

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**RESISTIVIDADE ELÉTRICA DE CONCRETOS  
CONTENDO DIFERENTES TEORES DE CINZA DE  
CASCA DE ARROZ**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Tiago Fernandes Hoppe**

Santa Maria, RS, Brasil

2005

# **RESISTIVIDADE ELÉTRICA DE CONCRETOS CONTENDO DIFERENTES TEORES DE CINZA DE CASCA DE ARROZ**

por

**Tiago Fernandes Hoppe**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da  
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como  
requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Civil**

**Orientador: Prof. Dr. Antônio Luiz Guerra Gastaldini**

Santa Maria, RS, Brasil

2005

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

A comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado

**RESISTIVIDADE ELÉTRICA DE CONCRETOS CONTENDO  
DIFERENTES TEORES DE CINZA DE CASCA DE ARROZ**

elaborada por  
**Tiago Fernandes Hoppe**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Civil**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Antônio Luiz Guerra Gastaldini, Dr.  
(Presidente/Orientador)**

---

**Geraldo Cechella Isaia, Dr. (UFSM/RS)**

---

**Cláudio de Souza Kazmierczak, Dr. (UNISINOS/RS)**

Santa Maria, 21 de outubro de 2005

*A Deus*

*Aos meus pais Deli e Milton, minhas  
irmãs Ângela e Luciana e especialmente  
a minha esposa Fernanda, pelo carinho,  
compreensão e incentivo.*

*A todos meus familiares e amigos*

## AGRADECIMENTOS

É com grande satisfação que neste momento importante da minha vida agradeço às pessoas e entidades envolvidas direta ou indiretamente na pesquisa, que de alguma forma contribuíram para a realização das investigações teóricas ou práticas, tornando possível à conclusão dessa dissertação e obtenção do grau de *Mestre em Engenharia Civil*:

Ao professor Antônio L. G. Gastaldini, por sua orientação competente, paciência, amizade e principalmente por incentivar-me a cursar esta pós-graduação.

Ao professor Gerado C. Isaia, pelo incentivo, apoio e especialmente conhecimentos teóricos, que me foram de muita valia.

Aos meus colegas de Pós-Graduação, Fabiano Missau e Adriano Saciloto, pela grande ajuda nas moldagens dos corpos-de-prova.

Aos amigos da Pós-Graduação, Jonas Schneider, Dalton Wegner, Gustavo Cantarelli, Cássio Rubin e Willian Cadore, pela amizade e companheirismo.

Aos alunos e amigos bolsistas do Grupo de Pesquisas em Concreto (GEPECON/UFSM), Rodrigo Bordignon, Éder Pedroso, André Lübeck, Henrique Siqueira, Leonardo Tombesi, Irineu Dalla Corte Filho e Rafael Dallacort, pela ajuda na preparação dos materiais, moldagem dos corpos-de-prova e realização dos ensaios.

Ao Laboratório de Materiais de Construção Civil – LMCC/UFSM, pelo empréstimo de seus equipamentos e pela atenção dos seus funcionários.

As empresas Cimento Itambé, Reitex, MBT Brasil, Cimento Mizzu, BK Energia, pela cessão dos materiais para a pesquisa.

A FINE, CNPq e CAPES, pelos recursos e bolsas concedidas a esta pesquisa.

A Universidade Federal de Santa Maria, por tornar possível a obtenção do grau de *Mestre em Engenharia Civil*.

O meu sincero muito obrigado!!!

## RESUMO

Dissertação de Mestrado  
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

### **RESISTIVIDADE ELÉTRICA DE CONCRETOS CONTENDO DIFERENTES TEORES DE CINZA DE CASCA DE ARROZ**

AUTOR: TIAGO FERNANDES HOPPE

ORIENTADOR: ANTÔNIO LUIZ GUERRA GASTALDINI

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 21 de outubro de 2005.

A durabilidade das estruturas de concreto armado é resultado da ação protetora do concreto sobre o aço. Quando a passivação do aço deixa de existir, a estrutura torna-se vulnerável ao fenômeno da corrosão, cuja propagação, após iniciada, é essencialmente controlada pela resistividade elétrica do concreto entre o ânodo e o cátodo e pela disponibilidade de oxigênio no cátodo. A resistividade elétrica do concreto é uma propriedade extremamente sensível às características físicas e químicas do mesmo. O presente trabalho buscou investigar a influência do teor de cinza de casca de arroz (CCA) na resistividade elétrica do concreto, bem como correlacionar os resultados obtidos com a resistência à compressão axial e alterações na composição da solução aquosa e estrutura dos poros. Foram investigadas misturas com relações água/aglomerante ( $a/ag$ ) 0,35, 0,50 e 0,65 com teores de substituição em massa de 10%, 20% e 30% de CCA. Para comparar os resultados, misturas com 50% de escória de alto forno, 35% de cinza volante e uma mistura de referência com 100% de cimento foram simultaneamente investigadas. A resistividade elétrica foi determinada utilizando o método dos quatro eletrodos (método de Wenner, adaptado para uso em concreto). Paralelamente, foram realizados ensaios de resistência à compressão axial, composição, pH e condutividade elétrica específica da solução aquosa dos poros e porosimetria por intrusão de mercúrio. Verificou-se que a idade, a relação  $a/ag$  e as adições minerais mostraram uma influência expressiva na resistividade elétrica do concreto, em virtude principalmente das alterações na estrutura dos poros e na quantidade e composição da solução dos mesmos. Os resultados mostraram um crescimento exponencial na resistividade do concreto com o aumento do teor de CCA. Tal fato foi confirmado pelo maior refinamento dos poros e menor condutividade específica da solução dos mesmos, mostrando haver uma ótima correlação entre estes fatores. Assim, os melhores resultados na resistividade elétrica foram obtidos com o teor de 30% de CCA. A melhor relação CUSTO/BENEFÍCIO, para 65MPa de resistência à compressão e 30k $\Omega$ .cm de resistividade elétrica, foi obtida com 10% de CCA e, para 65MPa e 60k $\Omega$ .cm, os melhores resultados foram atingidos com 20% desta adição.

