₃S é o composto hidratado micro cristalino C₃S₂H₃ com a liberação de cal na forma cristalina de Ca(OH)₂. O C₂S se comporta de maneira similar, mas evidentemente contém menos cal. Antigamente os silicatos de cálcio eram denominados como gel de tobermorita, na atualidade são descritos como S-C-H (NEVILLE e BROOKS, 2013).

A reação do C₃A com a água é imediata. Formam-se rapidamente hidratos cristalinos, tais como C₃AH₆, C₄AH₉, e C₂AH₈, com liberação de uma grande quantidade de calor de hidratação. A menos que a reação rápida de hidratação do C₃A seja de alguma forma desacelerada, o cimento Portland não terá utilidade para a maioria dos propósitos de construção. Isto é geralmente conseguido por adição de gipsita (gesso). Portanto, na prática, não são importantes as reações de hidratação C₃A sozinha, mas sim a hidratação do C₃A na presença de gesso (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Mesmo assim a reação do C₃A é mais rápida que a dos silicatos de cálcio, como se mostra a seguir (NEVILLE e BROOKS, 2013):



A quantidade de C₃A na maioria dos cimentos é relativamente pequena. Sua estrutura hidratada é uma forma cristalina cúbica circundada pelos silicatos de cálcio hidratados (NEVILLE e BROOKS, 2013).

O C₃A no cimento é indesejável, porque contribui pouco ou praticamente nada, exceto nas primeiras idades. Mas também é benéfico à produção de cimento, já que facilita a combinação de óxido de cálcio com a sílica (NEVILLE e BROOKS, 2013).

2.2 ASPECTOS FÍSICOS DO PROCESSO DE PEGA E ENDURECIMIENDO

2.2.1 Enrijecimento

É a perda de consistência plástica do cimento, e esta associada ao fenômeno de perda de abatimento no concreto. É a água livre na pasta do cimento que é responsável pela sua plasticidade. A perda gradual de água livre do sistema devido às reações de hidratação iniciais de hidratação, adsorção física na superfície dos produtos de hidratação de baixa cristalinidade, como a etringita e o C-S-H, e a evaporação causam o enrijecimento da pasta e, finalmente, a pega e o endurecimento (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

O tempo de pega é para descrever o enrijecimento da pasta do cimento, geralmente se refere à mudança do estado fluido para o rígido (NEVILLE e BROOKS, 2013). A pega é causada principalmente pela hidratação do C_3A e C_3S e acompanhada pela elevação da temperatura na pasta do cimento. O início de pega é o ponto em que a pasta se torna não trabalhável que corresponde a uma rápida elevação de temperatura e o fim de pega é quando esta solidificado completamente que corresponde ao pico de temperatura e não pode ser tão longo para poder continuar com as atividades construtivas.

2.3 EVOLUÇÃO DA MICROESTRUTURA DO CONCRETO

2.3.1 Porosidade

A pasta do cimento do concreto inclui uma rede de poros. A porosidade da pasta do cimento diminui o tempo devido aos processos de hidratação. Embora, o volume de vazios continua existindo no material, e a distribuição do tamanho e a conectividade vão influenciar na transferência de matéria no meio poroso. Segundo Powers (1960), os poros da pasta endurecida podem ser classificados em dois distintos grupos de acordo com seu tamanho: poros de gel e poros capilares. Também, os poros de ar, e os macro poros devido a defeitos de compactação (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

- Espaço de gel CSH

Powers (1960) assumiu que a largura do espaço interlaminar na estrutura do CSH é de 18 Å e determinou que é responsável por 28% da porosidade capilar no CSH sólido, no entanto Feldman e Sereda sugerem que o espaço pode variar de 5 a 25 Å (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

- Vazios capilares

Os vazios capilares são os espaços não preenchidos pelos componentes sólidos da pasta. O volume e tamanho dos poros capilares dependem da relação água/cimento

e do grau de hidratação podendo variar entre 0,005-5 μm . A Figura 2.2 ilustra vários tipos de vazios (MEHTA., MONTEIRO, 1994).

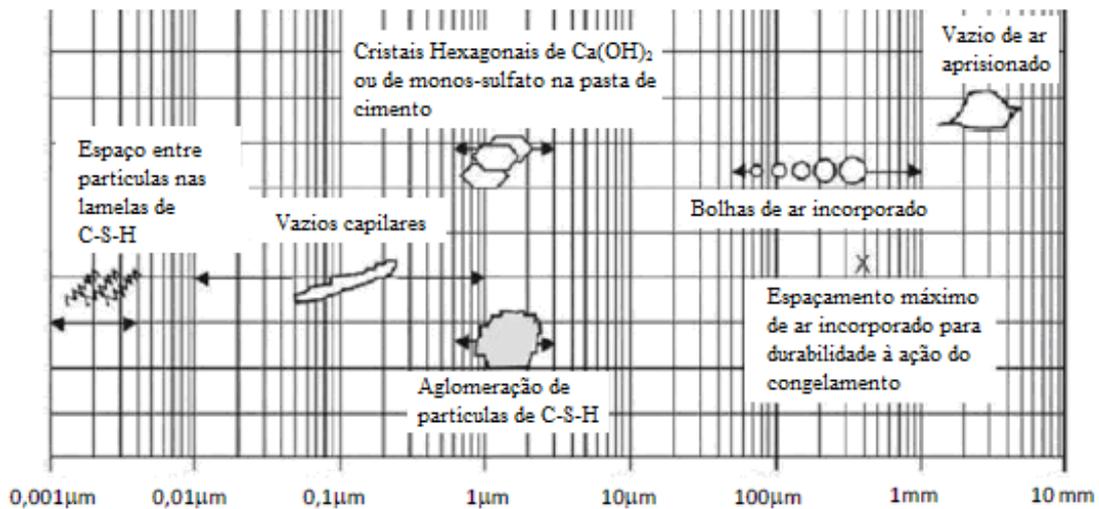


Figura 2.2 - Intervalo dimensional de sólidos e poros em uma pasta endurecida (MEHTA., MONTEIRO, 1994).

Os vazios capilares são mais importantes do ponto de vista da durabilidade que controlar o transporte do material no interior do concreto devido às forças capilares e tensão superficial destes furos e também porque penetram e espalhar os agentes agressivos externos (REBOLLEDO, 2010). A Figura 2.3 ilustra a rede porosa de uma argamassa.

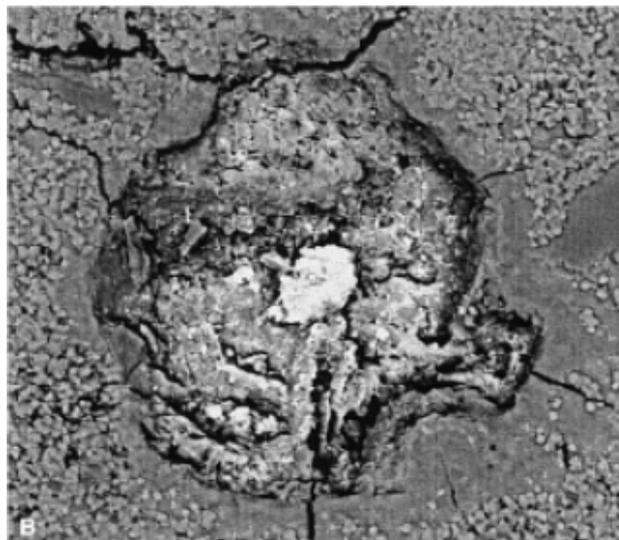


Figura 2.3 - Imagem da rede porosa de uma argamassa feita pore scanning acoustic microscope (200 x 200 μm) (LIVINGSTON et. al, 1999, REBOLLEDO, 2010).

2.3.2 Água na pasta do cimento hidratada

Na água presente na matriz da pasta do cimento se encontram dissolvidos tanto os íons provenientes do cimento como os que penetram desde o exterior como os cloretos, em concentrações dadas pelo equilíbrio com fases sólidas (Longuet 1973).

Alem do vapor nos poros vazios ou parcialmente vazios, existe água em diferentes estados.

- Água capilar. Esta presente nos poros capilares ou seja nos poros maiores do que 50 Å, pode ser dividida em duas categorias:
 - Água livre. Esta em diâmetros maiores que 50 nm, e caso seja removida não altera o volume.
 - Água retida por tensão capilar. Encontra-se em poros pequenos em torno de 5 a 50 nm, e ao ser removido altera o volume e pode causar retração do sistema.
- Água interlaminar. Associada a estrutura CSH, só é perdida por secagem abaixo de 11% de umidade relativa e se acontece uma perda desta água ocorre uma retração na estrutura de CSH.
- Água quimicamente combinada. É água que forma parte da estrutura dos produtos hidratados não é perdida na secagem. A perda deste tipo de água gera a decomposição dos produtos.

A Figura 2.4 resume algumas das classificações mais usadas.

Autores	Diâmetro no poro nos que a água se apresenta na pasta (Å)		
	Capilar	Interlaminar	Intralaminar
Powers e Brownyard (Powers 1947)	---	20 – 40	---
Feldman e Sereda (Feldman 1970)	---	5 -25	---
Barochel	---	18	< 50
Metha (Mehta 1986)	>50	10 – 40	---

Figura 2.4 - Classificação dos diferentes tipos de água na pasta do cimento endurecido segundo diversos autores (REBOLLEDO, 2010)

2.3.3 Propriedades condutoras do concreto

Quando a concentração dos íons K^+ , Na^+ , Ca^+ , OH^- , SO_4^{2+} e íons alcalinos procedentes do cimento, é muito alta começa se formar o CSH e etringita, que gera uma camada de isolante elétrico nos grãos do cimento, que faz que diminua a mobilidade iônica, aumentando a resistividade elétrica, também devido à porosidade (LEVITA et al. 2000). A figura 2.5 mostra a curva comparando a resistividade vs resistência à compressão..

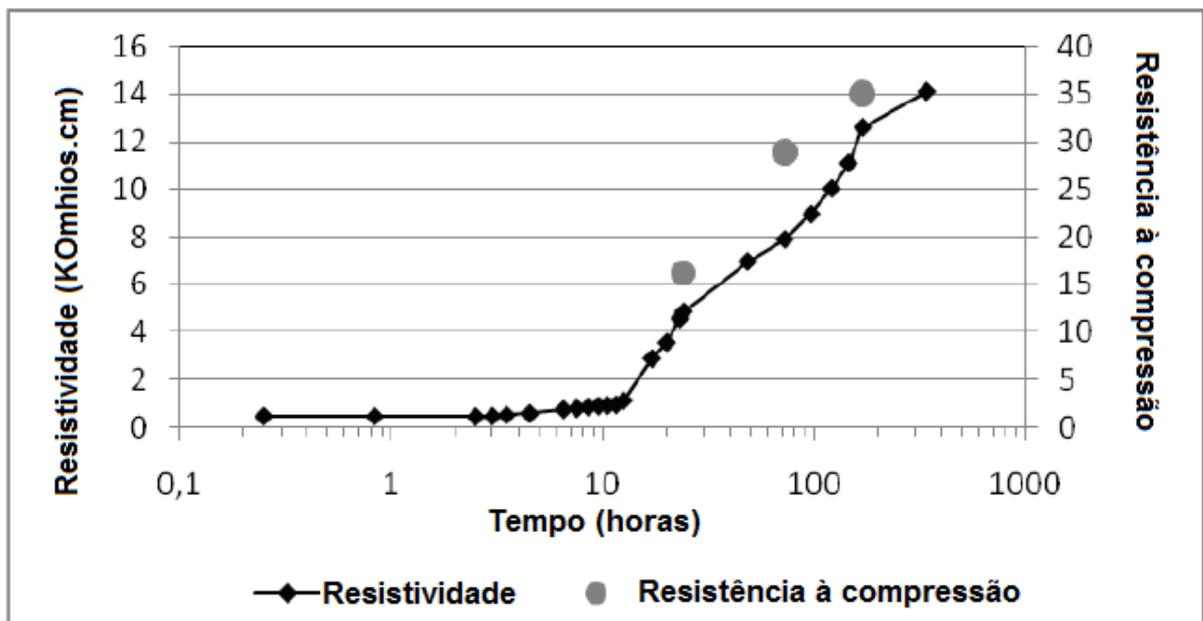


Figura 2.5 - O desenvolvimento da curva para identificar a ação dos aditivos, e outros aspectos do tempo de pega (REBOLLEDO E ANDRADE, 2011 apud ANDRADE E D'ANDREA 2011).

3 RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL

Tal como indicado pela Lei de Ohm é uma propriedade material de resistividade de volume e indica a sua resistência à passagem de cargas elétricas:

$$R = \frac{V}{I} = \rho \frac{l}{A}$$

(equação 4)

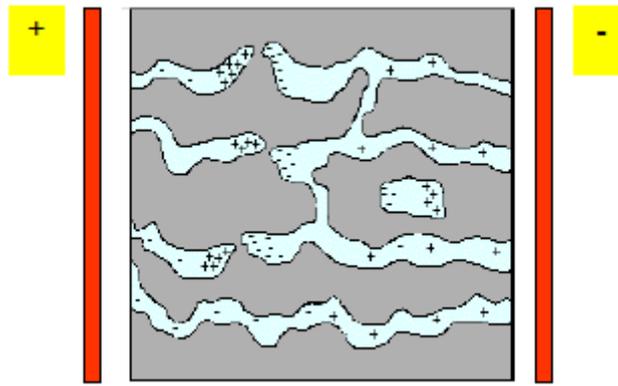


Figura 3.1- A porosidade pode ser avaliada pela resistência ao movimento de cargas elétricas (íons) na fase aquosa dos poros de concreto (ANDRADE E D'ANDREA 2011).

Onde R é a resistência elétrica medida por aplicação de uma tensão V e medindo o fluxo de corrente I . Esta relação é igual à resistividade, através do fator geométrico l/A , isto é, $L =$ distância entre os eletrodos, e $A =$ área da seção transversal do fluxo de corrente. Quanto maior a resistividade, menor é a porosidade do concreto e maior sua resistência mecânica, tendo mais fase sólida por volume. Além disso, se o concreto não está saturado de água, a resistividade aumenta, de modo que é uma medida do seu grau de saturação. Portanto, a resistividade é um indicador da qualidade do concreto porque indica a sua porosidade, e é um indicador do grau de saturação e, portanto, pode servir para controlar o grau de cura (ANDRADE E D'ANDREA, 2011).

A resistividade elétrica é a propriedade elétrica que caracteriza a dificuldade com que os íons se movimentam no concreto, ou seja, controla o fluxo de íons que difundem no concreto através da solução aquosa presente nos seus poros. Todos os fatores que influenciam a estrutura de poros, tais com relação a/c , tipo de cimento, adições minerais e grau de hidratação também afetam a resistividade elétrica do concreto. Esta, também, é altamente sensível ao teor de umidade de equilíbrio e à temperatura do concreto (NEVILLE, 1997).

3.1 FATORES QUE INFLUENCIAM A RESISTIVIDADE ELÉTRICA

3.1.1 Relação água/cimento

No caso da resistividade elétrica, a relação água/cimento tem influência indireta, ou seja, influencia a estrutura dos poros e a concentração iônica da solução aquosa dos poros, propriedades que têm atuação direta na resistividade elétrica do concreto (HOPPE, 2005).

A relação água/cimento é um dos parâmetros mais importantes para o desempenho do concreto. Este parâmetro influencia consideravelmente a estrutura porosa da pasta de cimento, especificamente no volume total de poros e na quantidade de poros de maiores diâmetros. Assim, quanto maior a relação água/cimento, maior o volume de poros e maior é a probabilidade de existirem poros com maiores diâmetros e interconectados e, portanto, menor será a resistividade elétrica.

Segundo Lencioni (2011), demonstrou-se que quanto maior a relação a/c do concreto, menor resistividade elétrica superficial do material, e vice-versa. Um concreto com relação a/c=0,45 resultou em valores de resistividade elétrica superficial 30% superiores aos valores medidos em um concreto com relação a/c=0,65 executados com os mesmos materiais.

Neville (1997) relata que qualquer aumento do volume de água e da concentração de íons na solução aquosa dos poros diminui a resistividade da pasta de cimento e, de fato, a resistividade decresce rapidamente com o aumento da relação água/cimento, devido a maior disponibilidade do eletrólito e maior porosidade. Uma redução no consumo de cimento do concreto também resulta em aumento na resistividade elétrica, pois com relação água/cimento constante, mas com um consumo menor de cimento, existe menos eletrólito disponível para a passagem de corrente, conforme se observa na Figura 3.2.

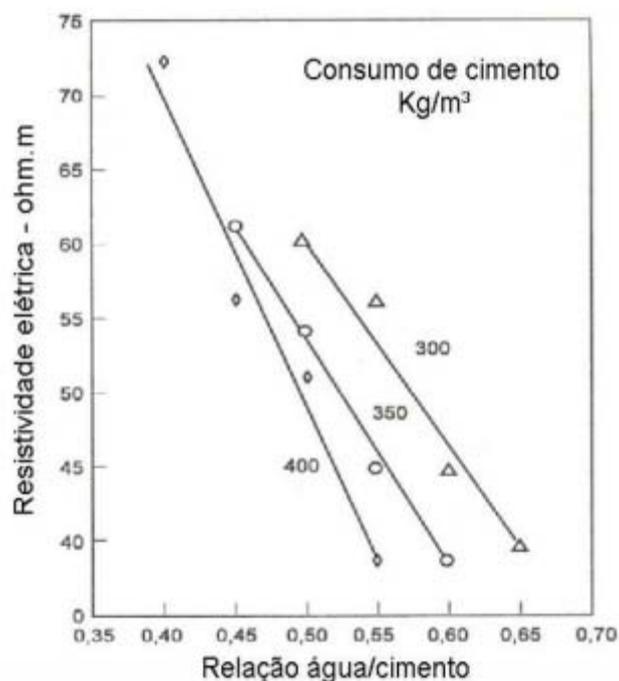


Figura 3.2 – Resistividade elétrica x relação água/cimento e consumo de cimento Portland comum, ensaiado aos 28 dias (NEVILLE, 1997).

A porosidade (determinado pelo teor de água evaporável) e a resistividade das amostras saturadas são apresentados na Figura 3.3 como a relação a/c aumenta, porosidade também aumenta enquanto a resistividade diminui.

A resistividade elétrica do concreto saturado depende do seu conteúdo de líquido no poro, por conseguinte é diretamente relacionada com o volume total de porosidade acessível quando concreto está saturado.

	N35	N40	N45	N50
relação a/a	0,35	0,4	0,45	0,5
água (kg/m ³)	133	140	144	150
OPC(kg/m ³)	380	350	320	300
FSS (kg/m ³)	189	190	193	193
CSS (kg/m ³)	749	754	766	767
GCS6-20 (kg/m ³)	980	980	980	980
Redução de água (l)	6,2	5,9	6	3,6
Ar (%)	3	3,1	3	3,1
Massa unitária (kg/m ³)	2404	2417	2392	2404
Slump (cm)	8	10	6	6
Absorção de água em 24 hrs (%)	3,37	3,64	3,78	3,78
Porosidade (%)	8,0 (0,2)	8,7 (0,4)	8,9 (0,2)	8,9 (0,4)
Resistividade em estado saturado (kΩ.cm)	17,3 (0,8)	13,8 (1,1)	10,7 (1,2)	12,8(0,7)
Resistência a compressão 28 d (MPa)	60,2	53,8	48,3	44,3

Figura 3.3 - Misture proporções e propriedades do concreto (VILLAGRAN e DI MAIO, 2014).

3.1.2 Agregados

Wei e Xiao (2011) monitoraram a resistividade elétrica dos concretos durante um dia com diferentes teores de agregados, de 0% a 70% com relação a/c de 0,4 e 0,5 e concluíram que :

O desenvolvimento da resistividade elétrica em função do tempo do concreto com diferente teor de agregados em diferentes proporções de a/c segue um padrão semelhante, as curvas caem para um ponto mínimo, e então aumentam gradualmente com o tempo, que é governado pelo processo de hidratação da sua pasta matriz.

A curva de resistividade do concreto do maior teor de agregado de volume está sempre acima dos de concreto com um menor teor de agregado para uma relação a/c fixa.

Quando o teor total de agregados varia entre 10% a 70%, tanto os módulos de elasticidade e da resistividade elétrica superficial do concreto aumentam com o aumento do teor de agregado. Maior teor de agregado no concreto resulta em maior módulo de elasticidade e maior resistividade elétrica do concreto, enquanto maior teor de agregado tem menos influência na resistência à compressão do concreto.

Segundo Gowers e Millard (1999 apud LENCIONI, 2011) quando empregada à técnica de Wenner para monitoração da resistividade elétrica, assume-se que o material monitorado seja homogêneo. Entretanto, as partículas de agregado do concreto apresentam, geralmente, uma resistividade elétrica muito mais elevada que a da pasta de cimento, o que faz com que grande parte da corrente seja conduzida através da pasta.

Monfore (1968 apud SANTOS, 2006) mediu a resistividade elétrica de vários agregados e segundo ele a presença de agregados, partículas praticamente não-condutoras, entre a matriz de concreto, causa a obstrução da passagem de corrente elétrica, fazendo com que o comprimento efetivo da trajetória a ser percorrida pela corrente seja maior do que a dimensão do material na direção da corrente. Assim, quanto maior for o teor de agregados, maior será o seu efeito de obstrução e maior será a resistividade.

Principallo et al. (2003) concluíram que a condutividade elétrica do concreto diminuiu com o aumento do teor de agregados na mistura. A evolução da condutividade dos concretos testados apresentou desenvolvimento semelhante a das pastas testadas. Ressaltam os pesquisadores que este comportamento evidencia a dominância da matriz cimentícia sobre a condutividade do concreto.

3.1.3 Hidratação do cimento

Woelf e Lauer (1979 apud LENCIONI e LIMA, 2010) apresentaram um aumento significativo da resistividade elétrica aos 23 dias para corpos de prova curados ao ar quando comparados com corpos de prova submetidos à cura úmida. Esse aumento é devido à evaporação da água livre, que é condutora de corrente pelo concreto.

A cura do concreto é um aspecto muito importante que afeta o comportamento de longo prazo, embora não tem um método que permita quantificá-lo. A resistividade permite que seja quantificado, já que detecta muito bem a secagem superficial, o grau de evaporação o saturação dos poros do concreto.

Comparando a resistividade de um concreto bem curado com outro mal curado é possível encontrar uma percentagem de saturação relativa dos poros que quantifica se tem uma boa cura. A Figura 3.4 ilustra uma relação obtida por Fernandez (2008 apud ANDRADE e D'ANDREA 2011), que resulta um método muito simples de controle na obra em relação á cura.

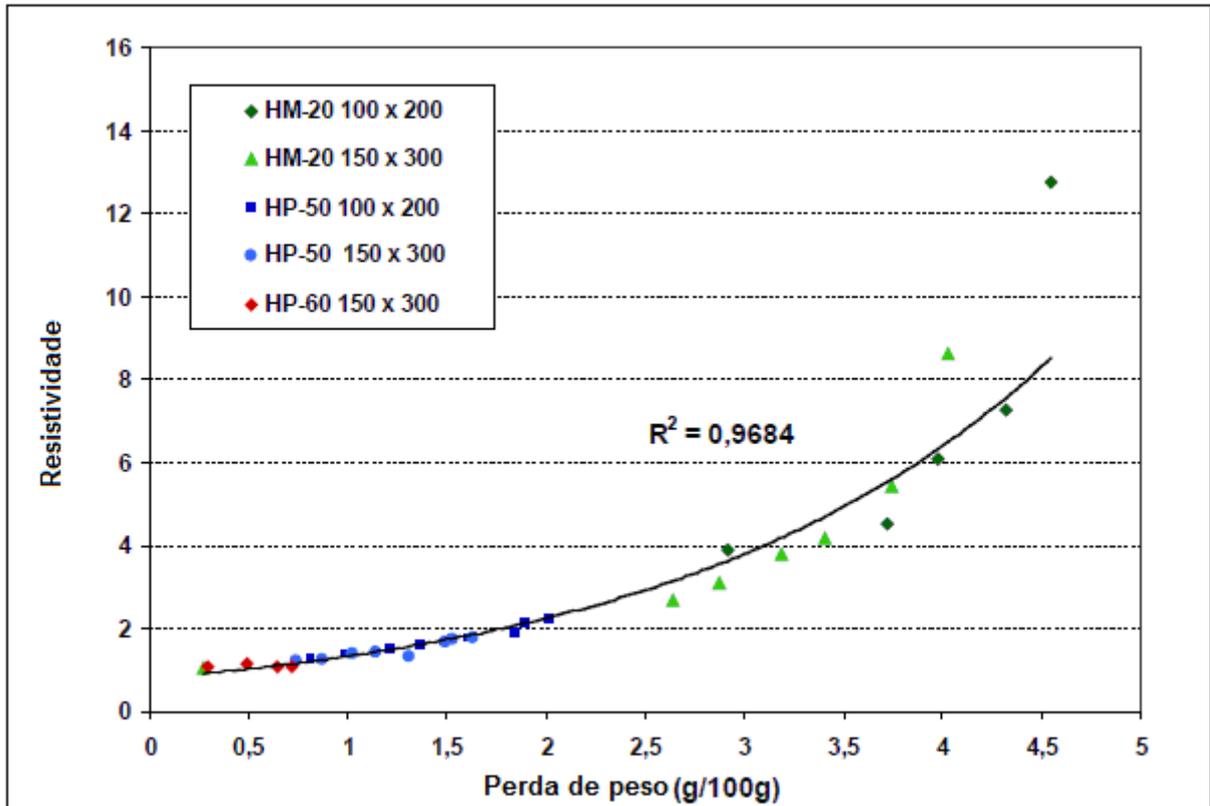


Figura 3.4 -Resistividade relativa vs perda de peso por secagem na cura. Fernandez (2008 apud ANDRADE e D'ANDREA, 2011).

