

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL DO  
CONCRETO: INFLUÊNCIA DA CURA**

LEANDRO MELO ANDRADE E SILVA

Goiânia, GO  
2016

LEANDRO MELO ANDRADE E SILVA

# **RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL DO CONCRETO: INFLUÊNCIA DA CURA**

Monografia de Projeto Final de Curso, apresentada à Coordenação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

**Área de Concentração:** Engenharia Civil.

**Orientador:** Prof<sup>o</sup>. Dr<sup>o</sup>. Enio Pazini Figueiredo.

Goiânia, GO  
2016

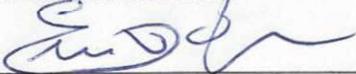
LEANDRO MELO ANDRADE E SILVA

**RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL DO CONCRETO: INFLUÊNCIA DA  
CURA**

Monografia apresentada no Trabalho de Conclusão de Curso 2 do Curso de Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás.

Aprovado em: 7/3/2016

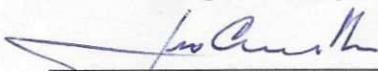
Banca Examinadora:

  
\_\_\_\_\_

Prof. Dr. Enio Pazini Figueiredo – EEC - UFG (Orientador)

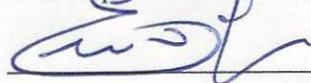
  
\_\_\_\_\_

Prof. Dr. Edgard Bacarji – EEC - UFG

  
\_\_\_\_\_

Prof. Me. Leonardo Gomes de Sá e Carvalho – Universidade Estácio de Sá

Atesto que as revisões solicitadas foram feitas:

  
\_\_\_\_\_

Prof. Dr. Enio Pazini Figueiredo (orientador)

Em: 8/3/2016

## **Dedicatória**

À minha família que sempre está ao meu lado em todos os momentos, aos meus amigos, verdadeiros companheiros de todas as horas, e à minha namorada, minha musa inspiradora.

Bom mesmo é ir a luta com determinação,  
abraçar a vida com paixão, perder com classe e  
vencer com ousadia, pois o triunfo pertence a  
quem se atreve...

Charlie Chaplin

## 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 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 água/aglomerante de 0,81 e 20 MPa de resistência à compressão; C-0,50 representa os concretos com relação água/aglomerante de 0,50 e 40 MPa; e C-0,35 representa os concretos com relação água/aglomerante de 0,35 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 água/aglomerante, 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.

**Palavras-Chave:** Resistividade elétrica superficial. Concreto. Cura.

## 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 the 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.

**Keywords:** Electrical resistivity concrete. Concrete. Water/binder ratio. Curing.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Resistividade elétrica do concreto versus relação água/cimento.	19
Figura 2.2. Resistividade elétrica versus temperatura.	22
Figura 2.3. Medida da resistividade elétrica do concreto através do método do eletrodo externo.	25
Figura 2.4. Método dos dois pontos para medidas de resistividade elétrica do concreto.	26
Figura 2.5. Esquema elétrico para determinação da resistividade elétrica volumétrica.	27
Figura 2.6. Técnica de Wenner para medida de resistividade elétrica superficial do concreto.	28
Figura 3.1 - Fôrmas utilizadas e concretagem dos corpos-de-prova prismáticos.	32
Figura 3.2 - Corpos-de-prova de 20 e 60 MPa no estado endurecido.	33
Figura 3.3 - Moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos.	33
Figura 3.3. Equipamento de medição utilizado nas medidas de resistividade elétrica superficial do concreto.	35
Figura 3.4. Equipamento de medição aferindo medidas de resistividade elétrica superficial do concreto em um dos corpos-de-prova prismático.	36
Figura 4.1 - Resistências à compressão dos concretos com uma relação água aglomerante de 0,81.	38
Figura 4.2 - Resistências à compressão dos concretos com uma relação água aglomerante de 0,50.	39
Figura 4.3 - Resistências à compressão dos concretos com uma relação água aglomerante de 0,35.	40
Figura 4.4 - Comparativo entre os crescimentos das resistências à compressão axial dos concretos com relação água/aglomerante de 0,81, 0,50 e 0,35.	41
Figura 4.5 - Evolução da resistividade elétrica superficial do concreto com relação água/aglomerante de 0,81 nas primeiras 24 horas.	42
Figura 4.6 - Evolução da resistividade elétrica superficial do concreto com relação água/aglomerante de 0,50 nas primeiras 24 horas.	42
Figura 4.7 - Evolução da resistividade elétrica superficial do concreto com relação água/aglomerante de 0,35 nas primeiras 24 horas.	43
Figura 4.8 - Comparativo entre a evolução da resistividade elétrica superficial dos concretos com relação água/aglomerante de 0,81, 0,50 e 0,35 sem cura nas primeiras 24 horas.	44

Figura 4.9 - Comparativo entre a evolução da resistividade elétrica superficial dos concretos com relação água/aglomerante de 0,81, 0,50 e 0,35 com cura submersa por 7 dias nas primeiras 24 horas.	45
Figura 4.10 - Comparativo entre a evolução da resistividade elétrica superficial dos concretos com relação água/aglomerante de 0,81, 0,50 e 0,35 com cura submersa por 14 dias nas primeiras 24 horas.	45
Figura 4.11 - Evolução da resistividade elétrica do concreto C-0,81, de 1 a 7 dias.	46
Figura 4.12 - Evolução da resistividade elétrica do concreto C-0,50, de 1 a 7 dias.	46
Figura 4.13 - Evolução da resistividade elétrica do concreto C-0,35, de 1 a 7 dias.	47
Figura 4.14- Comparativo entre a evolução da resistividade elétrica superficial dos concretos com relação água/aglomerante de 0,81, 0,50 e 0,35, sem cura, de 1 até 7 dias.	48
Figura 4.15- Comparativo entre a evolução da resistividade elétrica superficial dos concretos com relação água/aglomerante de 0,81, 0,50 e 0,35, com cura submersa por 7 dias, de 1 até 7 dias.	48
Figura 4.16- Comparativo entre a evolução da resistividade elétrica superficial dos concretos com relação água/aglomerante de 0,81, 0,50 e 0,35, com cura submersa por 7 dias, de 1 até 7 dias.	49
Figura 4.17- Evolução da resistividade elétrica superficial das 3 misturas sem cura, com cura por 7 dias e com cura por 14 dias.	50
Figura 4.18 - Evolução da resistividade elétrica do concreto C-0,81, de 7 a 14 dias.	51
Figura 4.19 - Evolução da resistividade elétrica do concreto C-0,50, de 7 a 14 dias.	51
Figura 4.20 - Evolução da resistividade elétrica do concreto C-0,35, de 7 a 14 dias.	52
Figura 4.21 - Comparativo entre a evolução da resistividade elétrica superficial dos concretos com relação água/aglomerante de 0,81, 0,50 e 0,35, sem cura, de 7 até 14 dias.	53
Figura 4.22 - Comparativo entre a evolução da resistividade elétrica superficial dos concretos com relação água/aglomerante de 0,81, 0,50 e 0,35, com cura submersa por 7 dias, de 7 até 14 dias.	53
Figura 4.23 - Comparativo entre a evolução da resistividade elétrica superficial dos concretos com relação água/aglomerante de 0,81, 0,50 e 0,35, com cura submersa por 14 dias, de 7 até 14 dias.	54
Figura 4.24- Evolução da resistividade elétrica superficial das 3 misturas sem cura, com cura por 7 dias e com cura por 14 dias.	55
Figura 4.25 - Evolução da resistividade elétrica do concreto C-0,81, de 14 a 91 dias.	56
Figura 4.26 - Evolução da resistividade elétrica do concreto C-0,50, de 14 a 91 dias.	56

Figura 4.27 - Evolução da resistividade elétrica do concreto C-0,35, de 14 a 91 dias.	57
Figura 4.28 - Comparativo entre a evolução da resistividade elétrica superficial dos concretos com relação água/aglomerante de 0,81, 0,50 e 0,35, sem cura, de 14 até 91 dias.	58
Figura 4.29 - Comparativo entre a evolução da resistividade elétrica superficial dos concretos com relação água/aglomerante de 0,81, 0,50 e 0,35, com cura submersa por 7 dias, de 14 até 91 dias.	58
Figura 4.30 - Comparativo entre a evolução da resistividade elétrica superficial dos concretos com relação água/aglomerante de 0,81, 0,50 e 0,35, com cura submersa por 14 dias, de 14 até 91 dias.	59
Figura 4.31- Evolução da resistividade elétrica superficial das 3 misturas sem cura, com cura por 7 dias e com cura por 14 dias.	60
Figura 4.32 - Perfil da umidade relativa durante os 91 dias.	60
Figura 4.33 - Evolução da resistividade elétrica do concreto C-0,81, de 241 a 255 dias e de 534 a 547 dias.	61
Figura 4.34 - Evolução da resistividade elétrica do concreto C-0,50, de 241 a 255 dias e de 534 a 547 dias.	61
Figura 4.35 - Evolução da resistividade elétrica do concreto C-0,35, de 241 a 255 dias e de 534 a 547 dias.	62
Figura 4.36 - Comparativo entre a evolução da resistividade elétrica superficial dos concretos com relação água/aglomerante de 0,81, 0,50 e 0,35, sem cura, de 241 até 255 dias, e de 534 até 547 dias.	63
Figura 4.37 - Comparativo entre a evolução da resistividade elétrica superficial dos concretos com relação água/aglomerante de 0,81, 0,50 e 0,35, com cura submersa por 7 dias, de 241 até 255 dias, e de 534 até 547 dias.	63
Figura 4.38 - Comparativo entre a evolução da resistividade elétrica superficial dos concretos com relação água/aglomerante de 0,81, 0,50 e 0,35, com cura submersa por 14 dias, de 241 até 255 dias, e de 534 até 547 dias.	64
Figura 4.39 - Perfil da Umidade Relativa nos dias 241a 255e nos dias 534 a 547.	64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Traços dos 3 diferentes tipos de concreto.	31
Tabela 3.2 - Rompimento dos corpos-de-prova cilíndricos de 20 MPa, 40 MPa e 60 MPa.	34
Tabela 3.3: Procedimento de medida da resistividade elétrica superficial do concreto nos corpos-de-prova prismáticos.	35
Tabela 4.1 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos.	37

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- °C (Grau Celsius)
- A (Área da seção Transversal);
- a/c (Relação Água/Cimento);
- a/ag (Relação Água/Aglomerante);
- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas);
- ASTM (American Society for Testing and Materials);
- Cl<sup>-</sup> (Íon Cloreto);
- CO<sub>2</sub> (Dióxido de Carbono);
- Hz (Hertz)
- I (Corrente Elétrica);
- kg (Quilograma);
- l (Comprimento);
- m (metro);
- m<sup>2</sup> (metro quadrado);
- m<sup>3</sup> (metro cúbico);
- mm (milímetro);
- MPa (Mega Pascal);
- NBR (Norma Brasileira);
- R (Resistência Elétrica);
- V (Diferença de Potencial);
- ρ (Resistividade Elétrica);
- σ (Condutividade Elétrica);
- Ω (Ohm).

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b>	<b>06</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>07</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>08</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>11</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b>	<b>12</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1. MOTIVAÇÃO	14
1.2. OBJETIVOS	16
1.2.1. Objetivo geral	16
1.2.2. Objetivo específico	16
<b>2. RESISTIVIDADE ELÉTRICA</b>	<b>17</b>
2.1. FATORES QUE INFLUENCIAM A RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO	18
2.1.1. Relação água/cimento	18
2.1.2. Cura e grau de hidratação do cimento	20
2.1.3. Agregados	21
2.1.4. Temperatura	21
2.1.5. Carbonatação	23
2.1.6. Adições minerais	23
2.1.7. Aditivos	23
2.1.8. Teor de umidade	24
2.2. MEDIDA DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO	24
2.2.1. Método do eletrodo externo	25
2.2.2. Método dos dois eletrodos	25
2.2.3. Método da resistividade elétrica volumétrica	26
2.2.4. Método dos quatro pontos ou Método de Wenner	28
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>30</b>
3.1. CONCRETO E CORPOS-DE-PROVA	31
3.2. MEDIDA DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL NOS CORPOS-DE-PROVA PRISMÁTICOS	34
<b>4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	<b>37</b>
4.1. RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO AXIAL	37
4.2. RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL NAS PRIMEIRAS 24 HORAS	41
4.3. RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL DO 1º DIA ATÉ O 7º DIA	46
4.4. RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL DOS 7 AOS 14 DIAS	50
4.5. RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL DOS 14 AOS 91 DIAS	56
4.6. RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL DOS 241 AOS 255 DIAS, E DOS 534 AOS 547 DIAS	61
<b>5. CONCLUSÕES</b>	<b>65</b>
5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	66
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>67</b>

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. MOTIVAÇÃO

O concreto é um dos materiais de construção mais antigos e ainda hoje é um dos materiais mais utilizados na construção civil devido a sua grande versatilidade e variedade de uso. É constituído basicamente de um aglomerante, o cimento Portland, agregados de diferentes tamanhos (areia, brita, etc.), e água, podendo ainda, conter aditivos ou componentes especiais (fibras, polímeros, etc.). O produto final é um material resistente, relativamente durável e barato (ARAÚJO, 2000).

Porém, apesar de possuir alta resistência às tensões de compressão, o concreto possui baixa resistência às tensões de tração, imprescindíveis na fabricação de peças estruturais necessárias no mundo moderno. Para aumentar a resistência à tração exigida na construção, adicionou-se outro elemento, o aço, dando origem, assim, ao que chamamos de concreto armado.

O concreto armado foi considerado, por muito tempo, o material estrutural definitivo e perpétuo, apresentando fácil moldagem, e podendo ser fabricado em várias formas e tamanhos, com baixo custo em relação aos outros materiais, grande resistência à água e excelente interação entre o aço e o concreto.

As excelentes características mecânicas e a razoável durabilidade do concreto armado se dão pela barreira física e proteção química que o concreto exerce sobre a estrutura do aço. Mas, devido à porosidade do mesmo, a penetração de fluidos provoca a degradação da armadura de aço (ANDRADE, 1992). Quanto mais poroso é o concreto, mais fácil ocorrerá o transporte interno de fluidos e agentes agressivos, e maior será a probabilidade de sua deterioração. Os principais agentes agressivos que provocam a degradação da armadura e do concreto são os íons cloretos (Cl<sup>-</sup>), encontrados principalmente em regiões marítimas e proximidades, e o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), presente na atmosfera e potencializado pela poluição proveniente das grandes cidades (SOUZA e RIPPER, 1998).

Esses agentes agressivos presentes na atmosfera podem degradar tanto o concreto, como as armaduras de aço, através de mecanismos de difusão, absorção capilar, permeabilidade e migração (FIGUEIREDO, 1994). O fenômeno da corrosão das armaduras

causa a deterioração do aço imerso no concreto, acompanhado de expansão volumétrica, gerando tensões significativas. A manifestação da corrosão das armaduras ocorre sob a forma de fissuras, destacamento do cobrimento e manchas no concreto, redução da seção da armadura e perda de aderência entre a armadura e o concreto.

Segundo Helene (1986) a corrosão das armaduras no concreto é um processo de natureza eletroquímica e sendo assim comandado pela resistividade elétrica do meio. O estudo da resistividade elétrica aparente do concreto permite avaliar a facilidade de acesso dos íons  $\text{Cl}^-$  e  $\text{CO}_2$  antes de desencadeado o processo corrosivo e estimar a velocidade desse processo depois de desencadeado.

A recuperação de estruturas por corrosão de armaduras gera gastos enormes em todo o mundo. São bilhões de dólares usados todos os anos, tornando-se, assim, um problema que envolve questões econômicas, técnicas, sociais e jurídicas (FIGUEIREDO, 1994).

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 em estado endurecido, limitando-se aos 28 dias de idade, enquanto o Ensaio de Abatimento do Tronco de Cone (Slump Test) avalia a qualidade do concreto em estado fresco.

A evolução das propriedades do concreto durante as primeiras horas é um marco importante para a posterior evolução das mesmas. Nos últimos anos, tenta-se relacionar certos métodos de ensaio no concreto que medem as suas propriedades mecânicas nas primeiras idades, dando informação sobre as mudanças microestruturais e mecânicas, desde a pega até os 28 dias.

Os fabricantes de concreto e os usuários precisam de um método não destrutivo que permita um controle de qualidade adequado nas primeiras idades.

A resistividade elétrica é capaz de dar importantes informações sobre a microestrutura do concreto, sobre sua porosidade e sobre o conteúdo da água nas primeiras idades. Como a medida de resistividade elétrica é não destrutiva, é possível a realização de várias medidas em uma única peça e ao longo do tempo, sem que isso prejudique o concreto.

No Brasil existe apenas uma norma oficial para ensaios de resistividade elétrica do concreto, a NBR 9204: Concreto endurecido – Determinação da resistividade elétrica

volumétrica – Método de ensaio (ABNT, 2012), referente à resistividade elétrica volumétrica sendo o ensaio de resistividade elétrica superficial preconizado por normas estrangeiras.

Um dos métodos mais usados para o ensaio da resistividade elétrica superficial do concreto é o método dos quatro pontos, ou também conhecido como método de Wenner, que possui vantagens em relação aos ensaios de resistividade elétrica volumétrica, pois pode ser empregado tanto no laboratório quanto *in situ*, além de ser um método não destrutivo que requer poucos equipamentos.

## 1.2. OBJETIVOS

### 1.2.1. Objetivo geral

Tal trabalho tem como objetivo geral avaliar a influência do tempo de cura no desempenho e no comportamento da resistividade elétrica superficial do concreto, desde as primeiras idades até o mesmo ter atingido o estado endurecido.

### 1.2.2. Objetivo específico

Investigar os concretos com relações água/aglomerante de: 0,35, com resistência à compressão de 60 MPa, sem cura, com cura submersa por 7 dias e com cura submersa por 14 dias, assim como os concreto com relação água/aglomerante de 0,50, com resistência a compressão de 40 MPa e 0,81, com resistência a compressão de 20 MPa, com as mesmas condições de cura do concreto de 60 MPa.

## 2. RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Os conceitos de resistividade elétrica são provenientes da física. A resistividade elétrica ( $\rho$ ) é uma característica geral dos materiais e é o inverso da condutividade elétrica ( $\sigma$ ).

$$\rho = 1/\sigma \quad \text{Equação (2.1)}$$

A resistividade elétrica está relacionada à resistência a passagem de corrente elétrica por um determinado material, segundo a Equação 2.2.

$$R = \rho \cdot l/A \quad \text{Equação (2.2)}$$

Onde:  $R$  = Resistência elétrica do material ( $\Omega$ );

$\rho$  = Resistividade elétrica do material ( $\Omega \cdot m$ );

$l$  = Comprimento do material (m);

$A$  = Área da seção transversal do material ( $m^2$ ).

A lei de Ohm estabelece que a tensão ou diferença de potencial (V) sobre um resistor é proporcional a corrente (I) que o atravessa, conforme mostra a Equação 2.3.

$$V = R \cdot I \quad \text{Equação (2.3)}$$

Dessa forma, pode-se determinar a resistência elétrica de um material, aplicando sobre o mesmo uma diferença de potencial (V) e medindo-se a corrente (I) que o atravessa.

A resistividade elétrica de um determinado material varia de acordo com sua natureza. De acordo com os valores de resistividade, um determinado material pode ser definido como: Condutor, Isolante e Semicondutor.

Os materiais condutores caracterizam-se por possuírem uma alta capacidade de conduzir a corrente elétrica e, conseqüentemente, possuem uma baixa resistência elétrica. Em geral, os metais são bons condutores de corrente elétrica.

Os materiais isolantes possuem a característica contrária aos materiais condutores, ou seja, possuem uma baixa capacidade de condução de corrente e, por consequência, uma alta resistência elétrica. Exemplos de materiais isolantes são o plástico e o vidro.

Os materiais semicondutores são intermediários aos condutores e isolantes.

O concreto, quando saturado em água, comporta-se como um semicondutor, com valores de resistividade elétrica da ordem de  $10^2 \Omega.m$ , enquanto que seco, pode ser considerado um isolante elétrico, com resistividade da ordem de  $10^6 \Omega.m$  (HELENE, 1993).

## 2.1. FATORES QUE INFLUENCIAM A RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO

A importância da resistividade elétrica do concreto reside no fato de que esta propriedade, juntamente com o acesso de oxigênio, controla o processo eletroquímico que gera o fenômeno da corrosão das armaduras imersas no concreto. A resistividade elétrica está relacionada aos principais estágios da vida útil de uma estrutura (períodos de iniciação e propagação da corrosão das armaduras) e considera-se existir uma relação entre a resistividade do concreto e a velocidade de corrosão do aço após a sua despassivação. Alguns fatores, intrínsecos ou extrínsecos ao concreto, afetam as medidas de resistividade elétrica, principalmente quando se trata da resistividade elétrica superficial do material, podendo resultar em falsos valores, baixos ou altos, que levam a interpretações errôneas quanto ao estado de uma armadura, se em corrosão ativa ou não. Os principais fatores intervenientes nas medidas de resistividade elétrica superficial do concreto realizadas com o método dos quatro pontos (Wenner), tais como: a relação a/c, o tipo e quantidade de agregados, a carbonatação, a temperatura, e os parâmetros geométricos, entre outros, podem influenciar significativamente as características da microestrutura do concreto.

Nota-se, então, que a resistividade elétrica é uma propriedade que depende principalmente da composição química da solução aquosa dos poros, da estrutura dos poros, da umidade e da temperatura do concreto, podendo atuar como um semicondutor ou um isolante elétrico (HOPPE, 2005). A seguir são apresentados os vários fatores que podem influenciar a resistividade elétrica do concreto.

### 2.1.1. Relação água/cimento

A relação água/cimento influencia consideravelmente a estrutura porosa da pasta de cimento, especificamente no volume total de poros e na quantidade de poros de maiores

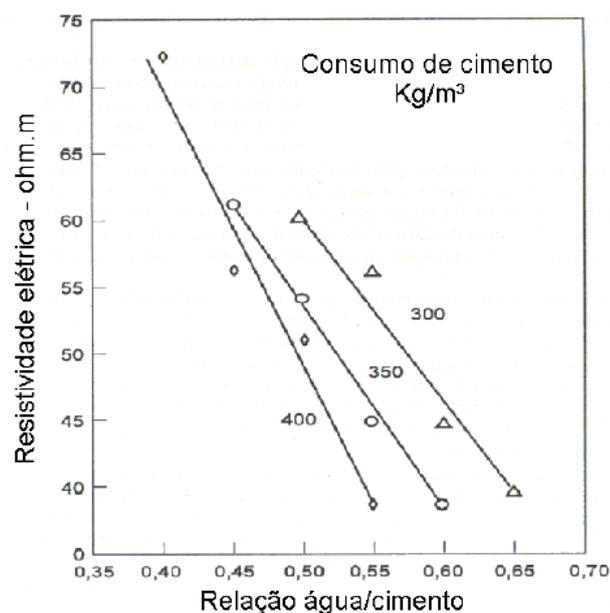
diâmetros. Quanto menor é a relação água/cimento, menor será o volume de poros e a probabilidade de existirem poros com maiores diâmetros e interconectados (SANTOS, 2006). Isto levará a uma maior resistividade do concreto.