Palavras-chaves: concreto, cinza de casca de arroz, adições minerais, resistividade elétrica.

## **ABSTRACT**

Master's Thesis  
Program of Postgraduation in Civil Engineering  
Federal University of Santa Maria, RS, Brazil

### **ELECTRICAL RESISTIVITY OF CONCRETE COMPOSITIONS WITH DIFFERENT CONTENTS OF RICE HUSK ASH**

AUTHOR: TIAGO FERNANDES HOPPE  
THESIS ADVISOR: ANTÔNIO LUIZ GUERRA GASTALDINI  
Santa Maria, the 21<sup>st</sup> of October, 2005.

The durability of reinforced concrete structures derives from the protective effect provided by the concrete cover over the steel rebars. When the passivation of the steel is compromised, the whole structure is liable to corrosion phenomena, whose rate of propagation is mainly controlled by the electrical resistivity of the concrete between the anode and cathode and by the availability of oxygen at the cathode. The electrical resistivity of concrete is highly dependent on its physical and chemical characteristics. This study aimed at to investigate the influence of the content of rice husk ash (RHA) on the electrical resistivity of concrete and identify any correlations between electrical resistivity and compressive strength properties and changes in pore solution and pore structure. The mixtures in this study were prepared with water/binder ratios (w/b) of 0.35, 0.50 and 0.65 with RHA substitutions of 10%, 20% and 30% for cement. Samples with 50% blast furnace slag, 35% fly ash and a reference sample with 100% cement were also investigated. Electrical resistivity was determined using the four electrode method (Wenner's Method adapted for concrete). Tests of compressive strength, pore solution composition, pH e electrical conductivity, and mercury porosimetry were also performed. These indicate that that the age of the sample, the w/b ratio used and the mineral additions have a expressive effect on the electrical resistivity of concrete because of changes in the concrete pore structure and in the composition and volume of pore solution. Results show there is a exponential increase in concrete resistivity as the content of RHA grows. This is confirmed by the smaller size of the pore network and the lower specific conductivity of the pore solution, which show a sound correlation. The best results in electrical resistivity were obtained with content of 30% of RHA. The best cost/benefit ratio for compressive strength values of 65MPa and electrical resistivity of 30kΩ.cm was obtained with the use of 10% RHA and for compressive strength values of 65MPa and electrical resistivity of 60kΩ.cm, the best results were obtained with 20% RHA.

Keywords: concrete, rice husk ash, mineral additions, electrical resistivity.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1.1 – Efeito do maior ou menor acesso de oxigênio (CASCUDO, 1997) .....	29
FIGURA 1.2 – Formação de uma pilha de corrosão em concreto armado – adaptação (ANDRADE, 1992; CASCUDO, 1997) .....	31
FIGURA 1.3 – Modelo de vida útil em função da corrosão proposto por Tuutti (1982) .....	32
FIGURA 1.4 – Tipos de corrosão e fatores que as provocam (CASCUDO, 1997) .....	33
FIGURA 1.5 – Volumes relativos do ferro e de alguns de seus produtos de corrosão (CASCUDO, 1997) .....	38
FIGURA 2.1 – Diagrama de distribuição das cargas no sistema de poros de pasta de cimento endurecida. G = gel; C = poros capilares contínuos; D = poros capilares descontínuos ou fechados (BRAMESHUBER e RAUPACH, 2003) .....	42
FIGURA 2.2 - Influência da composição do concreto em parâmetros que governam a proteção da armadura contra a corrosão (SCHIESSL, 1987 apud ABREU, 1998) .....	43
FIGURA 2.3 - Resistividade elétrica x relação água/cimento e consumo de cimento Portland comum, ensaiado a 28 dias (NEVILLE, 1997) .....	45
FIGURA 2.4 - Efeito do tipo de cimento na resistividade elétrica do concreto (HAMMOND e ROBSON, 1955 apud WHITING e NAGI, 2003) .....	46
FIGURA 2.5 - Efeito do teor de $C_3A$ na resistividade elétrica do concreto (BAWEJA et al., 1996 apud WHITING e NAGI, 2003) .....	47
FIGURA 2.6 - Efeito do teor do agregado na resistividade elétrica do concreto (HUGHES et al., 1985) .....	48