3.1.4 Adições Minerais

Entre as varias adições minerais utilizadas na produção de concretos, destacam-se quatro tipos, que são a cinza volante e a escoria de alto forno, que são adições minerais mais comumente utilizadas no concreto; a sílica ativa e a cinza de casca de arroz, utilizadas em uma escala menor (HOPPE, 2005).

McCarter et al. (2000) entendem que o emprego de pozolanas resulta em refinamento e aumento na tortuosidade da rede de poros. Diminuindo a mobilidade iônica e interações entre íons. Por fim, as maiores forças confinantes alteram o comportamento condutivo da solução dos poros.

No trabalho de Mostardeiro (2011), foram utilizadas misturas contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz (CCA) clara e escura foram investigadas quanto ao desempenho em concreto estrutural, através dos ensaios de absorção de água

por capilaridade, segundo a NBR 9779:1995 e resistividade elétrica aparente, conforme o método dos quatro eletrodos (Wenner). Para isso, foram testadas oito misturas aglomerantes, investigadas nas relações a/ag 0,35, 0,50 e 0,65: uma composta por 100% de cimento Portland, REF, três com substituição de cimento por CCA clara, em teores de 10%, 20% e 30%, denominadas 10 CCAC, 20 CCAC e 30 CCAC, respectivamente, outras três com os mesmos teores de troca de cimento por CCA escura, identificadas por 10 CCAE, 20 CCAE e 30 CCAE, respectivamente, e uma mistura com 10% de sílica ativa, 10 SA, para comparação de resultados. O aumento no prazo de cura e no teor de substituição de cimento por CCA resultou em melhor desempenho para as propriedades investigadas. Com relação à resistividade elétrica, a mistura composta com 30% de CCAC apresentou melhor desempenho em todas as idades de ensaio.

Abreu (1998) comparou concretos com adições de sílica ativa e cinzas de casca de arroz (0, 6 e 12%) cimento CP V – ARI e cimento CP IV 32 e relação água/aglomerante a 0,5, 0,65 e 0,80. Os valores de resistividade elétrica foram obtidos pelo método de Wenner, em três situações distintas de exposição do concreto (câmara úmida, câmara climatizada e submersa). Os resultados obtidos permitiram concluir que o uso de casca de arroz como adição no concreto mostrou-se ser favoravelmente significativo para a resistividade elétrica, principalmente quando este se encontra submerso e em idade mais avançadas, assim como a adição de sílica ativa no concreto possibilita obter concretos significativamente mais resistivos.

Adições minerais, como cinza volante, sílica ativa e escória de alto-forno, e os fillers, materiais inertes de pequenas dimensões, exercem influência na resistividade elétrica do concreto, pois, segundo Santos(2006), provocam o refinamento dos poros da matriz, por ação química e/ou física, e diminuem a concentração iônica da solução. Então, o concreto com adições minerais apresenta uma maior resistividade elétrica quando em comparação com um concreto convencional porque a matriz fica mais densa e a quantidade de poros aumenta, mas são de menor diâmetro, o que dificulta a condução da corrente através do concreto e, portanto, aumentam a resistividade elétrica (SANTOS, 2006).

3.1.5 Umidade

De todas as variáveis que de alguma maneira influenciam o valor da resistividade elétrica do concreto, a variação do teor de umidade é, sem dúvida, uma das mais importantes.

Isso porque a corrente elétrica que atravessa o concreto é conduzida pela solução aquosa dos poros. O volume dessa solução diminui com a redução do teor de umidade. Sendo assim, a passagem de corrente elétrica é reduzida e conseqüentemente a resistividade elétrica aumenta (OSNI, 2010)

Chen et al (2014) concluíram que a resistividade variou com o teor de água. As medidas dos espécimes no forno seco ou no ar em 40% de umidade relativa eram instáveis ou até mesmo não detectado. Por outro lado, essas medições das amostras a SSD (saturado superfície seca) ou úmida tinha resistividades semelhantes. Portanto, sugere-se que as amostras devem ser molhadas antes das medições de resistividade.

A resistividade elétrica controla o fluxo de íons na solução aquosa dos poros do concreto, sendo muito sensível ao teor de umidade de equilíbrio e a temperatura. Tanto o aumento da umidade quanto o da temperatura resultam em diminuição da resistividade elétrica do concreto (HELENE, 1993).

Segundo Castellote et al (2002) o grau de saturação na rede de poros capilares do concreto varia em função das condições atmosféricas do ambiente no qual esta exposto. As alterações na umidade relativa e a ocorrência de chuvas podem alterar o conteúdo de umidade do concreto.

A condutividade elétrica do concreto é essencialmente nula em uma umidade relativa de aproximadamente 42%. Embora, nessa mesma umidade, a pasta de cimento ainda contenha quantidades significativas de água em seus poros (acima de 4% do volume do concreto), essa não é condutiva (HUNKELER, 1996).

3.1.6 Temperatura

A temperatura que mudanças de temperatura exercem mudanças importantes na resistividade do concreto. Se a umidade relativa é constante, e a temperatura alta produz a queda da resistividade e vice-versa. Isto devido a mudanças na mobilidade iônica na solução dos poros e por mudanças na interação íon-sólido com a pasta de cimento (POLDER et. al, 2000).

Polder (2001 apud BERTOLINI e POLDER, 1997), fala que mudanças de temperatura têm efeitos importantes sobre a resistividade do concreto. Em geral, um aumento de temperatura provoca uma diminuição da resistividade e vice-versa. Este é o resultado da influência da temperatura sobre a mobilidade íon, ion-ion e interações íon-sólido, citando estudos realizados no laboratório nos que se pode observar que o efeito da temperatura na resistividade elétrica foi de 3% para cada grau kelvin alterado em concretos saturados, enquanto que, em concretos secos, a mudança de temperatura alterou a resistividade em 5 % por grau kelvin.

Hope et al. (1985 apud LUBECK, 2008) cita os seguintes resultados na Figura 3.5.

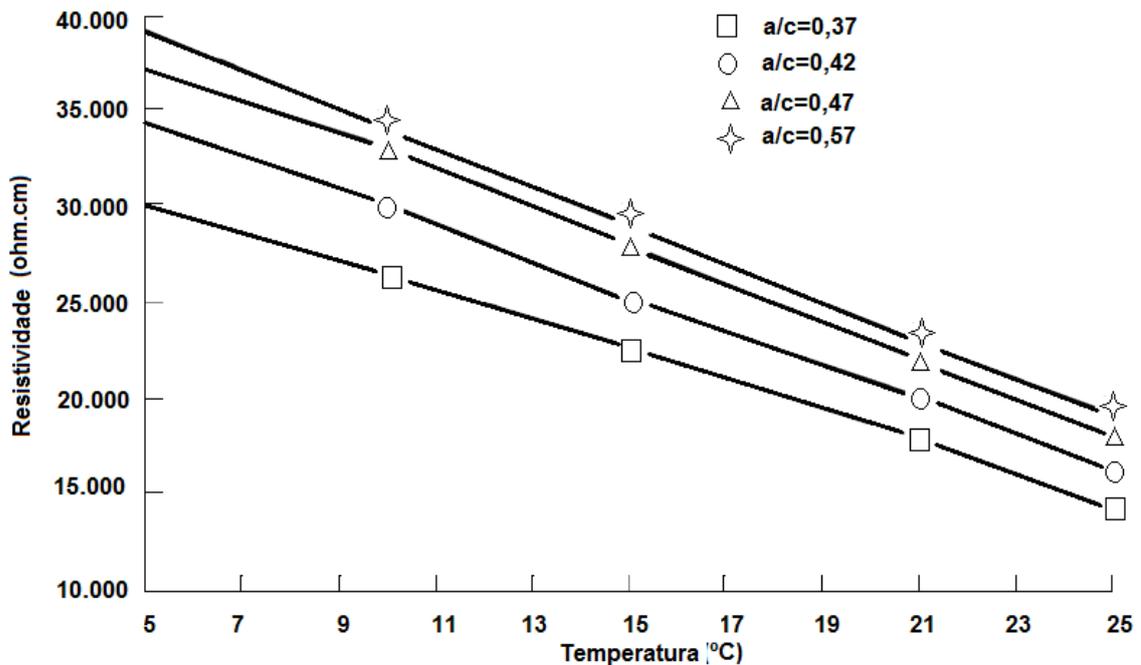


Figura 3.5 - Resistividade elétrica vs temperatura. Hope et al. (1985 apud LUBECK, 2008).

3.1.7 Tipo de cimento

Segundo Neville (1997), a resistividade elétrica de concretos feitos com cimento aluminoso é de 10 a 15 vezes maior do que quando se usa cimento Portland comum, nas mesmas proporções.

Hammond e Robson (1955 apud HOPPE, 2005) estudaram o efeito de três tipos de cimento na resistividade elétrica do concreto, sendo eles, cimento Portland comum, cimento Portland de alta resistência inicial e cimento Portland aluminoso (alto teor de alumina). A relação água/cimento utilizada foi 0,49. Concretos com cimento Portland comum e com cimento Portland de alta resistência inicial obtiveram resistividades elétricas semelhantes. No entanto o concreto com cimento Portland aluminoso alcançou uma maior resistividade elétrica do que o cimento Portland comum. Na Figura 3.6 pode-se observar essa diferença na resistividade elétrica relacionada com a composição química dos cimentos.

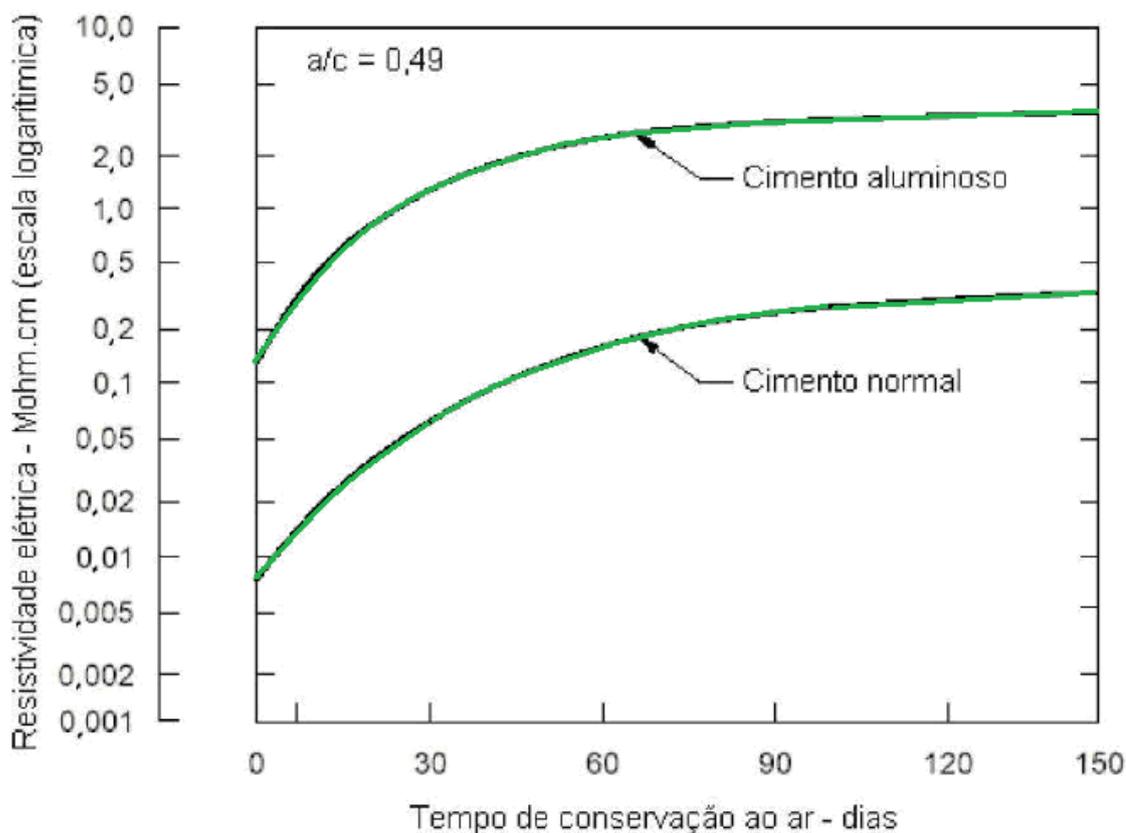


Figura 3.6 - Efeito do tipo de cimento na resistividade elétrica do concreto (HAMMOND e ROBSON, apud HOPPE, 2005)

Hansson e Hansson (1983) estudaram o efeito da composição química do cimento sobre a resistividade elétrica em pasta e, concluíram que, a resistividade era superior em pastas de cimento de alto forno, e a resistividade menor nos cimentos comuns conforme se ilustra na Figura 3.7.

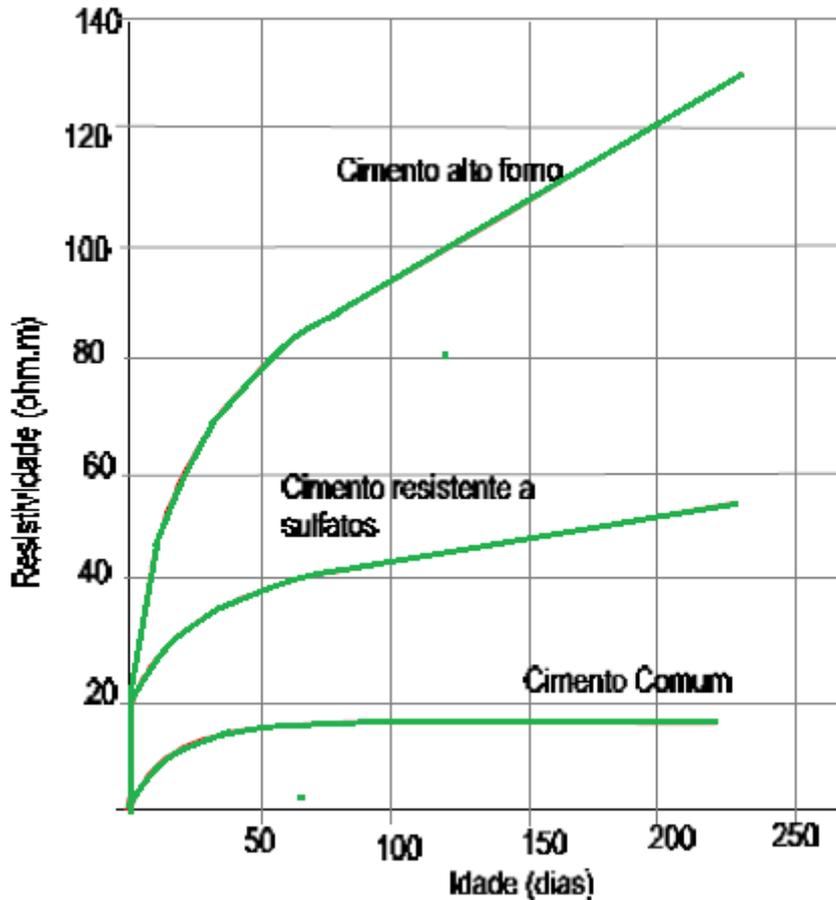


Figura 3.7 – Resistividade elétrica de pastas de diferentes tipos de cimentos, a temperatura de 22°C e umidade relativa de 100 % (HANSSON E HANSSON, 1983).

Observa-se também que a resistividade elétrica das pastas de cimento ensaiadas pelos autores é influenciada não apenas pelo tipo de cimento, mas também pela idade. Quando presentes no concreto, as adições atuam principalmente na interface pasta agregado, que é a fase do concreto mais susceptível à ação de agentes químicos e físicos, influenciando significativamente na sua microestrutura. Parece claro que, além do efeito pozzolânico ser característico para as diferentes adições, atuando de forma diferenciada nas principais propriedades do concreto (resistência à compressão e porosidade, por exemplo), influi também de forma significativa na resistividade elétrica do concreto, como um resultado das características químicas que tem o concreto que recebe a adição (ABREU, 1997).

3.1.8 Aditivos

No estudo de Neville (2007) o autor não encontrou alteração na resistividade elétrica do concreto.

Whiting e Nagi (2003 apud Mostardeiro 2011), concluíram que a influência é definida como pequena ou inexistente. No entanto, o emprego de aditivos pode trazer benefícios indiretos, pois aditivos plastificantes e superplastificantes possibilitam reduções na relação a/ag da mistura, mantendo a mesma trabalhabilidade, tornando o concreto mais denso e menos permeável, com resistividade elétrica mais elevada.

3.1.9 Íons Cloreto

O efeito dos íons Cloreto na resistividade elétrica do concreto é algo contraditório. Alguns autores afirmam ser insignificante a ação dos Cloretos sobre a resistividade elétrica; outros afirmam ocorrer uma redução significativa da resistividade elétrica com o aumento do teor desses íons no interior do concreto (LENCIONI E LIMA, 2010)

Segundo Santor (2011), A presença de íons agressivos no concreto aumenta a concentração iônica da solução aquosa dos poros, elevando a sua condutividade elétrica e conseqüentemente o concreto terá a sua resistividade elétrica reduzida.

Polder et al. (2000), afirma que para um concreto não carbonatado, o efeito da penetração dos íons Cloreto na resistividade é relativamente pequeno.

Hunkeler (1996), afirma que com altas concentrações de cloreto entre 1 e 2% aumenta a resistividade em duas até no máximo três vezes.

3.1.10 Carbonatação

Hoppe (2005) refere o trabalho de Chi et al. (2002) onde foi estudado o efeito da carbonatação sobre a resistividade elétrica do concreto. Foram feitos concretos com 100% de cimento Portland com relações a/ag de 0,48 (N48) e 0,58 (N58) e concretos com escória granulada de alto forno nos teores de 24% e 60% e relações a/ag de 0,36(S36) e 0,40 (S40). Todos os concretos foram submetidos à

carbonatação acelerada e ao mesmo tempo foi medida a resistividade elétrica superficial. Os resultados são ilustrados na Figura 3.8

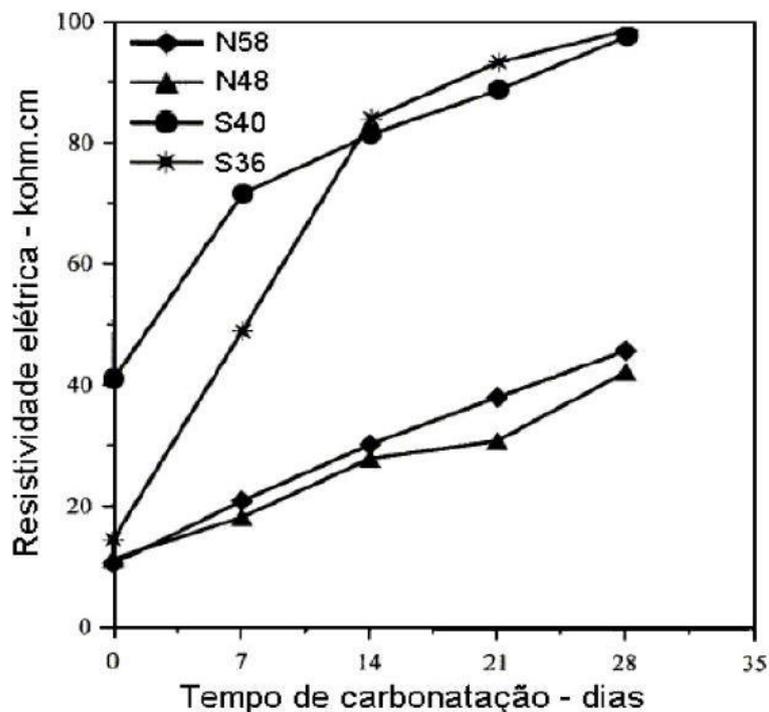


Figura 3.8 – Carbonatação versus resistividade elétrica (Chi et al., 2002 apud HOPPE 2005)

Chi et al., (2002, apud Hoppe 2005) concluíram que conforme avançava a carbonatação, incrementava a resistividade elétrica devido à diminuição da porosidade do concreto, em função a substituição do hidróxido de cálcio pelo carbonato de cálcio que ocupa maiores volumes. Porém foi observado um aumento da taxa de corrosão das armaduras devido ao processo de carbonatação do concreto.

3.2 MEDIDA DA RESISTIVIDADE

3.2.1 Secagem do concreto

Se a secagem prematura afeta a qual do concreto de revestimento, isso mostrara maiores espessuras carbonatadas que as zonas bem curadas, ou seja, uma velocidade maior do avanço da frente de carbonatação. Claramente, a técnica de medir a taxa de carbonatação em condições não aceleradas não é um método

prático, porque precisa da exposição prolongada (anos), mas tem a enorme vantagem conceptual que representa um método direto e destacando a importância de uma cura eficaz para a durabilidade de estruturas de concreto armado (FERNANDEZ, 2009).

Detecção da secagem pode ser realizado por vários métodos, embora alguns só são adaptados para pequenas amostras em condições laboratoriais ou porque possuem características semi-destrutivas, devem ser furos feitos no concreto, se não deixar as inserções correspondentes previstos no momento da execução da estrutura (FERNANDEZ, 2009).

Por estas razões, uma nova metodologia baseia-se na dependência da resistividade elétrica do concreto com o teor de umidade do mesmo e, mais especificamente, com seu grau de saturação (ANDRADE et. al., 2002), conforme ilustrado na Figura 3.9.

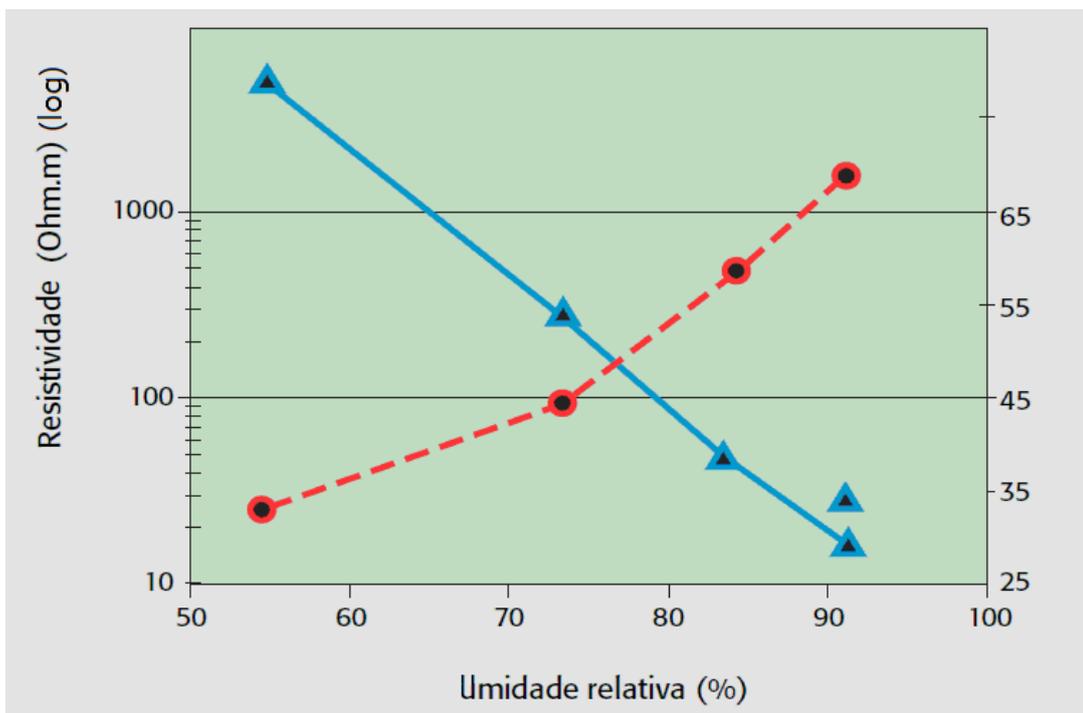


Figura 3.9 - Dependência da resistividade e o grau de saturação, usando como uma variável intermédia à umidade relativa (%) (FERNANDEZ, 2009).