Chao-Lung et al (2011) observaram um aumento na resistividade elétrica a partir da redução do volume dos poros capilares e melhora da impermeabilidade do concreto devido à reação pozolânica provocada pela adição de cinza de casca de arroz.

Woelf e Lauer (1979 apud LENCIONI, 2011) verificaram a influência da relação a/c na resistividade do concreto. Para isto foram feitos três concretos com relações a/c de 0,4, 0,5 e 0,6, sendo a relação a/c 0,5 a mistura de referência. Eles concluíram que a resistividade elétrica do concreto, está diretamente relacionada à quantidade de água empregada na mistura.

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 elétrica decresce rapidamente com o aumento da relação água/cimento, devido, principalmente, à maior disponibilidade de 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, como pode ser observado na Figura 2.1.

Figura 2.1 - Resistividade elétrica do concreto versus Relação água/cimento (Vicente, 2010).



### 2.1.2. Cura e grau de hidratação do cimento

Neville (1995) diz que, em concretos convencionais, a cura tende a garantir o mais alto grau de hidratação possível, possibilitando obter maior resistência e menor permeabilidade, além de minimizar os efeitos da retração autógena.

Aïtcin (2000) concluiu que em concretos de alto desempenho, a cura é ainda mais importante, devido à baixa velocidade de exsudação no estado plástico e auto-secagem e gradientes térmicos no concreto endurecido.

A cura de um concreto é um aspecto muito importante que afeta o comportamento a longo prazo, embora não exista um método para quantificá-lo. A resistividade elétrica poderia quantificar, já que detecta a secagem superficial e, conseqüentemente, o grau de saturação dos poros.

Helene (1993) afirma que a resistividade elétrica do concreto depende do grau de hidratação do cimento e eleva-se com o aumento deste.

Schulte, et. al (1978) afirmaram que, a variação da resistividade elétrica do concreto em condições semi-saturadas ocorre devido a condução iônica através da camada de água adsorvida nas paredes dos poros, enquanto nos concretos muito secos a condutividade diminui, e o concreto atua como isolante elétrico.

O grau de saturação na rede de poros capilares do concreto pode variar em função das condições atmosféricas do ambiente no qual esteja exposto. As chuvas e a umidade relativa alteram o conteúdo de umidade do concreto (CASTELLOTE et al, 2002).

A resistividade aumenta com a idade do concreto, o que significa progresso na hidratação do cimento.

Whittington et al (1981) afirmam que, uma vez que a quantidade de água evaporável em uma pasta de cimento comum varia de 60%, no momento inicial da mistura, a 20% após hidratação completa do cimento, a condutividade elétrica do concreto é função do tempo (ou idade do concreto).

Woelf e Lauer (1979) comparando corpos de prova curados ao ar com corpos de prova submetidos à cura úmida observaram que houve um aumento significativo da resistividade

elétrica aos 23 dias nos corpos de prova curados ao ar. Esse aumento é devido à evaporação da água livre, que é condutora de corrente pelo concreto.

### **2.1.3. Agregados**

Whiting & Nagi (2003) asseguram que a resistividade elétrica do concreto é muitas vezes maior que a da pasta de cimento.

Whittington et al (1981 apud MOSTARDEIRO 2011) verificaram que a resistividade elétrica do concreto foi de três a quatro vezes maior que da pasta de cimento da referente mistura, sugerindo a influência do agregado graúdo.

Segundo Monfore (1968 apud SANTOS, 2006) concretos com agregados de origem calcária e arenítica apresentam uma resistividade elétrica muito menor que concretos elaborados com granito.

Monfore (1968 apud SANTOS, 2006) afirma que, a presença de agregados, que praticamente não são condutores elétricos, na matriz cimentícia, causa obstrução da passagem da corrente elétrica. Assim a trajetória a ser percorrida pela corrente será maior do que seria se passasse diretamente pelo agregado, fazendo com que a resistividade elétrica seja maior.

Gowers e Millard (1999 apud LENCIONI, 2011), dizem que quando é usada a técnica de Wenner para medir a resistividade elétrica, considera-se que o material que está sendo medido é homogêneo. Entretanto, os agregados normalmente têm resistividades maiores que a pasta do cimento, o que faz que a maior parte da corrente elétrica seja conduzida através da pasta.

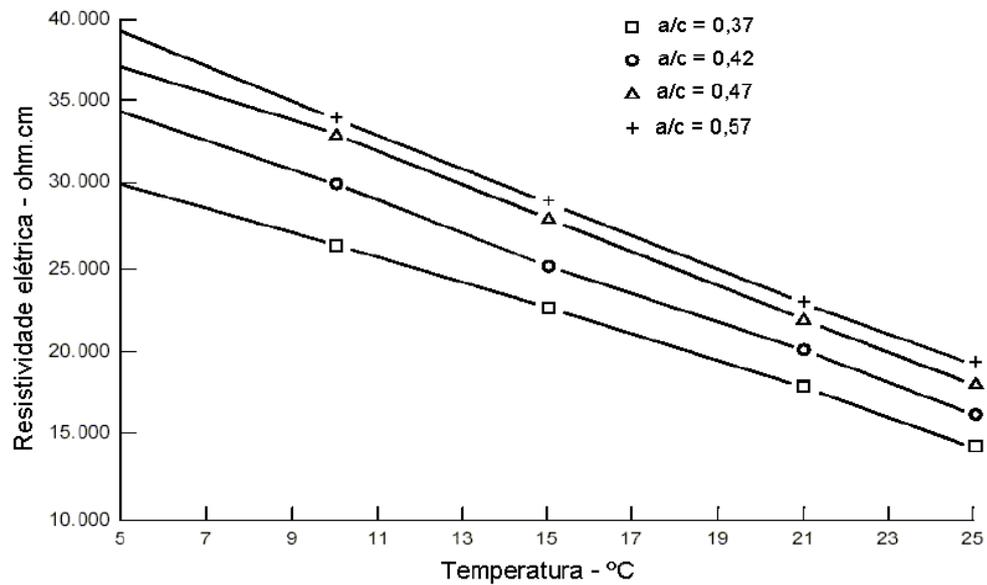
### **2.1.4. Temperatura**

A resistividade elétrica está ligada ao fluxo de íons na solução aquosa dos poros do concreto, sendo muito sensível ao teor de umidade e temperatura do mesmo. O aumento da umidade e da temperatura resulta em diminuição da resistividade elétrica (HELENE, 1993; NEVILLE, 1997).

Whiting e Nagi (2003) constataram que a resistividade do concreto depende da temperatura. A temperatura tem influência sobre a solução presente nos poros (eletrólito). Aumentando a temperatura diminui a viscosidade da solução e aumenta a mobilidade iônica e, conseqüentemente a condutividade elétrica. O que pode ser verificado na Figura 2.2 que ilustra como a resistividade decresce com o aumento da temperatura.

Figura 2.2 - Resistividade elétrica versus temperatura (Hope et al. 1985 apud Whiting & Nagi

2003).



Castellote et al. (2002) afirmam que, a resistividade elétrica, sendo o inverso da condutividade, depende da temperatura, um aumento da temperatura comumente resulta em diminuição da resistividade devido ao aumento da mobilidade e interação iônicas. Também sugere a adoção de 25° C como uma temperatura de referência para ensaios.

Em seus estudos, Al-Abdul-Hadi (1982) determinou de forma simplificada, que pode ser assumido que dentro de uma variação de 0 °C a 40 °C, a resistividade dobra quando há uma queda de 20°C, podendo-se assumir também que uma variação de 3% a 5% ocorre para cada grau de temperatura.

### **2.1.5. Carbonatação**

Segundo Millard (1991), a carbonatação gera a precipitação de carbonato de cálcio nos poros, o que provoca o endurecimento da superfície do concreto, havendo um aumento significativo da resistividade elétrica na superfície.

Quando exposto a condições de molhagem suficientes, a taxa de corrosão do aço no concreto carbonatado pode ser elevada, seguindo a correlação existente entre o inverso da resistividade elétrica e a taxa de corrosão. Além disso, a carbonatação reduz a concentração dos íons no líquido dos poros, responsáveis pela condução da corrente. Isso pode ocasionar o aumento da resistividade elétrica do concreto.

### **2.1.6. Adições minerais**

Segundo informações apresentadas por Santos (2006) As adições minerais, tais como cinza volante, sílica ativa e escória de alto-forno, e os fillers, provocam o refinamento dos poros da matriz, por ação química e/ou física, e diminuem a concentração iônica da solução. Sendo assim, o concreto com adições minerais apresenta uma maior resistividade elétrica quando em comparação com um concreto convencional. A densificação da matriz e o aumento da quantidade de poros de menores diâmetros dificultam a condução da corrente através do concreto e, portanto, aumentam a resistividade elétrica.

### **2.1.7. Aditivos**

Neville (1997) diz que os aditivos geralmente não reduzem a resistividade do concreto.

Para Whithing e Nagi (2003), o efeito específico do aditivo na resistividade elétrica do concreto não foi atestado. Mas, o aditivo causa efeitos indiretos, como por exemplo, quando se usa um aditivo redutor de água, reduz a relação a/c e com isso aumenta a resistividade. Outro exemplo, é o uso dos incorporadores de ar, os quais modificam a estrutura dos poros e, conseqüentemente, afetam a resistividade elétrica.

### 2.1.8. Teor de umidade

De todas as variáveis que de alguma maneira influenciam o valor da resistividade elétrica do concreto, a variação do teor de umidade interna do concreto 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.

O grau de saturação na rede de poros capilares do concreto varia em função das condições atmosféricas do ambiente no qual está exposto. As alterações na umidade relativa e a ocorrência de chuvas podem alterar o conteúdo de umidade do concreto. Considerando que a passagem de corrente pelo concreto depende do teor de eletrólito contido em seus poros, alterações no teor de umidade da matriz acarretarão em alterações na resistividade elétrica do concreto.

A umidade relativa é um parâmetro decisivo para o grau de saturação dos poros, que por sua vez controla a resistividade elétrica do concreto, principalmente na região superficial. Segundo Helene (1993), a evaporação que é um fenômeno de superfície, ocorre muito mais rapidamente que o transporte de água e secagem interna do concreto. Portanto, sempre que uma superfície de concreto estiver em um ambiente de baixa umidade relativa, superficialmente este aparentará estar seco.

## 2.2. MEDIDA DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO

Nesta seção serão apresentados diferentes métodos para determinação da resistividade elétrica do concreto, conforme será visto a seguir. 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, onde se mede a resistividade elétrica superficial do concreto e outra região mais interna, onde a umidade é mais estável, onde se mede a resistividade elétrica volumétrica.

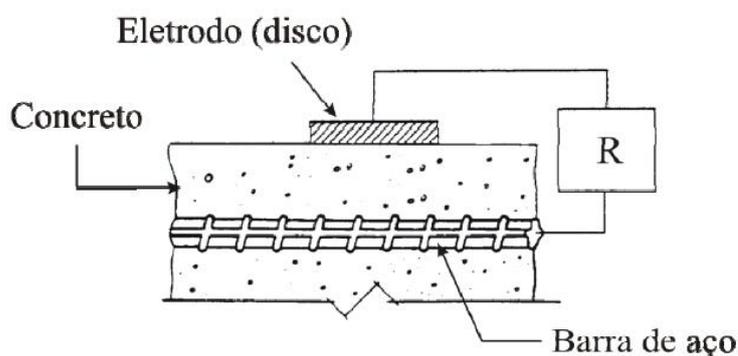
Desta forma, antes de escolher qual o método a ser utilizado, torna-se imperioso definir qual a área (interna ou superficial) mais relevante na determinação da resistividade

elétrica do material, pois pode haver diferença nos valores obtidos de resistividade elétrica do concreto.

### 2.2.1. Método do eletrodo externo

Neste método, um pequeno disco é utilizado como eletrodo, sendo posicionado na superfície da estrutura de concreto sobre a região da armadura, que é utilizada como o segundo eletrodo. A medida efetuada afere o valor da resistência do concreto entre o eletrodo e a armadura. A resistência medida pode ser convertida em resistividade elétrica usando-se uma constante de célula que depende da espessura do cobrimento e do diâmetro da barra. A Figura 2.3 ilustra a aplicação do método do eletrodo externo.

Figura 2.3 - Medida da resistividade elétrica do concreto através do método do eletrodo externo (LENCIONI, 2011).



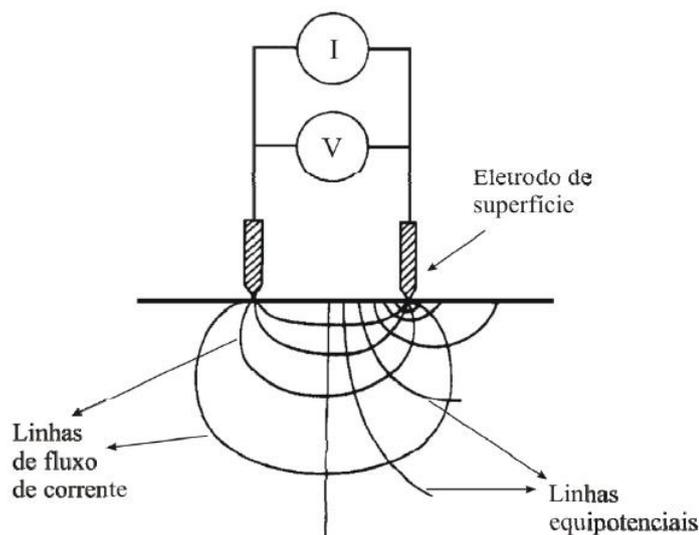
Esse método apresenta a vantagem de que a localização do ponto de teste, ou seja, a posição do disco na estrutura é irrelevante, já que a influência da armadura é eliminada. Todavia, a sensibilidade da resistência de contato entre o disco e o concreto apresenta-se como desvantagem.

### 2.2.2. Método dos dois eletrodos

Uma alternativa de ensaio de resistividade elétrica em estruturas reais é o método de dois eletrodos. Este é um método simples que utiliza dois eletrodos colocados em contato com

a superfície do concreto, por meio dos quais a corrente alternada é aplicada e a diferença de potencial é medida, como ilustrado na Figura 2.4.

Figura 2.4 - Método dos dois pontos para medidas de resistividade elétrica do concreto (MILARD, 1991).



Segundo Millard (1991), as medidas obtidas por este método são muito influenciadas por alterações no raio do eletrodo em contato com a superfície de concreto e pela presença de agregados nas regiões próximas ao contato. Estudos deste pesquisador mostraram que, neste método, quando a área de contato entre os eletrodos e o concreto diminui, a resistividade elétrica medida aumenta rapidamente. Dessa forma, tal método não é recomendado, pois é pouco utilizado e possui uma baixa precisão nas medidas realizadas.

### 2.2.3. Método da resistividade elétrica volumétrica

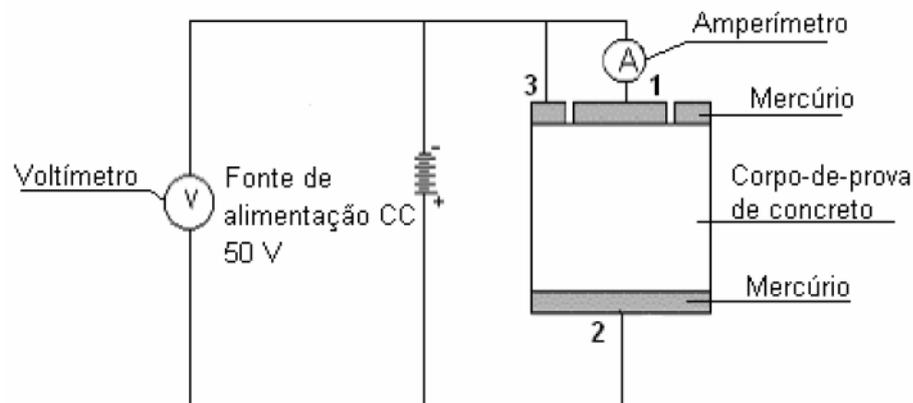
O método da resistividade elétrica volumétrica é um método para determinação da resistividade elétrica em laboratório, empregando-se corpos-de-prova moldados ou extraídos. É o único método de ensaio de resistividade elétrica do concreto normalizado no Brasil, e devido a tal fato, mesmo não se tratando de um ensaio para obtenção da resistividade elétrica superficial, objeto de estudo deste trabalho, será abordado.

A norma que descreve o procedimento de medida da resistividade elétrica volumétrica do concreto é a NBR 9204 Concreto endurecido - Determinação da resistividade elétrico-

volumétrica - Método de ensaio (ABNT, 2012). A resistividade nesse caso é dita volumétrica, pois apresenta a resistividade das camadas mais internas das amostras de concreto analisadas.

Os corpos-de-prova devem ser cilíndricos com 150 mm de diâmetro e 150 mm de altura, moldados ou extraídos das estruturas. Utilizando-se uma fonte de corrente contínua, aplica-se uma tensão de  $50 \pm 0,5$  V entre dois eletrodos de mercúrio nas faces do corpo-de-prova, como ilustrado na Figura 2.5. Um terceiro eletrodo também de mercúrio é utilizado para evitar erros devido aos efeitos de superfície (Abreu, 1998).

Figura 2.5 - Esquema elétrico para determinação da resistividade elétrica volumétrica (ABREU, 1998)



Dez minutos após a aplicação da tensão, a corrente elétrica gerada deve ser medida. A resistividade pode ser calculada utilizando-se a Equação 3.1.

$$\rho = \frac{V.A}{I.h} \quad \text{Equação (3.1)}$$

Onde:  $\rho$  = Resistividade elétrica volumétrica do concreto ( $\Omega.m$ );

V = Tensão aplicada (V);

A = Área do eletrodo principal ( $m^2$ ).

I = Corrente elétrica que atravessa o corpo-de-prova (A);

H = Altura do corpo-de-prova (m)

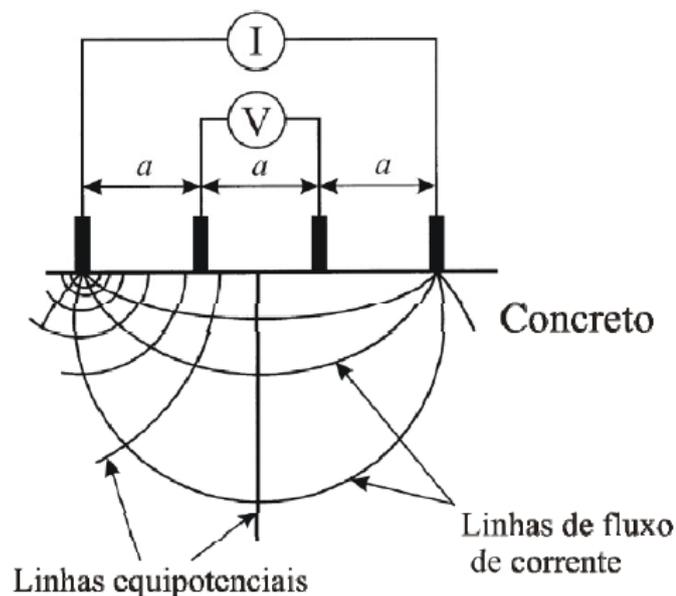
As críticas a este método estão relacionadas à utilização de corrente contínua, que pode gerar erros nas medidas devido à polarização dos eletrodos, ocasionada pelas interações entre estes e o material de contato. Além disso, a dificuldade na montagem da célula de ensaio com a utilização de mercúrio como eletrodo parece ser um fator que torna difícil a utilização deste método.

#### 2.2.4. Método dos quatro eletrodos ou Método de Wenner

O método dos quatro eletrodos é uma das técnicas mais usadas para se determinar a resistividade elétrica superficial do concreto. Inicialmente, foi desenvolvido para se determinar a resistividade elétrica do solo, sendo adaptado por Wenner para o uso em concretos. Por essa razão, também é chamado de Método de Wenner.

O ensaio consiste em submeter o corpo-de-prova, através dos eletrodos mais externos, à passagem de uma corrente elétrica alternada, de onda senoidal de frequência de 10 Hz, fixada de tal forma que a diferença de potencial entre esses eletrodos seja de 5 V. Após um período de tempo determinado, são realizadas duas medidas da diferença de potencial entre os eletrodos internos e duas leituras da corrente elétrica passante entre os eletrodos externos do corpo-de-prova. A Figura 2.6 ilustra o esquema de ensaio para medida da resistividade elétrica superficial do concreto.

Figura 2.6 - Técnica de Wenner para medida de resistividade elétrica superficial do concreto (LENCIONI, 2011)



Wenner desenvolveu uma maneira de calcular a resistividade, o valor da mesma pode ser obtido através da Equação 3.2.

$$\rho = 2\pi a \frac{V}{I} \quad \text{Equação (3.2)}$$

Onde:  $\rho$  = Resistividade elétrica do concreto ( $\Omega.m$ );

$a$  = Distância média entre os eixos dos eletrodos (m);

$V$  = Diferença de potencial entre os eletrodos internos (V);

$I$  = Corrente Elétrica (A).

Observa-se, no entanto, que, embora seja simples e bastante utilizado, Hoppe (2005) afirmou que o método dos quatro eletrodos deve ser aplicado cuidadosamente para que não ocorra influência de fatores externos, relacionados à geometria dos corpos-de-prova, superfície de contato entre os eletrodos e o concreto, heterogeneidade do concreto, presença de armaduras, tipo de onda, frequência e intensidade da corrente aplicada.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia deste trabalho tem como objetivo avaliar a resistividade elétrica pelo método dos quatro eletrodos, ou método de Wenner, de três diferentes tipos de concreto, desde a primeira hora, até quando o concreto já tenha um elevado percentual da sua resistência à compressão potencial.

Este trabalho foi feito acompanhando o trabalho de mestrado da aluna Elva Wendolyn Ramirez Pérez, da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, e ainda tem base no período de iniciação científica, ajudando-a com sua dissertação de mestrado, obtendo e coletando os dados.

O programa experimental tem a finalidade de obter resultados que permitam discutir sobre alguns dos fatores que intervêm nas medidas de resistividade elétrica. Para isso, foram feitas medições de resistividade elétrica superficial de diversos corpos de prova com diferentes características, adotando-se dois padrões de corpos de prova: 1) corpos de prova prismáticos, para realizar medições de resistividade elétrica tanto no estado fresco como no estado endurecido, sendo possível acompanhar a influência da cura e do grau de hidratação do cimento; e 2) corpos de prova cilíndricos submetidos às mesmas condições que os prismáticos, podendo acompanhar o crescimento da resistência à compressão.