FIGURA 2.7 - Efeito da cinza volante na resistividade elétrica do concreto (BAWEJA et al., 1996 apud WHITING e NAGI, 2003) .....	50
FIGURA 2.8 - Influência da escória de alto forno na resistividade elétrica de concretos submetidos a vários ciclos de molhagem e secagem (HOPE e IP, 1987) .....	51
FIGURA 2.9 - Influência da sílica ativa na resistividade elétrica do concreto (WOLSIEFIER, 1991).....	52
FIGURA 2.10 - Efeito da cinza de casca de arroz na resistividade elétrica do concreto. REF = 100% cimento; V35 = 35% cinza volante; E50 = 50% escória de alto forno; 10A, 20A e 30A = 10%, 20% e 30% cinza de casca de arroz, respectivamente (MISSAU, 2004).....	53
FIGURA 2.11 - Influência da sílica ativa e cinza de casca de arroz na resistividade elétrica do concreto. CCA = cinza de casca de arroz; SA = sílica ativa; C POZ = cimento pozolânico; C ARI = cimento de alta resistência inicial (ABREU, 1998).....	54
FIGURA 2.12 - Relação entre a resistividade elétrica e o período de cura do concreto com 100% de cimento e de concretos com adições minerais. SA = sílica ativa; E = escória de alto forno (WEE et al., 2000).....	55
FIGURA 2.13 - Efeito das adições minerais na resistividade elétrica do concreto. CP = cimento Portland; CV = cinza volante; E = escória de alto forno; SA = sílica ativa (SMITH et al., 2004) .....	56
FIGURA 2.14 - Efeito da temperatura na resistividade elétrica do concreto (HOPE et al., 1985).....	58
FIGURA 2.15 - Efeito do teor de umidade na resistividade elétrica do concreto (GJØRV et al., 1977) .....	60
FIGURA 2.16 - Relação entre o teor de umidade e a resistividade elétrica de concretos contaminados com cloreto (a) ou sulfato (b) (SALEEM et al., 1996).....	61
FIGURA 2.17 - Influência da carbonatação na resistividade elétrica do concreto (CHI et al., 2002) .....	63
FIGURA 2.18 - Método dos quatro eletrodos para medir a resistividade elétrica do concreto. “d” – distância entre eixos dos eletrodos (CARINO, 1998 apud LIMA, 2000).....	64

FIGURA 2.19 - Efeito da geometria e dimensões da peça de concreto na determinação da sua resistividade elétrica pelo método dos quatro eletrodos (GOWERS e MILLARD, 1999) .....	67
FIGURA 2.20 - Fator de correção “K”. (a) na face transversal do cilindro e (b) na lateral do cilindro. As curvas dos cilindros padrões com diâmetros de 7,62, 10,20 e 15,20cm possuem um círculo e correspondem a $\phi/d = 3, 4$ e $6$ , respectivamente (MORRIS et al., 1996).....	68
FIGURA 2.21 - Efeito da frequência na determinação da resistividade elétrica do concreto pelo método dos quatro eletrodos (MILLARD et al., 1989).....	70
FIGURA 2.22 - Efeito da intensidade da corrente na determinação da resistividade elétrica do concreto pelo método dos quatro eletrodos (MILLARD et al., 1989).....	70
FIGURA 2.23 - Efeito da heterogeneidade do concreto na determinação da sua resistividade elétrica pelo método dos quatro eletrodos (GOWERS e MILLARD, 1999).....	71
FIGURA 2.24 - Efeito da presença de armaduras na determinação da resistividade elétrica do concreto pelo método dos quatro eletrodos (GOWERS e MILLARD, 1999) .....	72
FIGURA 2.25 - Efeito de uma camada superficial de baixa resistividade na determinação da resistividade elétrica pelo método dos quatro eletrodos (GOWERS e MILLARD, 1999) .....	73
FIGURA 2.26 - Efeito das condições ambientais na determinação da resistividade elétrica pelo método dos quatro eletrodos - (a) relação entre resistividade e temperatura do ar – (b) Variação da resistividade antes, durante e depois da chuva, em concretos carbonatados (GOWERS e MILLARD, 1999).....	75
FIGURA 3.1 - Gráfico da granulometria do agregado miúdo – Areia média .....	81
FIGURA 3.2 - Gráfico da granulometria do agregado graúdo – Brita nº 1.....	82
FIGURA 3.3 - Detalhe dos corpos-de-prova utilizados para o ensaio de resistividade elétrica aparente.....	89
FIGURA 3.4 - Fôrma utilizada na moldagem dos corpos-de-prova para o ensaio de resistividade elétrica aparente .....	90

FIGURA 3.5 - Circuito utilizado no ensaio de resistividade elétrica aparente – (a) esquema do circuito – (b) circuito montado (pronto para leitura).....	91
FIGURA 4.1 - Resistência à compressão axial aos 28 dias .....	99
FIGURA 4.2 - Resistência à compressão axial aos 91 dias .....	99
FIGURA 4.3 - Variação da resistência à compressão axial das misturas com CCA em relação às demais, aos 91 dias .....	100
FIGURA 4.4 - Resistência à compressão axial aos 80 dias. Relação a/ag de 0,43. REF = mistura de referência (100% cimento); SA = sílica ativa; CCA = cinza de casca de arroz (COUTINHO, 2003) .....	101
FIGURA 4.5 - Resistividade elétrica aparente – a/ag= 0,35.....	104
FIGURA 4.6 - Resistividade elétrica aparente – a/ag= 0,50.....	104
FIGURA 4.7 - Resistividade elétrica aparente – a/ag= 0,65.....	105
FIGURA 4.8 - Variação da resistividade elétrica com o aumento do teor de CCA, aos 91 dias .....	108
FIGURA 4.9 - Variação da resistividade elétrica aparente das misturas com CCA em relação às demais, aos 91 dias .....	109
FIGURA 4.10 - Resistividade elétrica aparente versus resistência à compressão axial, aos 91 dias .....	114
FIGURA 4.11 - Resistividade elétrica aparente versus condutividade elétrica específica da solução dos poros, aos 91 dias .....	116
FIGURA 4.12 - Resistividade elétrica aparente versus concentração do íon OH <sup>-</sup> , aos 91 dias.....	117
FIGURA 4.13 - Resistividade elétrica aparente versus volume total de intrusão de mercúrio, aos 91 dias .....	118
FIGURA 4.14 - Resistividade elétrica aparente versus diâmetro crítico dos poros, aos 91 dias.....	119
FIGURA 4.15 - Resistividade elétrica aparente correspondente às resistências à compressão axial de 45MPa e 65MPa, aos 91 dias.....	123
FIGURA 4.16 - Resistência à compressão axial correspondente às resistividades elétricas aparentes de 30kΩ.cm e 60kΩ.cm, aos 91 dias.....	125
FIGURA 4.17 - Relação (R\$/m <sup>3</sup> )/(MPa) das misturas investigadas, aos 91 dias.....	128