A presença de água "líquida" de forma contínua dentro da estrutura de poros fornece o meio condutor e, por conseguinte, quando esta fase líquida é reduzida e perde continuidade, a resistividade aumenta significativamente.

A dificuldade associada às medições nas primeiras idades é que o concreto está evoluindo devido à hidratação do cimento, um desenvolvimento que também induz alterações na resistividade elétrica e na disponibilidade de água, e deve ser considerada se pretende usar a resistividade como um indicador de secagem superficial (FERNANDEZ, 2009). A Figura 3.10 ilustra o esquema da ocorrência dos mecanismos.

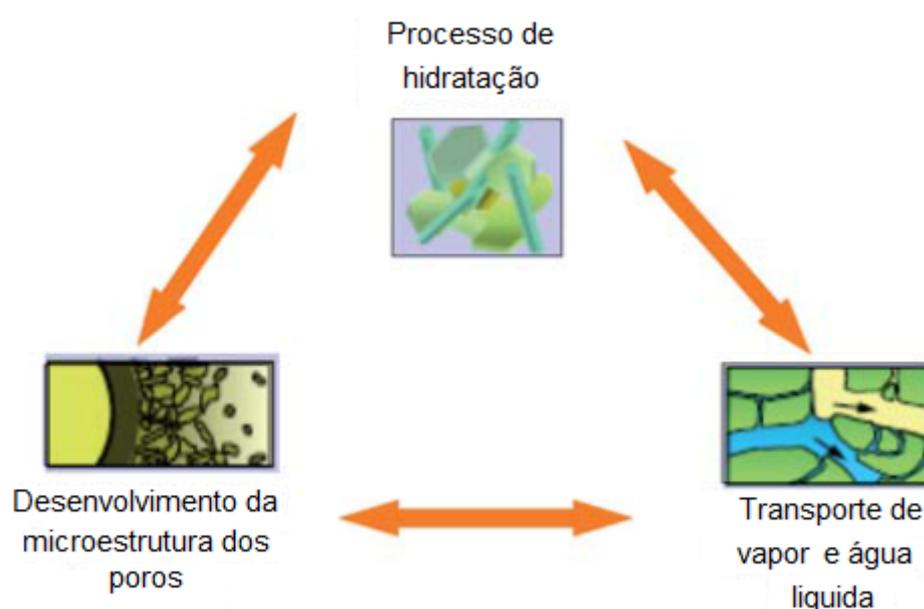


Figura 3.10 - Esquema de ocorrência de mecanismos acoplados que determinam o valor da resistividade elétrica nas primeiras idades (FERNANDEZ, 2009).

Para a medição da resistividade uma resistivímetro comercial de quatro elétrodos (ou pinos) eqüidistantes, foi utilizada segundo a configuração Wenner, e com o espaçamento entre eles de 50 mm e 20 mm, conforme ilustrado na Figura 3.11.



Figura 3.11 - Medição da resistividade elétrica do concreto utilizando o método dos eletrodos eqüidistantes 20 mm (FERNANDEZ, 2009).

3.2.2 Método dos quatro eletrodos ou método de Wenner

Como foi mencionado, o método mais comumente utilizado para medir a resistividade elétrica superficial do concreto é o método de Wenner ou método dos quatro eletrodos. Este método foi desenvolvido para medir a resistividade elétrica em solos, normalizado pela ASTM 657, no entanto mais tarde foi adaptado e agora é empregado para analisar a resistividade de concretos. Após muitos estudos, foram desenvolvidos equipamentos que possibilitam medidas de resistividade *in situ*, de forma não destrutiva. Neste método quatro eletrodos são colocados em contato com o concreto, eqüidistantes e alinhados conforme a Figura 3.18. Nos eletrodos externos passa uma pequena corrente alternada (I) e mede-se a diferença de potencial (V) entre os dois eletrodos internos.

Para uma geometria semi-infinita, a resistividade elétrica do concreto é obtida pela equação 5 (Gowers e Millard, 1999 apud SANTOR, 2011):

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot d \cdot \frac{V}{I} \quad (\text{equação 5})$$

Para medir a resistividade elétrica do concreto pelo método de Wenner, é necessário garantir um bom contato entre esses e o concreto. Dessa forma surge a nova variável que é a profundidade de penetração dos eletrodos no concreto. Dessa forma ocorre a necessidade de utilizar de uma fórmula mais completa que agregue essa nova variável (SANTOR, 2011).

De acordo com a NBR 7117/81, que normaliza a medição da resistividade elétrica do solo pelo método dos quatro eletrodos, é considerada a profundidade de penetração dos eletrodos no solo. Logo, fazendo uma analogia com o concreto, pode-se utilizar a equação 6 da norma NBR 7117/81, a qual é também indicada por Medeiros Filho (1979 apud ABREU, 1998):

$$\rho = \frac{4 \cdot \pi \cdot d \cdot V}{\left(1 + \frac{2 \cdot d}{\sqrt{d^2 + 4 \cdot b^2}} - \frac{d}{\sqrt{d^2 + b^2}}\right) \cdot I} \quad (\text{equação 6})$$

Onde:

ρ = resistividade elétrica calculada do concreto, em ohm.cm;

V = diferença de potencial medida, em Volts;

I = corrente medida, em Amperes;

d = distância de separação entre eixos dos eletrodos, em cm;

b = profundidade de penetração dos eletrodos no concreto, em cm.

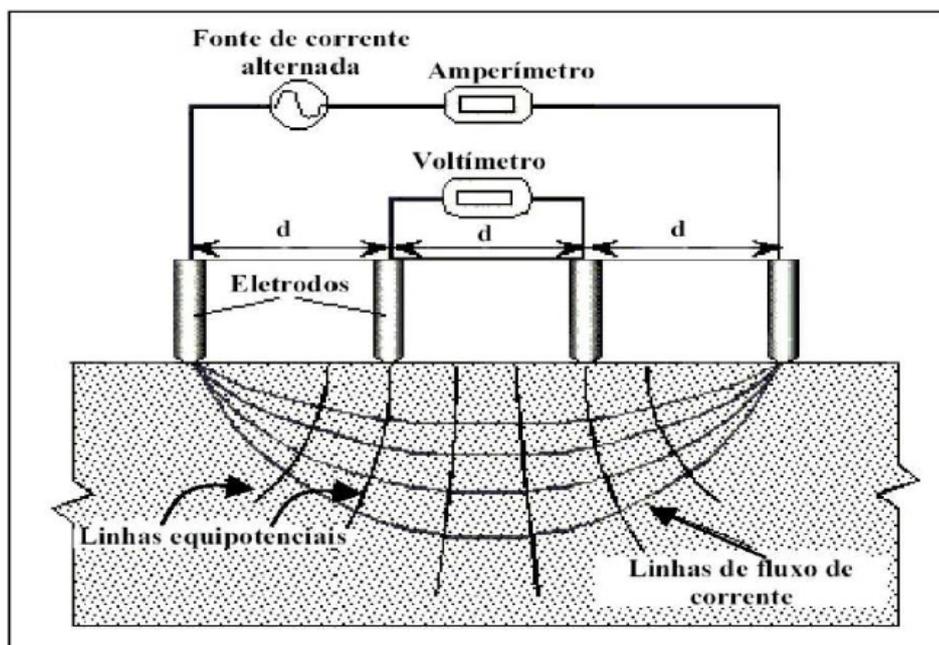


Figura 3.12 – Método dos quatro eletrodos para medir a resistividade elétrica do concreto. “d” – distância entre eixos dos eletrodos (CARINO, 1998 apud HOPPE, 2005).

O método dos quatro eletrodos, de acordo com a norma NBR 7117/81, determina a resistividade elétrica até uma profundidade aproximadamente igual à distância entre eixos dos eletrodos. Dessa forma, para determinar a resistividade elétrica em diferentes profundidades, basta variar a distância entre eixos dos eletrodos.

O método de Wenner embora é simples, pode estar sujeito a erros e distorções em função da geometria do conjunto, características do concreto avaliado ou presença de armaduras. Em seguida, são mencionados alguns fatores importantes relacionados com o método.

3.2.3 Método da resistividade elétrica volumétrica

Abreu (1998) salientou que há duas regiões características num elemento de concreto, as quais possuem valores de resistividade elétrica distintos: uma região mais superficial, sujeita a ciclos de molhagem e secagem, denominada resistividade elétrica aparente, e outra região mais interna, onde, segundo a autora, a umidade é mais estável, identificada como resistividade elétrica volumétrica.

O método da resistividade elétrica volumétrica foi apresentado por Abreu (1998), conforme descrito na NBR 9204:1985, de acordo com esquema ilustrado na Figura 2.11. Para este método, utilizam-se corpos-de-prova cilíndricos, de dimensões 15 x 15 cm, extraídos de estruturas ou moldados de acordo com a ABNT NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS, 2003). Durante a execução deste ensaio, a umidade de cada corpo-de-prova monitorada. Realiza-se a medição da resistividade elétrica volumétrica em diversas idades, através da aplicação de uma tensão de $50 \pm 0,5$ V, com corrente contínua. Decorridos 10 minutos, procede-se à leitura da corrente que atravessa o corpo-de-prova, em miliampère (mA). Em cada ensaio, coleta-se a massa do corpo-de-prova, assim como se mede a temperatura e a umidade nas imediações do mesmo, além da tensão e corrente. O cálculo da resistividade elétrica volumétrica (ρ_v) é realizado de acordo com a seguinte expressão:

$$\rho_v = \frac{V.A}{I.h}$$

(equação 7)

Onde:

ρ_v = resistividade elétrica volumétrica do corpo-de-prova na idade de ensaio ($\Omega \cdot \text{cm}$);

V = tensão aplicada no corpo-de-prova (mV);

A = área do eletrodo principal ou blindado (cm^2);

i = corrente elétrica que atravessa o corpo-de-prova (miliampères);

h = altura total do corpo-de-prova (cm).

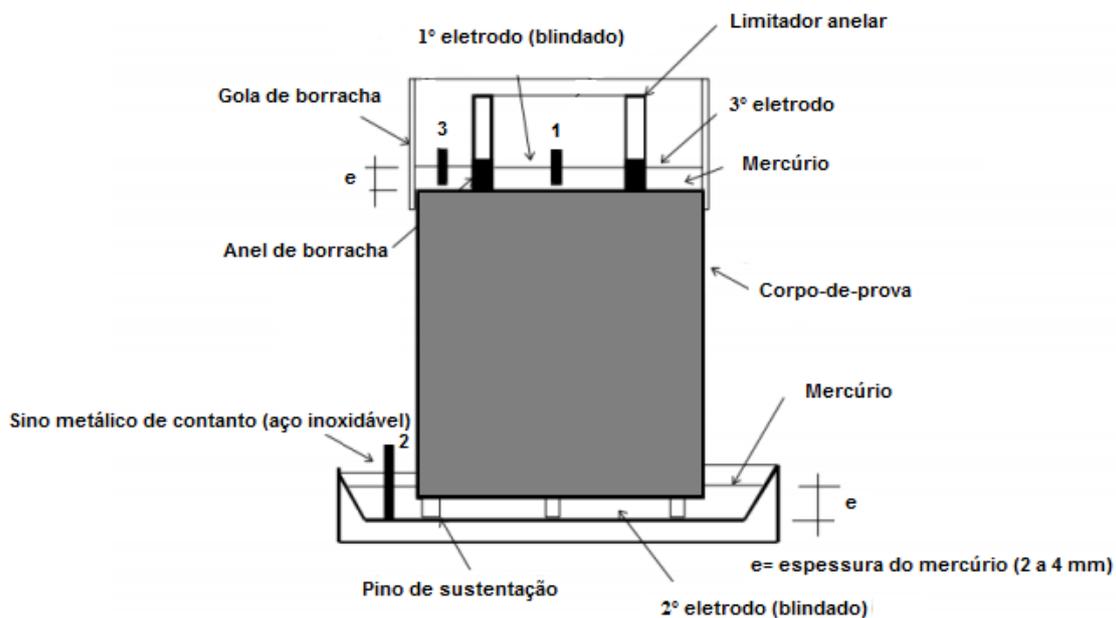


Figura 3.13. Esquema de montagem do corpo-de-prova para o ensaio de resistividade elétrica volumétrica, segundo a NBR 9204:1985 (ABREU, 1998).

3.3 FATORES IMPORTANTES RELACIONADOS COM O MÉTODO DE WENNER

3.3.1 Presença de Armadura

A armadura conduz corrente muito melhor do que o concreto e irá provocar alterações na homogeneidade do fluxo de corrente. Leituras realizadas sobre as barras resultam em falsas medidas de resistividade elétrica. Mesmo que apenas um dos quatro eletrodos esteja próximo à barra, o fluxo de corrente não será ideal, e resultados errôneos poderão ser produzidos. Neste caso, a leitura resultante poderá ser um falso valor baixo ou alto, dependendo de qual eletrodo estiver próximo à barra

A presença de armaduras no interior do concreto paralelas ao alinhamento do eixo dos quatro eletrodos resulta em distorção do campo de corrente. A influência das armaduras pode ser minimizada com a medida da resistividade tomada com o eixo

dos eletrodos perpendicularmente às armaduras, caso isto não seja possível pode-se manter um afastamento e lateral entre o eixo dos eletrodos e as armaduras (LUBECK, 2008).

Gowers e Millard (1999 apud Lubeck, 2008) concluem que para espessuras de cobrimento (c) maiores que 1,5 vezes a distância entre eletrodos (a) as medidas de resistividade elétrica sofrem pouca influência das barras de aço.

3.3.2 Parâmetros geométricos

Gowers e Millard (1999 apud LENCIONI, 2011) apresentaram um estudo segundo o qual alguns parâmetros geométricos devem ser tomados como referência para que se tenha precisão nas leituras efetuadas com os equipamentos para leitura da resistividade elétrica superficial dos concretos. As dimensões mínimas que os elementos de concreto deveriam apresentar para que não ocorresse o fenômeno de fuga de corrente foram investigadas. Na Figura 3.13 é apresentado o esquema dos parâmetros geométricos cuja adoção é recomendada por esses autores.

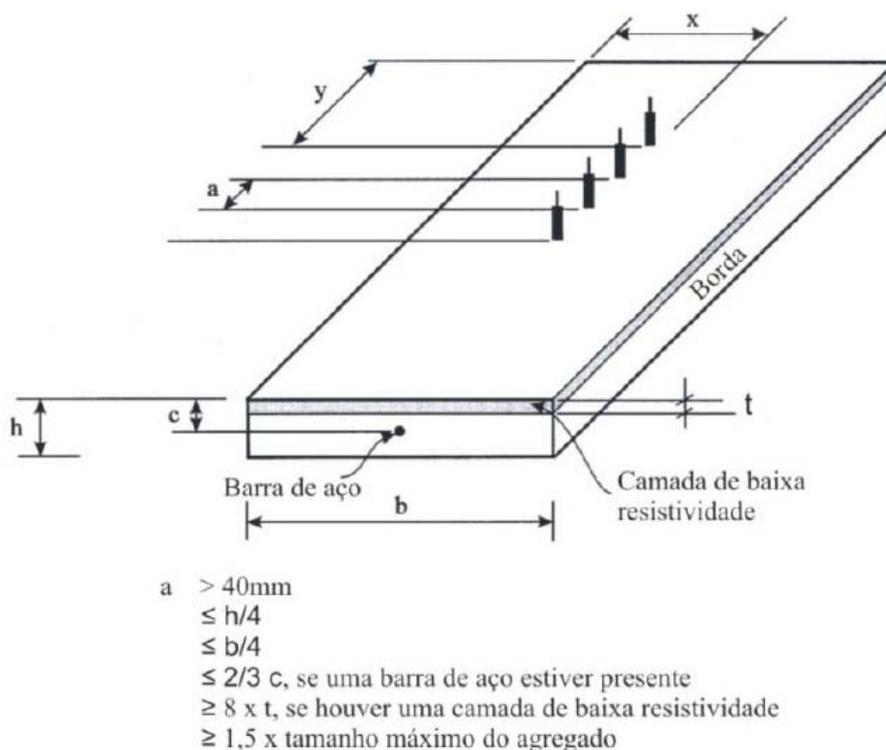


Figura 3.14 - Recomendações de parâmetros geométricos para ensaios de resistividade elétrica superficial.

3.3.3 Contato entre os eletrodos e o concreto

O bom contato entre os eletrodos e o concreto é imprescindível para a obtenção de medidas confiáveis. O mau contato pode resultar em estimativas erradas de resistividade elétrica, principalmente na leitura da diferença de potencial, mais sensível ao contato (GOWERS e MILLARD, 1999).

Outro fator importante é que os contatos de todos os eletrodos sejam iguais, ou o mais próximo disso, caso contrário erros poderão ocorrer na leitura (SANTOR, 2011).

A polarização do contato também pode resultar em distorções nas medidas. Whiting e Nagi (2003, apud LUBECK, 2008) afirmam que o emprego de corrente contínua em medidas de resistividade resulta na polarização do contato concreto-eletrodo, distorcendo os resultados. Os pesquisadores afirmam que o emprego de corrente alternada evita tal problema.

Gowers e Millard (1999) também recomendam o emprego de correntes alternadas de baixa frequência para reduzir os efeitos de polarização do contato eletrodo/concreto reduzindo distorções de medida da resistividade elétrica.

3.3.4 Tipo de onda, frequência e intensidade da corrente elétrica.

Millard et al. (1989, apud HOPPE, 2005) onde foi proposto o uso da corrente com ondas quadradas para eliminar o efeito capacitivo e foram considerados satisfatórios os resultados obtidos com correntes de onda senoidal, não observando diferenças maiores que 6 % entre os dois tipos de onda. Estudaram também a influência da intensidade da corrente (Figura 3.14) e frequência da onda (Figura 3.15) sobre a resistividade. E o incremento da resistividade com o aumento de frequência foi identificada por Millard et al. (1989 apud ABREU, 1998)

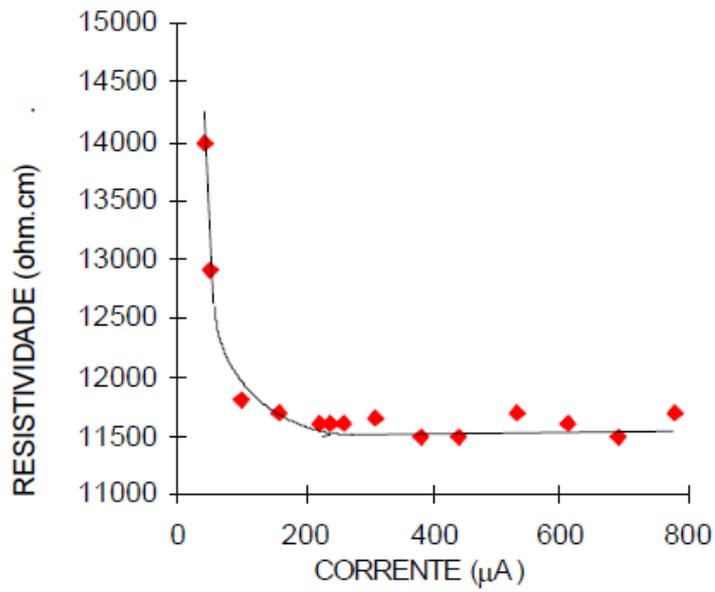


Figura 3.15 - Resistividade superficial em função da corrente (MILLARD et al., 1989 apud ABREU, 1998).

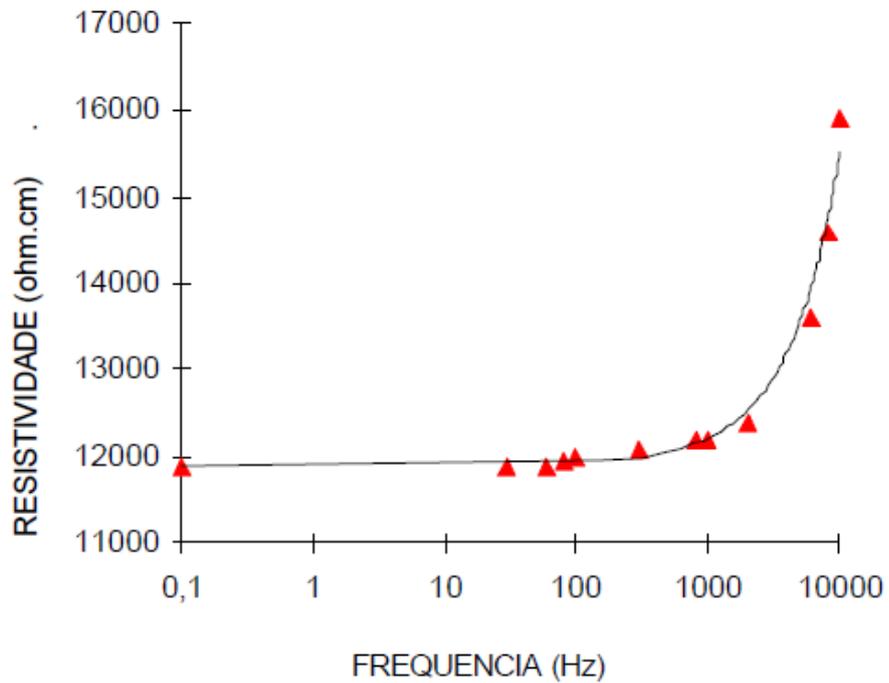


Figura 3.16 - Resistividade superficial em função da corrente (MILLARD et al., 1989 apud ABREU, 1998).

Os autores concluíram que correntes inferiores que 200 μA devem ser evitadas e fluxo de corrente elevado introduz erros devidos à resistência de contato entre o eletrodo e o eletrólito (SHREIR, 1963, apud ABREU, 1998)

3.3.5 Camadas superficiais

Além das heterogeneidades locais ocasionadas por partículas de agregados, a resistividade de camada superficial pode diferir da resistividade do interior da peça de concreto. Gradientes de umidade provocados pela secagem ou pela ocorrência de chuvas, maior porosidade do concreto na região superficial ocasionada pela exudação ou pela deficiência do processo de cura e até mesmo carbonatação do concreto influenciarão as medidas da resistividade elétrica (SANTOS, 2006).

Millard e Gowers (1991 apud ABREU, 1998), investigaram o efeito de camadas superficiais como as devidas à carbonatação ou secagem da camada mais externa do concreto e observaram que medidas em concretos carbonatados recentemente secos devem ser evitadas. Segundo os autores, os erros causados por uma baixa resistividade de camada superficial serão muito maiores que por uma camada de alta resistividade, de espessura similar. Uma camada superficial com espessura da ordem de 0,01 vezes o espaçamento dos eletrodos pode dar resultados subestimados da resistividade do concreto na região de atividade de corrosão. Entretanto, a presença de uma dupla camada superficial com resistividades diferentes, como por exemplo, um concreto carbonatado (alta resistividade), com uma película de umidade (baixa resistividade), produz erros difíceis de serem quantificados e minimizados, podendo, nesse exemplo, produzir uma alta resistividade artificial. Com isso, não é recomendado que a determinação da resistividade elétrica seja feita com a superfície do concreto recentemente umedecida (película de umidade), especialmente se existir camada carbonatada (GOWERS e MILLARD, 1999 apud HOPPE, 2005).

A Figura 3.16 mostra a influência de uma camada com baixa resistividade (armada de NaCl) na determinação da resistividade elétrica, pelo método dos quatro eletrodos. Para minimizar os erros devido à presença dessa camada, é necessário que a distância entre eixos dos eletrodos seja pelo menos 8 vezes maior do que a

espessura de referida camada ($d \geq 8 \cdot t_1$) (GOWERS e MILLARD, 1999 apud HOPPE, 2005).

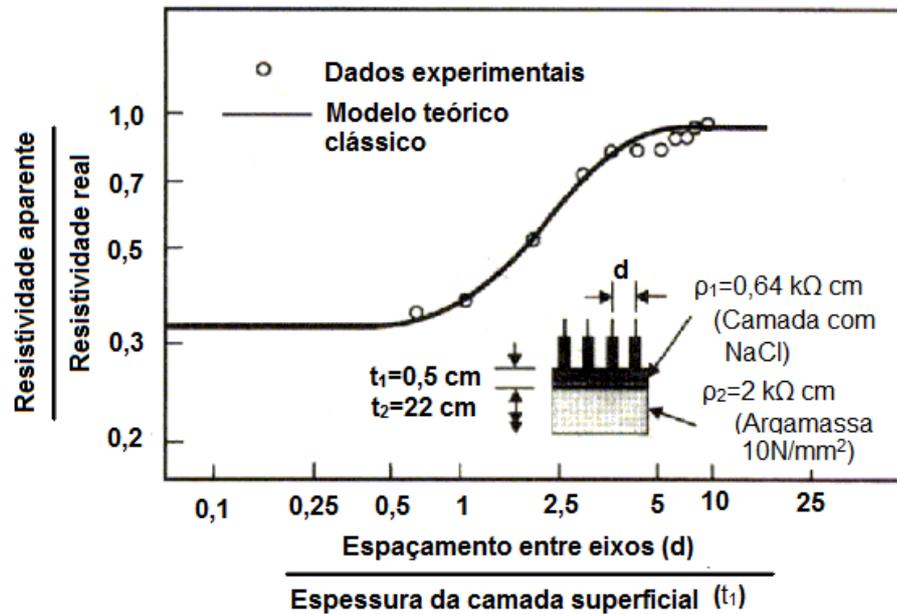


Figura 3.17 -Efeito de uma camada superficial de baixa resistividade na determinação da resistividade elétrica pelo método dos quatro eletrodos (GOWERS e MILLARD, 1999 apud HOPPE, 2005).