De uma forma geral, foi analisada a existência da influência da relação água/aglomerante, tempo de cura e grau de hidratação do concreto sobre as medidas de resistividade elétrica superficial do concreto.

Foram utilizados materiais que são de uso cotidiano na região de Goiânia e encontrados facilmente para a confecção do concreto de referência. O Cimento utilizado foi o cimento Portland tipo CP II - F, classe 40, segundo denominação da NBR 11578 Cimento Portland composto - Especificação (ABNT, 1991).

O agregado graúdo utilizado foi do tipo brita 1 com tamanho máximo de 25 mm, e do tipo brita 0 com tamanho máximo de 12,5 mm. O agregado miúdo foi do tipo areia fina e areia grossa, com tamanho máximo de 0,60 e 4,75, respectivamente. As granulometrias dos agregados graúdo e miúdo foram caracterizadas segundo a NBR NM 248 Agregados - Determinação da composição granulométrica (ABNT, 2003), a massa unitária dos agregados graúdo e miúdo segundo a NBR NM 45 Agregados - Determinação da massa unitária e do

volume de vazios (ABNT, 2006), a massa específica do agregado graúdo segundo a NBR NM 53 Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água (ABNT, 2009), a massa específica do agregado miúdo pela NBR NM 52 Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente (ABNT, 2009). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás.

### 3.1. CONCRETO E CORPOS-DE-PROVA

O concreto utilizado para o experimento foi fabricado com os materiais doados por uma reconhecida concreteira da região. Foram fabricados concretos de 20, 40 e 60 MPa, adotando os traços apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Traços dos 3 diferentes tipos de concreto.

Nomenclatura		<b>C20</b>	<b>C40</b>	<b>C60</b>
Resistência à compressão		<b>20 MPa</b>	<b>40 MPa</b>	<b>60 MPa</b>
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 <sup>3</sup> )	240	395	480
	Areia Fina (kg/m <sup>3</sup> )	380	320	190
	Areia Grossa (kg/m <sup>3</sup> )	465	380	445
	Brita 0 (kg/m <sup>3</sup> )	105	200	255
	Brita 1 (kg/m <sup>3</sup> )	900	805	755
	Água (kg/m <sup>3</sup> )	195	198	178
	Sílica Ativa (kg/m <sup>3</sup> )	-	-	30
	Aditivo (kg/m <sup>3</sup> )	1,74	2,68	3,48
	Superplastificante (L/m <sup>3</sup> )	-	-	0,125
Consumo das misturas	Relação água/aglomerante	0,81	0,5	0,35
	Relação água /cimento	0,81	0,5	0,37
	Argamassa seca (%)	45,71	41,09	38,64
	Água/materiais secos (%)	9,33	9,43	8,26

Foram moldados 180 corpos-de-prova, sendo 27 de forma prismática e 153 de forma cilíndrica e que foram moldados e adensados em mesa vibratória, de acordo com a norma NBR 5738 Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova (ABNT, 2003).

Após a desmoldagem, realizada 24 horas após a concretagem, de acordo com a norma NBR 5738 (ABNT, 2003), um terço dos corpos-de-prova prismáticos foram submetidos à cura submersa por 7 dias, assim como um terço dos corpos-de-prova cilíndricos, do mesmo modo, um terço dos corpos de prova prismáticos e cilíndricos foram submetidos à cura submersa por 14 dias e o restante dos corpos-de-prova não sofreram cura submersa e ficaram no ambiente de laboratório sob uma umidade de  $30\pm 10\%$ .

Os corpos-de-prova de forma prismática de dimensões de 200x200x60 mm foram moldados com o auxílio de fôrmas de madeira e distribuídos da seguinte maneira: 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, sendo 3 corpos-de-prova com resistência esperada de 20 MPa, 3 com resistência de 40 MPa, e 3 com resistência de 60 MPa, sem cura, o mesmo valendo para os corpos-de-prova com cura submersa por 7 e 14 dias. A Figura 3.1 mostra as fôrmas que foram utilizadas para os ensaios e a concretagem dos corpos de prova prismáticos e a Figura 3.2 mostra os corpos-de-prova de 20 MPa e 60 MPa já no estado endurecido.

Figura 3.1 - Fôrmas utilizadas e concretagem dos corpos-de-prova prismáticos.



Figura 3.2 - Corpos-de-prova de 20 e 60 MPa no estado endurecido.



Os corpos-de-prova cilíndricos com dimensões de 100 x 150 mm foram distribuídos da seguinte maneira: 60 corpos-de-prova no ambiente de laboratório e sem cura, 51 corpos de prova submetidos à cura submersa por 7 dias e 42 corpos-de-prova submetidos à cura submersa por 14 dias, sendo a resistência à compressão esperada dos mesmos de 20 MPa, 40 MPa e 60 Mpa, respectivamente. A Figura 3.3 mostra a moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos feitas no Laboratório de Materiais de Construção da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás.

Figura 3.3 - Moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos.



A Tabela 3.2 a seguir, ilustra como foi o processo de rompimento dos corpos-de-prova sem cura, com cura aos 7 dias e com cura as 14 dias. No 1º dia foram rompidos 3 corpos-de-prova de 20 MPa, 3 de 40 MPa e 3 de 60 MPa sem cura. No 3º dia foram rompidos três corpos-de-prova de 20 MPa, 3 de 40 MPa e 3 de 60 MPa, sem cura, 3 corpos-de prova de 20 MPa, 3 de 40 MPa e 3 de 60 MPa com cura submersa de 7 dias, e assim sucessivamente até

obter o rompimento de todos os corpos-de-prova sem cura, com cura submersa por 7 dias e com cura submersa por 14 dias.

Tabela 3.2 - Rompimento dos corpos-de-prova cilíndricos de 20 MPa, 40 MPa e 60 MPa.

<b>Resistência à compressão</b>	<b>Idade (dias)</b>	<b>Sem cura</b>	<b>Cura à 7 dias</b>	<b>Cura à 14 dias</b>
<b>C-0,81 (20 Mpa)</b>	<b>1</b>	3	-	-
	<b>3</b>	3	3	-
	<b>7</b>	3	3	-
	<b>14</b>	3	3	3
	<b>28</b>	3	3	3
	<b>56</b>	3	3	3
	<b>91</b>	2	2	2
<b>C-0,50 (40 Mpa)</b>	<b>1</b>	3	-	-
	<b>3</b>	3	3	-
	<b>7</b>	3	3	-
	<b>14</b>	3	3	3
	<b>28</b>	3	3	3
	<b>56</b>	3	3	3
	<b>91</b>	2	2	2
<b>C-0,35 (60 Mpa)</b>	<b>1</b>	3	-	-
	<b>3</b>	3	3	-
	<b>7</b>	3	3	-
	<b>14</b>	3	3	3
	<b>28</b>	3	3	3
	<b>56</b>	3	3	3
	<b>91</b>	2	2	2

### 3.2. MEDIDA DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL NOS CORPOS-DE-PROVA PRISMÁTICOS

Após a moldagem dos corpos-de-prova foram realizadas as medidas de resistividade elétrica superficial dos 27 corpos-de-prova prismáticos. O monitoramento dos mesmos foi feito conforme esquematizado na Tabela 3.3. Houve um acompanhamento ininterrupto até os 91 dias, então houve uma pausa para que o concreto alcançasse de fato a qualidade desejada. As medidas recomeçaram de novo aos 241 dias, indo até o dia 255, houve outra interrupção nas medidas e então recomeçou-se de novo aos 534 dias, indo até o dia 547.

Tabela 3.3: Procedimento de medida da resistividade elétrica superficial do concreto nos corpos-de-prova prismáticos.

MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL	
Tempo	Medidas
0 até as 36 horas	A cada 1 hora
36 horas até o 7º dia	A cada 6 horas
8º dia até o 14º dia	A cada 12 horas
15º dia até 28º dia	A cada 24 horas
29º dia até o 91º dia	A cada 48 horas
241º dia até o 255º dia	A cada 48 horas
534º dia até o 547º dia	2 vezes na semana

As medidas de resistividade superficial do concreto foram realizadas utilizando um equipamento de laboratório apropriado para a medida da resistividade elétrica superficial, e que por ser de fácil usabilidade, tornou a atividade de monitoramento bastante simples. A Figura 3.3 mostra o equipamento de medição que foi utilizado para fazer as medidas de resistividade elétrica superficial do concreto.

Figura 3.3. Equipamento de medição utilizado nas medidas de resistividade elétrica superficial do concreto.



A técnica utilizada foi o “método dos 4 eletrodos” adaptado por Wenner para medir a resistividade superficial do concreto e originalmente empregada na determinação da resistividade elétrica dos solos. A técnica original para medidas de resistividade elétrica do solo é descrita na norma ASTM G57 - Standard Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method (ASTM, 2006). As medidas foram realizadas basicamente colocando-se os eletrodos do equipamento nas faces paralelas dos corpos-de-prova prismáticos, sendo que utilizou-se uma esponja macia nos eletrodos do equipamento para se obter um melhor contato entre os mesmos e as faces do concreto, e por

fim, foram aferidas as medidas de resistividade elétrica superficial do concreto que apareciam no visor do equipamento. A Figura 3.4 mostra o equipamento de medição aferindo o valor de resistividade elétrica superficial.

Figura 3.4. Equipamento de medição aferindo medidas de resistividade elétrica superficial do concreto em um dos corpos-de-prova prismático.



## 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1. 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 mesmo. Portanto, é de fundamental importância estudar e definir a dosagem correta para atender a resistência especificada adotada em cada projeto.

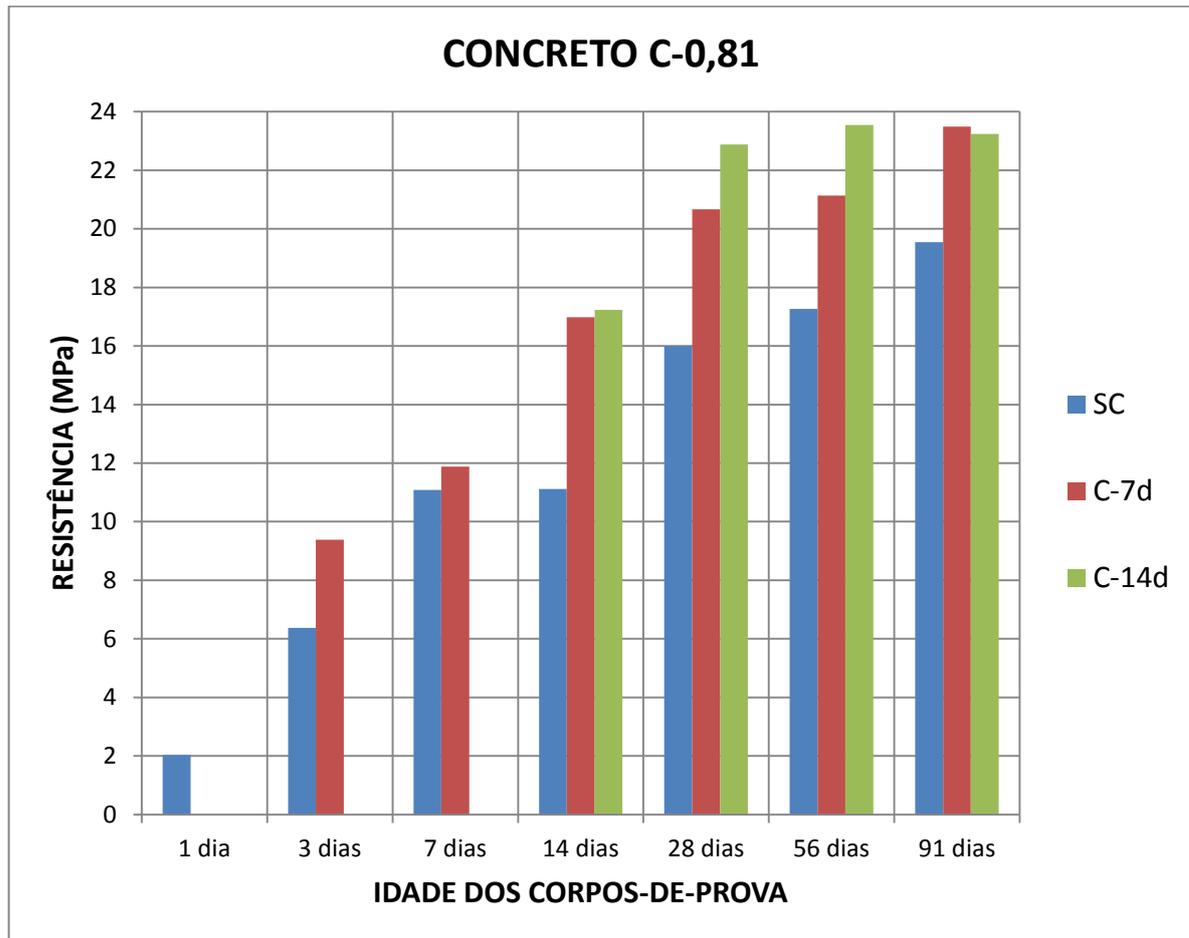
A Tabela 4.1 a seguir, apresenta os dados obtidos nos ensaios de resistência à compressão dos corpos-de-prova aos, 1; 3; 7;14; 28, 56 e 91 dias, respectivamente, para os três diferentes concretos que foram utilizados na pesquisa, ou seja, para o concreto C-0,81, que possui uma relação água /aglomerante de 0,81, para o concreto C-0,50, que possui uma relação água/aglomerante de 0,50 e para o concreto C-0,35, que possui uma relação água/aglomerante de 0,35.

Tabela 4.1 - 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	2,55	21,6	28,1	29,62	30,77	30,43	34,5
	Cura 7 dias	-	21,6	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 4.1 mostra os resultados médios obtidos para as resistências à compressão dos concretos com relação água/aglomerante de 0,81, para as idades de 1;3; 7; 14; 28; 56 e 91 dias.

Figura 4.1 - Resistências à compressão dos concretos com uma relação água aglomerante de 0,81.

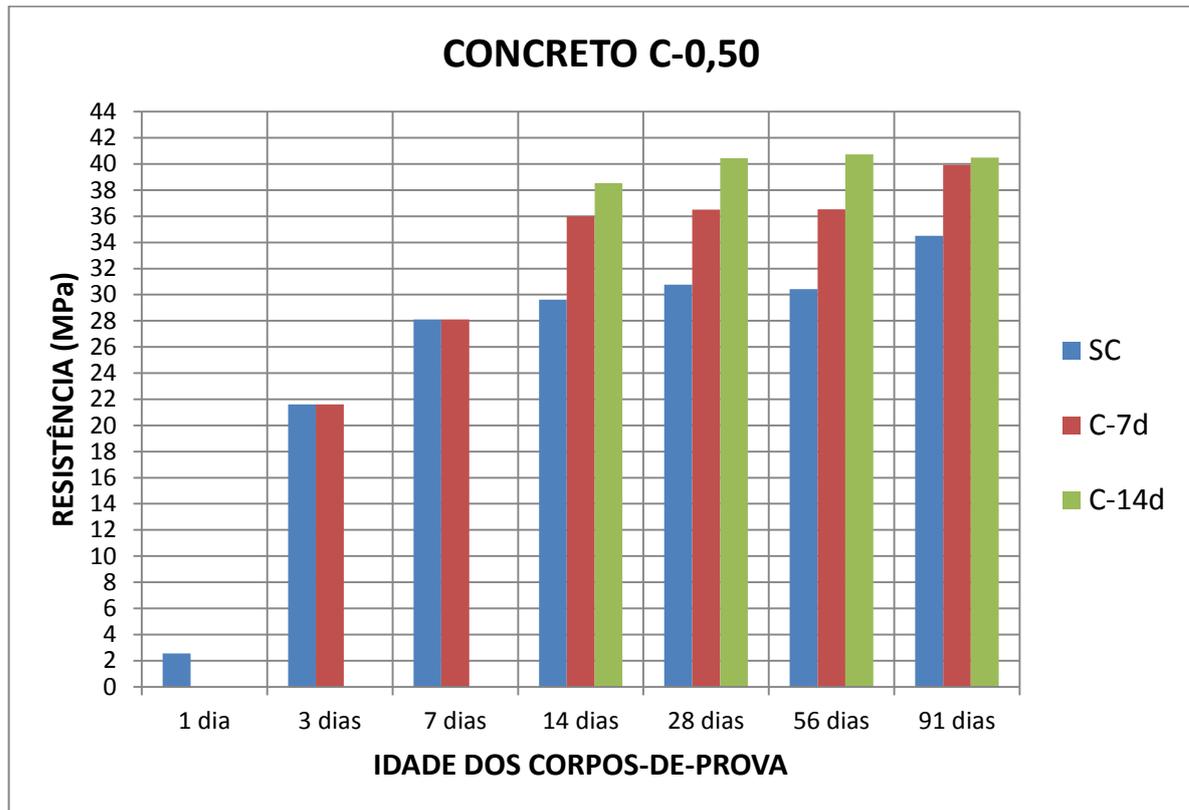


Legenda: SC = Sem cura;  
C-7d = Cura submersa por 7 dias;  
C-14d = Cura submersa por 14 dias.

Pode-se observar que o concreto que não sofreu influência da cura chegou aos 91 dias a uma resistência de 19,54 Mpa, bem próxima da esperada que era de 20 MPa. Os concretos que sofreram cura submersa por 7 e 14 dias ultrapassaram a resistência de 20 MPa aos 91 dias de idade, como era esperado. Pode-se notar com esse fato, a importância da cura, para que o concreto atinja a resistência esperada de projeto e sofra as reações de hidratação desejadas.

A Figura 4.2 mostra os resultados médios obtidos para as resistências à compressão dos concretos com relação água/aglomerante de 0,50, nas idades de 1,3, 7, 14, 28, 56 e 91 dias.

Figura 4.2 - Resistências à compressão dos concretos com uma relação água aglomerante de 0,50.

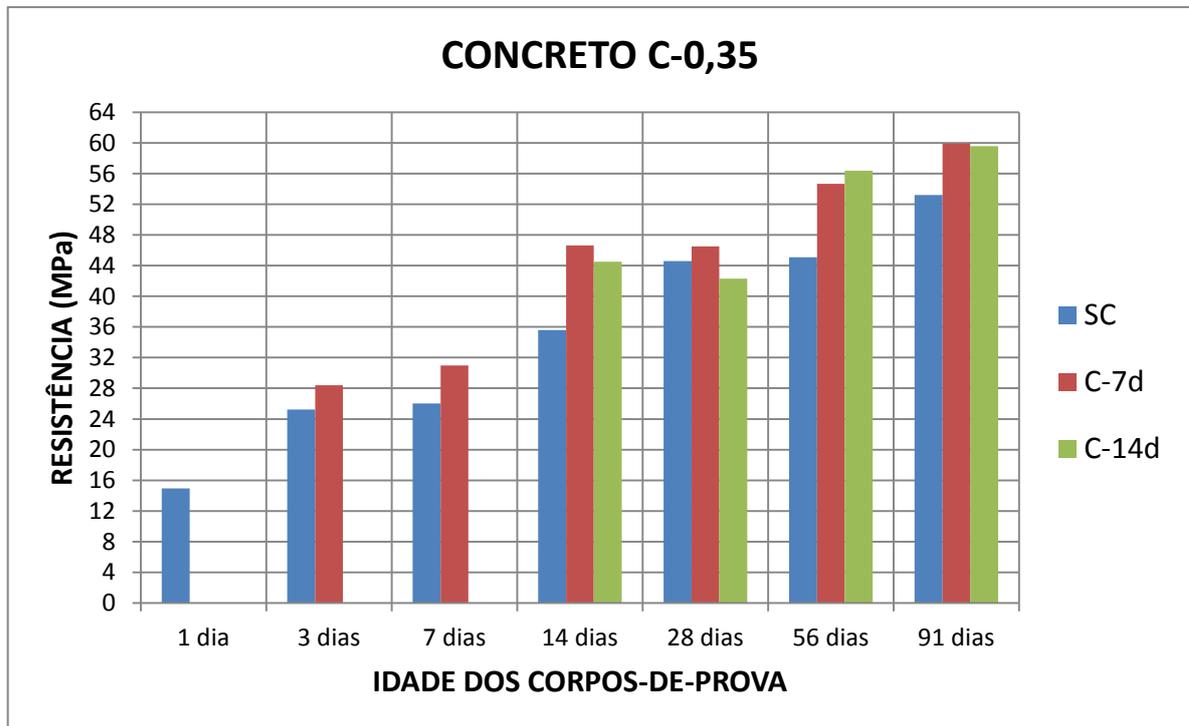


Legenda: SC = Sem cura;  
C-7d = Cura submersa por 7 dias;  
C-14d = Cura submersa por 14 dias.

Pode-se observar que o concreto que não sofreu influência da cura, chegou aos 91 dias a uma resistência de 34,50 Mpa, que é uma resistência um pouco menor que a esperada de 40 MPa. O concreto que sofreu cura submersa por 7 dias, chegou a uma resistência de 39,92 MPa, que é uma resistência extremamente próxima a de 40 MPa. Já o concreto que sofreu cura submersa por 14 dias, ultrapassou a resistência esperada de 40 MPa aos 91 dias de idade, com um valor de 40,49 MPa, o que era esperado.

As resistências à compressão do concreto com uma relação água/aglomerante de 0,35, são mostradas na Figura 4.3, para as idades de 1; 3; 7; 14; 28; 56 e 91 dias., sem cura, com cura submersa por 7 dias e com cura submersa por 14 dias.

Figura 4.3 - Resistências à compressão dos concretos com uma relação água aglomerante de 0,35.