FIGURA 4.18 - Custo dos materiais por m <sup>3</sup> para produzir concretos com 45MPa e 65MPa de resistência à compressão e concretos com 30kΩ.cm e 60kΩ.cm de resistividade elétrica, aos 91 dias .....	129
FIGURA 4.19 - Relação entre o teor de umidade e a resistividade elétrica de concretos contaminados com cloreto (SALEEM et al., 1996) .....	133
FIGURA 4.20 - Resistividade elétrica aparente – a/ag= 0,35 .....	134
FIGURA 4.21 - Resistividade elétrica aparente – a/ag= 0,50 .....	135
FIGURA 4.22 - Resistividade elétrica aparente – a/ag= 0,65 .....	135

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – Critérios de avaliação da resistividade (SMITH et al., 2004) .....	39
TABELA 3.1 - Características físico-mecânicas do cimento .....	79
TABELA 3.2 - Composição química dos materiais aglomerantes (% em massa) .....	79
TABELA 3.3 - Características físicas dos materiais aglomerantes.....	80
TABELA 3.4 - Proporções das misturas investigadas .....	80
TABELA 3.5 - Características físicas dos agregados .....	82
TABELA 3.6 - Traços unitários .....	84
TABELA 3.7 - Quantidade dos materiais utilizados por m <sup>3</sup> .....	85
TABELA 3.8 - Condutividade equivalente de íons aquosos numa concentração infinita em 25°C.....	94
TABELA 4.1 - Resultados de resistência à compressão axial.....	97
TABELA 4.2 - Resultados de resistividade elétrica aparente .....	103
TABELA 4.3 - Índice de resistividade elétrica das misturas investigadas .....	106
TABELA 4.4 - Variação percentual de resistividade elétrica, com o aumento do teor de CCA.....	108
TABELA 4.5 - Análise química da solução aquosa dos poros (Mmol/l), aos 91 dias.....	110
TABELA 4.6 - Condutividade elétrica específica e índice de condutividade elétrica específica da solução aquosa dos poros, aos 91 dias.....	111
TABELA 4.7 - Porosimetria por intrusão de mercúrio, aos 91 dias .....	113
TABELA 4.8 - Resistividade elétrica aparente e resistência à compressão axial, aos 91 dias.....	121
TABELA 4.9 - Relações a/ag para resistência à compressão de 45MPa e 65MPa e resistividades elétricas correspondentes, aos 91 dias .....	122

TABELA 4.10 - Relações água/aglomerante para resistividade elétrica de 30kΩ.cm e 60kΩ.cm e resistências à compressão correspondentes, aos 91 dias.....	124
TABELA 4.11 - Quantidade dos materiais utilizados por m <sup>3</sup> .....	126
TABELA 4.12 - Preço dos materiais utilizados.....	126
TABELA 4.13 - Custo dos materiais por m <sup>3</sup> e relação (R\$/m <sup>3</sup> )/(MPa).....	127
TABELA 4.14 - Custo dos materiais para produzir concretos com 45MPa e 65MPa de resistência à compressão e concretos com 30kΩ.cm e 60kΩ.cm de resistividade elétrica, aos 91 dias.....	129
TABELA 4.15 - Resultados de resistividade elétrica aparente .....	132

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- a/ag** – água (água + aditivo)/aglomerante (cimento + adição), em massa
- a/c** – água (água + aditivo)/cimento, em massa
- ARI** – Alta resistência inicial
- BaCl<sub>2</sub>** – Sulfato de bário
- BaSO<sub>4</sub>** – Cloreto de bário
- CAD** – Concreto de alto desempenho
- Ca<sup>2+</sup>** - Íons cálcio
- Ca(OH)<sub>2</sub>** – Hidróxido de cálcio
- C<sub>3</sub>A** – Aluminato tricálcico
- CCA** – Cinza de casca de arroz
- Cl<sup>-</sup>** - Íons cloreto
- Cl<sup>-</sup>/OH<sup>-</sup>** - Relação iônica entre cloretos e hidroxilas
- CO<sub>2</sub>** – Anidrido carbônico ou dióxido de carbono
- CP** – Cimento Portland
- C-S-H** – Silicatos de cálcio hidratados
- CV** – Cinza volante
- EAF** – Escória de alto forno
- fc** – Resistência à compressão axial
- Fe<sup>2+</sup>** – Íons ferro
- H<sup>+</sup>** - Íons hidrogênio
- HCl** – Ácido clorídrico
- I<sub>p</sub>** = Índice de resistividade elétrica aparente do concreto
- I<sub>σ</sub>** = Índice de condutividade elétrica específica da solução aquosa dos poros
- K<sup>+</sup>** - Íons potássio
- KOH** – Hidróxido de potássio