3.4 O ENDURECIMENTO NO ESTADO FRESCO

Uma vez que se mistura o cimento com água é obtida uma suspensão, a resistividade no início da mistura é muito baixa, mas conforme se hidrata o cimento e o concreto inicia a pega e endurece, a resistividade aumenta. Um exemplo da curva de resistividade durante as primeiras 24 horas é mostrada na

A relação da resistividade com a resistência à compressão indicada nesta Figura 3.17 também está sendo estudado (ANDRADE et al, 2009 apud ANDRADE e D'ANDREA, 2011) e estão se desenvolvendo expressões matemáticas que ligam ambos os parâmetros, permitindo ao fabricante prever a resistência mecânica desde as primeiras horas.

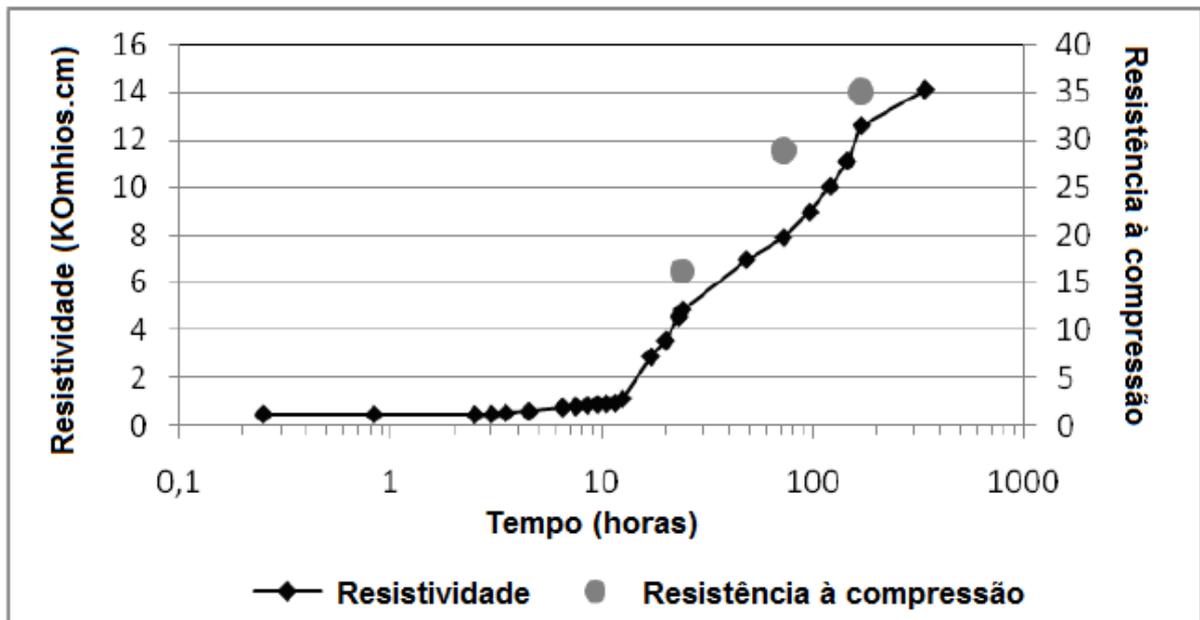


Figura 3.18 - O desenvolvimento da curva para identificar a ação dos aditivos, e outros aspectos do tempo de pega (REBOLLEDO E ANDRADE, 2011 apud ANDRADE E D'ANDREA 2011).

4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A metodologia aplicada neste trabalho teve como objetivo avaliar a influência da relação água/cimento, tempo de cura e grau de hidratação no desempenho e no comportamento da resistividade elétrica do concreto.

O programa experimental tem a finalidade de obter resultados que permitam a discussão sobre a resistividade de diferentes tipos de concreto.

Foi estudada a resistividade elétrica superficial do concreto de três diferentes tipos de concretos. Um terço dos corpos-de-prova moldados possuíam uma relação água/cimento de 0,35. Destes corpos-de-prova, um terço foi curado em ambiente de laboratório, um terço teve cura submersa por 7 dias e o restante foi curado por 14 dias da mesma forma. A outra terça parte foi moldada com um concreto com uma relação água/cimento de 0,50, sendo submetidos às mesmas condições que os corpos-de-prova com relação água/cimento de 0,35. Por ultimo os corpos de prova restantes possuíam uma relação água/cimento de 0,81 e foram curados da mesma forma descrita.

Os corpos-de-prova foram monitorados por meio de medidas de resistividade elétrica superficial e por ensaios de resistência à compressão. A umidade ambiental do laboratório, durante as medições, também foi monitorada.

4.1 MATERIAIS UTILIZADOS NA CONFECÇÃO DO CONCRETO DE REFERÊNCIA

Foram utilizados materiais que são de uso cotidiano na região de Goiânia e encontrados facilmente para a confecção dos concretos do presente estudo.

O Cimento utilizado foi o cimento Portland tipo CP II – F - 40, segundo denominação da NBR 11578 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997).

Os agregados gráudo e miúdos foram caracterizados no Laboratório de Materiais de Construção da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás. Para a confecção dos traços empregou-se areia grossa e fina e brita 1 (um) e 0 (zero).

4.1.1 Areia Grossa

4.1.1.1 Massa unitária da areia grossa

A determinação da massa unitária foi realizada pelo ensaio regulamentado pela norma NBR NM 45 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006). Os valores encontrados estão apresentados na Tabela 4.1

Tabela 4.1 – Massa unitária da areia grossa.

Determinação	δ (kg/dm³)
1 ^a	1,53
2 ^a	1,53
3 ^a	1,53
Média	1,53

4.1.1.2 Massa específica da areia grossa

A determinação da massa específica foi realizada pelo ensaio regulamentado pela norma NBR NM 52 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009). Os valores encontrados estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Massa específica da areia grossa.

Determinação	$\bar{\delta}$ (kg/dm ³)
1 ^a	2,60
2 ^a	2,59
Média	2,59

4.1.1.3 Determinação da Composição granulométrica da areia grossa

A determinação da composição granulométrica foi realizada pelo ensaio regulamentado pela norma NBR NM 248 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003). Os valores encontram-se na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Composição granulométrica da areia grossa.

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA AREIA GROSSA - NBR NM 248								
1ª Determinação				2ª Determinação				% Acumulada Média
Peneira (mm)	Massa Retida (g)	% Retida	% Retida Acumulada	Peneira (mm)	Massa Retida (g)	% Retida	% Retida Acumulada	
9,5	0,0	0,0%	0,0%	9,5	3,3	0,7%	0,7%	0,3%
6,3	10,8	2,2%	2,2%	6,3	5,6	1,1%	1,8%	2,0%
4,75	7,2	1,4%	3,6%	4,8	8,4	1,7%	3,5%	3,5%
2,4	55,7	11,1%	14,7%	2,4	49,8	10,0%	13,4%	14,1%
1,2	83,80	16,8%	31,5%	1,2	85,5	17,1%	30,5%	31,0%
0,6	114,8	23,0%	54,5%	0,6	117,6	23,5%	54,0%	54,3%
0,3	128,9	25,8%	80,2%	0,3	131,3	26,3%	80,3%	80,3%
0,15	66,4	13,3%	93,5%	0,15	64,1	12,8%	93,1%	93,3%
Fundo	32,4	6,5%	100,0%	Fundo	34,4	6,9%	100,0%	100,0%
Total	500,0	100,0	100,0	Total	500,00	100,0	100,0	100,0

Segundo a norma, o valor do diâmetro máximo característico (DMC) deve ser determinado pelo valor imediatamente inferior ou igual a 5,0% da porcentagem de massa retida acumulada e não deve diferir entre as duas amostras ensaiadas. Nestes ensaios, os valores do DMC foram os mesmos e iguais a 4,75 mm. O módulo de finura (MF) deve ser calculado somando-se as porcentagens das massas retidas acumuladas médias, excluindo-se as peneiras da série intermediária e o fundo. Logo o valor do MF neste ensaio foi igual a 2,77.

A Figura 4.1 ilustra a distribuição granulométrica da areia grossa.

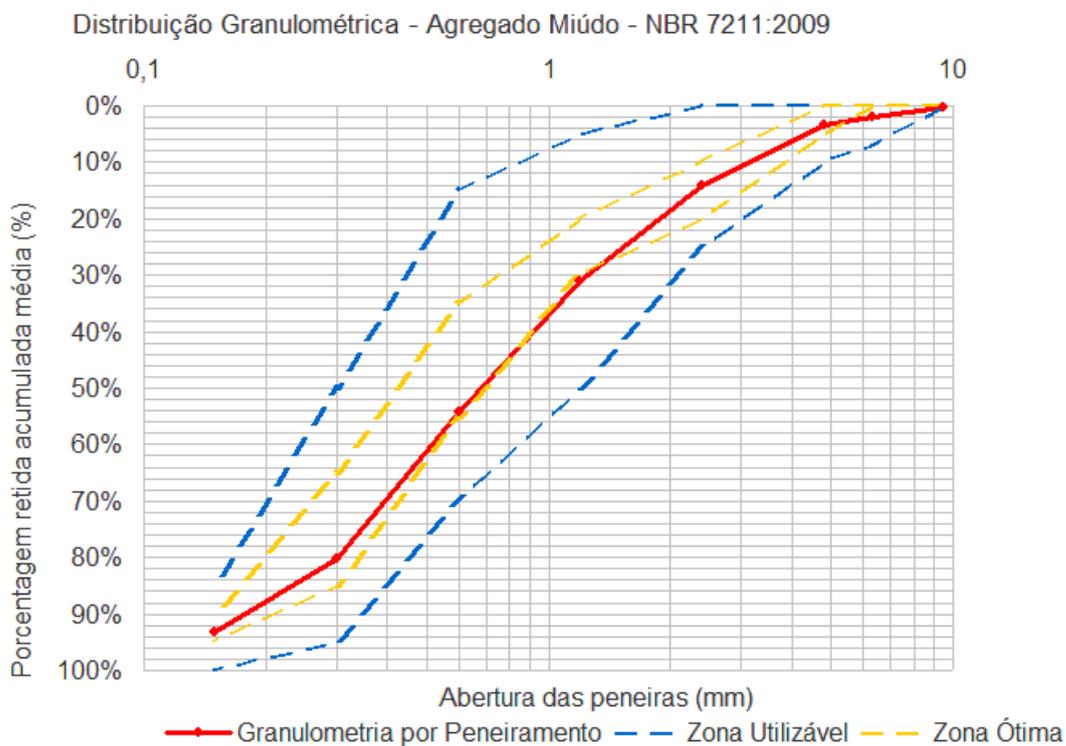


Figura 4.1 Distribuição Granulométrica da areia grossa.

4.1.2 Areia fina

4.1.2.1 Massa unitária da areia fina

A massa unitária foi determinada pelo ensaio de acordo com a norma NBR NM 45 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006). Os valores encontrados estão apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Massa unitária da areia fina.

Determinação	δ (kg/dm ³)
1 ^a	1,36
2 ^a	1,36
3 ^a	1,36
Média	1,36

4.1.2.2 Determinação da massa específica da areia fina

A massa específica foi determinada pelo ensaio de acordo com a norma NBR NM 52 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009). Os valores encontrados estão apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Massa específica da areia fina.

Determinação	$\bar{\delta}$ (kg/dm³)
1 ^a	2,64
2 ^a	2,66
Média	2,65

4.1.2.3 Composição granulométrica da areia fina

A composição granulométrica foi determinada pelo ensaio regulamentado pela norma NBR NM 248 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003), como apresentado na tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Composição granulométrica da areia fina.

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AREIA FINA - NBR NM 248								
1ª Determinação				2ª Determinação				% Acumulada Média
Peneiras (mm)	Retida (g)	% Retida	% Retida Acumulada	Peneiras (mm)	Retida (g)	% Retida	% Retida Acumulada	
9,5	0,00	0,0%	0,0%	9,5	0,00	0,0%	0,0%	0,0%
6,3	1,00	0,2%	0,2%	6,3	0,60	0,1%	0,1%	0,2%
4,8	1,30	0,3%	0,5%	4,8	0,60	0,1%	0,2%	0,4%
2,4	2,70	0,5%	1,0%	2,4	2,40	0,5%	0,7%	0,9%
1,2	13,60	2,7%	3,7%	1,2	13,90	2,8%	3,5%	3,6%
0,6	95,30	19,1%	22,8%	0,6	101,50	20,3%	23,8%	23,3%
0,3	273,60	54,7%	77,5%	0,3	275,10	55,0%	78,8%	78,2%
0,15	100,70	20,1%	97,6%	0,15	95,30	19,1%	97,9%	97,8%
Fundo	11,80	2,4%	100,0%	Fundo	10,60	2,1%	100,0%	100,0%
Total	500,00	100,0	100,0	Total	500,00	100,0	100,0	100,0%

Segundo a norma, o valor do diâmetro máximo característico (DMC) deve ser determinado pelo valor imediatamente inferior ou igual a 5,0% da porcentagem de massa retida acumulada e não deve diferir entre as duas amostras ensaiadas. Nestes ensaios, os valores do DMC foram os mesmos e iguais a 1,2 mm. O módulo de finura (MF) deve ser calculado somando-se as porcentagens das massas retidas acumuladas médias, excluindo-se as peneiras da série intermediária e o fundo. Logo o valor do MF neste ensaio obtido foi igual a 2,04.

A Figura 4.2 mostra a distribuição granulométrica da areia fina.

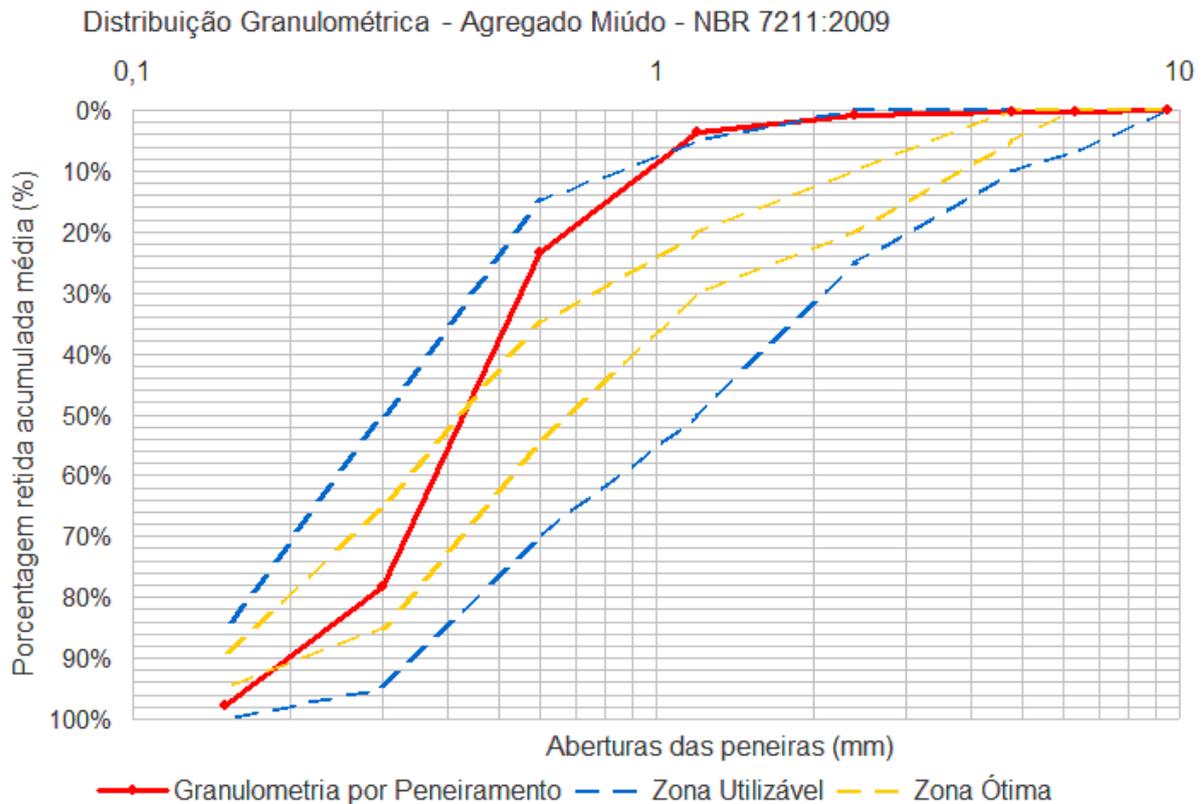


Figura 4.2 mostra a distribuição granulométrica da areia fina.

4.1.3 Brita

4.1.3.1 Redução da amostra de campo para ensaios em laboratório

Para os agregados graúdos da pesquisa foi utilizado o separador mecânico com o objetivo de reduzir as amostras para as massas dos ensaios laboratoriais. O separador mecânico é dotado de calhas que dispersam o material aleatoriamente. O ensaio é regulamentado pela norma NBR NM 27, (ASOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001).

4.1.3.2 Massa unitária da Brita 1

A determinação da massa unitária foi realizada pelo ensaio regulamentado pela norma NBR NM 45 (ASOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006). Os valores encontrados estão apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Massa unitária da brita 1.

Determinação	δ (kg/dm ³)
1 ^a	1,66
2 ^a	1,66
3 ^a	1,67
Média	1,67

4.1.3.3 Massa específica da brita 1

A determinação da massa específica foi realizada pelo ensaio regulamentado pela norma NBR NM 53 (ASOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009). Os valores encontrados estão apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Massa específica da brita 1.

Determinação	δ (kg/dm ³)
1 ^a	2,90
2 ^a	2,87
Média	2,88

4.1.3.4 Composição granulométrica da brita 1

A determinação da composição granulométrica foi realizada pelo ensaio regulamentado pela norma NBR NM 248 (ASOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003). Os valores encontrados estão apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Composição granulométrica da brita 1.

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO GRAÚDO - NBR NM 248							
1ª Determinação				2ª Determinação			% Acumulada Média
Peneiras (mm)	Massa Retida (g)	% Retida	% Retida Acumulada	Massa Retida (g)	% Retida	% Retida Acumulada	
76	---	0,0%	0,0%	---	0,0%	0,0%	0,0%
64	---	0,0%	0,0%	---	0,0%	0,0%	0,0%
50	---	0,0%	0,0%	---	0,0%	0,0%	0,0%
38	---	0,0%	0,0%	---	0,0%	0,0%	0,0%
32	---	0,0%	0,0%	---	0,0%	0,0%	0,0%
25	0,00	0,0%	0,0%	0,00	0,0%	0,0%	0,0%
19	952,40	9,5%	9,5%	1571,20	15,7%	15,7%	12,6%
12,5	6841,60	68,4%	77,9%	6486,40	64,9%	80,6%	79,3%
9,5	1706,60	17,1%	95,0%	1560,20	15,6%	96,2%	95,6%
6.3	377,40	3,8%	98,8%	307,40	3,1%	99,3%	99,0%
4,8	73,00	0,7%	99,5%	45,20	0,5%	99,7%	99,6%
2,4	26,00	0,3%	99,8%	9,20	0,1%	99,8%	99,8%
1,2	23,00	0,2%	100,0%	20,40	0,2%	100,0%	100,0%
0,6	0,00	0,0%	100,0%	0,00	0,0%	100,0%	100,0%
0,3	0,00	0,0%	100,0%	0,00	0,0%	100,0%	100,0%
0,15	0,00	0,0%	100,0%	0,00	0,0%	100,0%	100,0%
Fundo	0,00	0,0%	100,0%	0,00	0,0%	100,0%	100,0%
Total	10000,00	100,0%	100,0%	10000,00	100,0%	100,0%	100,0%

A figura 4.3 mostra a distribuição granulométrica da brita 1.

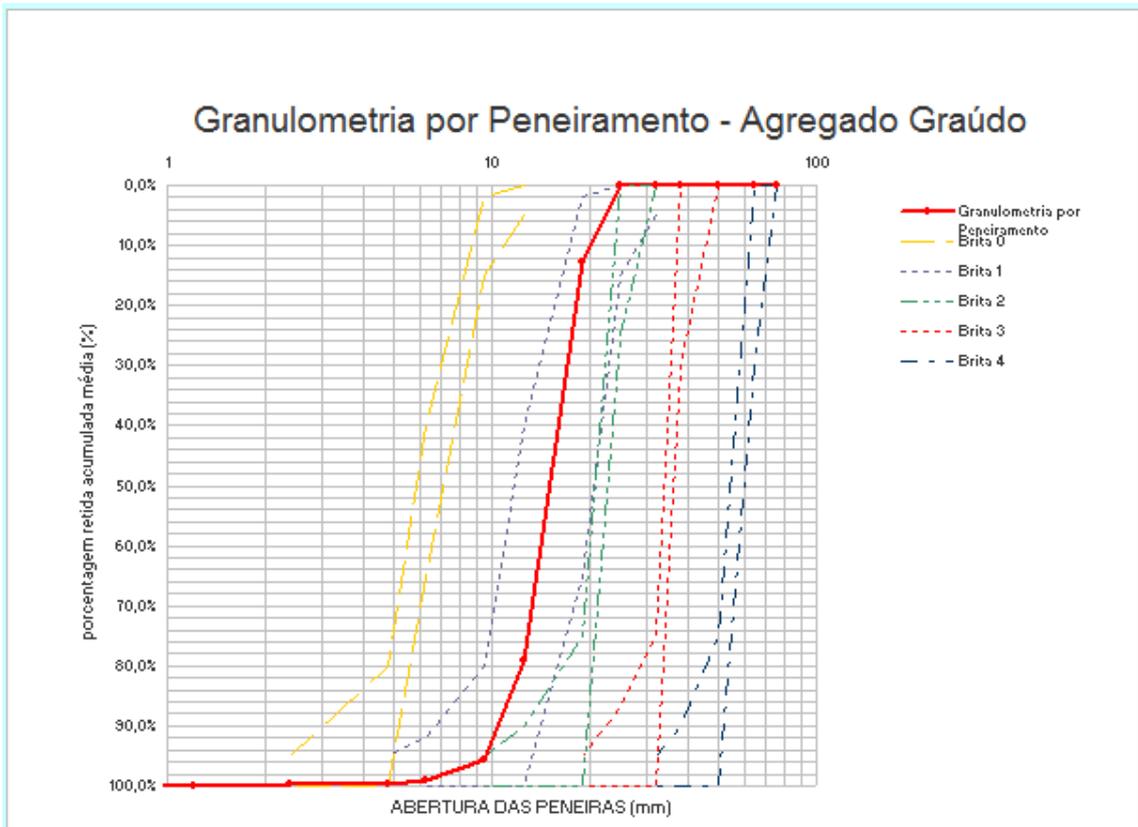


Figura 4.3 - Gráfico da granulometria por peneiramento da brita 1.

Segundo a norma, o valor do diâmetro máximo característico (DMC) deve ser determinado pelo valor imediatamente inferior ou igual a 5,0% da porcentagem de massa retida acumulada e não deve diferir entre as duas amostras ensaiadas. Nestes ensaios, os valores do DMC foram os mesmos e iguais a 25,0 mm. O módulo de finura (MF) deve ser calculado somando-se as porcentagens das massas retidas acumuladas médias, excluindo as peneiras da série intermediária e o fundo. Logo, o valor do MFL neste ensaio obtido foi igual a 7,08.

4.1.4 BRITA 0

4.1.4.1 Massa unitária da brita 0

A determinação da massa unitária foi realizada pelo ensaio regulamentado pela norma NBR NM 45 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006). Os valores encontrados estão apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Massa unitária da brita 0.

Determinação	δ (kg/dm ³)
1 ^a	1,60
2 ^a	1,63
3 ^a	1,61
Média	1,62

4.1.4.2 Massa específica da brita 0

A determinação da massa específica foi realizada pelo ensaio regulamentado pela norma NBR NM 53 (ASOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009). Os valores encontrados estão apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Massa específica da brita 0.