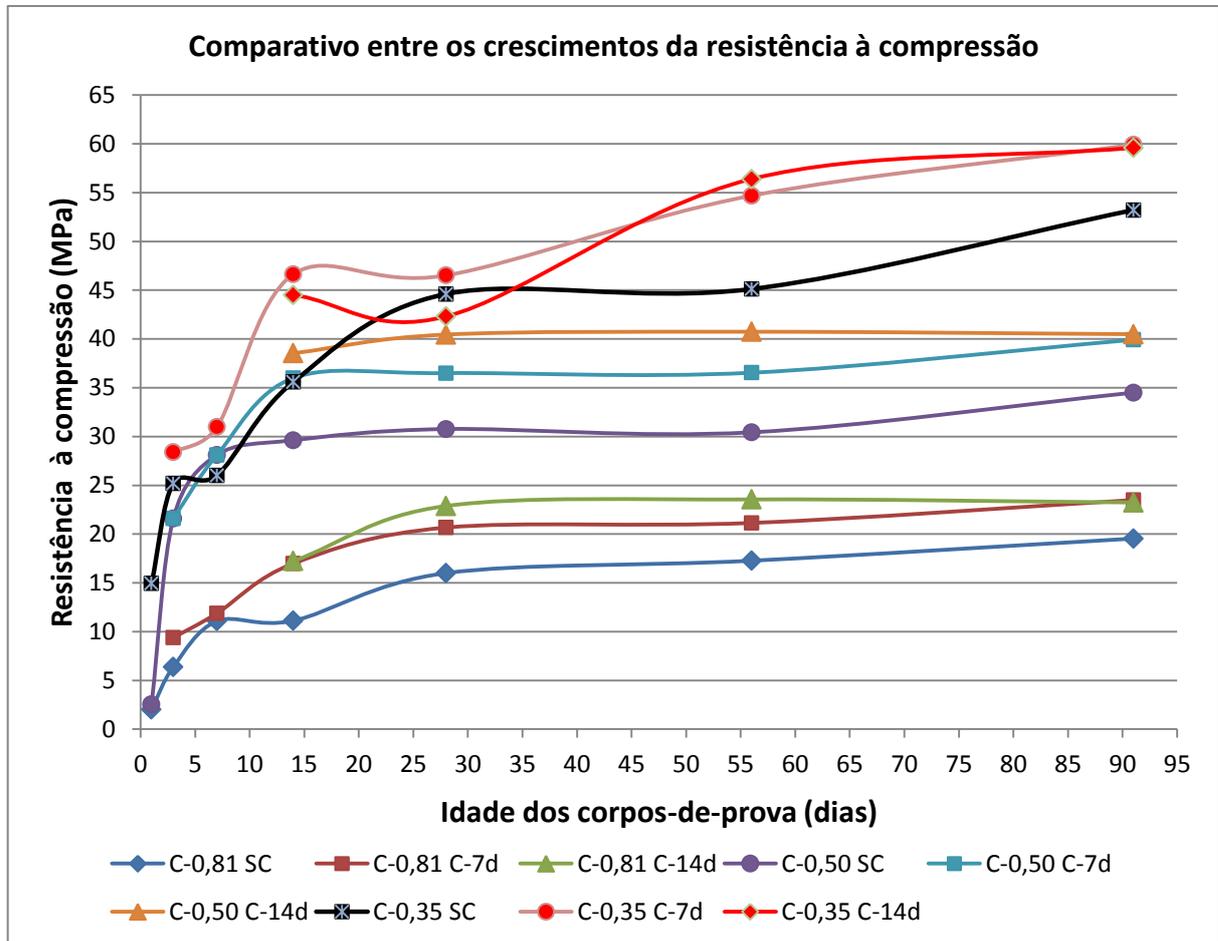
Legenda: SC = Sem cura;  
 C-7d = Cura submersa por 7 dias;  
 C-14d = Cura submersa por 14 dias.

Observa-se que o concreto que não sofreu influência da cura submersa, chegou aos 91 dias a uma resistência de 53,22 MPa, que é uma resistência um pouco menor que a esperada de 60 MPa. O concreto que sofreu cura submersa por 7 dias, chegou a uma resistência de 59,91 MPa, que é uma resistência extremamente próxima a de 60 MPa, o mesmo valendo para o concreto que sofreu cura submersa por 14 dias, que chegou a uma resistência de 59,59 MPa, também bem próximo ao valor esperado de 60 MPa.

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, e observa-se que os corpos-de-prova que não foram submetidos à cura, ficaram mais distantes das resistências projetadas.

A Figura 4.4 mostra uma comparação entre os crescimentos das resistências à compressão dos corpos-de-prova sem cura, com cura submersa por 7 dias e com cura submersa por 14 dias, que tinham a princípio resistências projetadas de 20, 40 e 60 MPa, respectivamente.

Figura 4.4 - Comparativo entre os crescimentos das resistências à compressão axial dos concretos com relação água/aglomerante de 0,81, 0,50 e 0,35.



#### 4.2. RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL NAS PRIMEIRAS 24 HORAS

A resistividade elétrica superficial foi determinada pelo método dos quatro eletrodos ou método de Wenner, que é a forma mais comumente utilizada para medir a resistividade elétrica superficial do concreto, e que garante uma grande praticidade nas medidas.

Nesta etapa do projeto experimental foram usados os corpos-de-prova prismáticos com as resistências projetadas de 20, 40 e 60 MPa, respectivamente. A resistividade elétrica superficial foi medida, desde o concreto em seu estado fresco, até o mesmo se encontrar em estado endurecido.

As Figuras 4.5, 4.6 e 4.7 apresentam os resultados da resistividade elétrica superficial do concreto no estado fresco, desde a primeira hora até 24 horas após a concretagem. As medidas foram realizadas de hora em hora e estão apresentadas a seguir, para cada tipo de concreto com relação água/aglomerante 0,81, 0,50 e 0,35.

Figura 4.5 - Evolução da resistividade elétrica superficial do concreto com relação água/aglomerante de 0,81 nas primeiras 24 horas.

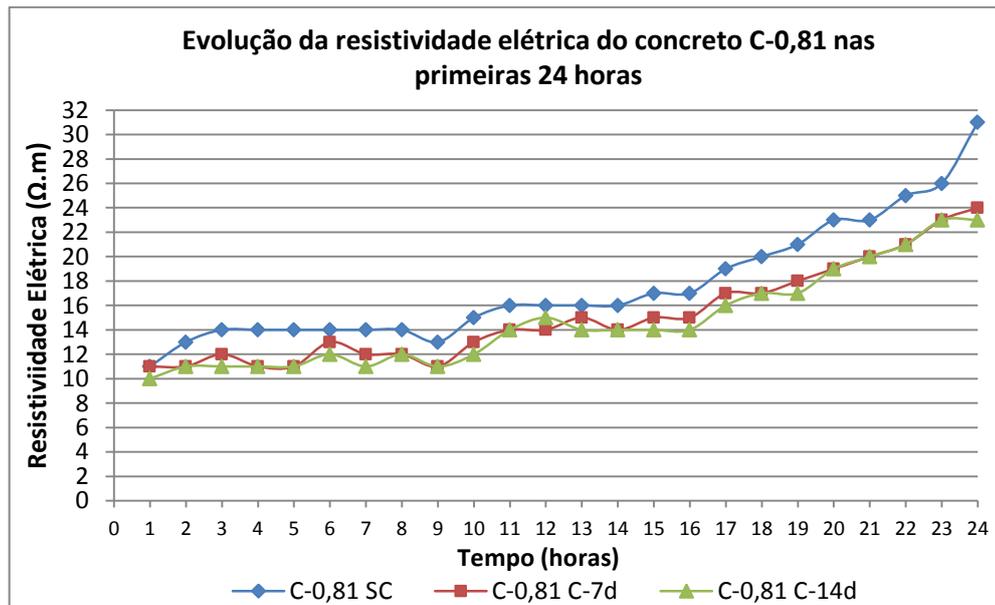


Figura 4.6 - Evolução da resistividade elétrica superficial do concreto com relação água/aglomerante de 0,50 nas primeiras 24 horas.

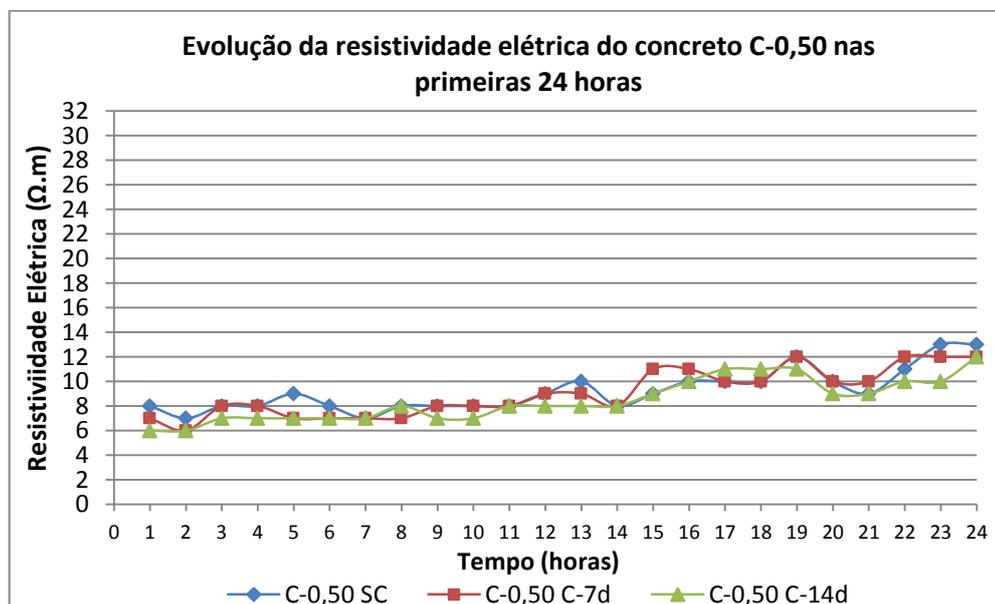
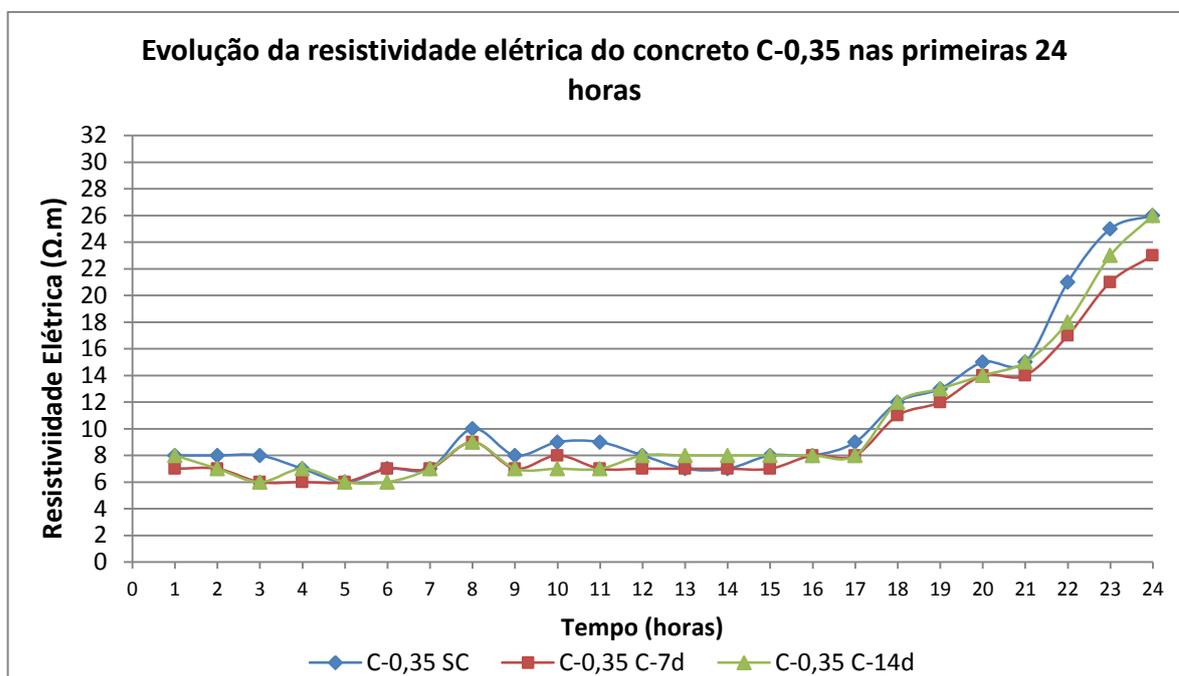


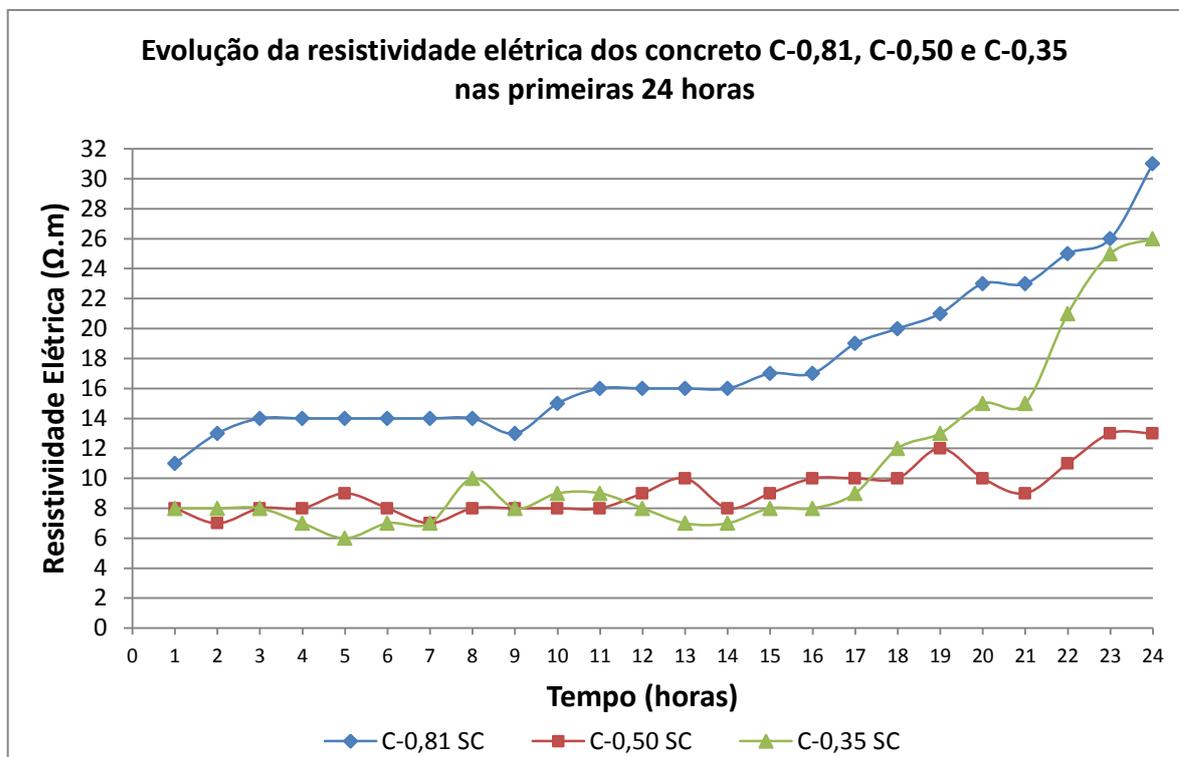
Figura 4.7 - Evolução da resistividade elétrica superficial do concreto com relação água/aglomerante de 0,35 nas primeiras 24 horas.



Nota-se que os comportamentos dos primeiros resultados de resistividade elétrica superficial dos concretos, após uma hora depois da concretagem até as 24 horas seguintes, mostram que o concreto C-0,81 de 20 MPa, é o que apresenta os maiores valores resistividade elétrica, tanto para os que não sofreram cura, quanto para os que sofreram cura submersa por 7 e 14 dias. Mas isto não significa que este concreto possui uma melhor qualidade, e sim que o mesmo perdeu água mais rapidamente em relação aos concretos com cura submersa C-0,50 (40 MPa) e C-0,35 (60 MPa), devido principalmente a porosidade, que implica nas relações inerentes ao tamanho e conectividade dos poros. Os concretos C-0,50 (40 MPa) e C-0,35 (60 MPa), praticamente começaram com os mesmos valores de resistividade elétrica nas primeiras horas, como pode ser observado nas Figuras 4.6 e 4.7, mas com o passar do tempo pode ser observado um ganho rápido de resistividade elétrica do concreto C-0,35, comparado com o concreto C-0,50.

A Figura 4.8 apresenta o perfil da evolução da resistividade elétrica dos três tipos de concreto que não sofreram cura, nas primeiras 24 horas e medindo-se cada hora.

Figura 4.8 - Comparativo entre a evolução da resistividade elétrica superficial dos concretos com relação água/aglomerante de 0,81, 0,50 e 0,35 sem cura nas primeiras 24 horas.



Pode-se observar que o concreto C-0,81 (20 MPa) 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. 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 (40 MPa) e C-0,35 (60MPa), 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.

O comportamento dos concretos que sofreram cura submersa por 7 e 14 dias está apresentado nas Figuras 4.9 e 4.10, respectivamente. O comportamento da resistividade elétrica é semelhante ao que não sofreu cura, mas nota-se que ao final das 24 horas, o concreto C-0,35, com cura submersa por 14 dias, apresenta um valor maior de resistividade

elétrica que o concreto C-0,81, com cura submersa por 14 dias, o que demonstra que suas características microestruturais estão se tornando melhores que o do concreto de 20 MPa.

Figura 4.9 - Comparativo entre a evolução da resistividade elétrica superficial dos concretos com relação água/aglomerante de 0,81, 0,50 e 0,35 com cura submersa por 7 dias nas primeiras 24 horas.

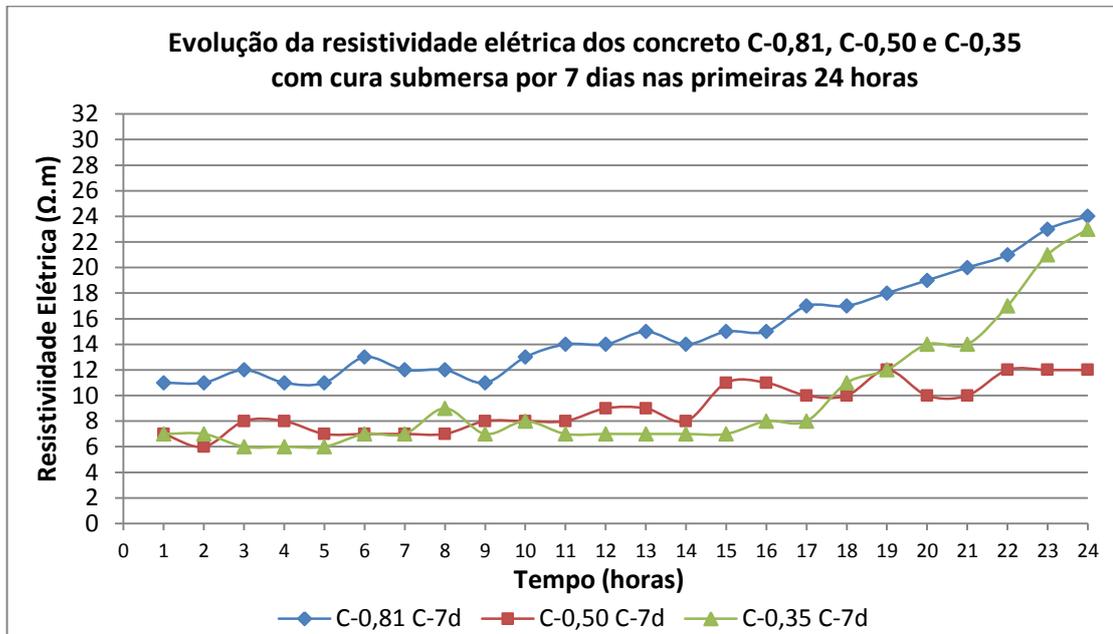
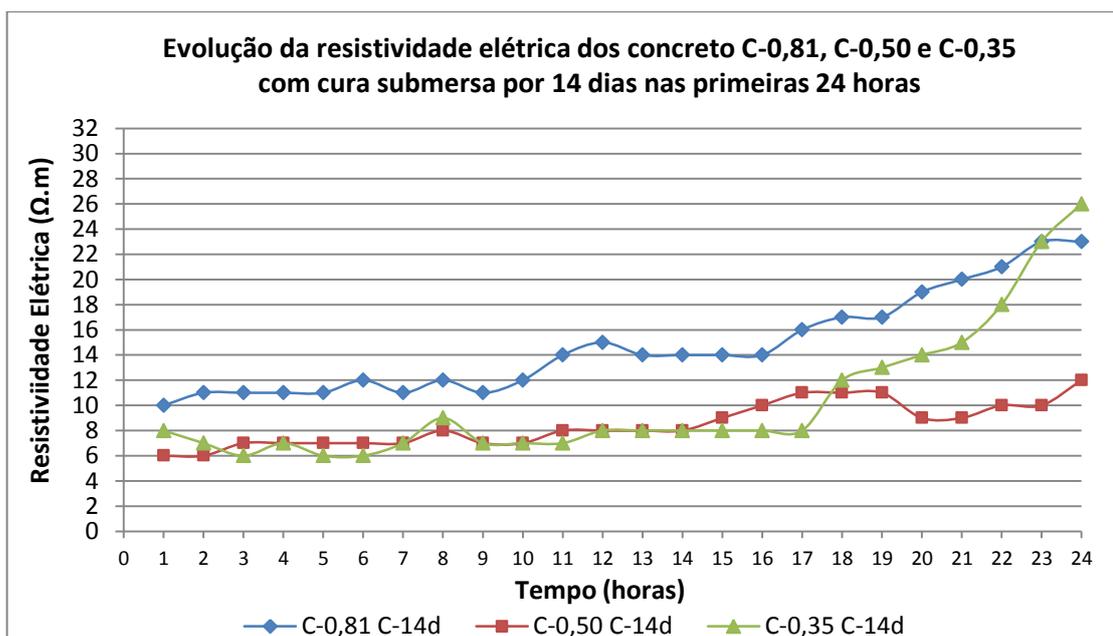


Figura 4.10 - Comparativo entre a evolução da resistividade elétrica superficial dos concretos com relação água/aglomerante de 0,81, 0,50 e 0,35 com cura submersa por 14 dias nas primeiras 24 horas.



### 4.3. RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL DO 1º DIA ATÉ O 7º DIA

As Figuras 4.11, 4.12 e 4.13 apresentam os resultados da resistividade elétrica da 24ª hora (1º dia) até as 168 horas (7º dia), de forma separada, por cada tipo de concreto e medindo-se nas primeiras 6 horas, de hora em hora (24 até 30 horas), e após esse período a cada 6 horas (30 até 168).

Figura 4.11 - Evolução da resistividade elétrica do concreto C-0,81, de 1 a 7 dias.