**K<sub>2</sub>O** – Óxido de potássio

**Mg<sup>2+</sup>** - Íons magnésio

**Na<sup>+</sup>** - Íons sódio

**NaCl** – Cloreto de sódio

**NaOH** – Hidróxido de sódio

**Na<sub>2</sub>O** – Óxido de sódio

**OH<sup>-</sup>** - Íons hidroxila ou hidroxila

**pH** – Potencial de hidrogênio ou hidrogeniônico

**R** – Coeficiente de correlação

**R<sup>2</sup>** - Quadrado do coeficiente de correlação

**REF** – Mistura de referência com 100% de cimento

**ρ** = Resistividade elétrica aparente do concreto

**SiO<sub>2</sub>** – Dióxido de silício

**σ**= Condutividade elétrica específica da solução aquosa dos poros

**SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>** - Óxido de enxofre

**#** - Abertura da malha da peneira

**∅** - Diâmetro

**10A** – Mistura composta com 10% de CCA em substituição ao cimento no concreto

**20A** – Mistura composta com 20% de CCA em substituição ao cimento no concreto

**30A** – Mistura composta com 30% de CCA em substituição ao cimento no concreto

**35V** - Mistura composta com 35% de CV em substituição ao cimento no concreto

**50E** - Mistura composta com 50% de EAF em substituição ao cimento no concreto



## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	5
<b>ABSTRACT</b> .....	6
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b> .....	7
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	12
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b> .....	14
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	19
<b>1 CORROSÃO DAS ARMADURAS NO CONCRETO</b> .....	27
<b>1.1 Considerações iniciais</b> .....	27
<b>1.2 Corrosão da armadura em meio aquoso</b> .....	28
1.2.1 Iniciação .....	32
1.2.1.1 Corrosão generalizada – carbonatação .....	33
1.2.1.2 Corrosão localizada por pite – cloretos .....	34
1.2.2 Propagação .....	35
<b>1.3 Efeitos da corrosão</b> .....	36
1.3.1 Produtos de corrosão .....	37
<b>2 RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO</b> .....	39
<b>2.1 Considerações iniciais</b> .....	39
<b>2.2 Características do concreto relacionadas à resistividade elétrica</b> .....	41
<b>2.3 Efeito da dosagem e materiais do concreto na sua resistividade elétrica</b> .....	44
2.3.1 Relação água/aglomerante e consumo de cimento .....	44
2.3.2 Características físicas e químicas do cimento .....	45
2.3.3 Agregados .....	47
2.3.4 Aditivos .....	49

2.3.5	Adições minerais .....	49
<b>2.4</b>	<b>Efeito da exposição do concreto na sua resistividade elétrica.....</b>	<b>56</b>
2.4.1	Cura e grau de hidratação do concreto .....	56
2.4.2	Temperatura .....	57
2.4.3	Teor de umidade .....	59
2.4.4	Íons agressivos.....	60
2.4.5	Carbonatação .....	62
<b>2.5</b>	<b>Medida da resistividade - método dos quatro eletrodos (método de Wenner).....</b>	<b>63</b>
2.5.1	Fatores intervenientes na utilização do método dos quatro eletrodos.....	66
2.5.1.1	Dimensões e geometria do corpo de prova.....	66
2.5.1.2	Contato entre eletrodos e o concreto .....	69
2.5.1.3	Efeito do tipo de onda, da frequência e da intensidade da corrente.....	69
2.5.1.4	Heterogeneidade do concreto .....	71
2.5.1.5	Efeito da presença de armaduras .....	72
2.5.1.6	Efeito de camadas com diferentes resistividades.....	73
2.5.1.7	Efeito das condições ambientais .....	74
<b>3</b>	<b>INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>76</b>
<b>3.1</b>	<b>Considerações iniciais.....</b>	<b>76</b>
<b>3.2</b>	<b>Variáveis envolvidas na pesquisa.....</b>	<b>76</b>
<b>3.3</b>	<b>Caracterização dos materiais .....</b>	<b>78</b>
3.3.1	Cimento .....	78
3.3.2	Adições minerais .....	79
3.3.3	Agregados .....	81
3.3.4	Aditivo.....	83
3.3.5	Água .....	83
<b>3.4</b>	<b>Dosagem dos concretos.....</b>	<b>83</b>
<b>3.5</b>	<b>Moldagem, armazenamento e cura dos corpos de prova.....</b>	<b>85</b>
3.5.1	Concretos .....	85
3.5.2	Pastas.....	87
<b>3.6</b>	<b>Ensaio em concreto.....</b>	<b>88</b>
3.6.1	Resistência à compressão axial .....	88
3.6.2	Resistividade elétrica aparente.....	88