Determinação	δ (kg/dm ³)
1 ^a	2,90
2 ^a	2,84
Média	2,87

1.4.4 Composição granulométrica da brita 0

A determinação da composição granulométrica foi realizada pelo ensaio regulamentado pela norma NBR NM 248 (ASOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003) e os valores obtidos encontram-se na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Composição granulométrica da brita 0

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO GRAÚDO - NBR NM 248							
1ª Determinação				2ª Determinação			% Acumulada Média
Peneiras (mm)	Massa Retida (g)	% Retida	% Retida Acumulada	Massa Retida (g)	% Retida	% Retida Acumulada	
76	---	0,0%	0,0%	---	0,0%	0,0%	0,0%
64	---	0,0%	0,0%	---	0,0%	0,0%	0,0%
50	---	0,0%	0,0%	---	0,0%	0,0%	0,0%
38	---	0,0%	0,0%	---	0,0%	0,0%	0,0%
32	---	0,0%	0,0%	---	0,0%	0,0%	0,0%
25	0,0	0,0%	0,0%	0,0	0,0%	0,0%	0,0%
19	0,0	0,0%	0,0%	0,0	0,0%	0,0%	0,0%
12,5	6,4	0,3%	0,3%	0,0	0,0%	0,0%	0,2%
9,5	293,6	14,7%	15,0%	296,1	14,8%	14,8%	14,9%
6,3	830,3	41,5%	56,5%	857,0	42,9%	57,7%	57,1%
4,8	489,2	24,5%	81,0%	470,1	23,5%	81,2%	81,1%
2,4	330,1	16,5%	97,5%	320,9	16,0%	97,2%	97,3%
1,2	50,4	2,5%	100,0%	55,9	0,2%	100,0%	100,0%
0,6	0,0	0,0%	100,0%	0,0	0,0%	100,0%	100,0%
0,3	0,0	0,0%	100,0%	0,0	0,0%	100,0%	100,0%
0,15	0,0	0,0%	100,0%	0,0	0,0%	100,0%	100,0%
Fundo	0,0	0,0%	100,0%	0,0	0,0%	100,0%	100,0%
Total	2000,0	100,0%	100,0%	2000,0	100,0%	100,0%	100,0%

A figura 4.4 mostra a distribuição granulométrica da brita 0.

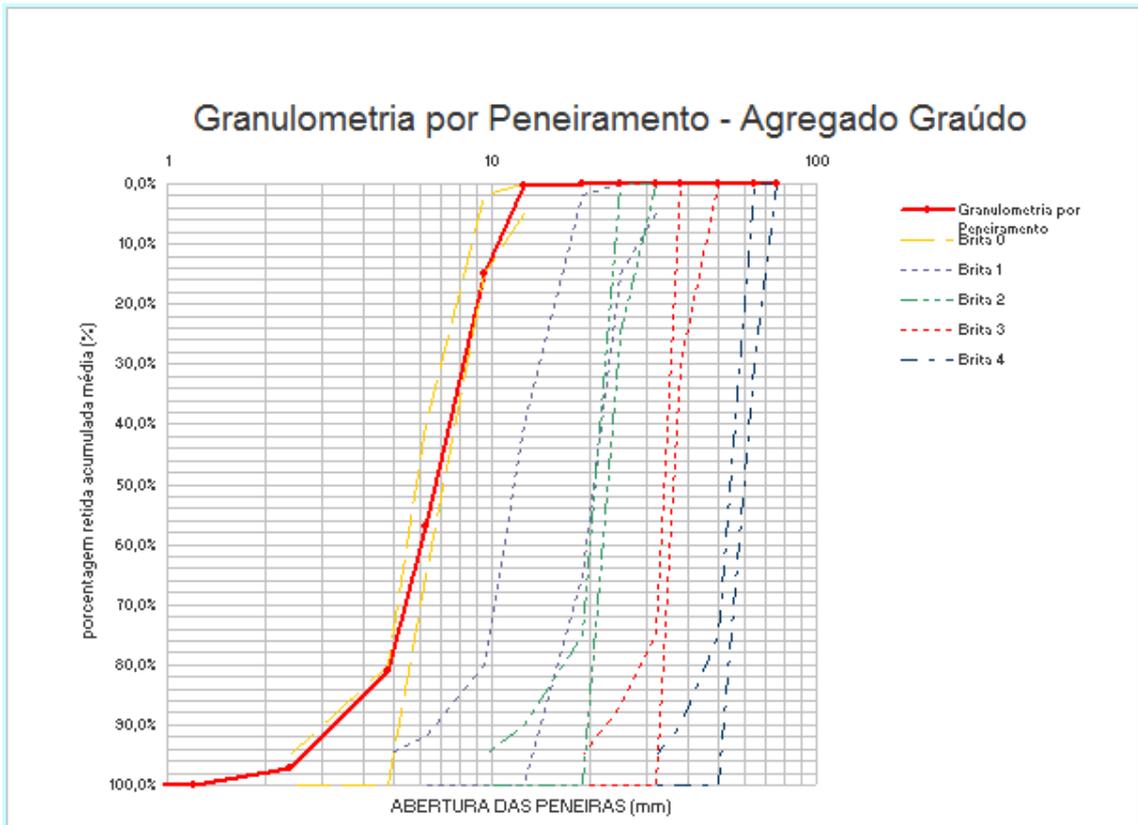


Figura 4.4- Gráfico da granulometria por peneiramento da brita 0.

Segundo a norma, o valor do diâmetro máximo característico (DMC) deve ser determinado pelo valor imediatamente inferior ou igual a 5,0% da porcentagem de massa retida acumulada e não deve diferir entre as duas amostras ensaiadas. Nestes ensaios, os valores do DMC foram os mesmos e iguais a 12,5 mm. O módulo de finura (MF) deve ser calculado somando-se as porcentagens das massas retidas acumuladas médias, excluindo-se as peneiras da série intermediária e o fundo. Logo, o valor do MF neste ensaio obtido foi igual a 5,93.

4.2 CONCRETO

O concreto utilizado para o experimento foi fabricado com os materiais doados por uma reconhecida concreteira da região. Foram usados concretos de 20, 40 e C-0,35, adotando os traços apresentados na Tabela 4.13

Tabela 4.13 Traços de dos 3 diferentes concreto

Nomenclatura		C-0,81	C-0,50	C-0,35
Resistência à compressão		20 MPa	40 MPa	60 MPa
Traço (cim:areia:brita:água)		1:3,52:4,18:0,81	1:1,77:2,54:0,50	1:1,32:2,10:0,37
Consumo dos materiais	Cimento (kg/m ³)	240	395	480
	Areia Fina (kg/m ³)	380	320	190
	Areia Grossa (kg/m ³)	465	380	445
	Brita 0(kg/m ³)	105	200	255
	Brita 1(kg/m ³)	900	805	755
	Água (kg/m ³)	195	198	178
	Sílica Ativa (kg/m ³)	-	-	30
	Aditivo (kg/m ³)	1,74	2,68	3,48
	Superplastificante (L/m ³)	-	-	0,125
Consumo das misturas	Relação água/aglomerante	0,81	0,50	0,35
	Relação água /cimento	0,81	0,50	0,37
	Argamassa seca (%)	45,71	41,09	38,64
	Água/materiais secos (%)	9,33	9,43	8,26

Foram moldados 189 corpos-de-prova, sendo 27 de forma prismática e 144 de forma cilíndrica, moldados e adensados em mesa vibratória, de acordo com a norma da NBR 5738 (ASOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS, 1984).

Após a desmoldagem, realizada 24 h depois da concretagem, de acordo com a norma ABNT NBR 5738 (ASOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS, 2003), foram submetidos à cura submersa, e o restante ficou no ambiente de laboratório sob uma umidade de 30±10%.

Os corpos-de-prova de forma prismática de dimensões de 200x200x60 mm moldados com o auxílio de formas de madeira distribuídos da seguinte forma: 9 corpos-de-prova no ambiente de laboratório, 9 corpos-de-prova submetidos à cura submersa por 7 dias e 9 corpos-de-prova submetidos à cura submersa por 14 dias variando a resistência à compressão entre 20, 40 e C-0,35, respectivamente. A Figura 4.5 mostra as formas que foram usadas para os ensaios e a concretagem dos corpos de prova prismáticos.

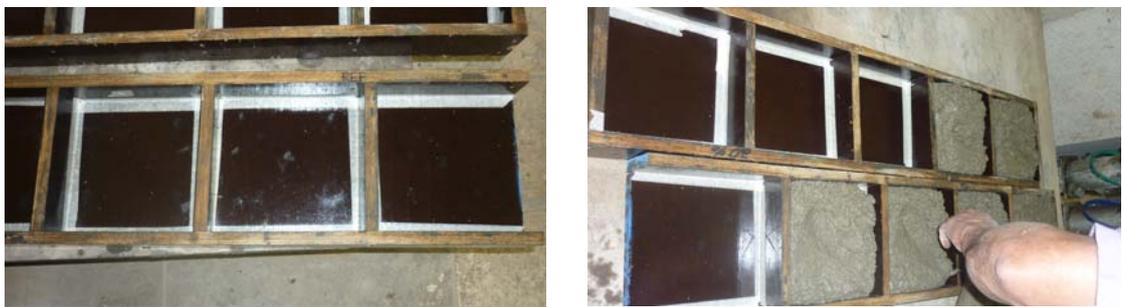


Figura 4.5. Moldagem dos corpos de prova prismáticos

Os corpos-de-prova cilíndricos com dimensões de 100 x 150 mm, foram distribuídos da seguinte forma: 48 corpos-de-prova no ambiente de laboratório, 48 corpos de prova submetidos à cura submersa por 7 dias e 48 corpos-de-prova submetidos à cura submersa por 14 dias, variando a resistência à compressão entre 20, 40 e C-0,35, respectivamente, como é mostrado a Tabela 4.14.

Tabela 4.14 Corpos de prova cilíndricos para cada tipo de cura e resistência à compressão

Resistência à compressão	Idade (dias)	Sem cura	Cura a 7 dias	Cura à 14 dias
C-0,81	1	3	-	-
	3	3	3	-
	7	3	3	-
	14	3	3	3
	28	3	3	3
	56	3	3	3
	91	2	2	2
C-0,50	1	3	-	-
	3	3	3	-
	7	3	3	-
	14	3	3	3
	28	3	3	3
	56	3	3	3
	91	2	2	2
C-0,35	1	3	-	-
	3	3	3	-
	7	3	3	-
	14	3	3	3
	28	3	3	3
	56	3	3	3
	91	2	2	2

A Figura 4.6 mostra-se o processo de moldagem dos corpos cilíndricos



Figura 4.6. Moldagem dos corpos de prova cilíndricos.

4.3 PROCEDIMENTO DE MEDIDA DA RESISTIVIDADE SUPERFICIAL DO CONCRETO

Logo após a moldagem dos corpos-de-prova foi feito um acompanhamento dos 27 corpos de prova prismáticos por meio das medidas de resistividade elétrica, sendo monitorados conforme esquematizado na Figura 4.7. A Figura 4.8 ilustra como foram feitas as medições de resistividade elétrica.

0- 36 horas a cada hora	36 horas- 7º dias a cada 6 horas.	8º-14º dias a cada 12 horas	15º-28º dias a cada 24 horas	15º-91º dias a cada 48 horas.
-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------	------------------------------	-------------------------------

Figura 4.7 Esquema da avaliação de resistividade elétrica superficial.

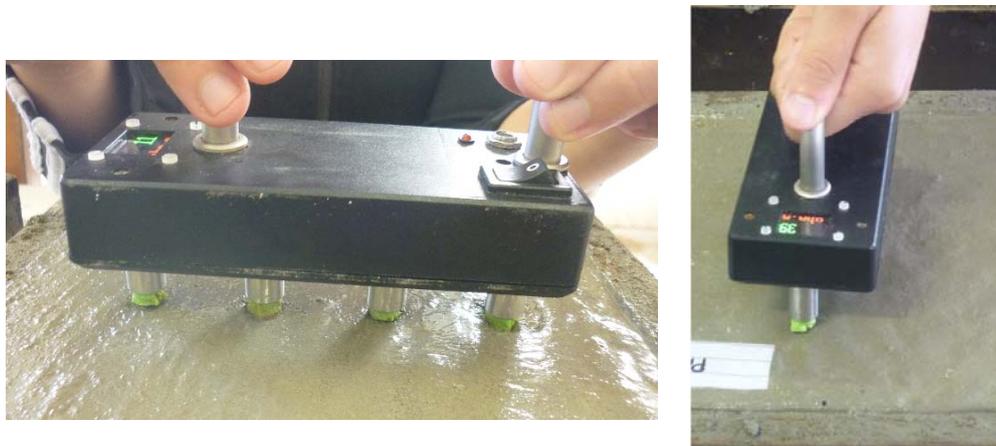


Figura 4.8 Medições de Resistividade Elétrica

4.4 EQUIPAMENTO

Pode-se realizar colocando os eletrodos nas caras paralelas dos corpos de prova prismáticos usando o “método dos 4 eletrodos” similar ao método de Wenner originalmente empregado na determinação da resistividade elétrica dos solos e descrito na norma ASTM G57 - *Standard Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method*. Para a medida rápida da Resistividade do concreto e *in situ* tem-se desenvolvido um resistivímetro portátil como indicam a figura 4.9.



Figura 4.9. Equipamento utilizado nas medidas de resistividade elétrica do concreto.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO AXIAL

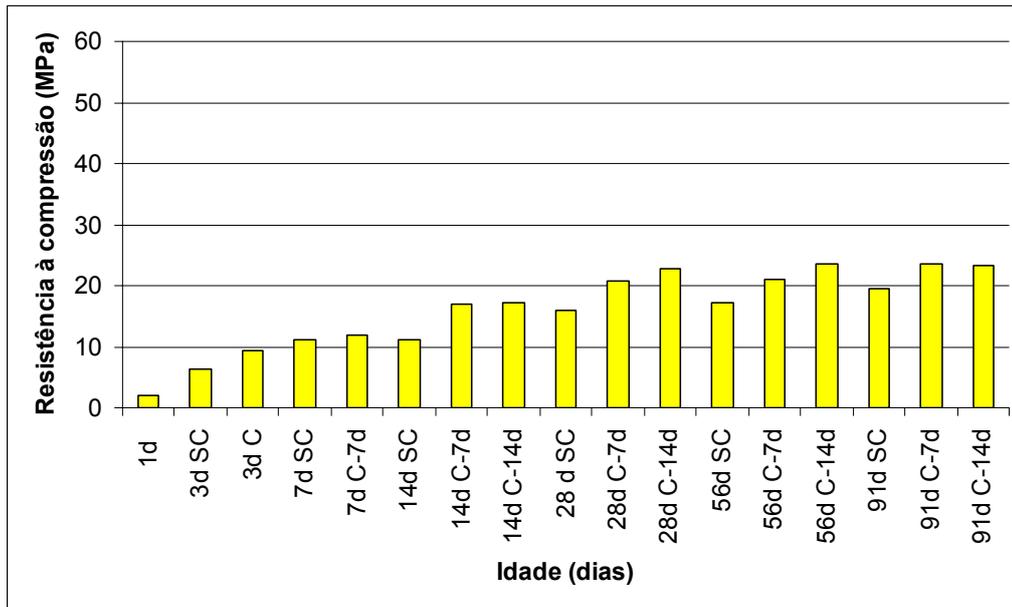
A resistência à compressão axial é considerada a propriedade mais importante do concreto, uma vez que esta propriedade associa-se as outras propriedades do concreto. Portanto, é de fundamental importância estudar e definir a dosagem correta para atender a resistência especificada adotada em cada projeto.

A tabela 5.1 apresenta os dados obtidos nos ensaios de resistência à compressão aos 1,3, 7,14, 28, 56 e 91 dias, respectivamente, para os três diferentes concretos que foram usados nesta pesquisa.

Tabela 5.1 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos.

Resistência \ Idade		1 dia	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias	56 dias	91 dias
C-0,81	Sem cura	2,04	6,37	11,08	11,12	16	17,27	19,54
	Cura 7 dias	-	9,38	11,88	16,98	20,67	21,14	23,49
	Cura 14 dias	-	-	-	17,23	22,88	23,55	23,24
C-0,50	Sem cura	-	21,60	28,1	29,62	30,77	30,43	34,5
	Cura 7 dias	2,55	21,60	28,1	35,99	36,5	36,54	39,92
	Cura 14 dias	-	-	-	38,54	40,45	40,74	40,49
C-0,35	Sem cura	14,94	25,21	26,02	35,59	44,61	45,12	53,22
	Cura 7 dias	-	28,39	30,98	46,64	46,52	54,69	59,91
	Cura 14 dias	-	-	-	44,52	42,31	56,4	59,59

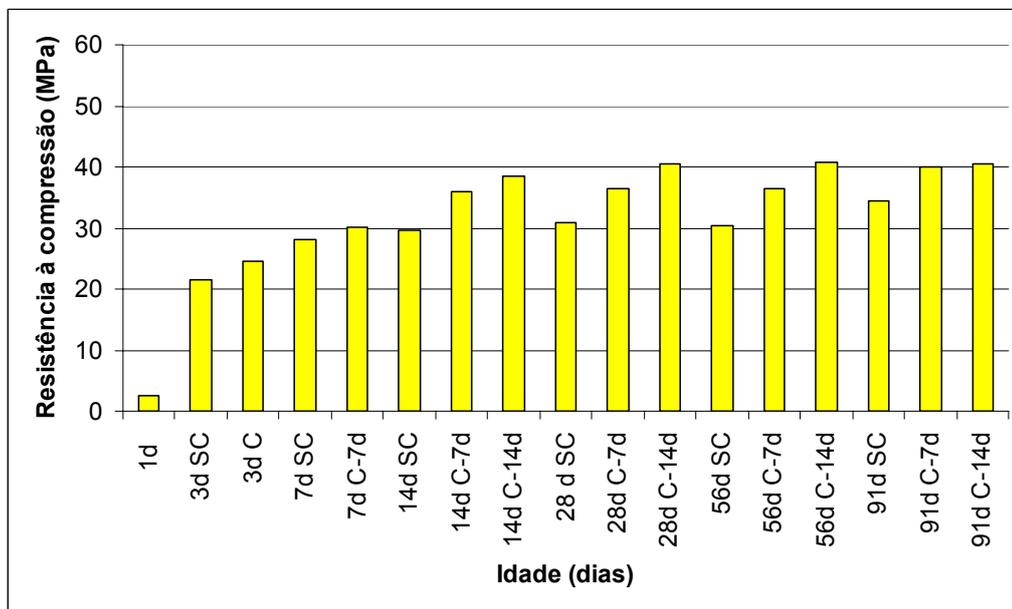
O gráfico da Figura 5.1 mostra os resultados médios obtidos para concreto C-0,81 sendo estudado às idades de 1,3, 7, 14, 28, 56 e 91 dias.



SC= sem cura, C= cura submersa, C-7d= Cura submersa 7 dias, C-14d= Cura submersa 14 dias

Figura 5.1 - Resistências à compressão dos concretos C-0,81 (relação água/aglomerante=0,81)

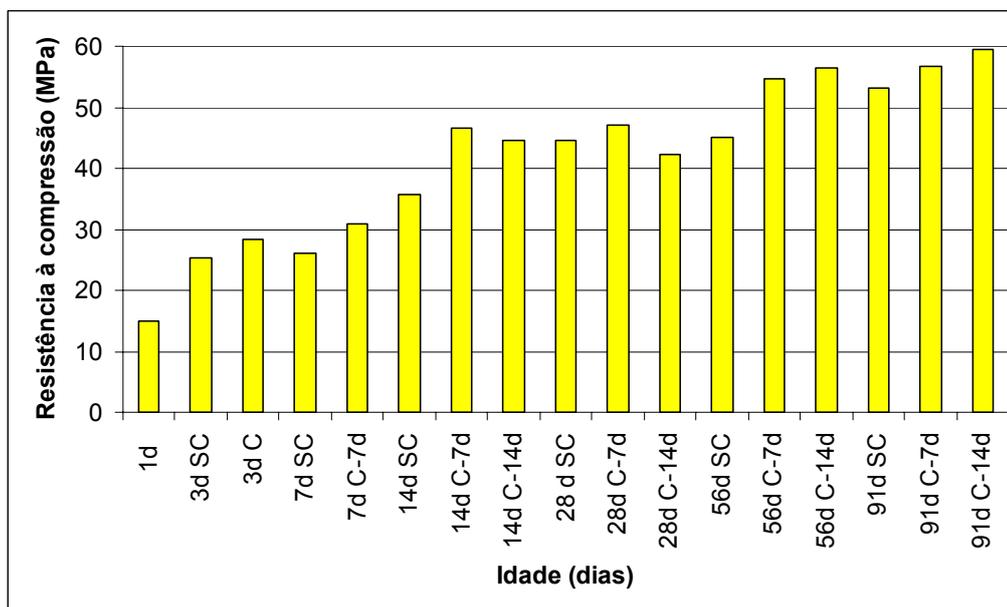
A Figura 5.2 mostra os resultados médios de resistências à compressão obtidos para concreto C-0,50, nas idades de 1,3, 7, 14, 28, 56 e 91 dias.



SC= sem cura, C= cura submersa, C-7d= Cura submersa 7 dias, C-14d= Cura submersa 14 dias

Figura 5.2 - Resistências à compressão dos concretos C-0,50 (relação água/aglomerante=0,50)

As resistências à compressão do concreto C-0,35, são mostradas na Figura 5.3, idades de 1,3, 7, 14, 28, 56 e 91 dias.

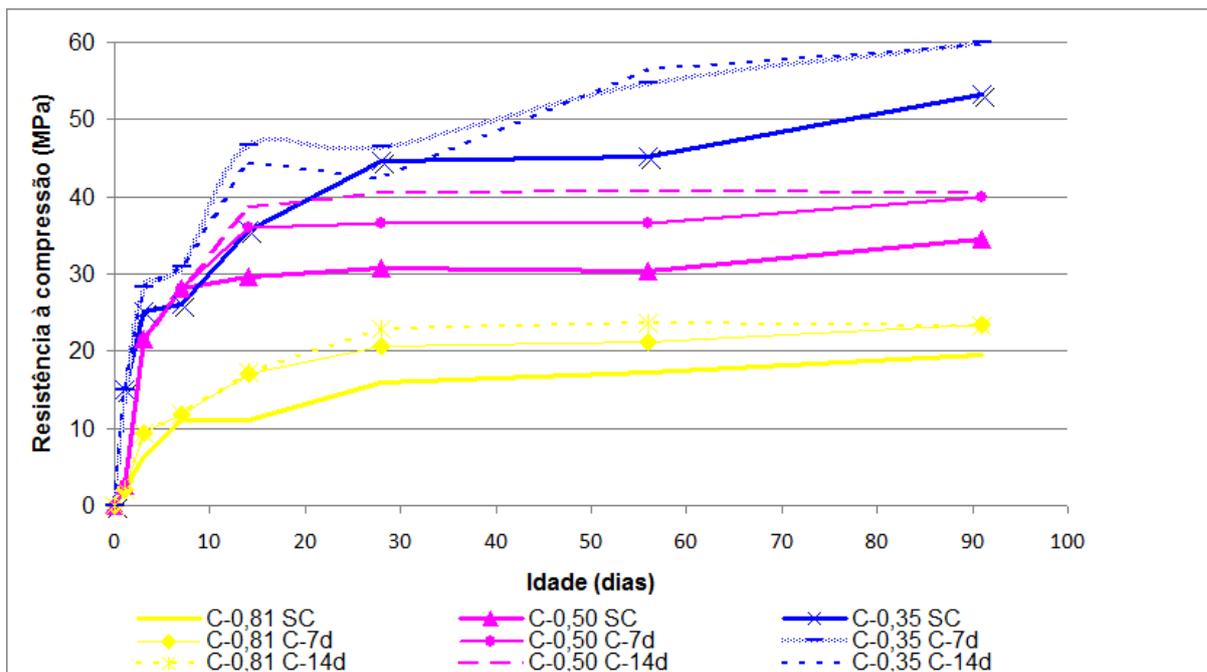


SC= sem cura, C= cura submersa, C-7d= Cura submersa 7 dias, C-14d= Cura submersa 14 dias

Figura 5.3 - Resistências à compressão do concreto C-0,35 (relação água/aglomerante=0,34)

O maior ganho da resistência à compressão observada nos ensaios é produzida nos primeiros 14 dias quando é submetido à cura. Também é observada a importância da cura para promover a hidratação do cimento, os corpos-de-prova que não foram submetidos à cura, ficaram mais distantes das resistências projetadas.

A Figura 5.4 mostra uma comparação entre os crescimentos das resistência à compressão dos corpos-de-prova projetados para terem C-0,81, C-0,50 e C-0,35.