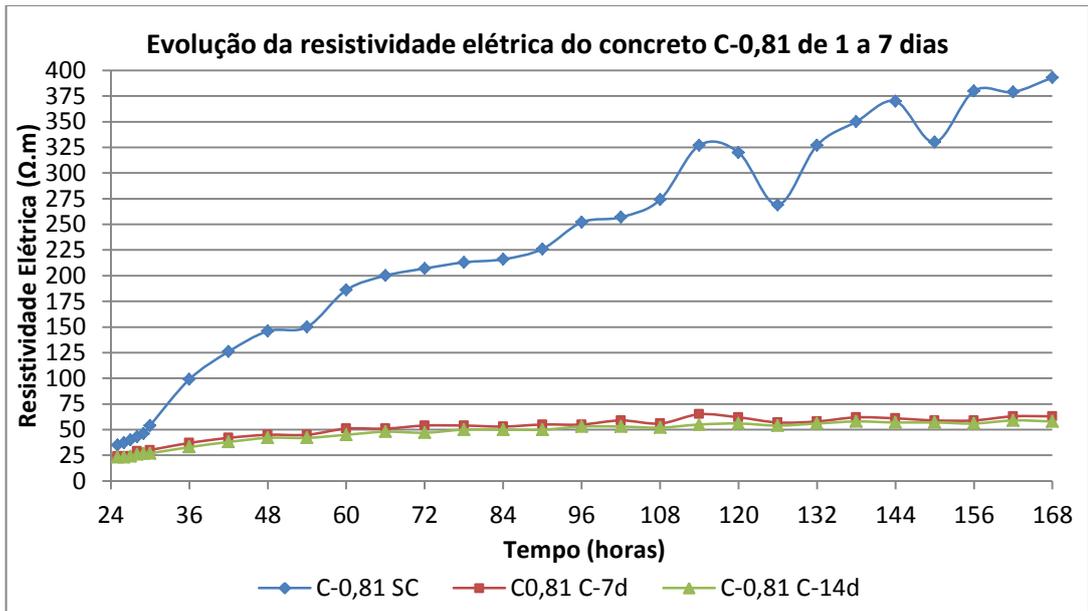


Figura 4.12 - Evolução da resistividade elétrica do concreto C-0,50, de 1 a 7 dias.

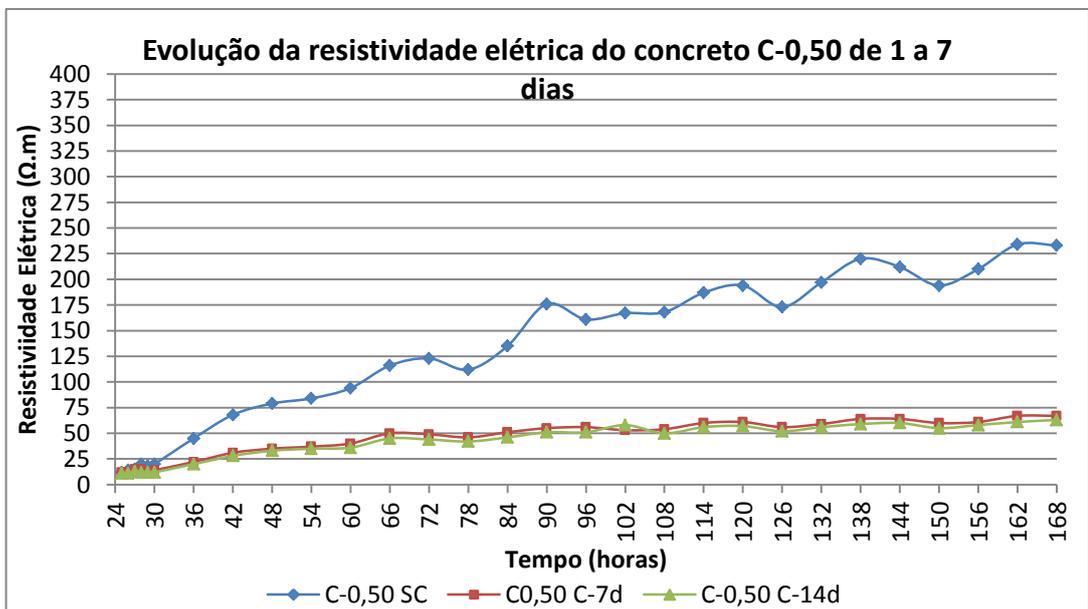
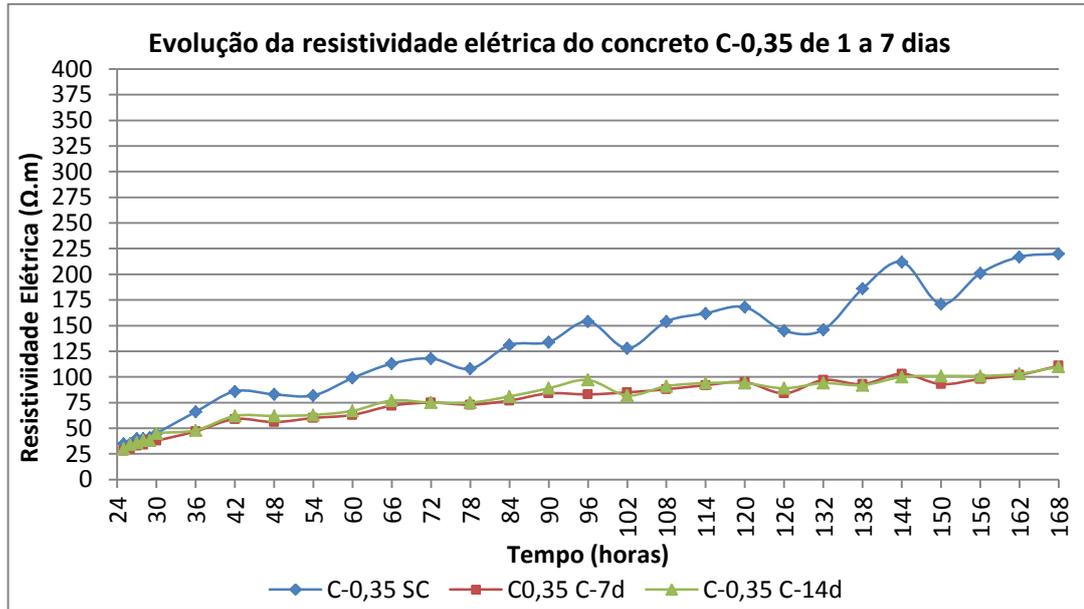


Figura 4.13 - Evolução da resistividade elétrica do concreto C-0,35, de 1 a 7 dias.



Nota-se que os resultados da resistividade elétrica superficial dos concretos, após um dia até os 7 dias, continuam bem parecidos com os resultados anteriores das primeiras 24 horas, pelos mesmos motivos apresentados anteriormente.

Observa-se que, como já foram mudadas as condições de cura do concreto, há 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, parte da água permite um adequado adensamento no momento inicial e posteriormente sai do concreto por evaporação. Dessa forma, deve-se controlar essa saída de água por meio da cura, para que a mesma não aconteça com muita velocidade, porque quando a cura é controlada, ela influencia o tamanho e refinamento dos poros e garante um concreto com maior qualidade.

Na Figura 4.14, observa-se um comparativo da resistividade elétrica das três misturas que não foram submetidas à cura e nas Figuras 4.15 e 4.16, mostra-se o comparativo da resistividade elétrica superficial das três misturas que foram submetidas à cura de 7 e 14 dias, respectivamente, entre as idades de 1 a 7 dias.

Figura 4.14- Comparativo entre a evolução da resistividade elétrica superficial dos concretos com relação água/aglomerante de 0,81, 0,50 e 0,35, sem cura, de 1 até 7 dias.

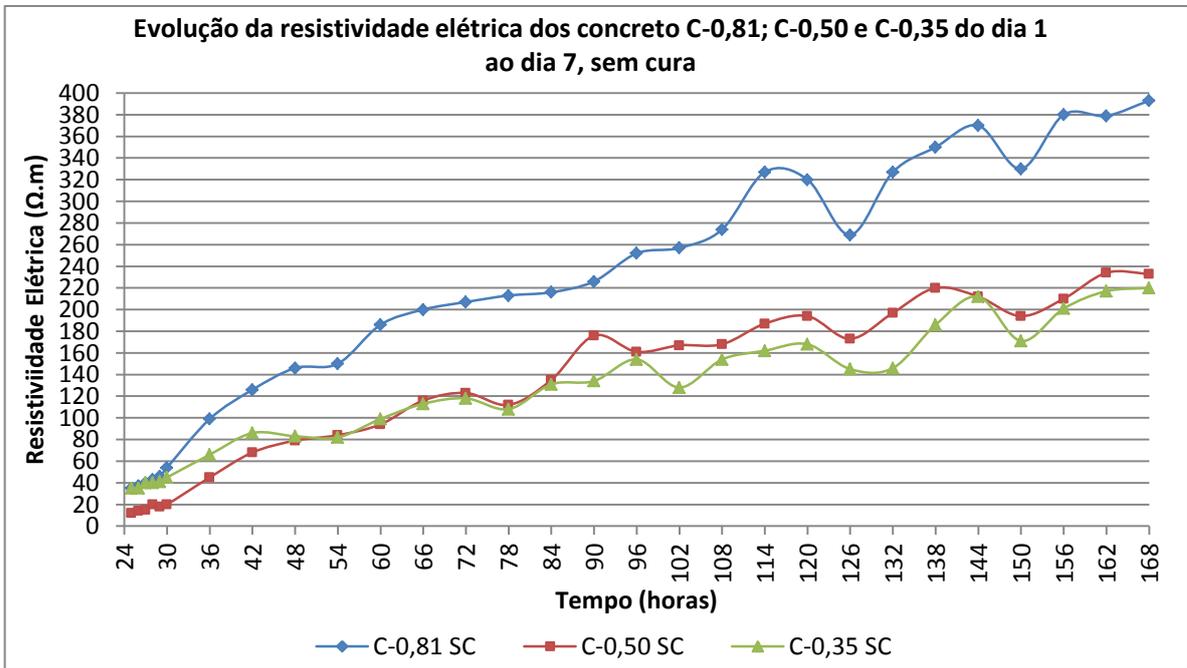


Figura 4.15- Comparativo entre a evolução da resistividade elétrica superficial dos concretos com relação água/aglomerante de 0,81, 0,50 e 0,35, com cura submersa por 7 dias, de 1 até 7 dias.

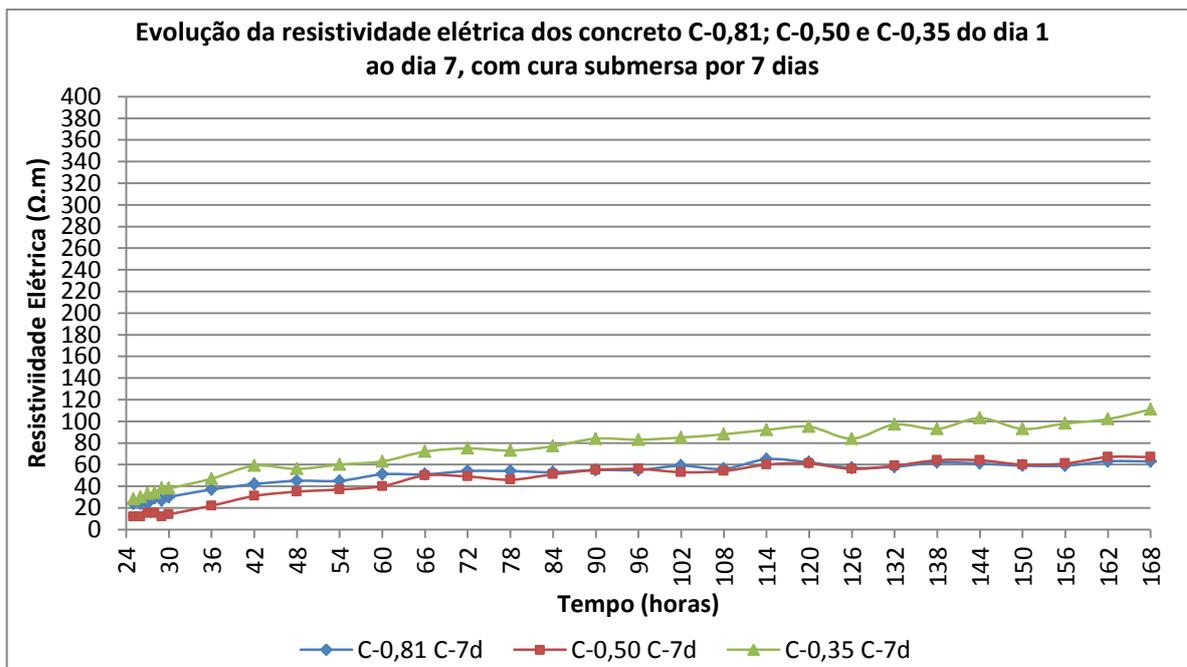
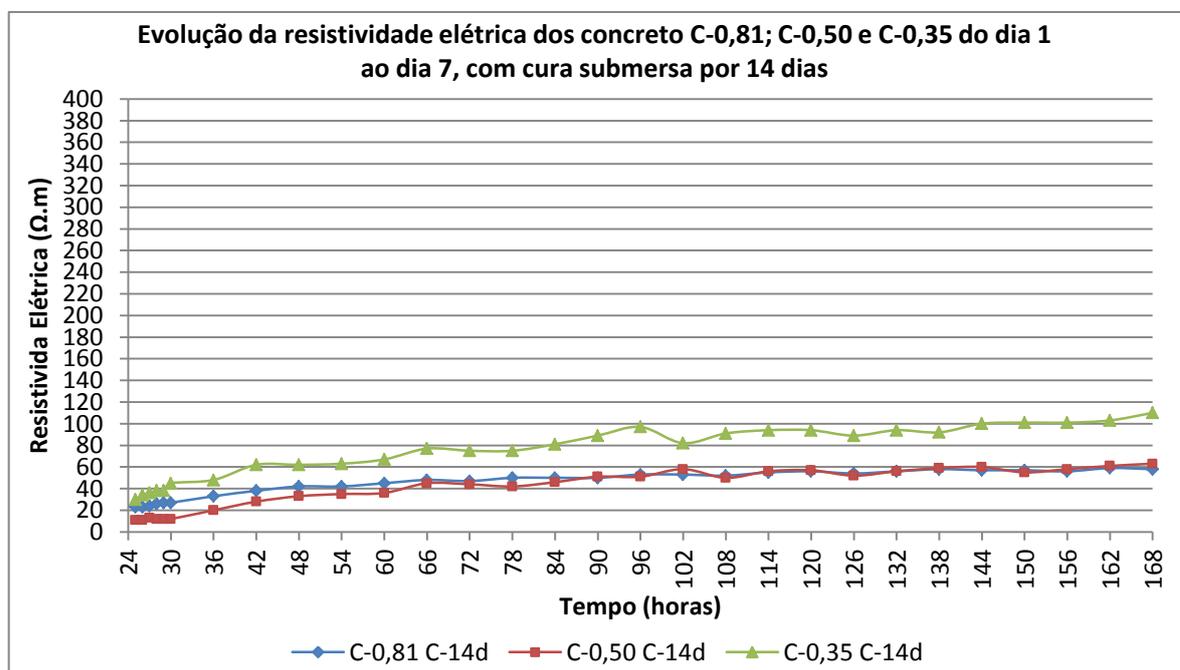
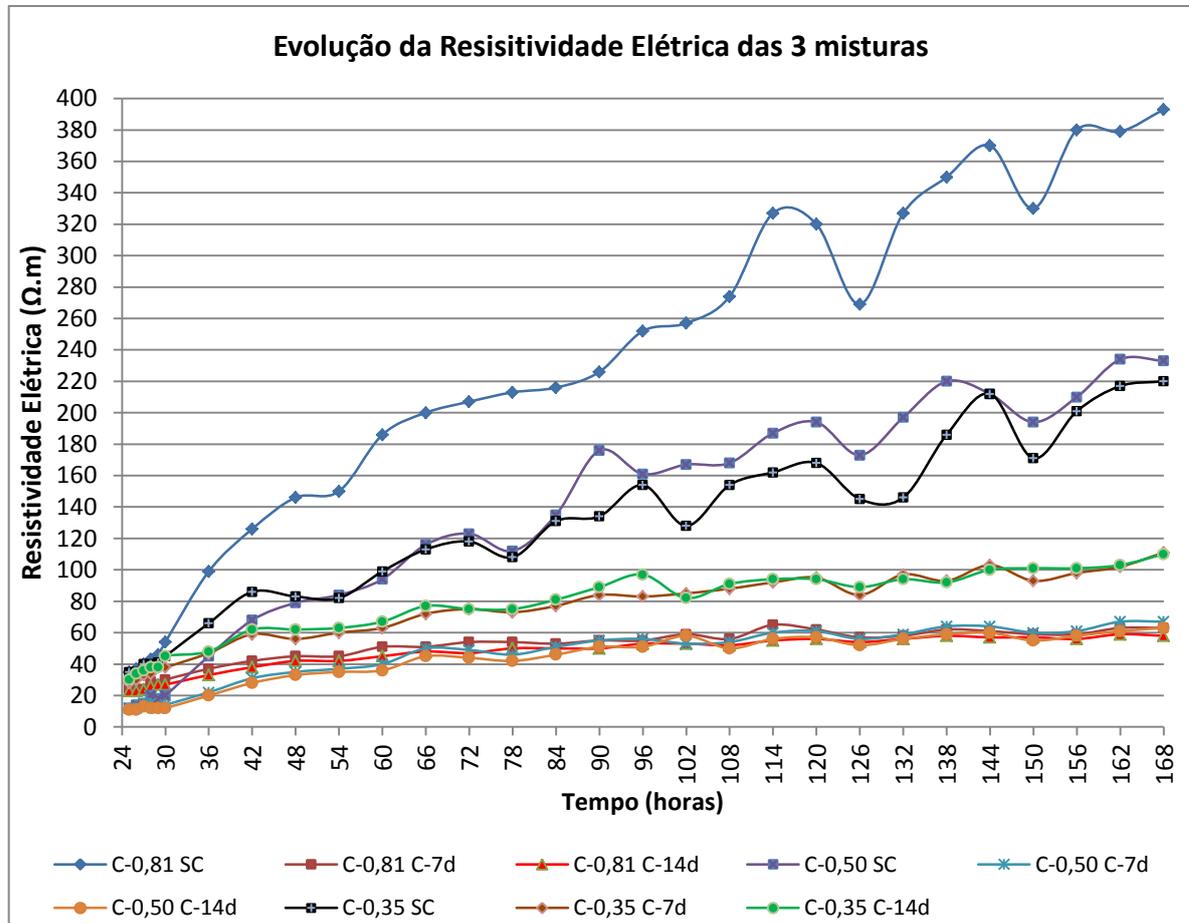


Figura 4.16- Comparativo entre a evolução da resistividade elétrica superficial dos concretos com relação água/aglomerante de 0,81, 0,50 e 0,35, com cura submersa por 7 dias, de 1 até 7 dias.



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 4.17 visualiza-se que os concretos que estão no ambiente de laboratório são os que têm maiores valores de resistividade elétrica, e isso acontece justamente devido à perda de água, pois existe uma evaporação da água da mistura, que acontece normalmente quando os corpos-de-prova não sofrem o processo da cura e não há uma hidratação satisfatória da pasta. Nos concretos nos quais a cura é realizada, observa-se que os valores de resistividade são bem menores, pois não há uma perda acentuada de água na mistura, fato que ocorre com os concretos sem cura, mas isso não significa que esses concretos tenham uma pior qualidade e sim que existe ainda muita água nos poros destes concretos, e é essa água a responsável pela condutividade elétrica dos corpos-de-prova, e que por sua vez garante os baixos valores de resistividade elétrica superficial aferidos.

Figura 4.17- Evolução da resistividade elétrica superficial das 3 misturas sem cura, com cura por 7 dias e com cura por 14 dias.



#### 4.4. RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL DOS 7 AOS 14 DIAS

Nesta etapa da pesquisa a condição de cura do concreto com cura submersa por 7 dias foi atingida.

Nas Figuras 4.18, 4.19 e 4.20 são apresentados os resultados da resistividade elétrica superficial dos corpos-de-prova, das 168 horas (7 dias) às 336 horas (14 dias), separados por cada tipo de concreto (C-0,81, C-0,50 e C-0,35), por cada condição de cura e medindo-se a cada 12 horas.

Figura 4.18 - Evolução da resistividade elétrica do concreto C-0,81, de 7 a 14 dias.

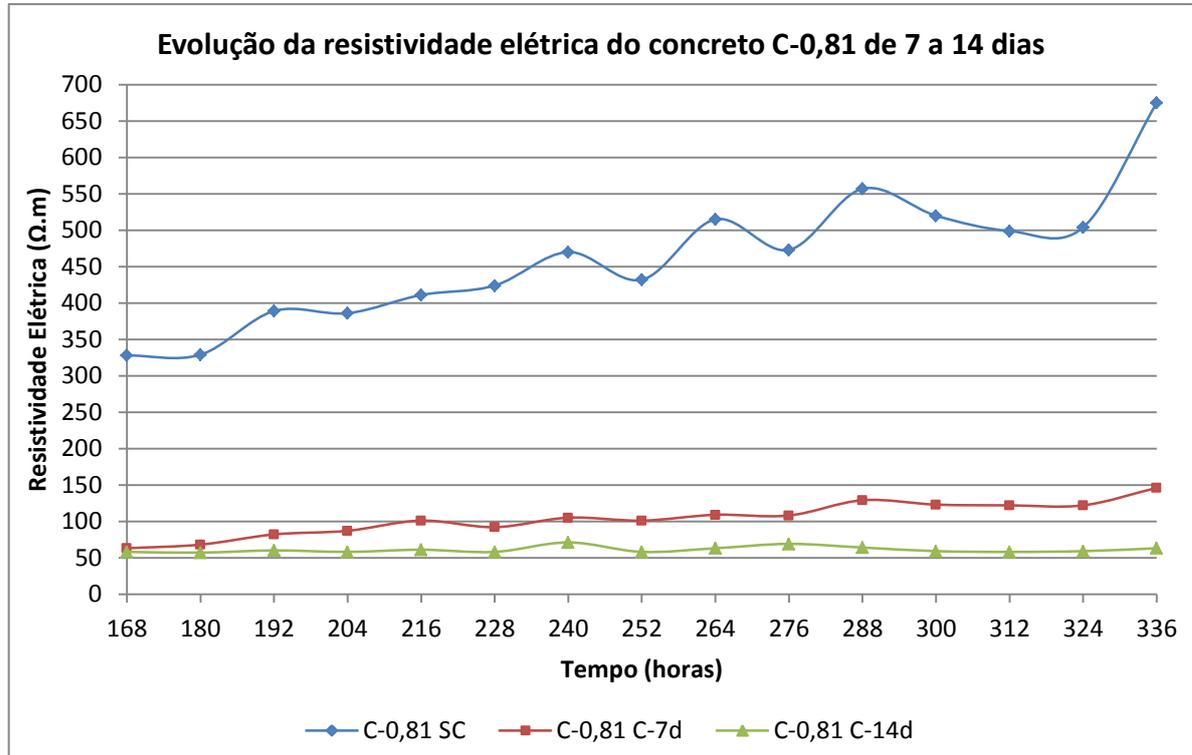


Figura 4.19 - Evolução da resistividade elétrica do concreto C-0,50, de 7 a 14 dias.