<b>3.7</b>	<b>Ensaio em pastas</b> .....	93
3.7.1	Solução aquosa dos poros .....	93
3.7.2	Porosimetria por intrusão de mercúrio.....	95
<b>4</b>	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	96
<b>4.1</b>	<b>Considerações iniciais</b> .....	96
<b>4.2</b>	<b>Resistência à compressão axial</b> .....	96
<b>4.3</b>	<b>Resistividade elétrica aparente</b> .....	102
<b>4.4</b>	<b>Solução aquosa dos poros</b> .....	110
<b>4.5</b>	<b>Porosimetria por intrusão de mercúrio</b> .....	112
<b>4.6</b>	<b>Integração dos resultados</b> .....	113
4.6.1	Resistividade elétrica aparente versus resistência à compressão axial .....	114
4.6.2	Resistividade elétrica aparente versus condutividade elétrica específica da solução dos poros .....	115
4.6.3	Resistividade elétrica aparente versus concentração do íon OH <sup>-</sup> .....	116
4.6.4	Resistividade elétrica aparente versus volume total de intrusão de mercúrio e diâmetro crítico dos poros .....	118
4.6.5	Análise do comportamento das misturas investigadas em relação à resistividade elétrica e resistência à compressão, a partir da especificação do valor de uma dessas propriedades .....	120
<b>4.7</b>	<b>Análise de custos</b> .....	125
<b>4.8</b>	<b>Resistividade elétrica do concreto em ambiente agressivo</b> .....	131
	<b>CONCLUSÃO</b> .....	137
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	141

## INTRODUÇÃO

O grande crescimento industrial dos últimos séculos, com suas desmedidas, acarretou sérios problemas ecológicos ao planeta. Isso em virtude desse crescimento ocorrer, sobretudo, às custas da utilização indiscriminada de recursos naturais, negligenciando os impactos ambientais oriundos da sua extração e utilização.

Um exemplo de tais desmandos é a emissão de CO<sub>2</sub>, cuja concentração no ar tem aumentado nos últimos anos devido, principalmente, aos gases emitidos pelo escapamento dos veículos e outros usos de combustíveis fósseis. Portanto, diante desse contexto, é urgente a conscientização de que os avanços tecnológicos não podem ir além, sem dar igual atenção e importância ao interesse público na preservação do equilíbrio ecológico do planeta.

Uma notável fonte de CO<sub>2</sub>, responsável por 5% (WBCSD, 2004) da emissão mundial, é a fabricação do cimento que emite para a atmosfera uma quantidade de CO<sub>2</sub>, em massa, aproximadamente igual a do clínquer produzido (PENTTALA, 1997). Além disso, depois do alumínio e do aço o cimento é o material que mais consome energia na sua fabricação (ZHANG e MALHOTRA, 1996).

Para Isaia (1995), além dos aspectos técnicos e funcionais, a sociedade exige bom desempenho dos materiais ou da construção e também das interações com o meio ambiente, em busca daqueles, cuja obtenção ou realização se materializa com menor impacto ecológico e menor ônus energético. A fim de corroborar seu argumento, o autor usa o pressuposto de Mehta (1986b) para o qual a escolha dos materiais de construção deveria atender ao quádruplo enfoque iniciado pela letra E: *Engenharia, Economia, Energia e Ecologia*. Tal premissa não pode, de modo algum, ser esquecida por uma Engenharia que pretenda responder verdadeiramente, às demandas sociais.

Assim, diante do impacto que representa a fabricação do cimento, devemos procurar alternativas que proporcionem redução no consumo de energia e redução na emissão de CO<sub>2</sub>. Uma estratégia ecologicamente eficiente é a incorporação de resíduos de outras indústrias na produção do cimento, com ganhos de desempenho na durabilidade dos concretos.

O crescimento da população mundial, de acordo com a projeção atual, passará dos atuais 6 bilhões para 9 bilhões em 2050 e 11 bilhões até o final do século. É de se esperar também um crescimento no consumo de concreto, na mesma proporção, e conseqüentemente o lançamento na atmosfera de uma grande quantidade de CO<sub>2</sub>, decorrente da fabricação do cimento, o principal constituinte daquele, que atualmente chega a 1,5 bilhão de toneladas por ano (WBCSD, 2004). Estudos apresentaram que, com inovações tecnológicas na fabricação do clínquer, consegue-se reduzir em 4,3% a emissão de CO<sub>2</sub>, mas, com a substituição de 25% do clínquer por cinza volante, a redução é de 24,6% e, com a substituição de 30% desse por escória de alto forno, a redução chega a 29%, o que demonstra a importância das adições minerais na redução da emissão de CO<sub>2</sub> (ROSKOVIC e BJEGOVIC, 2005).

O concreto, depois da água, é o material mais consumido pelo homem e também o mais largamente utilizado em construções, em virtude da sua capacidade de fornecer excelente durabilidade e propriedades mecânicas a um relativo baixo custo. Devido ao elevado consumo do concreto e a sua possibilidade de incorporar resíduos industriais é que, cada vez mais, devemos estudar o comportamento de concretos compostos com esses resíduos, buscando determinar a máxima quantidade que pode ser incorporada em função da durabilidade requerida, visto que, atualmente, a produção de resíduos industriais é muito superior à sua utilização no concreto.

O arroz é uma das plantas que contém grande quantidade de silicatos, principalmente na casca. Essa, sendo considerada um resíduo, não serve para alimentação de animais, pois tem poucas propriedades nutricionais. Somado a isto, possui uma superfície irregular e abrasiva, sendo muito resistente à degradação natural, fato que gera sérios problemas de acúmulo. A maneira mais usual de reduzir a quantidade deste resíduo é com a queima a céu aberto, cujo resultado são cinzas que agredem o ambiente através da poluição do ar, do solo ou de mananciais aquíferos (SENSALE e DAL MOLIN, 2001).

Assim, a utilização da cinza de casca de arroz no concreto apresenta-se como uma resposta positiva ao questionamento a respeito do que se fazer com esse resíduo agrícola.