SC= sem cura, C= cura submersa, C-7d= Cura submersa 7 dias, C-14d= Cura submersa 14 dias

Figura 5.4 - Comparação entre os crescimentos das resistências à compressão dos concretos C-0,81, 40MPa e C-0,35.

5.2 RESISTIVIDADE ELÉTRICA NAS PRIMEIRAS 24 HORAS

A resistividade elétrica foi determinada pelo método dos quatro eletrodos o método de Wenner que é o método mais comumente usado para medir a resistividade elétrica de uma maneira pratica e não destrutiva. Este método originalmente foi desenvolvido para medir a resistividade elétrica do solo. Posteriormente, agora tem sido utilizado para medir a resistividade elétrica superficial do concreto.

Nesta etapa do projeto experimental foram usados concretos de 20, 40 e C-0,35. A resistividade elétrica foi medida no concreto no estado fresco e no estado endurecido.

Nas Figuras 5.5, 5.6 e 5.7 são apresentados os resultados da resistividade elétrica do concreto no estado fresco, desde a primeira hora até 24 horas após a concretagem. Os ensaios foram feitos de hora em hora e estão apresentados nas referidas figuras, por tipo de concreto.

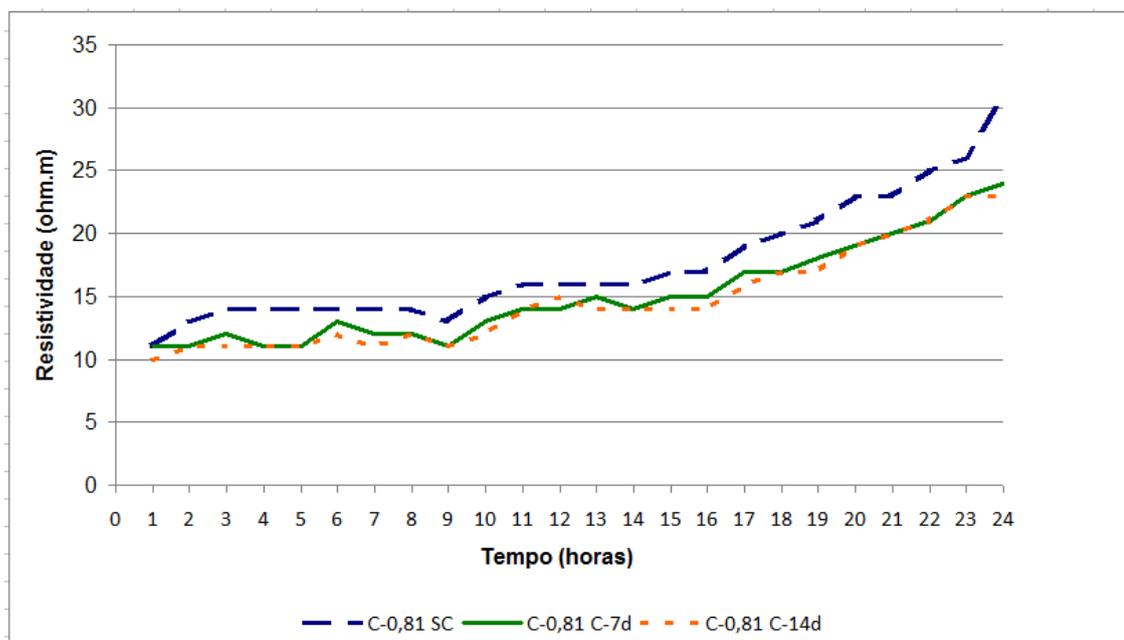


Figura 5.5 - Evolução da resistividade elétrica do concreto C-0,81 nas primeiras 24 horas.

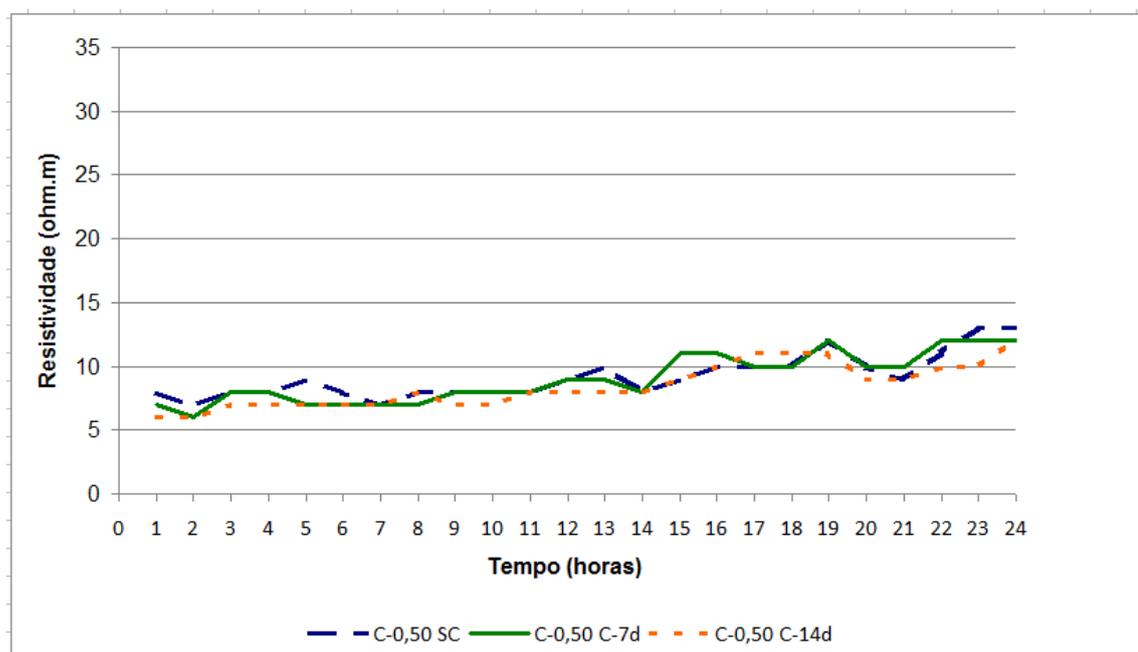


Figura 5.6 - Evolução da resistividade elétrica do concreto C-0,50 nas primeiras 24 horas.

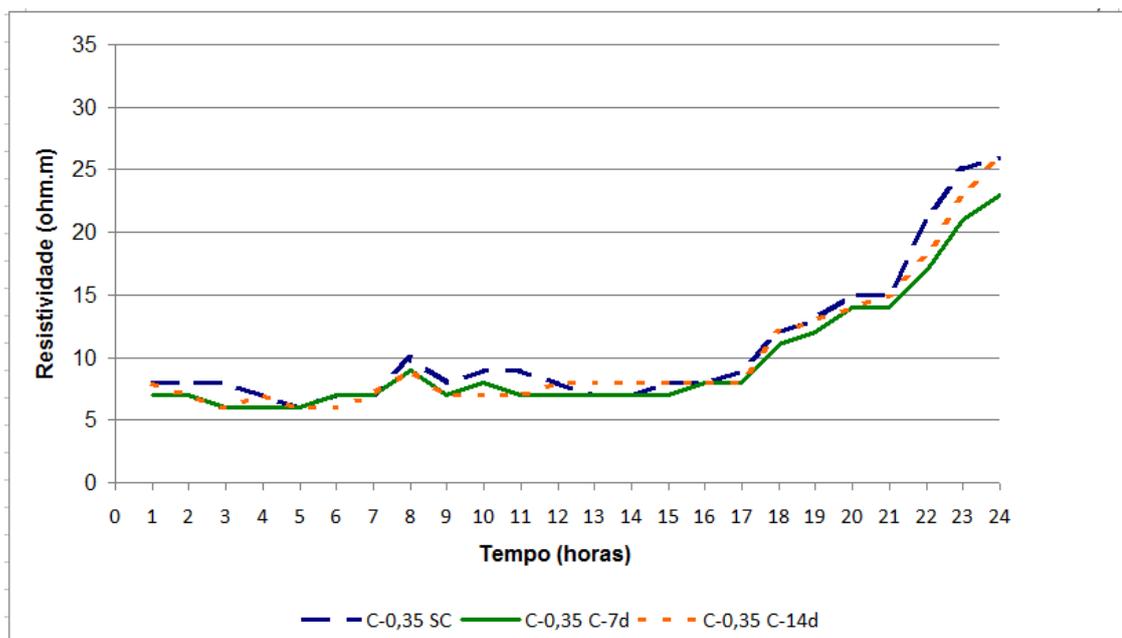


Figura 5.7 - Evolução da resistividade elétrica do concreto C-0,35 nas primeiras 24 horas

Observa-se que os comportamentos dos primeiros resultados de resistividade elétrica do concreto após uma hora depois da concretagem até as 24 horas seguintes, apontam que o concreto C-0,81 é o que tem uma maior resistividade. Isto não significa que este concreto possui melhor qualidade e sim que o mesmo perdeu água mais rapidamente em relação aos concretos C-0,50 e C-0,35, devido ao tamanho e conectividade dos poros. Os concretos de 40 e C-0,35, praticamente, começaram com os mesmos valores de resistividade, mas com o passar das horas pode ser observado um ganho rápido de resistividade do concreto C-0,35, comparado com o C-0,50.

A Figura 5.8 apresenta o perfil da evolução da resistividade elétrica dos três tipos de concreto nas primeiras 24 horas, medindo-se cada hora. Pode-se observar que o concreto C-0,81 apresenta o maior valor de resistividade elétrica após uma hora da concretagem. Alguns autores garantem que a porosidade total, a distribuição do tamanho e conectividade dos poros e a condutividade da solução aquosa presente no seu interior (características microestruturais da matriz do cimento), estão relacionadas à resistividade elétrica (SKEKARCHI et al., 2004; WHITING&NAGI, 2003; ANDRADE, 1998; HUNKELER, 1996). No concreto C-0,81 o tamanho dos poros é maior que nos outros concretos, de tal forma que existe uma rápida evaporação de água no mesmo, o que torna a condutividade elétrica menor e

consequentemente faz com que a resistividade elétrica aumente. Nos concretos C-0,50 e C-0,35, pode-se observar um comportamento similar da resistividade elétrica até as 17 horas após a concretagem. Após esse período de 17 horas ocorre o fenômeno da saída de água do concreto, e com a perda de água nos poros há um aumento significativo da resistividade elétrica.

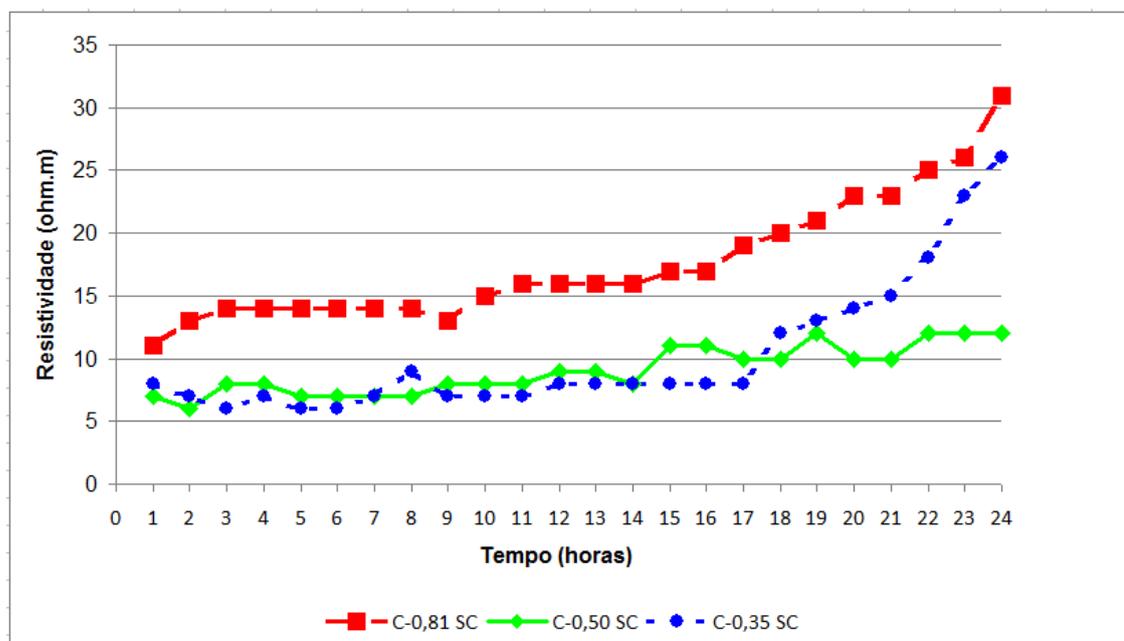


Figura 5.8 - Perfil da evolução da resistividade elétrica dos três tipos de concreto as primeiras 24 horas.

5.3 RESISTIVIDADE ELÉTRICA DA 24ª HORA ATÉ 168 HORAS (7 DIAS)

Nas Figuras 5.9, 5.10 e 5.11 são apresentados os resultados da resistividade elétrica da 24ª hora (1 dia) até as 168 horas (7 dias) de forma separada, por cada tipo de concreto e medindo-se nas primeiras 24 horas, de hora em hora, e após esse período a cada 6 horas.

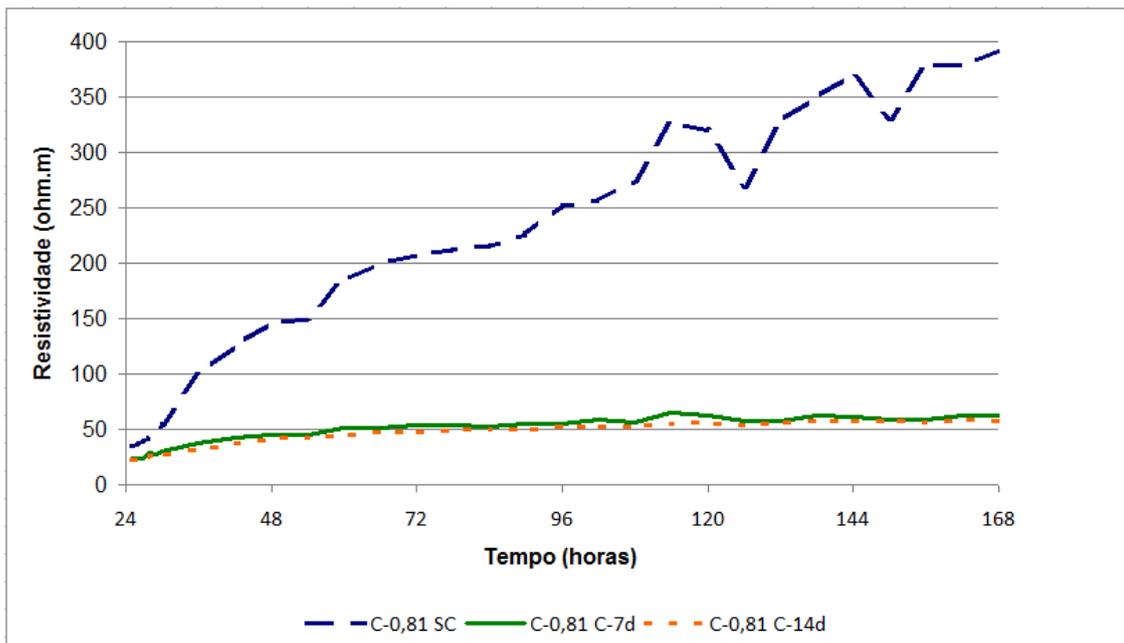


Figura 5.9 - Evolução da resistividade elétrica do concreto C-0,81 de 1 a 7 dias.

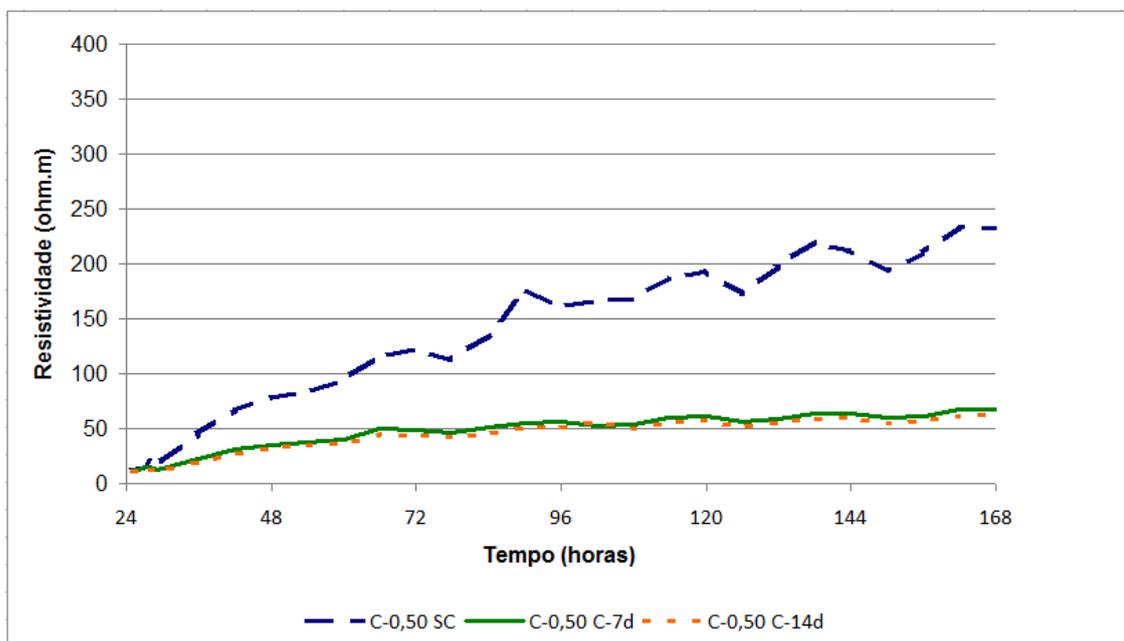


Figura 5.10 - Evolução da resistividade elétrica do concreto C-0,50 de 1 a 7 dias.

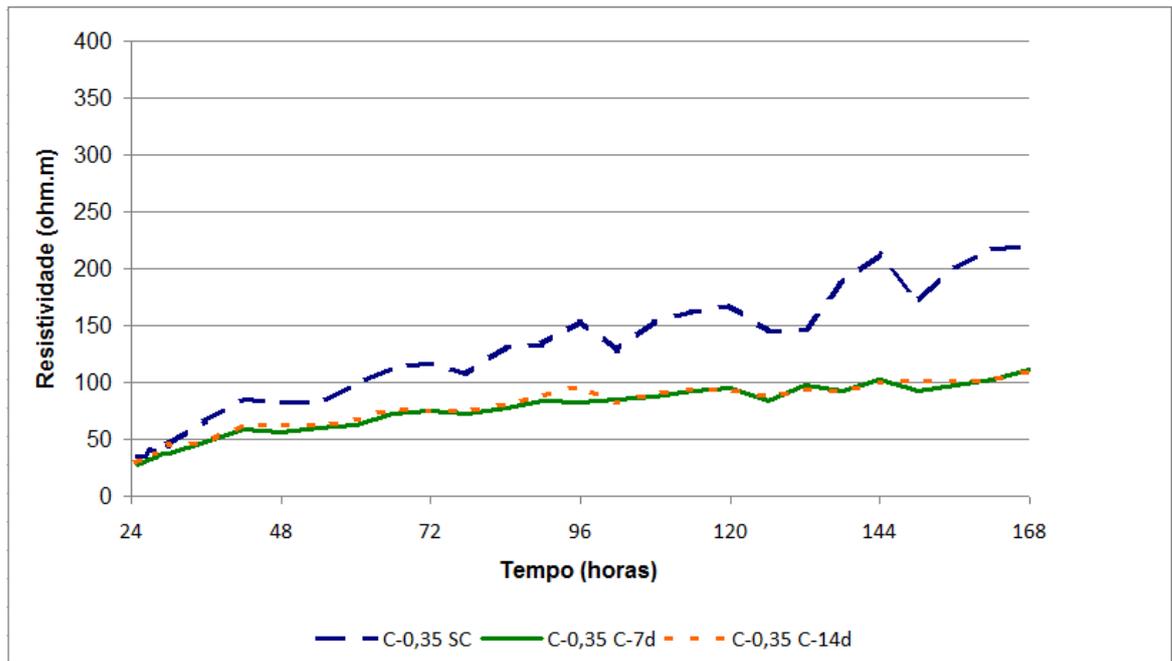


Figura 5.11 - Perfil da evolução da resistividade elétrica do concreto C-0,35 de 1 a 7 dias.

Para uma melhor visualização e comparação, na Figura 5.12, observa-se um comparativo da resistividade elétrica das três misturas que não foram submetidas à cura e na Figura 5.13, mostra-se o comparativo da resistividade elétrica das três misturas que foram submetidas à cura de 7 dias entre as idades de 1 a 7 dias.

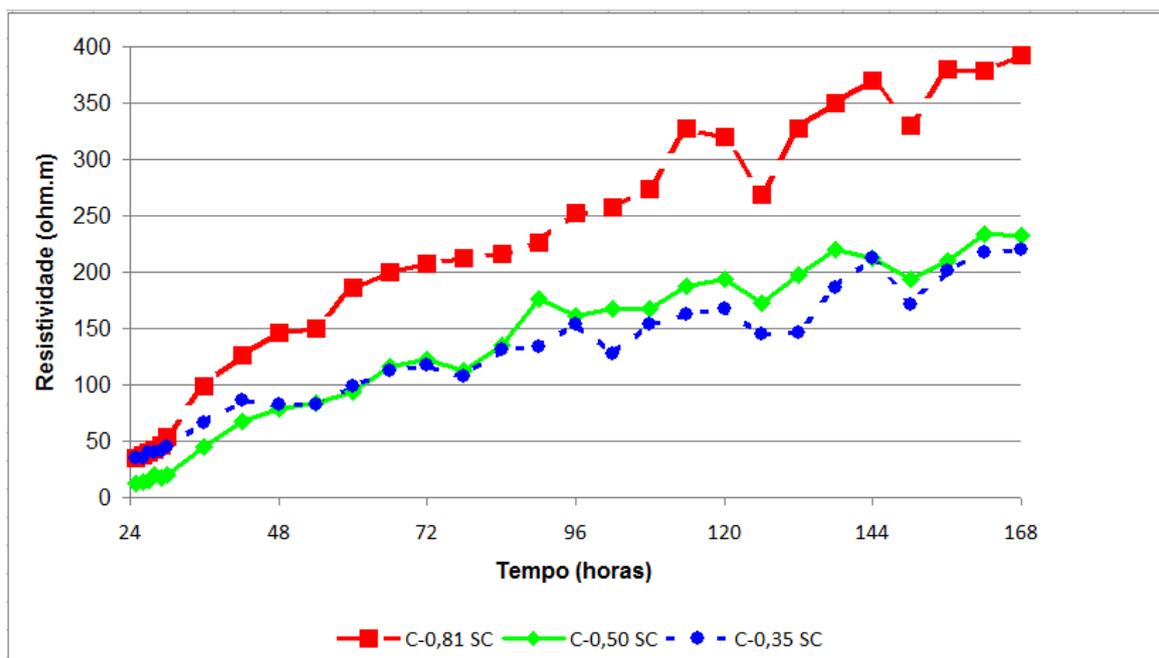


Figura 5.12 - Comparativo da resistividade elétrica das três misturas que não foram submetidas à cura (1-7 dias).

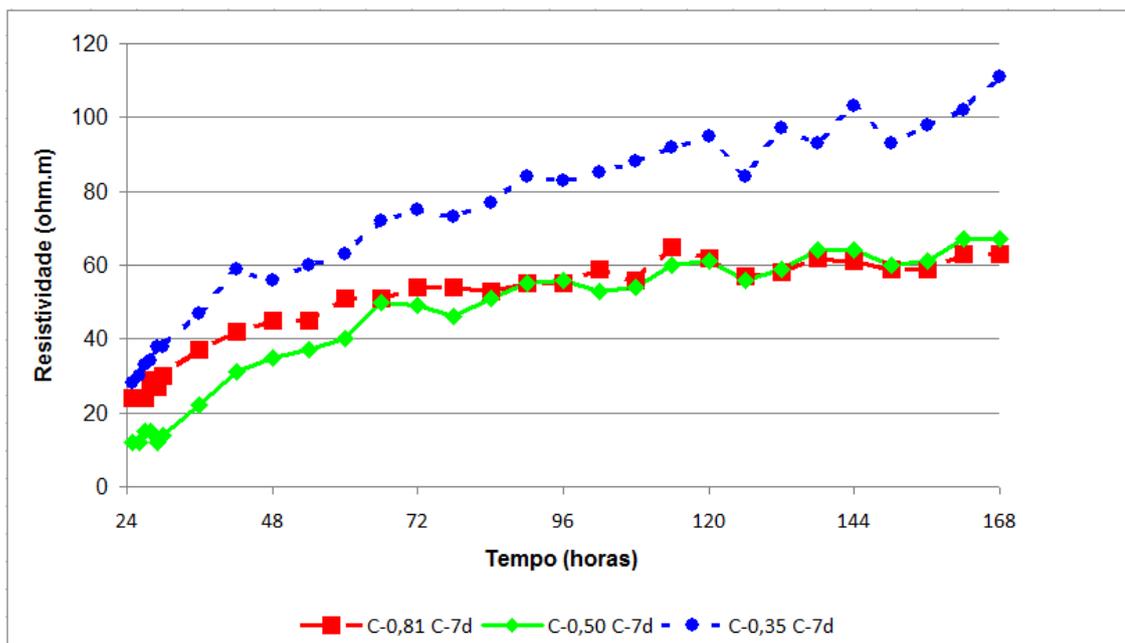


Figura 5.13 - Comparativo da resistividade elétrica das três misturas que foram submetidas à cura de 7 dias (1-7 dias).