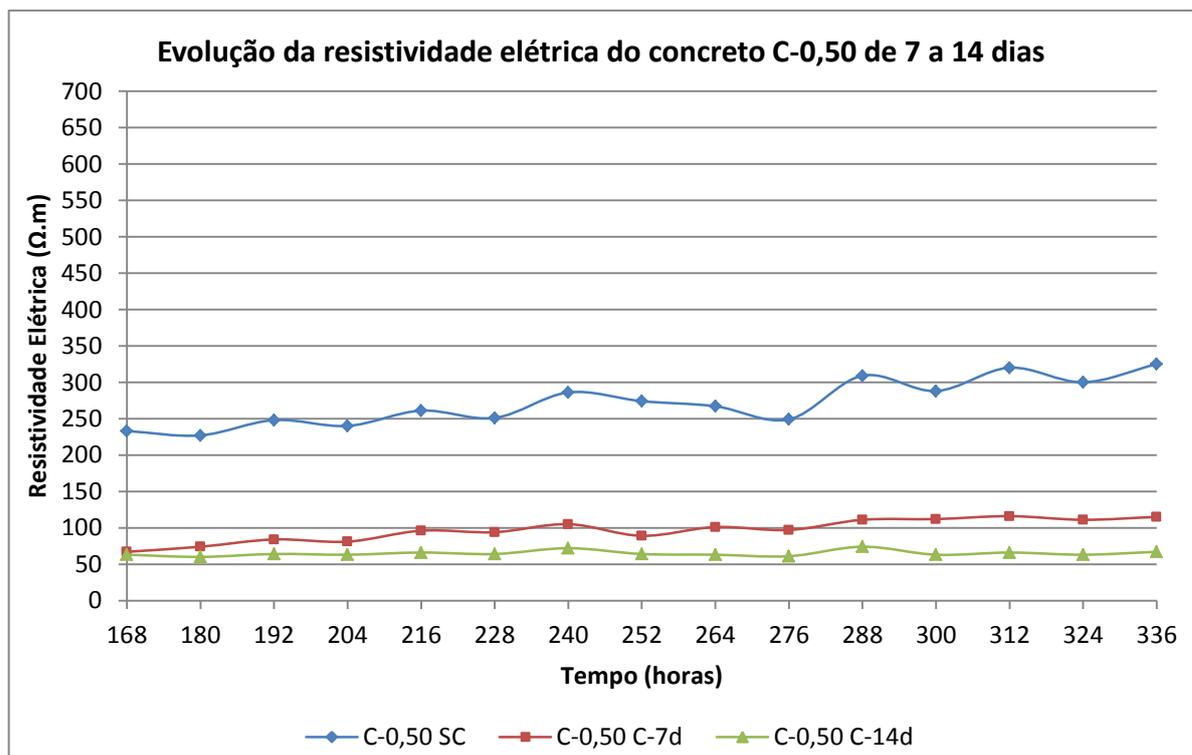
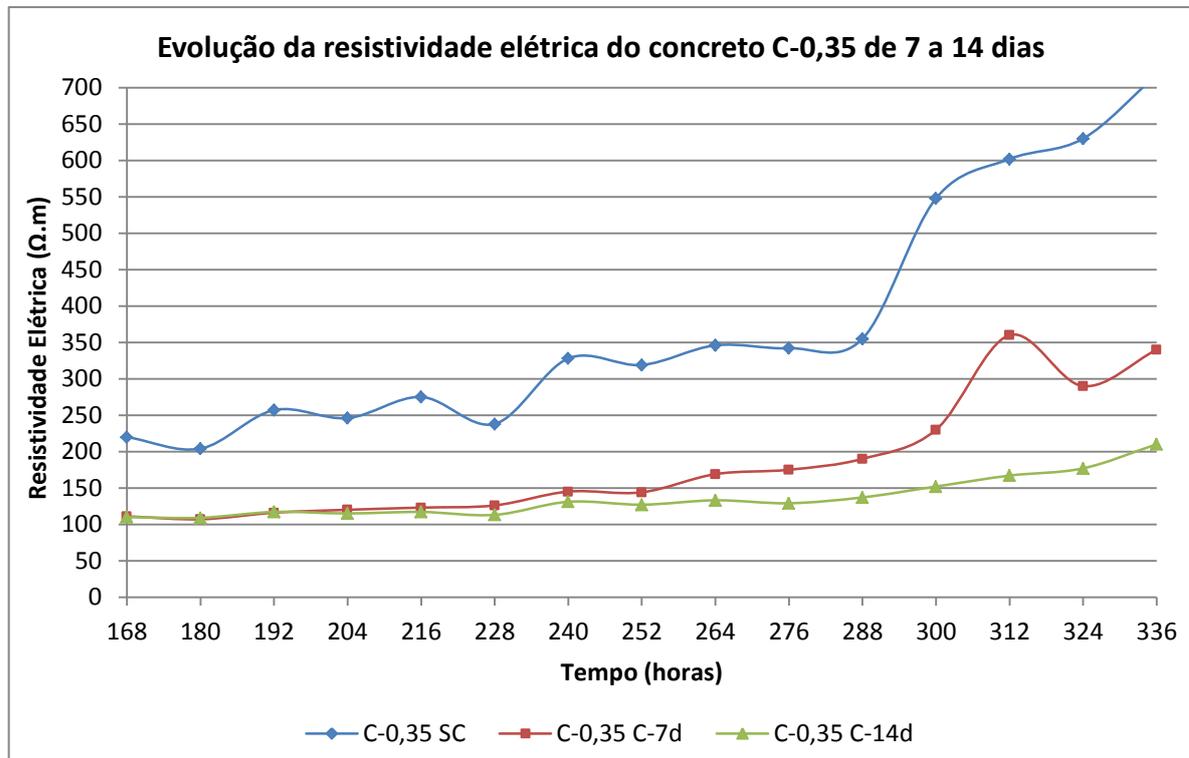


Figura 4.20 - Evolução da resistividade elétrica do concreto C-0,35, de 7 a 14 dias.



As Figuras 4.18 a 4.20 mostram a influência da cura, que controla a umidade interna do concreto, sobre a resistividade elétrica. Quanto maior a umidade interna, ou seja, para os concretos submetidos a cura submersa, menor é a resistividade elétrica superficial.

Na Figura 4.21, observa-se o comparativo da resistividade elétrica das três misturas com diferentes relações água/aglomerante e que não foram submetidas à cura. Nota-se que a resistividade elétrica do concreto C-0,81 começa maior, mas quando o tempo está por volta de 300 horas, o concreto C-0,35 atinge valores maiores de resistividade elétrica, o que já era esperado, pois a porosidade deste é bem menor. Por algum motivo o concreto C-050 continua ainda com um valor de resistividade elétrica abaixo do concreto C-0,81. A Figura 4.22, mostra o comparativo da resistividade elétrica superficial das três misturas que foram submetidas à cura de 7 dias, e a Figura 4.23, mostra o comparativo da resistividade elétrica superficial das três misturas que foram submetidas à cura de 14 dias entre as idades de 7 a 14 dias.

Figura 4.21 - Comparativo entre a evolução da resistividade elétrica superficial dos concretos com relação água/aglomerante de 0,81, 0,50 e 0,35, sem cura, de 7 até 14 dias.

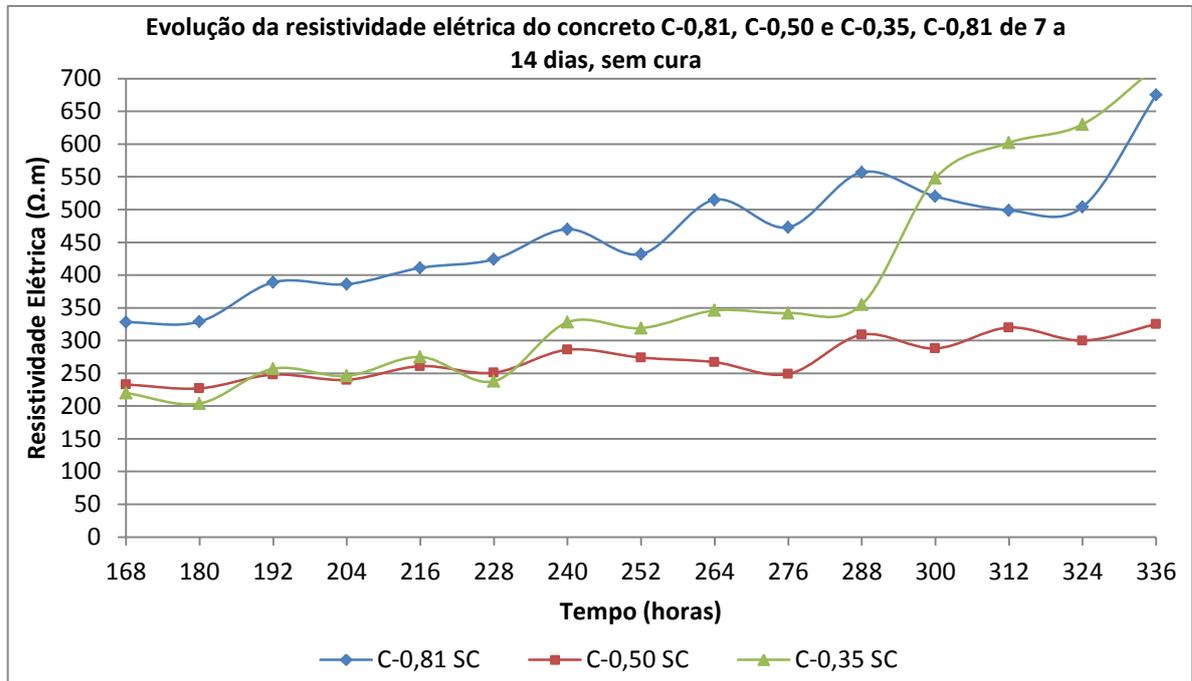


Figura 4.22 - Comparativo entre a evolução da resistividade elétrica superficial dos concretos com relação água/aglomerante de 0,81, 0,50 e 0,35, com cura submersa por 7 dias, de 7 até 14 dias.

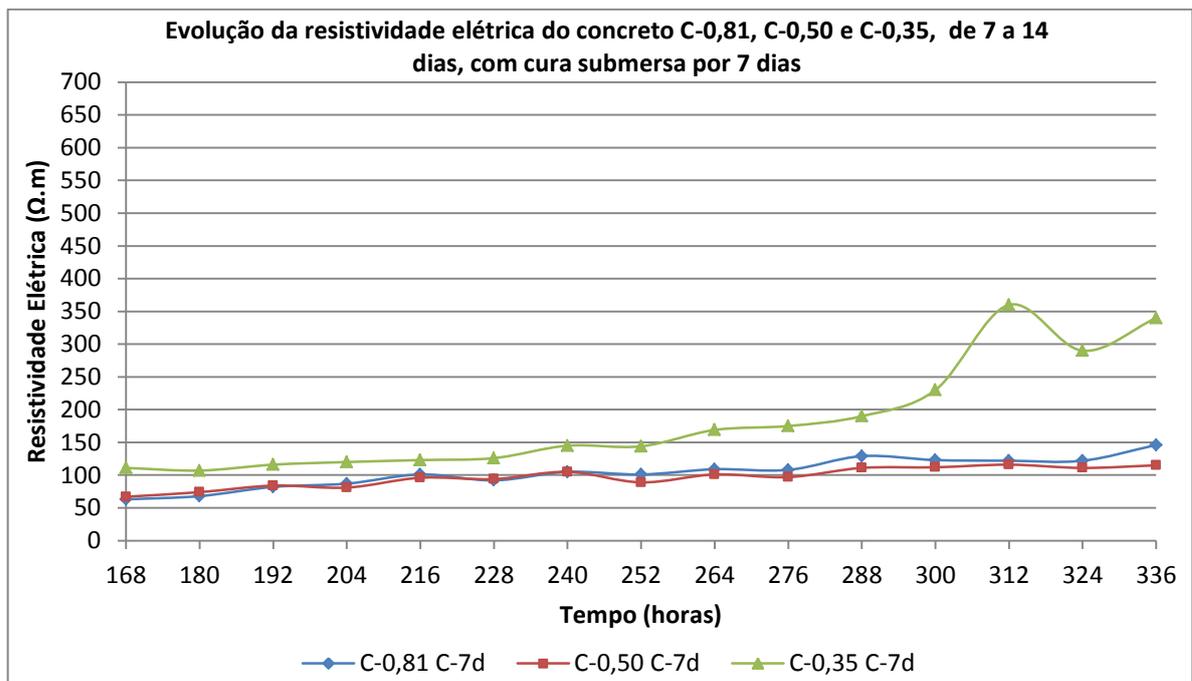
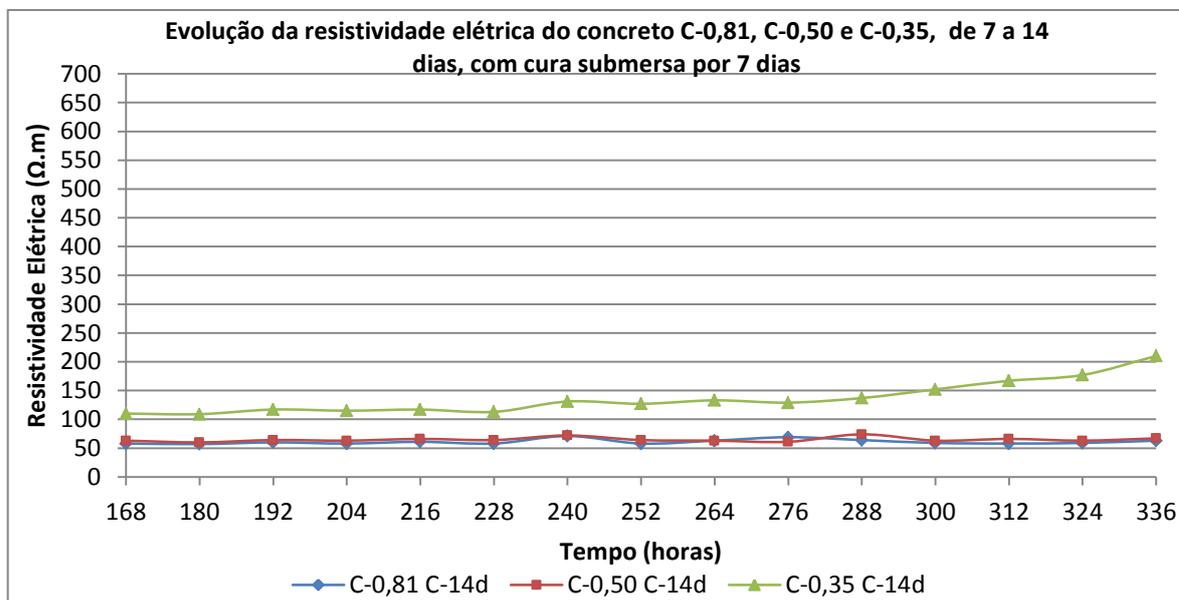


Figura 4.23 - Comparativo entre a evolução da resistividade elétrica superficial dos concretos com relação água/aglomerante de 0,81, 0,50 e 0,35, com cura submersa por 14 dias, de 7 até 14 dias.



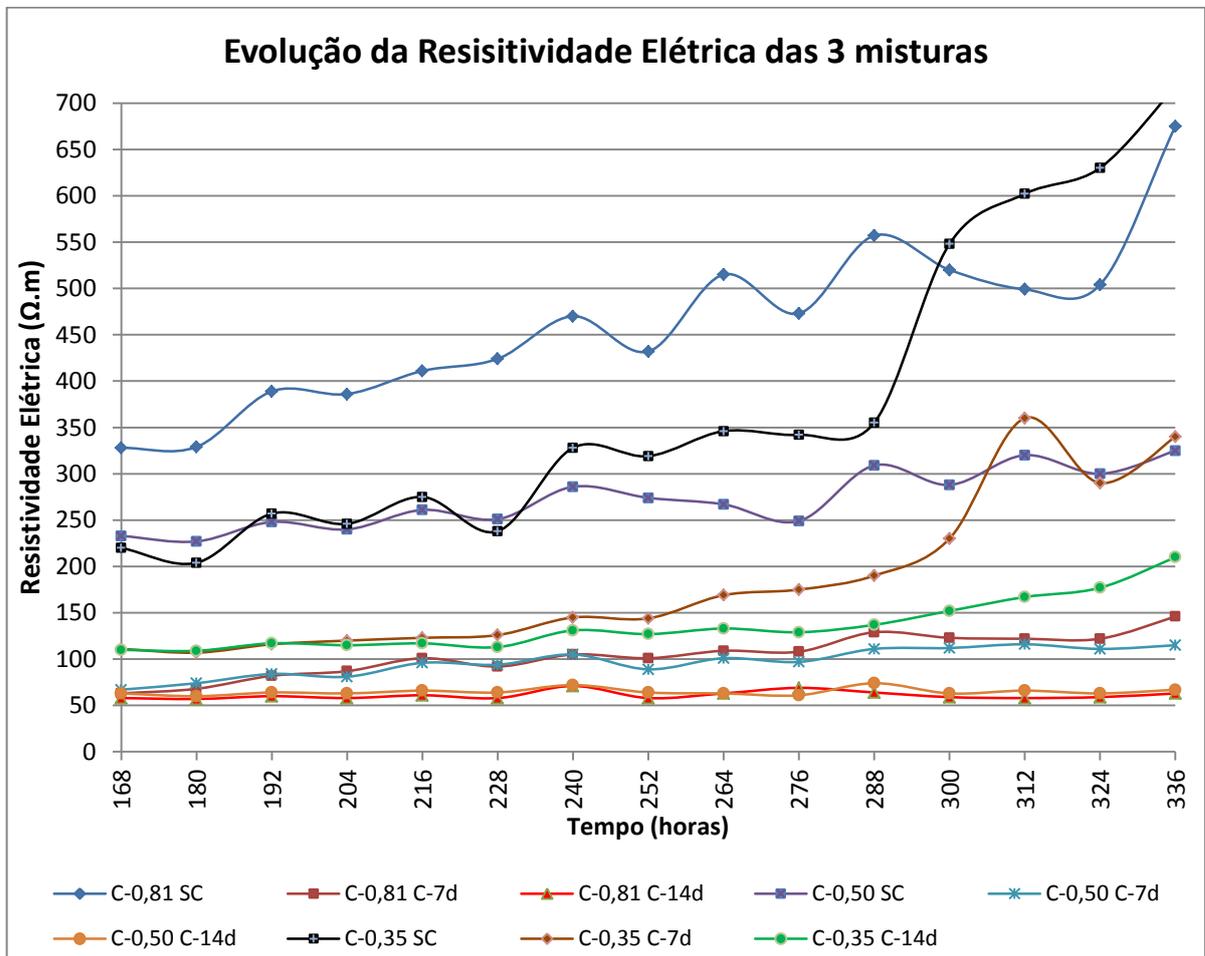
As Figuras 4.21, 4.22 e 4.23 mostram que os maiores valores de resistividade elétrica são os dos concretos que não foram submetidos à cura, sendo que os concretos C-0,81 e C-0,35 são os que possuem os maiores valores resistividade, podendo-se considerar que o concreto C-0,81 tem valores elevados de resistividade 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 4.22), mas que depois ficaram no ambiente de laboratório, observou-se um ganho de resistividade elétrica em relação aos concretos que não foram curados (Figura 4.21), devido ao controle por 7 dias da saída da água, mas que depois por estar no ambiente de laboratório fez com que a água contida nos poros evaporasse e aumentasse os valores de resistividade elétrica.

A Figura 4.23 mostra os valores de resistividade elétrica superficial dos concretos que ainda estão submetidos a cura submersa. Nota-se claramente, que a os concretos C-0,35 tem uma maior qualidade que os C-0,81 e C-0,50, e como estão submetidos ainda à cura, os valores de resistividade elétrica dos mesmos tendem a ser maiores que os demais, o que pode ser comprovado no gráfico.

Na Figura 4.24, visualiza-se o perfil da evolução da resistividade elétrica dos três tipos de concreto, com as três diferentes condições ambientais a que foram submetidos. Observa-se que à medida que se aproxima dos 14 dias, o concreto com C-0,35 sem cura, atinge valores de resistividade elétrica 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 C-0,35 apresenta maiores valores de resistividade elétrica, a medida que se aproximam os 14 dias.

Figura 4.24- Evolução da resistividade elétrica superficial das 3 misturas sem cura, com cura por 7 dias e com cura por 14 dias.



#### 4.5. RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL DOS 14 AOS 91 DIAS

Nas Figuras 4.25 a 4.27 são apresentados os resultados da resistividade elétrica superficial das 336 horas (14 dias) às 2184 horas (91 dias), separados por cada tipo de concreto (C-0,81, C-0,50 e C-0,35), por cada condição de cura e medindo-se a cada 48 horas.

Figura 4.25 - Evolução da resistividade elétrica do concreto C-0,81, de 14 a 91 dias.

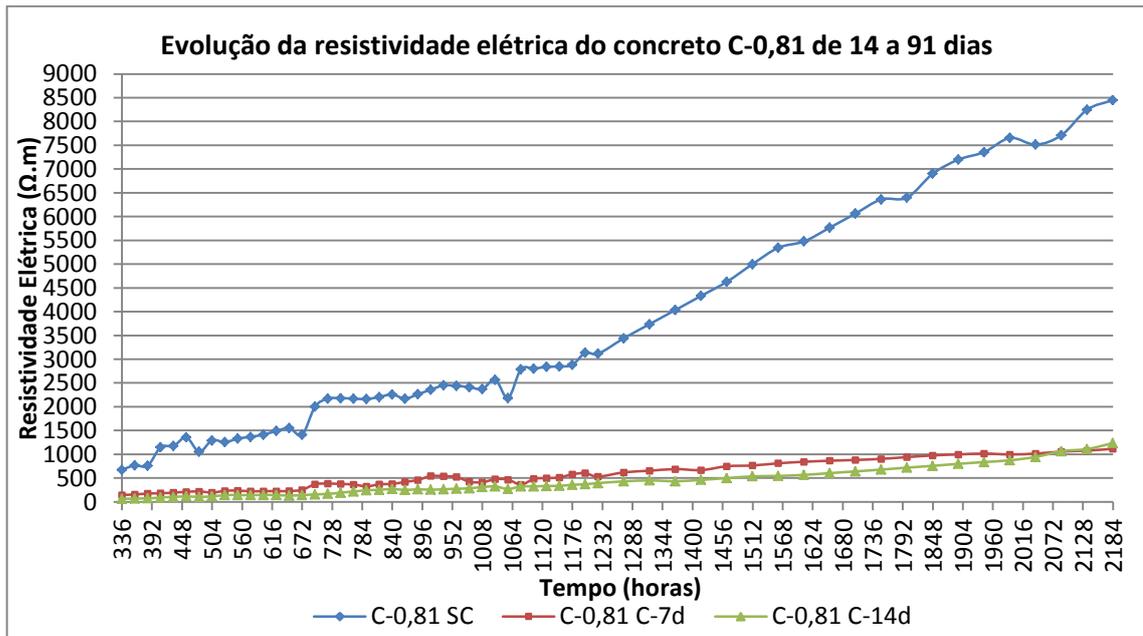


Figura 4.26 - Evolução da resistividade elétrica do concreto C-0,50, de 14 a 91 dias.