Além disso, não podemos esquecer que o arroz é considerado o cereal mais consumido no Mundo. Estima-se que a produção mundial para 2005 seja de 621

milhões de toneladas (FAO, 2005). No Brasil, a adição da cinza de casca de arroz ao concreto torna-se extremamente significativa já que o país encontra-se entre os 10 maiores produtores de arroz do Mundo, com uma produção de aproximadamente 10,5 milhões de toneladas de grãos na safra 2002/2003 (IBGE, 2004), sendo que o Rio Grande do Sul é responsável por aproximadamente 5,5 milhões de toneladas. De acordo com Mehta e Monteiro (1994), cada tonelada de arroz produz aproximadamente 200Kg de casca, o que, por combustão, gera 40Kg de cinza. Com isso, só no Brasil, seriam 420 mil toneladas de resíduos (cinzas) produzidos com a safra 2002/2003 e, por conseguinte, mais efeitos destrutivos contribuindo para agravar os problemas ambientais.

De acordo com Missau (2004), a crise energética mundial tem conduzido a humanidade à busca cada vez maior de fontes de energias renováveis como a energia solar, a energia eólica, a energia hidráulica, as marés e a biomassa. Estas apresentam-se como quase inesgotáveis e oferecem inúmeras vantagens em relação às energias sujas (nuclear, carvão mineral e petróleo), como as de: assegurar a sustentabilidade da geração de energia em longo prazo; reduzir as emissões atmosféricas de poluentes; criar novas oportunidades de empregos e diminuir o desmatamento das florestas.

O Protocolo de Quioto, um acordo internacional que estabelece metas para controlar a emissão dos gases estufas, responsáveis pelo aquecimento do planeta, entrou em vigor em fevereiro deste ano. O Protocolo obriga 39 países desenvolvidos a reduzir, no período de 2008 a 2012, a emissão de seis gases poluentes em 5,2% frente ao índice global registrado em 1990. Os gases são: CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono), CH<sub>4</sub> (metano), N<sub>2</sub>O (óxido de nitrogênio) e três gases flúor (HFC, PFC e SF<sub>6</sub>). Para tal, determina, entre outras orientações, a diminuição do uso de energias fósseis, como carvão, petróleo e gás natural, que representam 80% destas emissões. Quando a casca do arroz é descartada a céu aberto, seu processo de decomposição libera gás metano na atmosfera. Da mesma forma, a incineração da casca em ambientes fechados emite gases poluentes. Uma das alternativas para contornar este problema é o uso da casca de arroz como fonte de energia limpa em usinas termoelétricas. O aproveitamento da biomassa como combustível representa uma solução bastante eficiente diante de um abastecimento energético apertado e da necessidade de uso cada vez mais racional da água, principal fonte de energia primária do país. Mas esta não é a única vantagem: preservar o meio ambiente,

reduzir o uso de combustíveis fósseis, diminuir o custo de armazenagem e transporte do resíduo industrial do arroz, reduzir gastos com energia elétrica e ainda gerar como subproduto cinza de casca de arroz com alto teor de sílica, que possui crescente valor de mercado, são outros benefícios. (PEROZZI, 2004; PEROZZI e PEREZ, 2005).

Com efeito, como bem assinalam Silveira e Dal Molin (1995), além de dar finalidade ao resíduo, a utilização da cinza de casca de arroz no concreto influencia beneficemente tanto os aspectos relacionados com a resistência mecânica como os relativos à durabilidade. Estes aspectos são favorecidos pelos efeitos microfiller e pozolânico que ocorrem sobre os produtos de cimento hidratado. O efeito microfiller acontece devido ao tamanho das partículas, que se introduzem entre os grãos de cimento e se alojam nos interstícios da pasta, reduzindo o espaço disponível para a água e atuando como ponto de nucleação, dificultando a orientação preferencial dos cristais de hidróxido de cálcio. O efeito pozolânico está relacionado com a atividade pozolânica, ou seja, com a capacidade de reação da pozolana com a cal. Neville (1997) argumenta que a pozolanicidade ainda não foi perfeitamente entendida, pois tanto a área específica quanto a composição química têm um papel importante e estão relacionadas entre si, o que torna o problema mais complexo.

Além da contribuição ecológica, portanto, o uso de cinza de casca de arroz no concreto justifica-se por razões de ordem tecnológica e econômica. Isso porque confere ao concreto, entre outras propriedades importantes, maior resistência aos ataques ácidos, maior resistência aos sulfatos, inibição da reação álcali agregado, maior resistência mecânica e menor permeabilidade.

Nas últimas décadas, tem-se observado um aumento significativo de construções com problemas precoces de durabilidade, evidenciando que aquela "eternidade" esperada das estruturas de concreto não corresponde à realidade dos fatos. A partir dessa constatação, várias atitudes vêm sendo tomadas pela indústria da construção civil no sentido de minimizar esses problemas e aumentar a vida útil das estruturas de concreto, sem despesas excessivas de manutenção. Uma delas é o emprego de concretos resistentes e duráveis, ou seja, concretos de alto desempenho (CAD) que apresentam resistência e durabilidade superiores ao concreto convencional, devido a uma microestrutura mais compacta, com menor possibilidade de penetração de agentes agressivos. A maior durabilidade do CAD resulta em maior vida útil para a estrutura e, por conseqüência, numa maior relação

custo/benefício. A maior resistência do CAD, por sua vez, propicia a execução de peças mais esbeltas, com relativa redução no consumo de concreto, ganho de área útil, diminuição de cargas nas fundações etc. Isaia e Gastaldini (2003) relatam em seus estudos que a elevação na resistência à compressão axial de 30MPa para 60MPa, resultou numa economia de concreto entre 15% e 20%.