Observa-se que como já foram mudadas as condições de cura do concreto, nota-se uma significativa diferença entre os corpos-de-prova que não estão sendo curados e os que estão sendo.

A cura está relacionada diretamente com a água presente na mistura, que atende tanto a trabalhabilidade, como a reação de hidratação do cimento, ou seja, que parte da água permite um adequado adensamento no momento inicial e posteriormente saíra do concreto por evaporação. Justamente por isso, devemos controlar essa saída de água por meio da cura para que não aconteça com muita velocidade, porque quando a cura é controlada, o tamanho e refinamento dos poros são os que controlam a resistividade e não a evaporação da água.

No caso dos concretos que estão no ambiente de laboratório, a saída da água com maior velocidade pelos poros, influenciou em maior grau a resistividade elétrica do que o tamanho e o refinamento dos poros. Na Figura 5.14, visualiza-se que os concretos que estão no ambiente de laboratório são os que têm maiores valores de resistividade elétrica devido à perda de água. Nos concretos nos quais a cura é realizada, observam-se que os valores de resistividade tem um comportamento relacionado com a resistência à compressão axial, ou seja, quanto maior a resistência à compressão, maior é a resistividade.

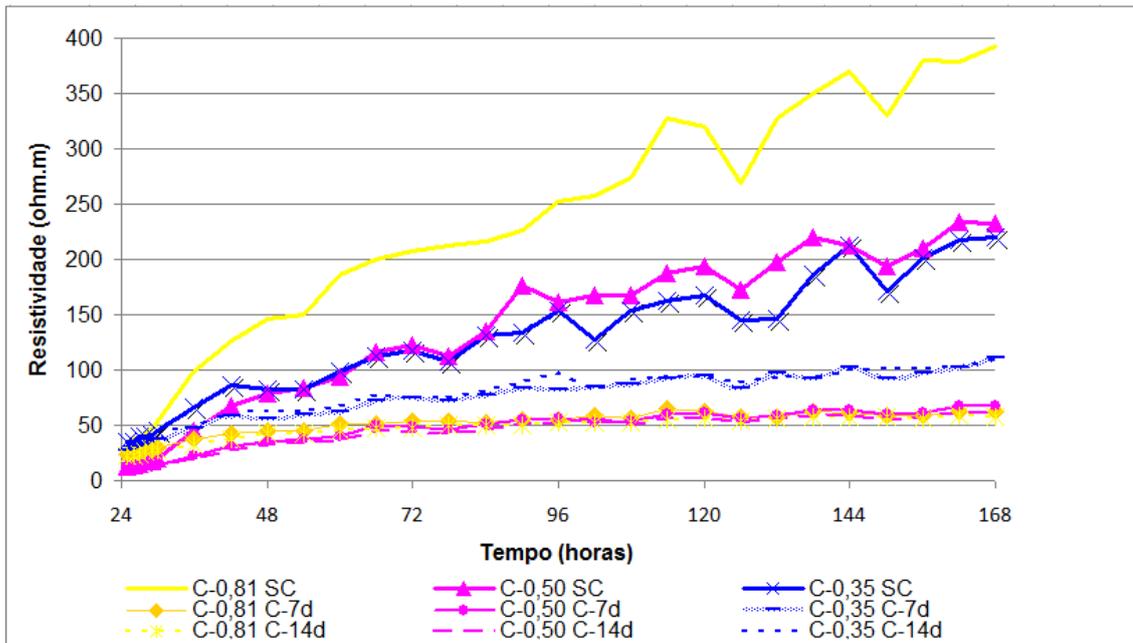


Figura 5.14 - Evolução da resistividade elétrica do concreto das três misturas de 1-7 dias.

5.4 RESISTIVIDADE ELÉTRICA AOS 7 DIAS (168 HORAS) ATÉ 14 DIAS (336 HORAS)

Nas Figuras 5.15, 5.16 e 5.17 são apresentados os resultados da resistividade elétrica das 168 horas (7 dias) às 336 horas (14 dias), separado por cada tipo de concreto, medindo-se a cada 12 horas.

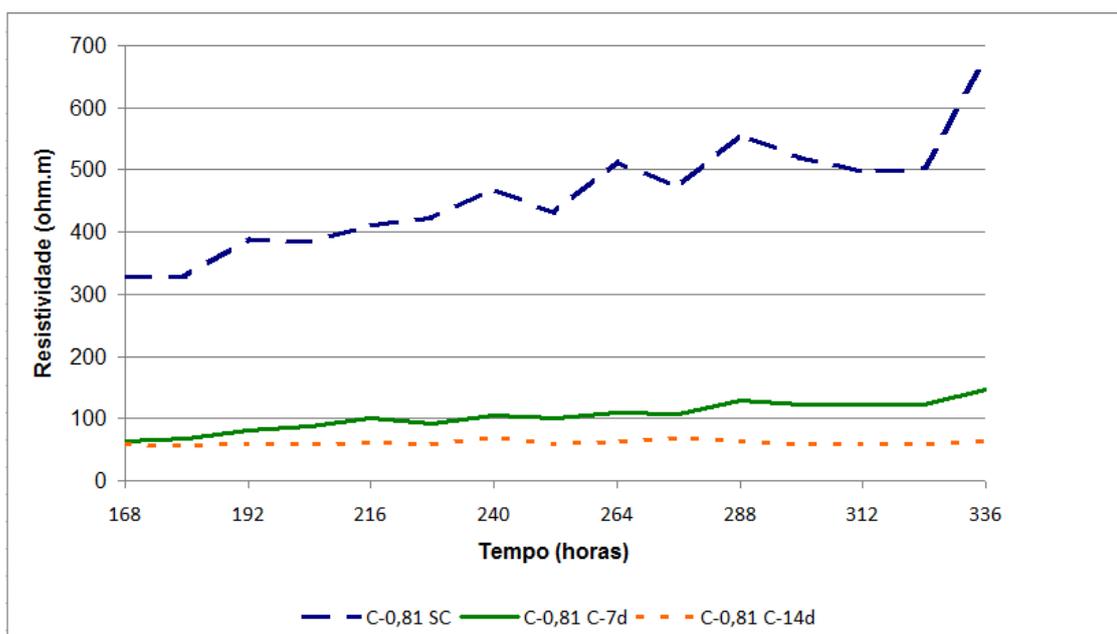


Figura 5.15 - Evolução da resistividade elétrica do concreto C-0,81 de 7 a 14 dias.

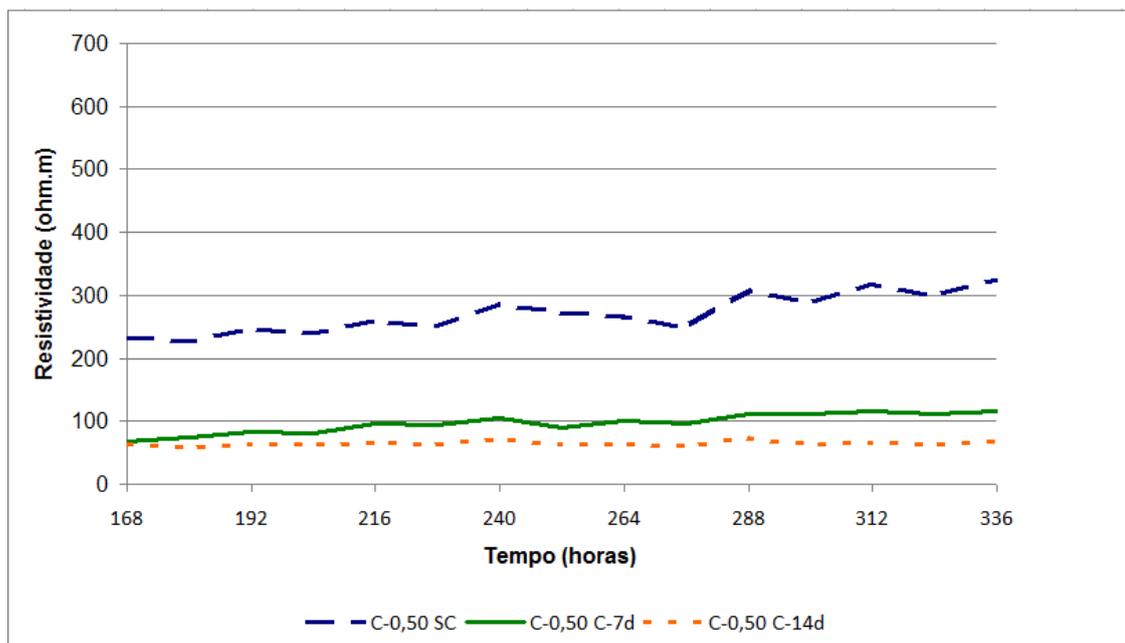


Figura 5.16 - Evolução da resistividade elétrica do concreto C-0,50 de 7 a 14 dias.

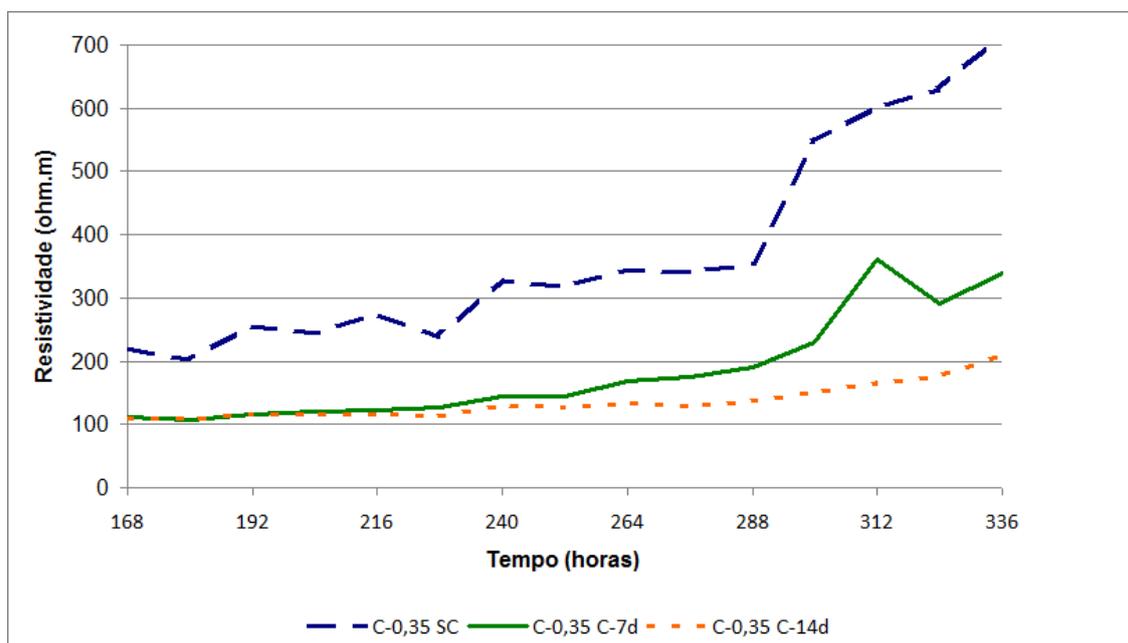


Figura 5.17 - Evolução da resistividade elétrica do concreto C-0,35 de 7 a 14 dias

Nesta etapa da pesquisa têm-se três condições diferentes para os concretos, sem cura (SC), cura de 7 dias (C-7d) e cura de 14 dias (C-14d), Nesta idade observa-se de maneira clara as diferenças de comportamento. As Figuras 5.15 a 5.17 mostram

a influencia da umidade interna do concreto sobre a resistividade. Quanto maior a umidade menor a resistividade elétrica superficial.

Para uma melhor visualização e comparação, na Figura 5.18, observa-se um comparativo da resistividade elétrica das três misturas que não foram submetidas à cura, na Figura 5.19, mostra-se o comparativo da resistividade elétrica das três misturas que foram submetidas à cura de 7 dias e na Figura 5.20, mostra-se o comparativo da resistividade elétrica das três misturas que foram submetidas à cura de 14 dias entre as idades de 7 a 14 dias.

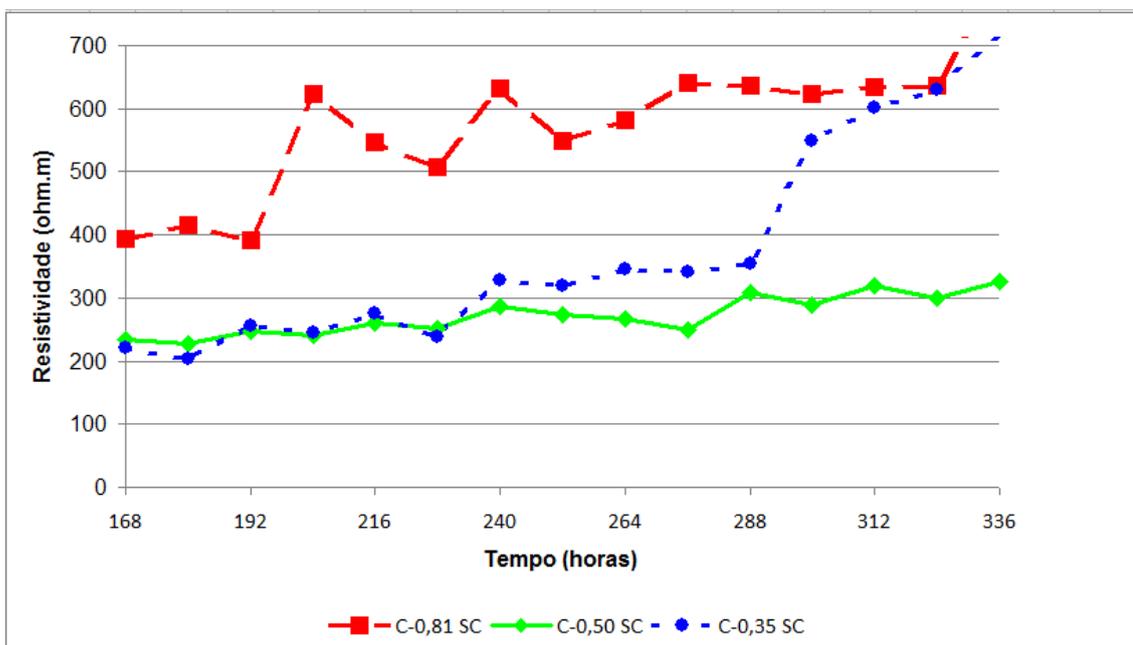


Figura 5.18 - Comparativo da resistividade elétrica das três misturas que não foram submetidas à cura (7-14 dias).

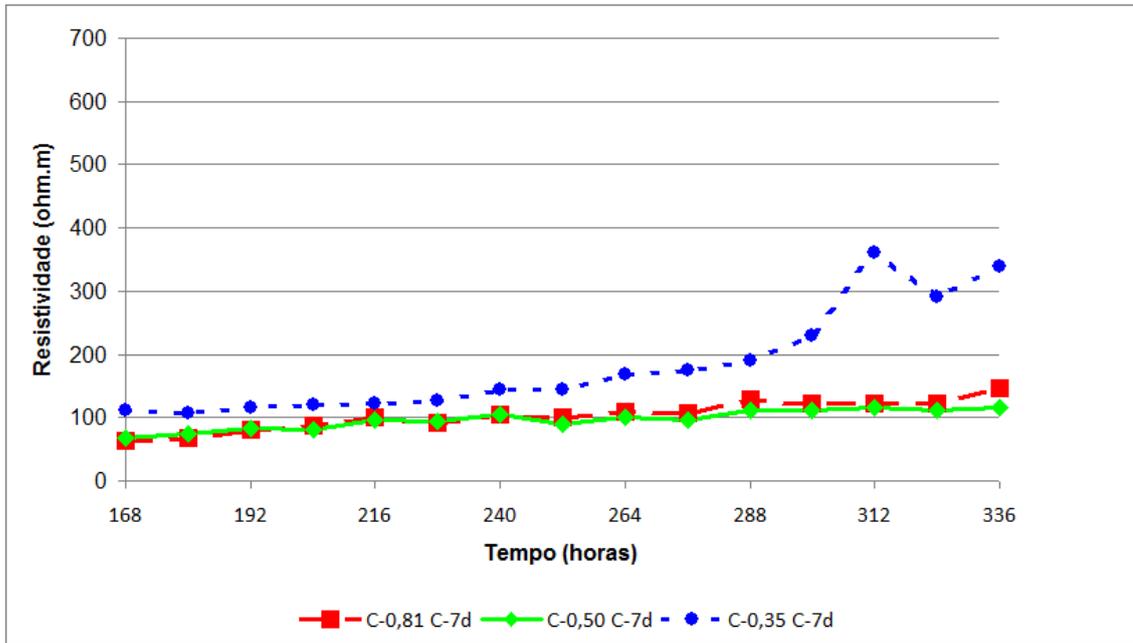


Figura 5.19 - Comparativo da resistividade elétrica das três misturas que foram submetidas à cura de 7 dias.

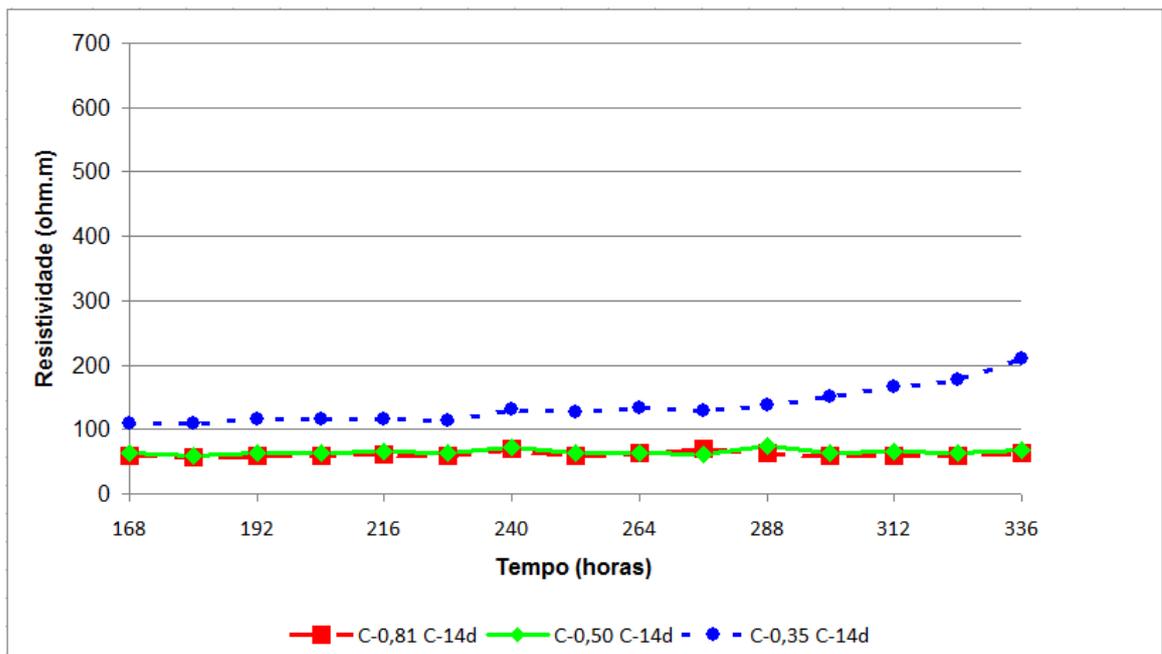


Figura 5.20 - Perfil comparativo da resistividade elétrica das três misturas que foram submetidas à cura de 14 dias (7-14 dias).

As Figuras 5.18, 5.19 e 5.20 mostram que os maiores valores de resistividade são para os concretos que não foram submetidos à cura, sendo que os concretos C-0,81 e C-0,35 são os de maior resistividade, podendo-se considerar que o concreto C-0,81 tem valores elevados de resistividade devido à maior secagem do concreto, e o C-0,35 possui maior resistividade devido à melhor qualidade do concreto.

Nos concretos que ficaram submetidos à cura de 7 dias (Figura 5.15), mas que depois ficaram no ambiente de laboratório, observou-se um ganho de resistividade em relação aos concretos que não foram curados (Figura 5.XX) devido ao controle por 7 dias da saída da água.

Na Figura 5.21, visualiza-se o perfil da evolução da resistividade elétrica dos três tipos de concreto, com as três diferentes condições ambientais que foram submetidos. Observa-se que a medida que se aproxima dos 14 dias, o concreto com C-0,35 sem cura atinge resistividades superiores ao concreto C-0,81 sem cura, mostrando que o efeito da melhoria da microestrutura, a partir destas idades, pode influenciar mais a resistividade que a perda de umidade. O mesmo efeito pode ser observado nos resultados com 7 a 14 dias de cura, onde o concreto com C-0,35 possui maior resistividade a medida que se aproximam os 14 dias (Figura 5.21).

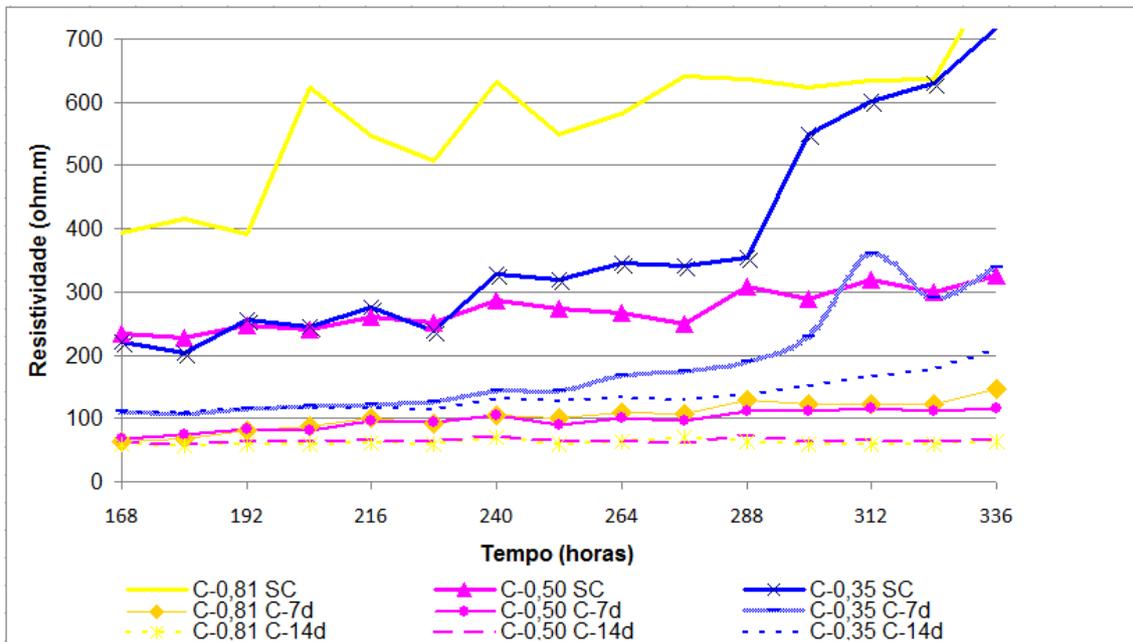


Figura 5.21 - Perfil da evolução da resistividade elétrica do concreto das três misturas de 7-14 dias.

5.5 RESISTIVIDADE ELÉTRICA DOS 14 DIAS (336 H) ATE 91 DIAS (2184 H)

Na figura 5.22 a 5.24 são apresentados os resultados da resistividade elétrica no estado fresco das 336 horas (14 dias) às 2184 horas (91 dias), separado por cada tipo de concreto, medindo-se a cada 48 horas.