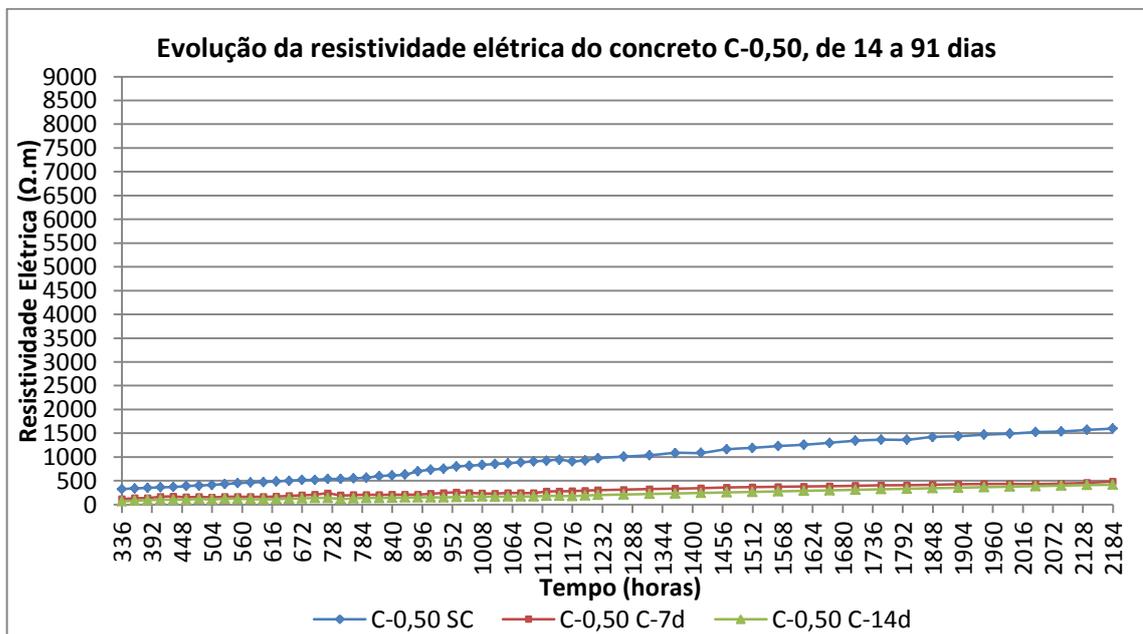
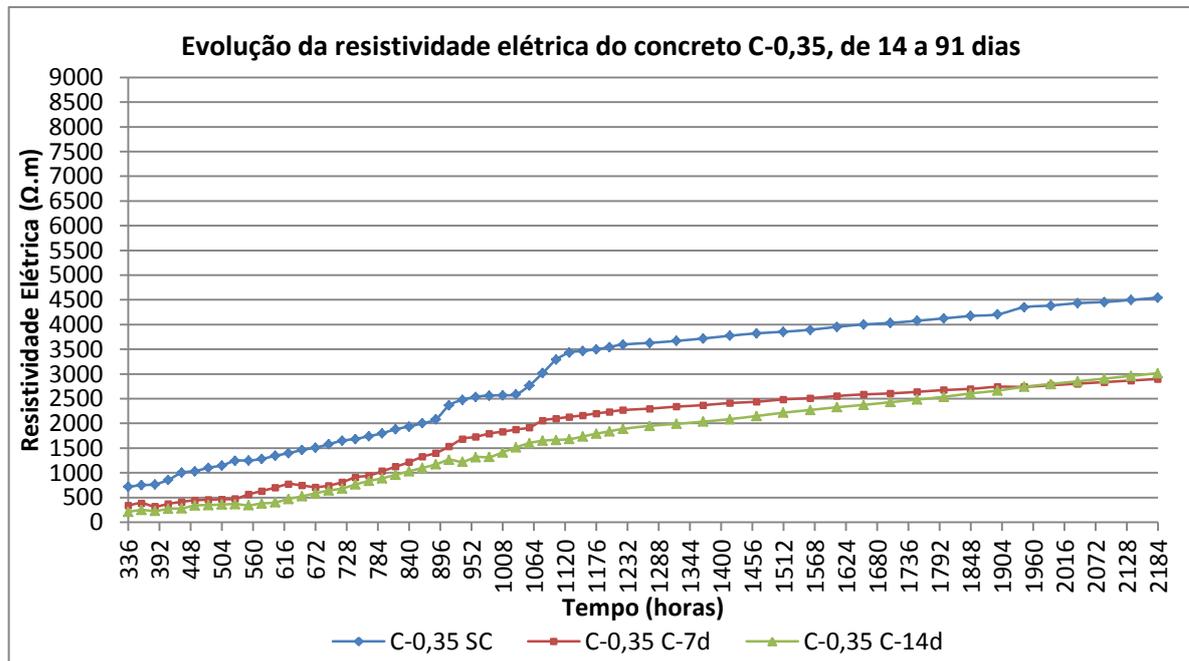


Figura 4.27 - Evolução da resistividade elétrica do concreto C-0,35, de 14 a 91 dias.



Nesta etapa da pesquisa todas as condições de cura foram atingidas. Agora, os concretos estão expostos às condições ambientais do laboratório, que por sua vez, possui valores de umidade externa baixos.

As Figuras 4.25, 4.26 e 4.27 mostram que, quando a umidade ambiental é baixa e o concreto possui uma maior porosidade e poros mais interconectados, a resistividade elétrica aumenta consideravelmente, que é o caso do concreto C-0,81, que sofre esse efeito de forma mais acentuada que os concretos C-0,50 e C-0,35, que possuem uma melhor qualidade. Isto também pode ser visto na Figura 4.28, onde o concreto sem cura C-0,81 (20 MPa), apresentou maior resistividade que o concreto C-0,35 (60 MPa), mesmo esse último possuindo características que o tornam um concreto de melhor qualidade.

Para visualizar e comparar os resultados, na Figura 4.28, observa-se o comparativo da resistividade elétrica das três misturas que não foram submetidas à cura. Na Figura 4.29, mostra-se o comparativo da resistividade elétrica das três misturas que foram submetidas à cura de 7 dias e na Figura 4.30, 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, respectivamente.

Figura 4.28 - Comparativo entre a evolução da resistividade elétrica superficial dos concretos com relação água/aglomerante de 0,81, 0,50 e 0,35, sem cura, de 14 até 91 dias.

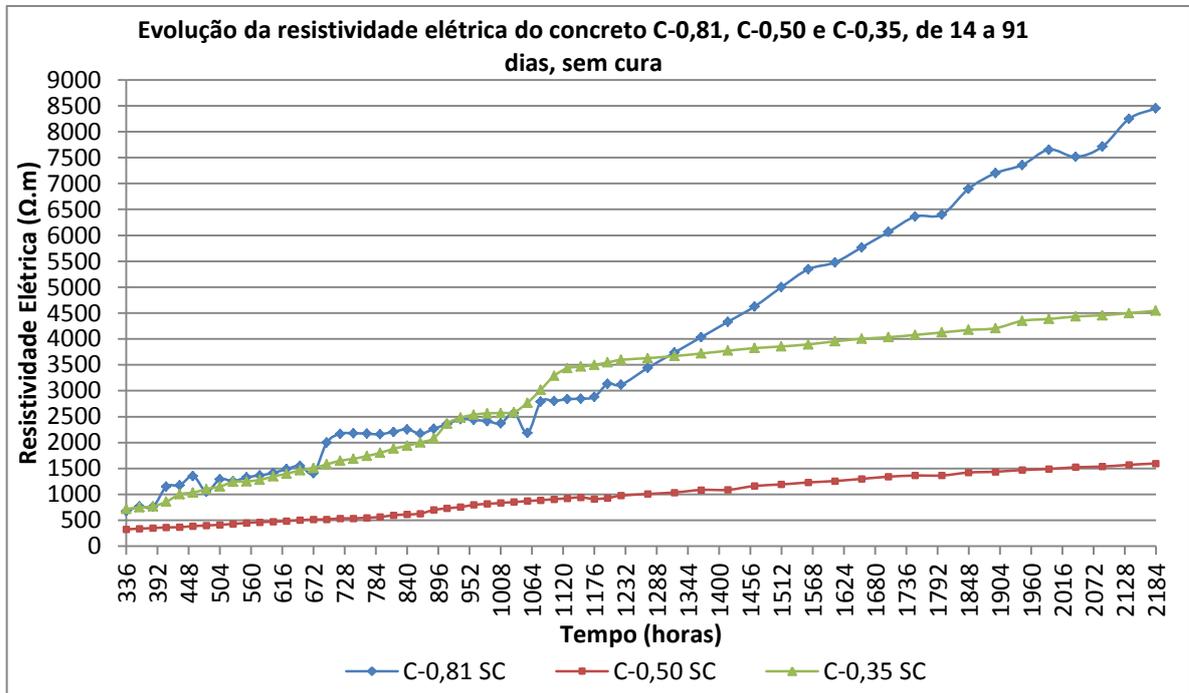


Figura 4.29 - Comparativo entre a evolução da resistividade elétrica superficial dos concretos com relação água/aglomerante de 0,81, 0,50 e 0,35, com cura submersa por 7 dias, de 14 até 91 dias.

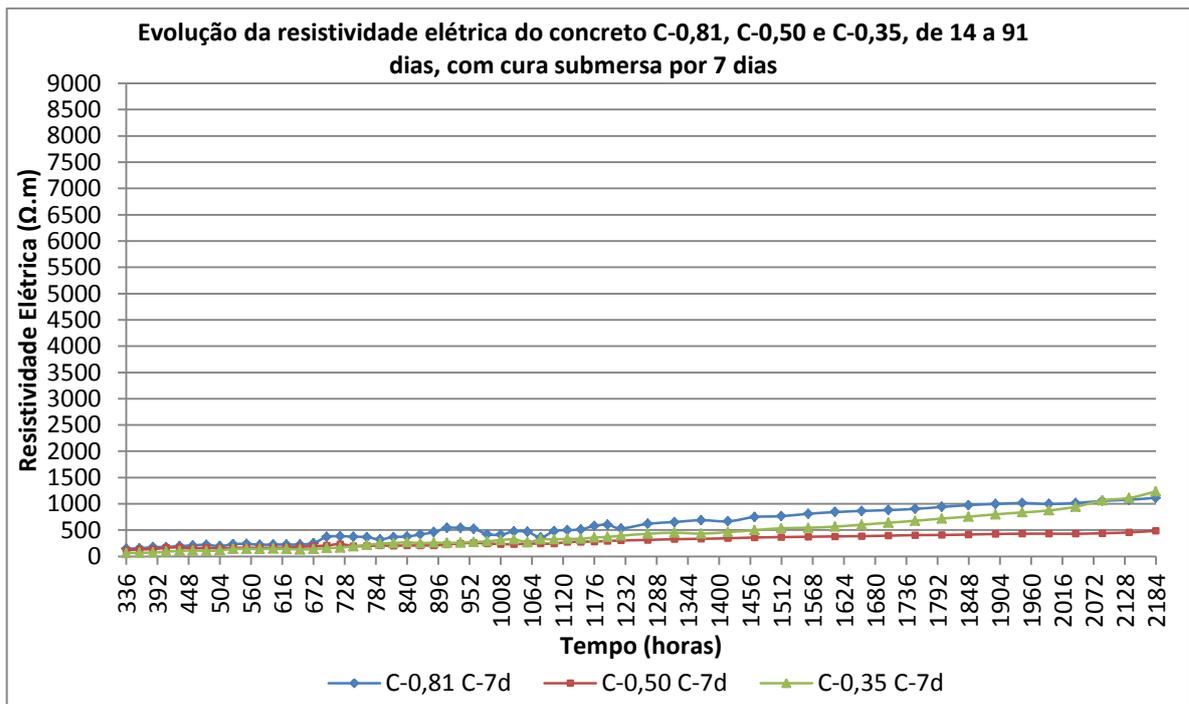
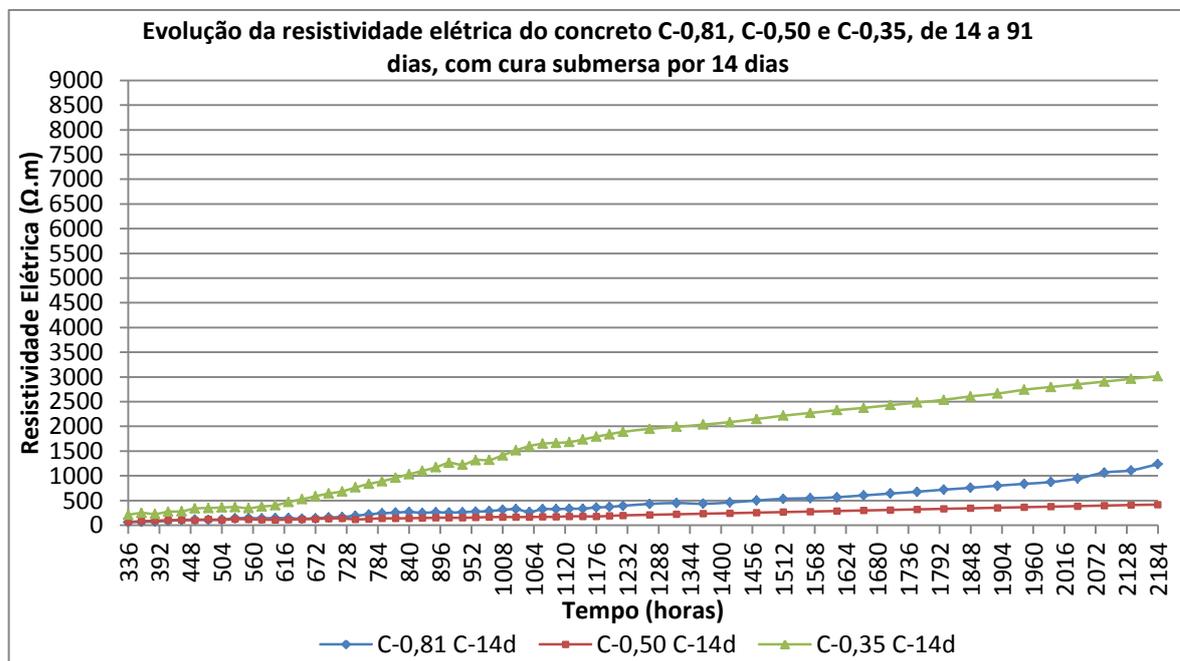


Figura 4.30 - Comparativo entre a evolução da resistividade elétrica superficial dos concretos com relação água/aglomerante de 0,81, 0,50 e 0,35, com cura submersa por 14 dias, de 14 até 91 dias.

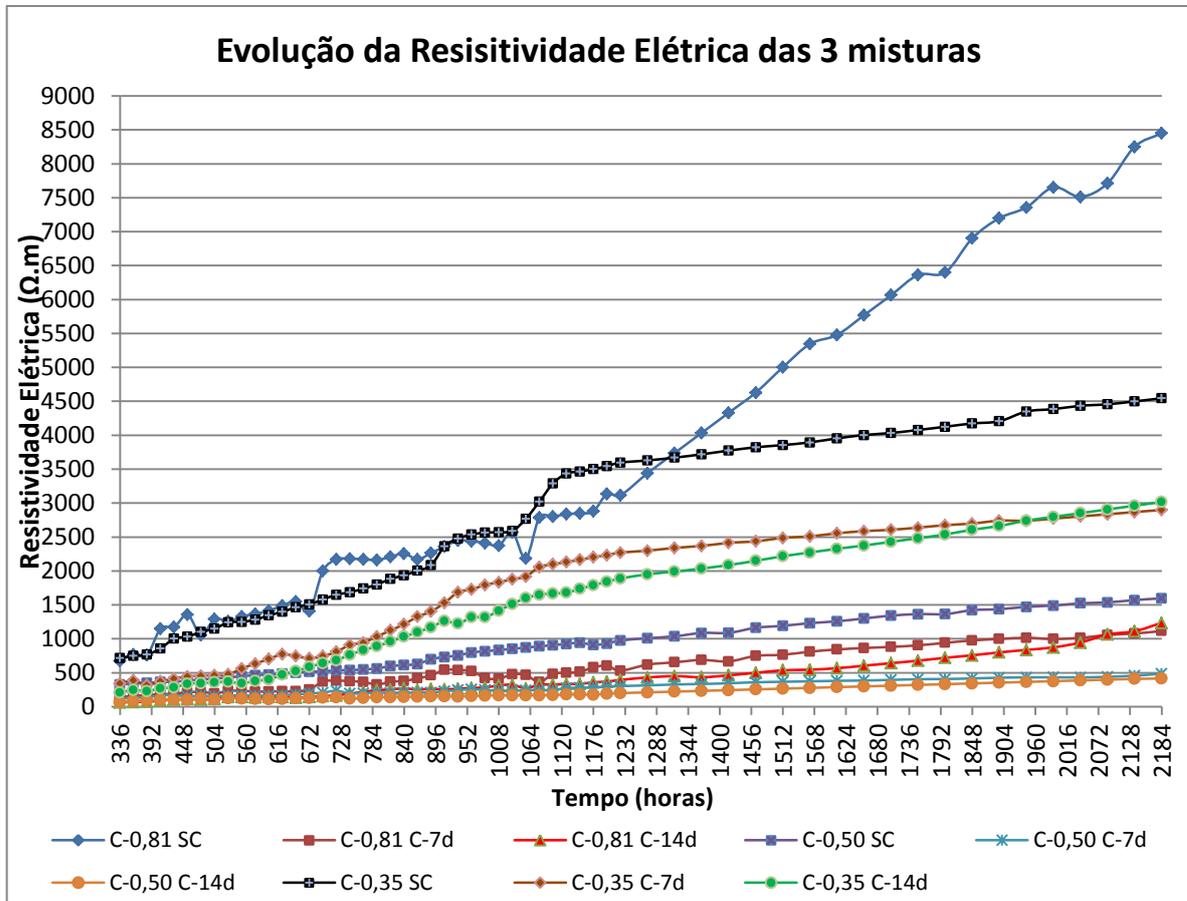


Observa-se através dos gráficos expostos acima, que os concretos que não sofreram cura são mais afetados pelas condições ambientais externas, dessa forma, o concreto C-0,81 sem cura atinge valores elevados de resistividade elétrica se comparados com os concretos C-0,50 e C-0,35, sem cura. Os concretos que sofreram cura submersa por 7 e 14 dias, possuem valores de resistividade elétrica menores que os que não sofreram cura, pois possuem uma melhor microestrutura e não estão tão sujeitos às variações externas.

Os concretos C-0,35 que sofreram cura, possuem maiores valores de resistividade elétrica aos 91 dias, que os concretos C-0,81 e C-0,50, o que também já era esperado, devido a sua melhor microestrutura e consequentemente menor porosidade e qualidade final.

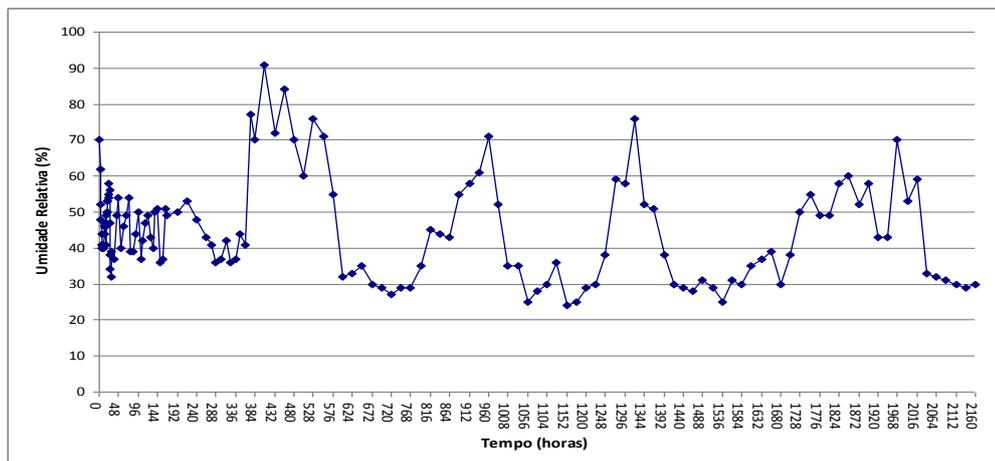
Na Figura 4.31, visualiza-se o perfil da evolução da resistividade elétrica dos três tipos de concreto, com as três diferentes condições de cura que foram submetidos. Observa-se que à medida que se aproxima dos 91 dias, o concreto com C-0,81 sem cura, atinge os maiores valores de resistividade elétrica, isso devido a sua alta porosidade e influência da extrema secagem pois a umidade externa está muito baixa no ambiente laboratorial. Os concretos C-0,35 vem logo em seguida com valores elevados de resistividade elétrica, mostrando o efeito da melhoria da microestrutura sobre a resistividade elétrica.

Figura 4.31- Evolução da resistividade elétrica superficial das 3 misturas sem cura, com cura por 7 dias e com cura por 14 dias.



A Figura 4.32, mostra o perfil da umidade relativa do ambiente de laboratório durante as medidas ininterruptas de 91 dias.

Figura 4.32 - Perfil da umidade relativa durante os 91 dias.



#### 4.6. RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL DOS 241 AOS 255 DIAS, E DOS 534 AOS 547 DIAS

Nas Figuras 4.33 a 4.35 são apresentados os resultados da resistividade elétrica superficial das 5784 horas (241 dias) às 6120 horas (255 dias), com medições a cada 48 horas. Após esse período, houve um intervalo nas medições de 279 dias, e então as mesmas começaram aos 534 dias e foram até os 547 dias, medindo-se 2 vezes na semana, por cada tipo de concreto (C-0,81, C-0,50 e C-0,35) e por cada condição de cura.

Figura 4.33 - Evolução da resistividade elétrica do concreto C-0,81, de 241 a 255 dias e de 534 a 547 dias.