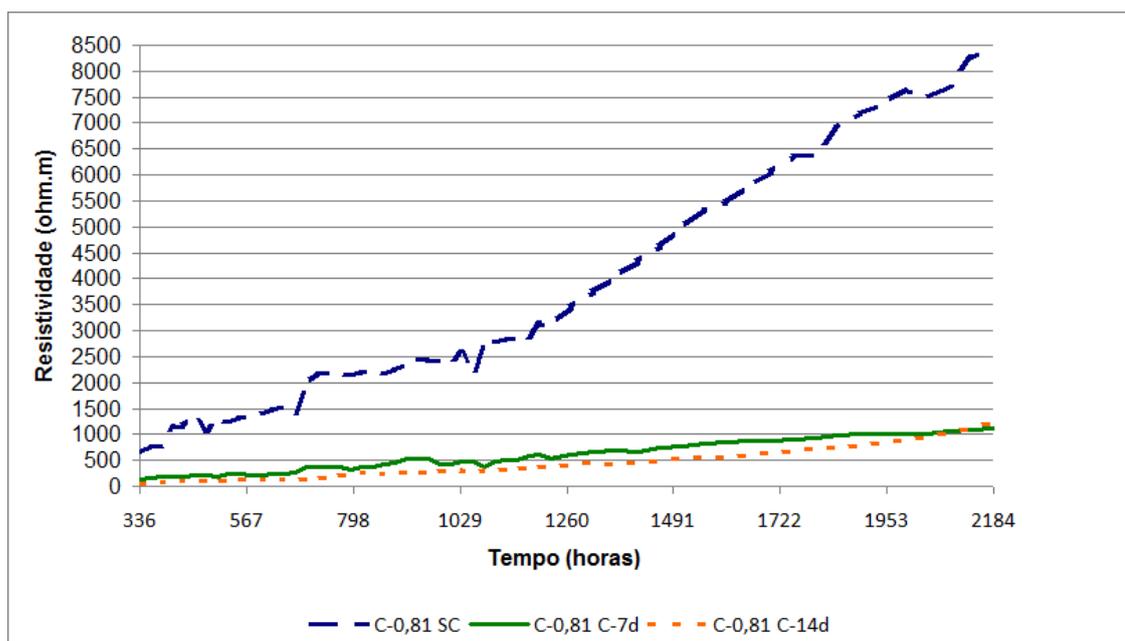


Figura 5.22- Perfil da evolução da resistividade elétrica do concreto C-0,81 de 14 a 91 dias.

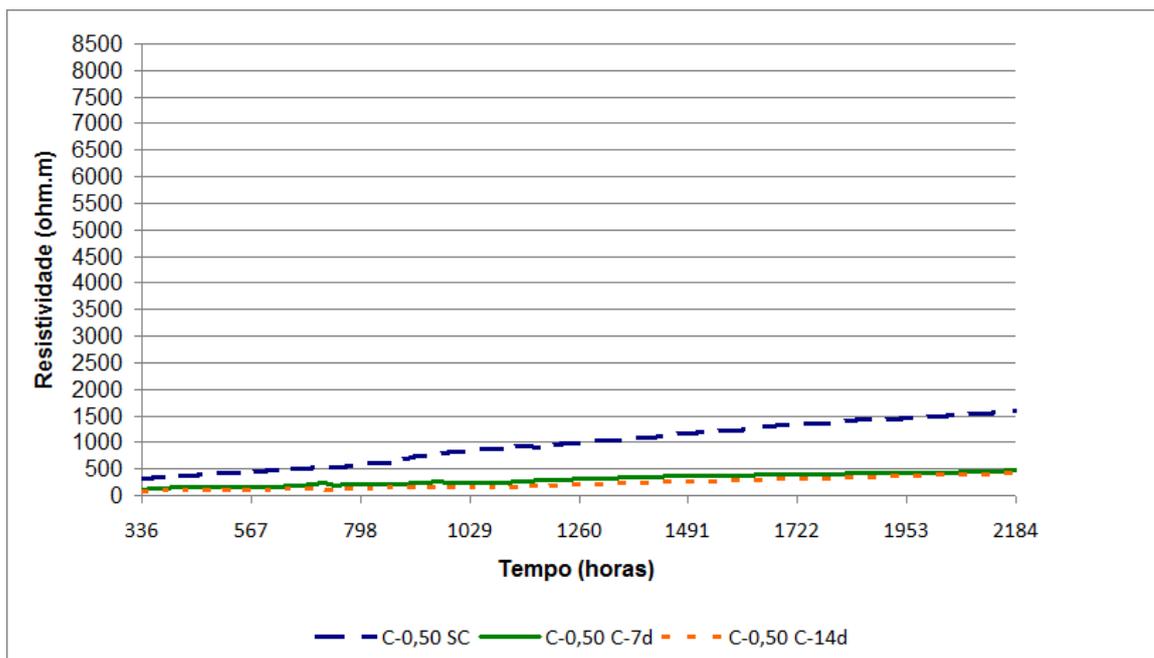


Figura 5.23 - Perfil da evolução da resistividade elétrica do concreto C-0,50 de 14 a 91 dias.

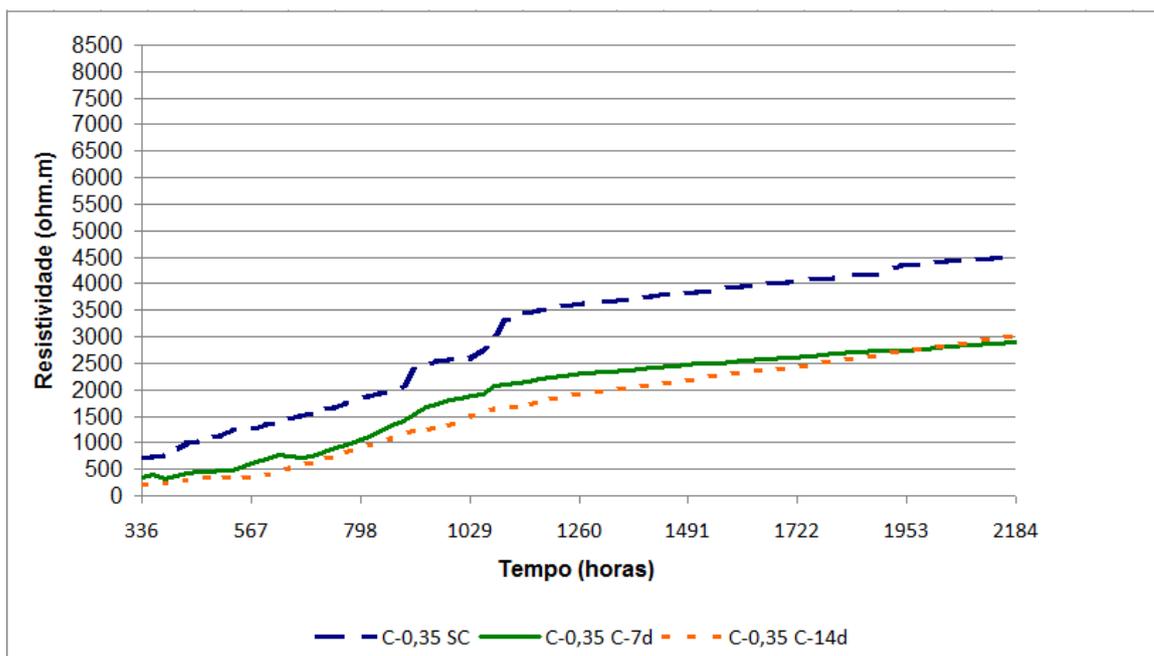


Figura 5.24 - Perfil da evolução da resistividade elétrica do concreto C-0,35 de 14 a 91 dias.

As Figuras 5.22, 5.23, 5.24 mostram que quando a umidade ambiental é baixa e o concreto com porosidade mais aberta e interconectada, a resistividade aumenta

consideravelmente. Isto também pode ser visto na Figura 5.25, onde o concreto sem cura de 25 MPa apresentou maior resistividade que o concreto C-0,35.

Para visualizar e comparar os resultados, Figura 5.25, observa-se um comparativo da resistividade elétrica das três misturas que não foram submetidas à cura. Na Figura 5.26, mostra-se o comparativo da resistividade elétrica das três misturas que foram submetidas à cura de 7 dias e na Figura 5.27, mostra-se o comparativo da resistividade elétrica das três misturas que foram submetidas à cura de 14 dias entre as idades de 14 a 91 dias.

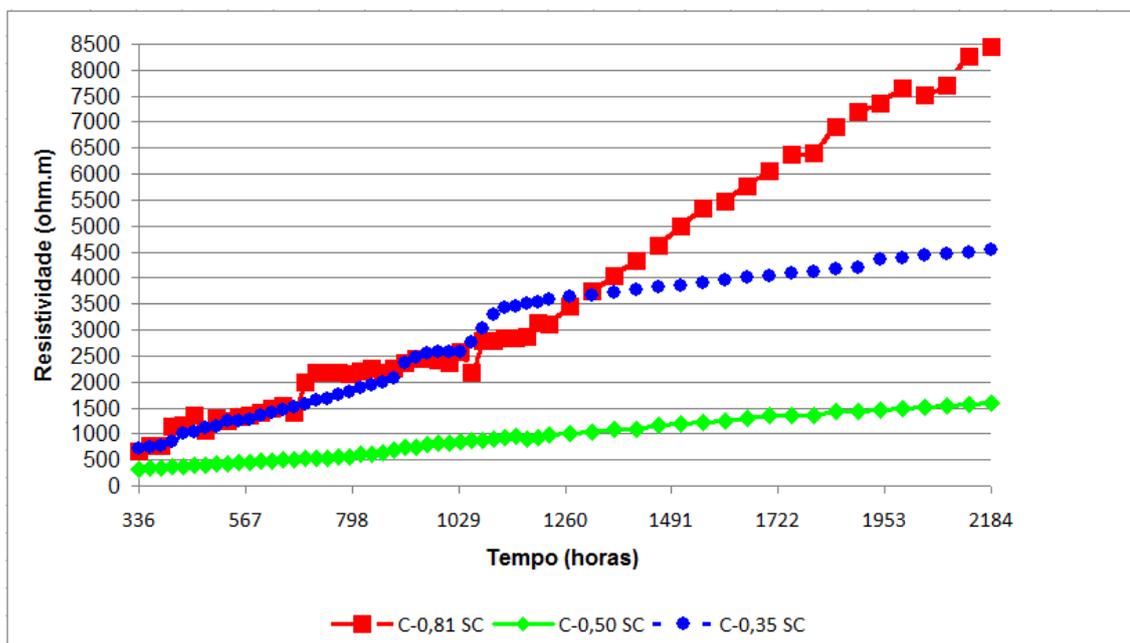


Figura 5.25 - Perfil comparativo da resistividade elétrica das três misturas que não foram submetidas à cura.

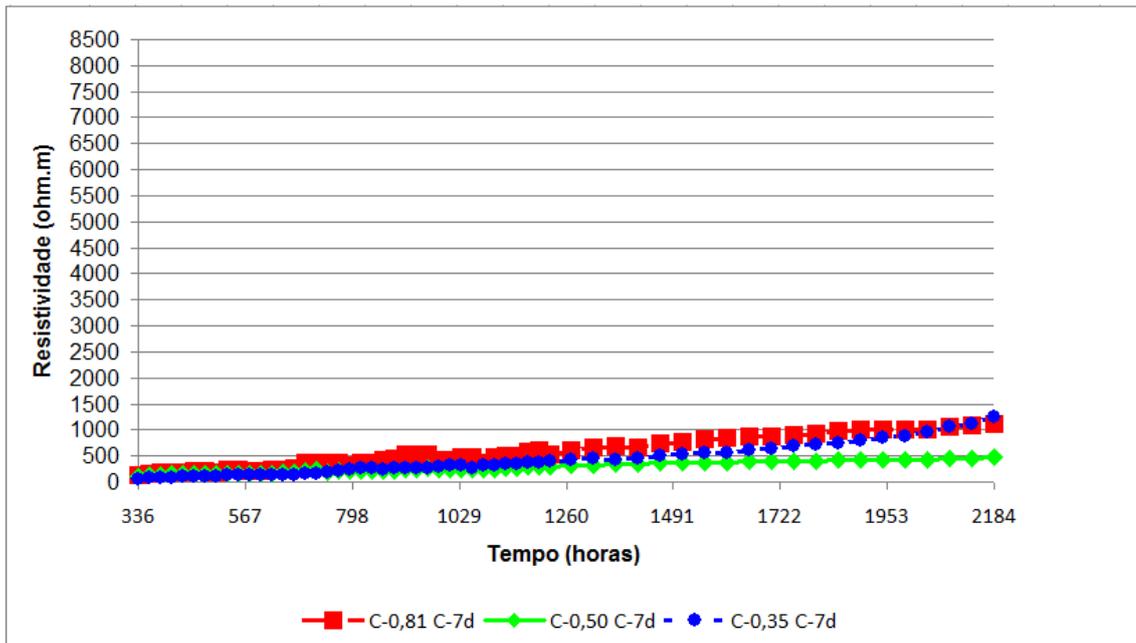


Figura 5.26 - Perfil comparativo da resistividade elétrica das três misturas que foram submetidas à cura de 7 dias.

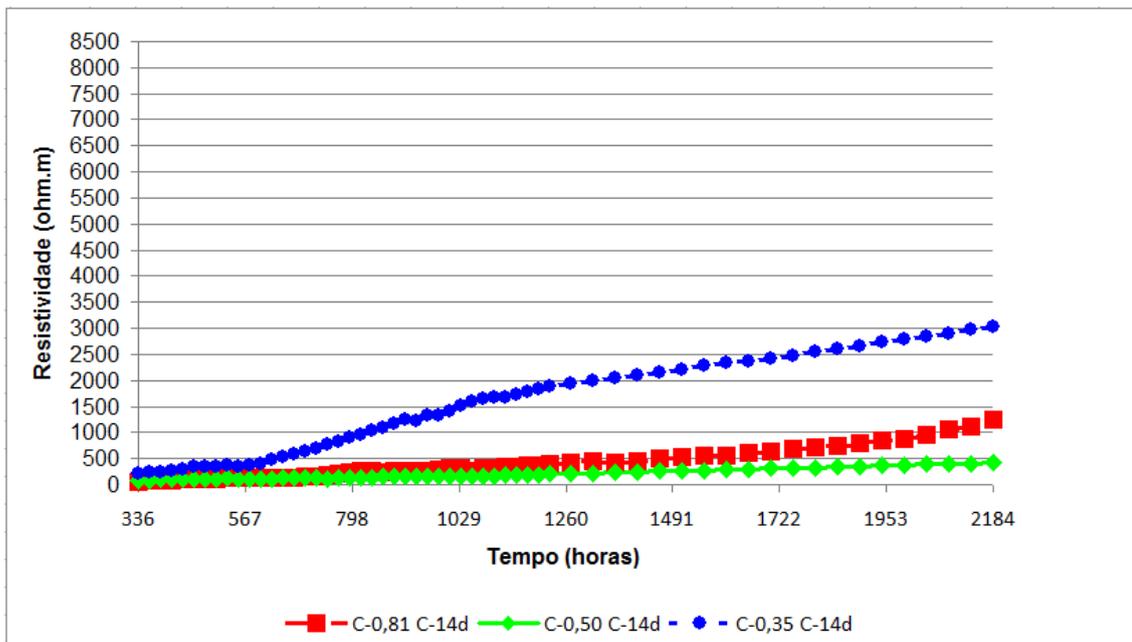


Figura 5.27 - Perfil comparativo da resistividade elétrica das três misturas que foram submetidas à cura de 14 dias.

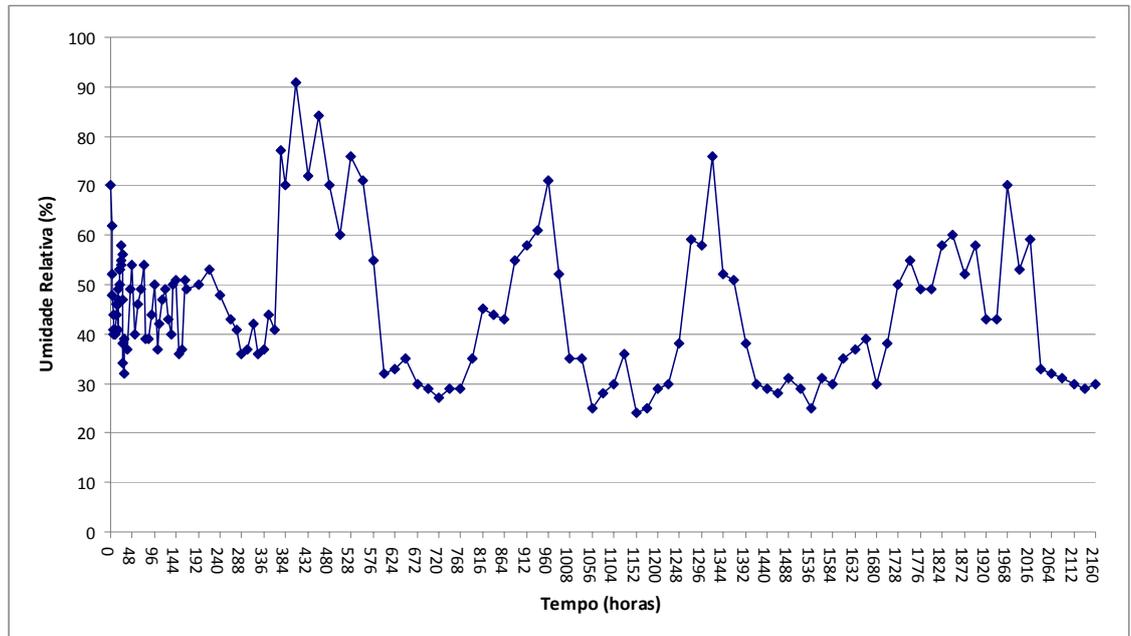


Figura 5.28 - Perfil da umidade relativa durante os 91 dias.

6 CONCLUSÕES

Concretos com baixa relação a/ag tendem a apresentar maiores valores de resistividade elétrica superficial quando submetidos à cura submersa. Por meio desse procedimento de cura é possível garantir melhor hidratação do cimento da mistura, visto que é evitada a evaporação da água empregada no amassamento dos concretos, evitando a perda de água superficial, e a diminuição à porosidade do material.

No que se trata dos concretos submetidos a cura úmida, os que possuem maiores relações a/ag apresentarem menores valores de resistividade elétrica se comparados aos concretos que não foram submetidos no processo de cura.

Quando são analisados os resultados de concretos com a mesma relação a/ag mas que sofreram processos de cura diferentes, pode se verificar a influencia da melhor qualidade da microestrutura sobre a resistividade do concreto. Concreto com maior tempo de cura, tende a registrar maiores resistividades.

Quando não foram empregados processos de cura os concretos com relação a/ag igual a 0,81 foram os que registraram as maiores resistividades superficiais até a idade monitorada (91 dias). As maiores resistividades dos concretos com alta relação a/ag nas baixas idades e com baixas umidades relativas do meio ambiente são devidas as maiores velocidades de saída da água através da porosidade mais aberta e interligada destes concretos.

No entanto os gráficos 5.18 e 5.25 mostram que existe uma tendência das resistividades elétricas superficiais dos concretos com a/ag igual a 0,35 superam as resistividades dos concretos com a/ag igual a 0,81 em futuras medidas.

Estes resultados e estas análises mostram que, em ambientes de baixa umidade relativa, como é o caso de Goiânia, a influencia da umidade dos poros sobre a resistividade pode ser maior que a qualidade da microestrutura do concreto. Portanto, o uso de resistividade elétrica superficial do concreto em ambientes de baixa umidade relativa que será analisada com precauções.

6.1 *SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS*

Sugere-se que o monitoramento da resistividade continue, de forma que os corpos-de-prova possam por períodos de maior umidade ambiental, inclusive realizando medidas com concretos saturados, a fim de evidenciar a melhor qualidade da microestrutura sobre a resistividade do concreto.

Realizar ensaios em ambientes naturais em diferentes ambientes, com maior controle da umidade relativa, temperatura, para tentar obter a relação entre umidade e resistividade.

Realizar monitoramento da resistividade em estruturas reais ao longo de um ou mais anos, em estruturas novas e antigas.

Realizar ensaios em concretos com diferentes tipos de cimento e distintas adições pozolânicas, de forma a correlacionar os valores obtidos de resistividade elétrica superficial.

Referencias Bibliográficas

ABREU, A. G. Efeito das adições minerais na resistividade elétrica de concretos convencionais. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1998.

ANDRADE C. e GONZALEZ. Aproximación al efecto de la resistividad del hormigón en la corrosión de armaduras embebidas en hormigón. *Materiales de construcción*, Vol. 37. no 207, 1987).

ANDRADE E D'ANDREA. La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad. *Revista ALCONPAT*, Volumen 1, Número 2, 2011.

ANDRADE et al. "A test method for measuring chloride diffusion coefficients through nonsaturated concrete Part I. The instantaneous plane source diffusion case" *Cement and Concrete Research* 32 (2002).

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

_____. NBR 5739: Concreto – Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR 11578: Cimento Portland composto – Especificação. Rio de Janeiro, 1991.

_____. NBR 11579: Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR 11768: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. NBR 14931: Execução de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

_____. NBR 16372: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015.

_____. NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. NBR NM 49: Agregado miúdo – Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.

_____. NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR NM 67: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

_____. NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR NM ISO 3310-1: Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificação. Rio de Janeiro, 2010.

Chun-Tao Chen, Jiang-Jhy Chang, Wei-chung Yeh The effects of specimen parameters on the resistivity of concrete Construction and Building Materials 71 2014.

FERNÁNDEZ , Importancia del curado en la calidad del hormigón de recubrimiento. Parte II: Métodos experimentales para identificar o prevenir el curado deficiente. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA), 2009.

GOWERS e MILLARD. Measurement of concrete resistivity for assessment of corrosion severity of steel using wenner technique. ACI Materials Journal, n. 96-M66, (1999), p. 536-541.

HANSSON, I.L.H. e HANSSON, C.M. Electrical resistivity of Portland cement based materials. Cement and Concrete Research, v.13, p.675-683, 1983.

HOPPE, T.F., Resistividade elétrica de concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

HUNKELER, F. The resistivity of pore water solution—a decisive parameter of rebar corrosion and repair methods. Construction & building material, 1996.

LENCIONI, J. W.. Estudos sobre resistividade elétrica superficial em concreto: análise e quantificação de parâmetros intervenientes nos ensaios. 2011. Tese de doutorado em Infra-estrutura Aeroportuária – instituto Tecnológico de Aeronáutica, São Jose dos Campos.

LENCIONI e LIMA. Principais fatores intervenientes nas medidas de resistividade elétrica superficial do concreto – Estado-da-Arte. Cinpar, 2010.

LEVITA et al. Electrical properties of fluidified portland cement mixes in the early stage of hydration. Cement and concrete research, 2000.

LÜBECK A. Resistividade elétrica de concretos de cimento portland branco e elevados teores de escória de alto forno. Universidade Federal de Santa Maria Centro de Tecnologia Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, 2008.

McCARTER, W. J. et al. Electrical conductivity, dissusion and permeability of portland cement-based mortars. *Cement and Concrete Research*. V.30, No.9, p.1395-1400, 2000.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. 2. ed. São Paulo: Pini, 2014.

MOSTARDEIRO, C. Z. *Absorção capilar e resistividade elétrica de concretos compostos com cinza de casca de arroz de diferentes teores de carbono grafítico*, 2011.

NEVILLE, A. M. *Propriedades do concreto*. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997. 828p.

PRINCIGALLO et. al. Influence of the aggregate on the electrical conductivity of Portland cement concretes. *Cement and Concrete Research*. V.33, No.11, p.1755-1763, 2003.

REBOLLEDO. *Aplicación de técnicas no destructivas al estudio de hormigón fresco*. Universidad Politécnica de Madrid, 2010.

SALEEM, M. et. al. Effect of Moisture, Chloride and Sulfate Contamination on the Electrical Resistivity of Portland Cement Concrete, *Construction and Building Materials*, V. 10, No. 3, 1996, pp: 209- 214.

SANTOS. *Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto*. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Engenharia Civil). Univeridade de Brasília, Brasília, (2006).

POLDER, R. B. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete – RILEM TC-154 technical recommendation. *Construction and Building Materials*, v. 15, n. 2-3, p.125-31, 2001.

POLDER et al. RILEM TC 154-EMC: Electrochemical techniques for masuring metallic corrosion. *Materials and Structures*. Vol. 33, , p. 603- 611, 2000.

SANTOR. *Influência de materiais de proteção superficial na resistividade elétrica e absorção capilar do concreto*. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, RS, 2011.

VICENTE, OSNI. *Estudo sobre o comportamento elétrico do concreto utilizado em sistemas de aterramento estrutural*. Londrina, 2010.

VILLAGRA´ N-ZACCARDI YA, DI MAIO. Electrical resistivity measurement of unsaturated concrete samples, *Magazine of Concrete Research* Volume 66 Issue 10,2014.

WEI e XIAO. Influence of the Aggregate Volume on the Electrical Resistivity and Properties of Portland Cement Concretes *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci.*, 2011.