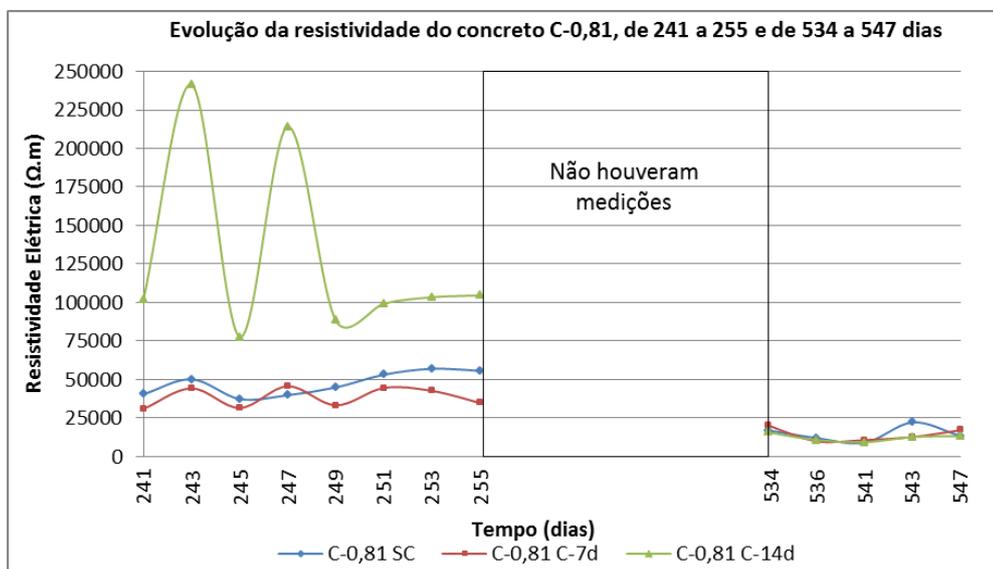


Figura 4.34 - Evolução da resistividade elétrica do concreto C-0,50, de 241 a 255 dias e de 534 a 547 dias.

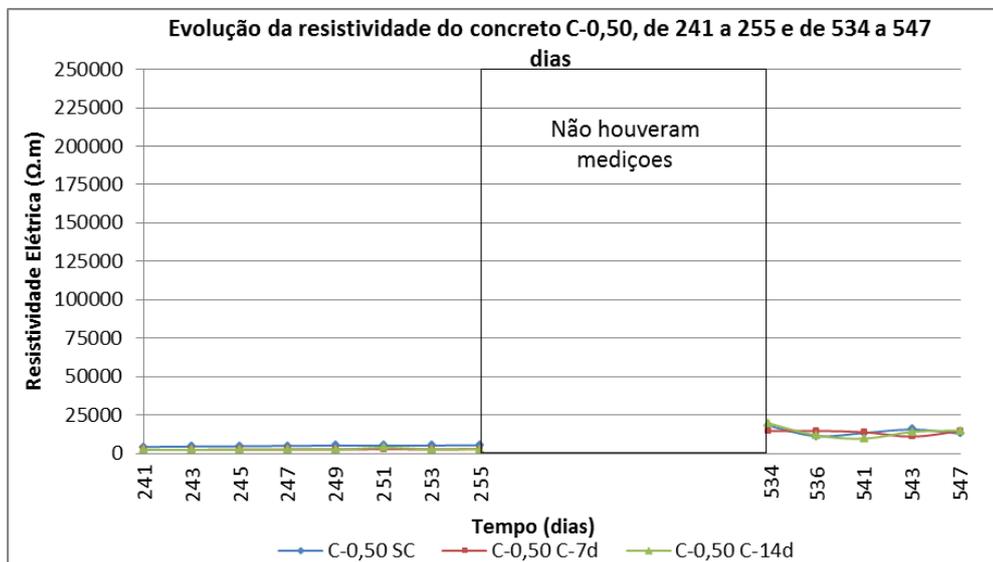
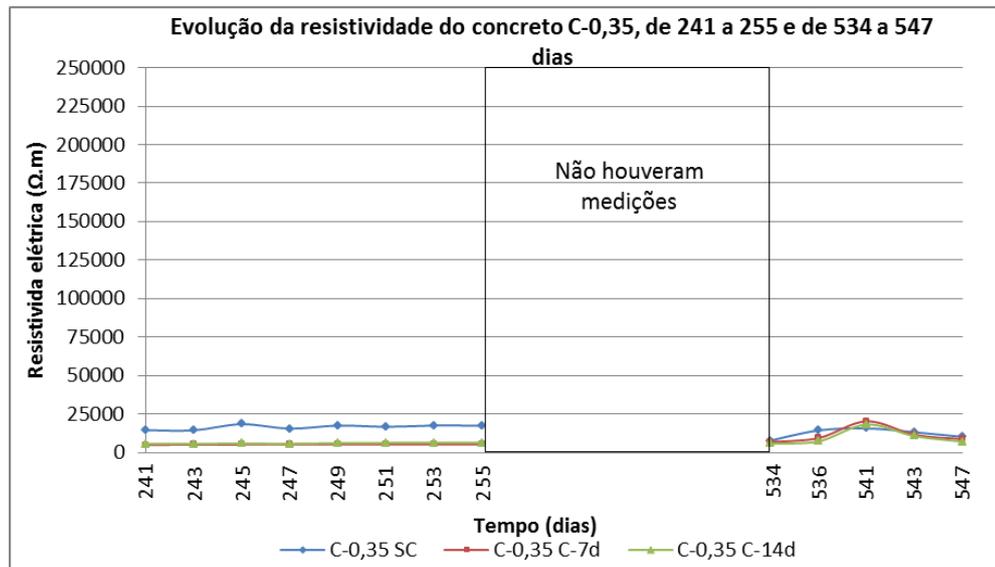


Figura 4.35 - Evolução da resistividade elétrica do concreto C-0,35, de 241 a 255 dias e de 534 a 547 dias.



A Figura 4.33, mostra que o concreto C-0,81, com cura submersa por 14 dias, comparado aos outros concretos, apresenta uma maior resistividade elétrica. Esse fato faz bastante sentido, visto que houve o processo de evaporação, e o mesmo apresenta uma melhor hidratação. As Figuras 4.34 e 4.35 mostram que os concretos C-0,50 e C-0,35, com cura submersa, tem menores valores de resistividade elétrica, fato que vai um pouco em contrapartida dos resultados esperados, mas tem que se levar em conta também, os efeitos da umidade relativa, que por sua vez, influencia a umidade interna do concreto e consequentemente os valores de resistividade elétrica.

As Figuras 4.36 a 4.38 mostram os resultados obtidos da resistividade elétrica superficial para as três misturas, para os concretos sem cura, com cura submersa por 7 dias e com cura submersa por 14 dias. Nota-se que os concretos C-0,81 tem maiores valores de resistividade elétrica, pois submetidos ao ambiente tendem a secar superficialmente bem mais facilmente que os demais concretos. Esse fato ocorre nos dias 241 a 255, que apresentam uma umidade relativa mediana, mas observa-se que nos dias 534 a 547, que possuem valores de umidade relativa maiores, os valores voltam a ficar mais estáveis.

Figura 4.36 - Comparativo entre a evolução da resistividade elétrica superficial dos concretos com relação água/aglomerante de 0,81, 0,50 e 0,35, sem cura, de 241 até 255 dias, e de 534 até 547 dias.

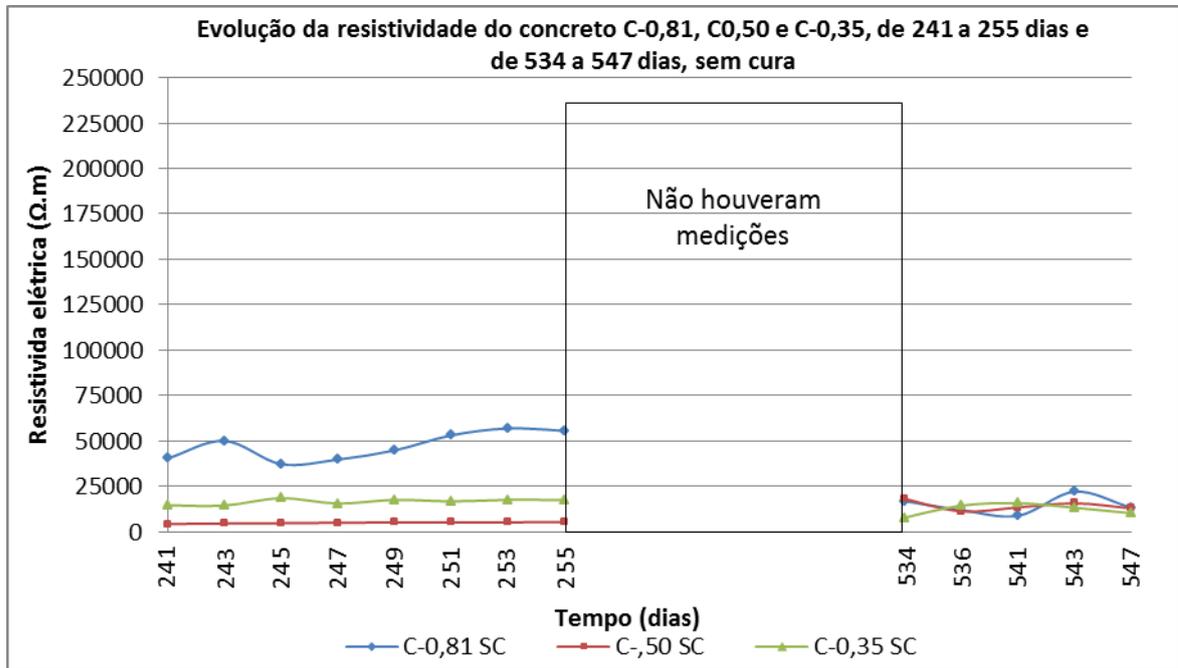


Figura 4.37 - Comparativo entre a evolução da resistividade elétrica superficial dos concretos com relação água/aglomerante de 0,81, 0,50 e 0,35, com cura submersa por 7 dias, de 241 até 255 dias, e de 534 até 547 dias.

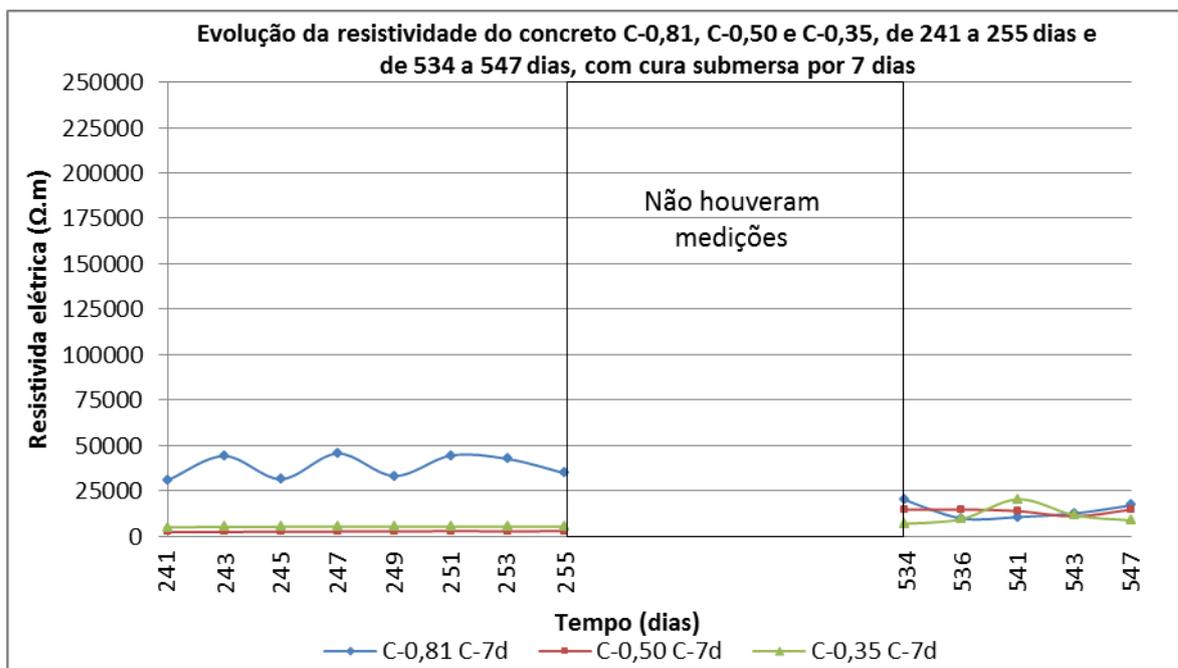
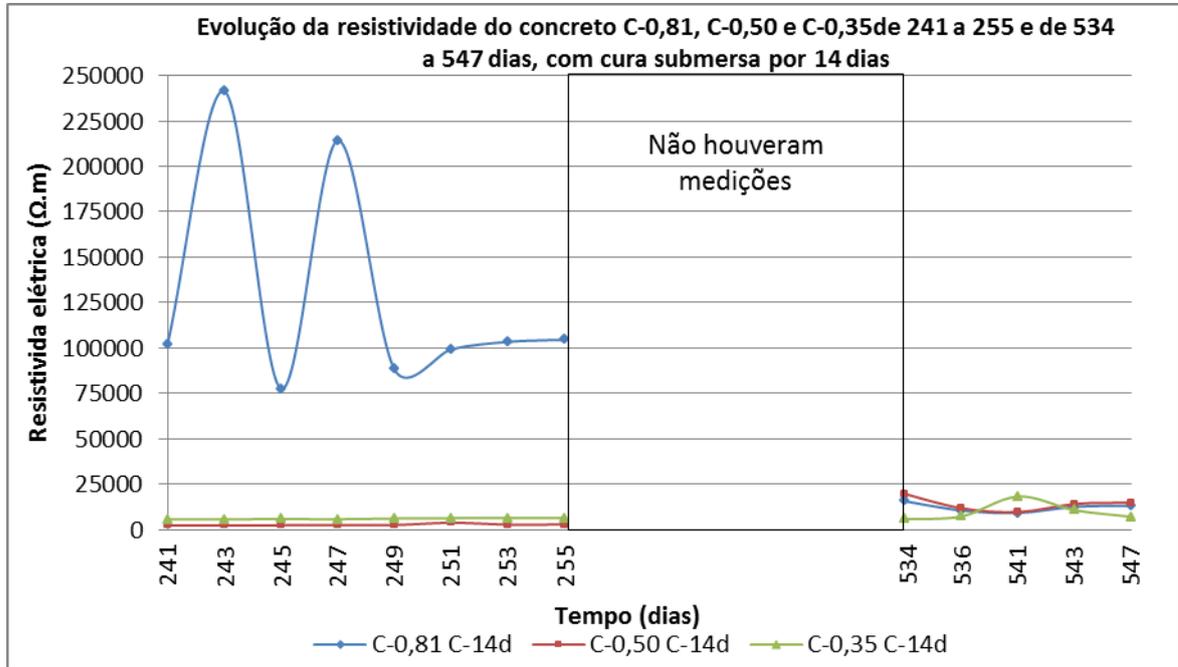
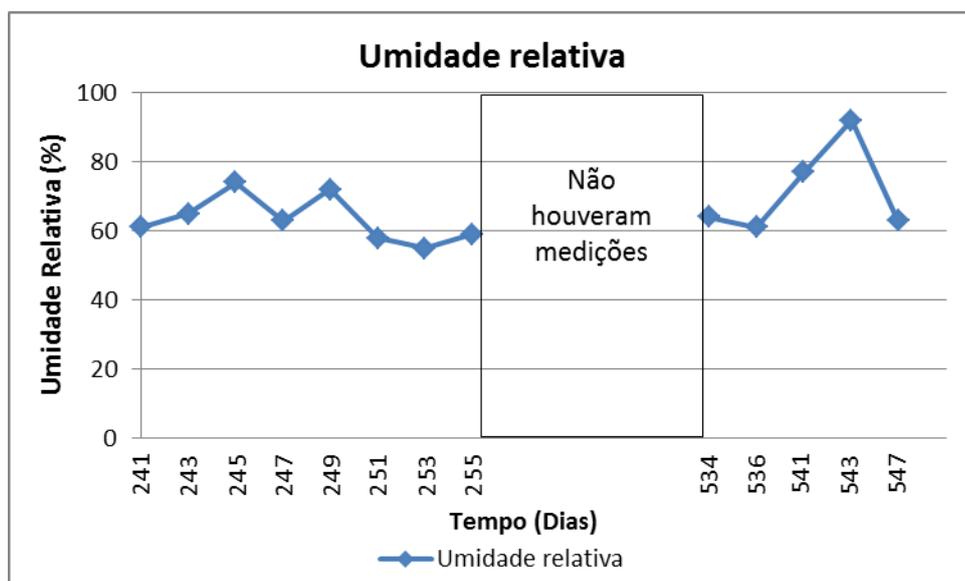


Figura 4.38 - Comparativo entre a evolução da resistividade elétrica superficial dos concretos com relação água/aglomerante de 0,81, 0,50 e 0,35, com cura submersa por 14 dias, de 241 até 255 dias, e de 534 até 547 dias.



A Figura 4.39 mostra a variação de umidade no ambiente laboratorial no período analisado anteriormente.

Figura 4.39 - Perfil da Umidade Relativa nos dias 241 a 255 e nos dias 534 a 547.



## 5. CONCLUSÕES

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

No que se trata dos concretos submetidos à cura úmida, os que possuem maiores relações água/aglomerante apresentarem menores valores de resistividade elétrica se comparados aos concretos que não foram submetidos ao processo de cura.

Quando são analisados os resultados de concretos com a mesma relação água/aglomerante, mas que sofreram processos de cura diferentes, pode se verificar a influencia da melhor qualidade da microestrutura sobre a resistividade do concreto. Os concretos com maior tempo de cura tendem a registrar maiores valores de resistividade elétrica.

Quando não foram empregados processos de cura os concretos com relação água/aglomerante igual a 0,81 (C-0,81) foram os que registraram as maiores resistividades elétricas superficiais nas idades monitoradas. As maiores resistividades elétricas dos concretos com alta relação água/aglomerante, nas baixas idades e com baixas umidades relativas do meio ambiente, são devidas as maiores velocidades de saída da água, pois os mesmos possuem uma maior porosidade, sendo esta mais aberta e interligada entre si.

No entanto os gráficos das Figuras 4.21 a 4.23 mostram, que existe uma tendência das resistividades elétricas superficiais dos concretos com uma relação água/aglomerante igual a 0,35 superarem as resistividades elétricas dos concretos com uma relação água/aglomerante 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 elétrica 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 dever ser analisada com extrema precaução. Mas o processo de cura, ainda sim garante uma melhor qualidade do concreto e faz com estes apresentem uma melhor microestrutura.

## 5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se que o monitoramento da resistividade elétrica continue, de forma que os corpos-de-prova possam passar 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 com maior controle da umidade relativa e temperatura, para tentar obter valores mais fideis da resistividade elétrica superficial.

Realizar monitoramento da resistividade elétrica volumétrica e verificar se as medidas sofrem tanta influência da umidade relativa como as medidas de resistividade elétrica superficial.

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

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, A. G. Efeito das adições minerais na resistividade elétrica de concretos convencionais. Porto Alegre. 1998. 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.
- AÏTCIN, P. C. Concreto de Alto Desempenho, 2000. 667p. São Paulo. Editora Pini. 2000.
- AL-ABDUL-HADI. Electrical resistivity of concrete in relation to corrosion of reinforcement. Tese (Master of Science in Civil Engineering). King Fahd University of Petroleum & Minerals, Arábia Saudita, (1982), 288p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. G57: Standard Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method. West Conshohocken, 2006. 5p.
- ANDRADE C., D'ANDRÉA R., La resistividade eletrifica como parâmetro de controle de formigona y de só durabilidade, Revista ALCONPAT, V. 1, Núm. 2, 2011.
- ANDRADE, Carmen. Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras. São Paulo: Pine, 1992.
- ARAÚJO, R. C. L. Materiais de construção. Rio de Janeiro: Eder UFRRJ, 2000. cap. 5. (Coleção Construções Rurais). ISBN 85-85720-23-9.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11578: Cimento Portland composto - Especificação. Rio de Janeiro, 1991. 5p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova . Rio de Janeiro, 2003, 6p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9204: Concreto endurecido – Determinação da resistividade elétrica volumétrica – Método de ensaio, 2012. 12p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica, Rio de Janeiro, 2003
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios, Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente, Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água, Rio de Janeiro, 2009.
- CASTELLOTE, M.; ANDRADE, C.; ALONSO, M. C. Standardization, to a reference of 25 °C, of electrical resistivity for mortars and concretes in saturated or isolated conditions. ACI Materials Journal, v.99, No.2, p.385-390, 2002.
- CHAO-LUNG, H.; ANH-TUAN, B. L.; CHUN-TSUN, C. Effect of rice husk ash on the strength and durability characteristics of concrete. Construction and Build Materials, v. 25, p. 3768-72, 2011.
- FIGUEIREDO, E.J.P. Avaliação do desempenho de revestimentos para proteção da armadura contra a corrosão através de técnicas eletroquímicas: Contribuição ao estudo de reparo de estruturas de concreto armado. Tese de Doutorado. EPUSP. São Paulo, 1994. 423p.

HELENE, P. R. Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado. Tese (Livre-Docência)- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Civil, São Paulo, 1993.

HELENE, P. R. L. Corrosão em armaduras para concreto armado. São Paulo: Pini, 1986.

HOPPE, T. Resistividade elétrica do concreto contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

LENCIONI, J. W. Estudos sobre resistividade elétrica superficial em concreto: análise e quantificação de parâmetros intervenientes nos ensaios Tese (Doutorado em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica)-Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ITA, Brasil, 2011.

LÜBECK, André. Resistividade elétrica de concretos executados com cimento Portland branco e elevados teores de escória de alto forno. Mestrado - Universidade Federal de Santa Maria, 2008.

MEHTA, P. K. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: PINI, 1994.

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

MOSTARDEIRO Neto, Carlos Zinn. Absorção capilar e resistividade elétrica de concretos compostos com cinza de casca de arroz de diferentes teores de carbono grafítico. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2011

NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. São Paulo. PINI. 1997.

SANTOS, L. 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) - Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

SCHULTE, C.; MADER, H.; WITTMANN, F.H. "Electric Conductivity of Hardened Cement Paste at Different Moisture Contents". Cement and Concrete Research 8, Nr. 3, S, 1978. pp.359-368

SOUZA, V. C.; RIPPER, T. Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto. São Paulo: PINI, 1998.

VICENTE, O. Estudo sobre o comportamento elétrico do concreto utilizado em sistemas de aterramento estrutural. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Londrina, Paraná, 2010.

WHITING, D. A.; NAGI, M. A. Electrical resistivity of concrete – A literature review. 2003. 57p. R&D Serial n. 2457. Portland Cement Association. Skokie, Illinois, EUA.

WHITTINGTON, H. W; MCCARTER, W. J; FORDE, M. C. The conduction of electricity through concrete. Magazine of Concrete Research, Vol 33, n. 114, 1981. p. 48-60

WOELF, G. A.; LAUER, K. The electrical resistivity of concrete with emphasis on the use of electrical resistance for measuring moisture content. Cement, concrete and Aggregates, v. 1, n. 2, 1979.