Entre os processos de deterioração das estruturas de concreto, destaca-se a corrosão das armaduras. Essa normalmente ocorre como resultado da redução da alcalinidade, que, por sua vez, é devida à carbonatação do concreto, à lixiviação dos álcalis ou à presença de quantidade significativa de íons cloreto no concreto (BASHEER et al., 2002).

A durabilidade das estruturas de concreto armado é resultado da ação protetora do concreto sobre o aço. Quando esta proteção deixa de existir, a estrutura torna-se vulnerável ao fenômeno da corrosão e, nestas condições, é controlada pela resistividade elétrica do concreto e pela disponibilidade de oxigênio ao redor da armadura (GJØRV et al., 1977; ANDRADE, 1995).

A resistividade elétrica do concreto está relacionada com algumas aplicações específicas, tais como dormentes ferroviários, estruturas em que o concreto é usado para proteção contra correntes de fuga etc., mas torna-se uma propriedade extremamente importante devido ao fato de influenciar diretamente na velocidade de corrosão de armaduras, principal processo de deterioração das estruturas.

Para algumas estruturas de concreto, onde a durabilidade é imprescindível e o risco de corrosão é presente, como, por exemplo, em estruturas próximas a linhas férreas, os índices de resistividade requeridos são bastante elevados. Cascudo (1997) comenta que, para as estruturas do Metrô de São Paulo, foi solicitada uma resistividade elétrica mínima de 60kΩ.cm, que é considerado um índice rígido entre os pesquisadores, porém compatível com as exigências e o rigor da obra.

A resistividade elétrica do concreto depende da estrutura dos poros e da composição iônica da solução aquosa dos mesmos e é sensível à temperatura e à umidade do concreto. A utilização de adições minerais nesse altera a distribuição do tamanho dos poros, promovendo um refinamento e reduz a condutividade elétrica da solução aquosa dos mesmos. Dessa forma, causa grande influência na resistividade elétrica, elevando seu valor.

Tanto as vantagens técnicas que a utilização da cinza de casca de arroz promove em quase todas as características dos concretos estruturais, como os



benefícios sociais relacionados com a redução de problemas de deposição no meio ambiente, servem, cada vez mais, de estímulo ao desenvolvimento de pesquisas que investiguem as potencialidades desse material.

Atualmente existem poucos estudos relacionados com a resistividade elétrica de concretos com adição de cinza de casca de arroz. Através da revisão bibliográfica encontrou-se apenas os trabalhos de Abreu (1998) e Missau (2004), sendo que este último foi realizado aqui na Universidade Federal de Santa Maria.

Devido a esses fatos, dentro do contexto atual de aproveitamento de resíduos e geração de novos materiais, este trabalho pretende contribuir para o futuro emprego da cinza de casca de arroz em concretos.

### **Objetivo**

A pretensão deste trabalho é, através de seus resultados, fornecer subsídios técnicos e científicos referentes a parâmetros de durabilidade do concreto, tendo como objetivo, estudar a influência que a substituição de parte do cimento por cinza de casca de arroz exerce sobre algumas propriedades ligadas à durabilidade do CAD, em especial a resistividade elétrica, buscando determinar qual teor que proporciona as melhores características. Para isto, investigou-se misturas com aglomerantes compostos por diferentes teores de adições minerais, de 10%, 20% e 30% de cinza de casca de arroz, uma mistura contendo 100% de cimento, denominada mistura de referência, uma com teor de 35% de cinza volante e uma com teor de 50% de escória de alto forno. Além da mistura de referência, as duas últimas citadas também foram utilizadas como parâmetro de comparação por corresponderem aos teores (35% e 50%) médios usados na produção do cimento Portland pozolânico (CP IV) e cimento Portland de alto forno (CP III), respectivamente.

Este questionamento principal pode ser desdobrado em perguntas mais específicas como:

- A adição de cinza de casca de arroz é benéfica à durabilidade, em especial à resistividade elétrica do concreto?

- Em que medida o teor de substituição de cinza de casca de arroz influencia na resistividade elétrica, na composição da solução aquosa dos poros e na estrutura dos poros do concreto?
- Como é o comportamento de concretos com cinza de casca de arroz, frente àqueles compostos com cinza volante e escória de alto forno, adições largamente utilizadas no sul e sudeste do país?
- Como varia a resistividade elétrica, bem como as demais propriedades estudadas, à medida que aumenta a relação água/aglomerante ( $a/ag$ ) e a idade?
- Se a especificação do concreto se referir apenas à resistência à compressão, como comporta-se a resistividade elétrica desses concretos ao dosarmos todos para atingir um mesmo patamar de resistência?
- Qual a mistura com melhor relação CUSTO/BENEFÍCIO, considerando as propriedades estudadas?

### **Estrutura da dissertação**

A dissertação está estruturada em quatro capítulos. O primeiro e o segundo apresentam a revisão bibliográfica sobre a temática investigada. O terceiro faz o relato dos materiais e ensaios utilizados na fase experimental. Finalmente, o quarto capítulo versa sobre a análise e discussão dos resultados obtidos.

O capítulo I apresenta os aspectos referentes ao processo de corrosão das armaduras em concreto armado, relatando as condições necessárias para que ocorra a corrosão, os fatores desencadeantes e controladores do processo, bem como os efeitos causados na estrutura.

O capítulo II aborda a resistividade elétrica do concreto, apresentando as características do concreto relacionadas com esta propriedade e os fatores que a influenciam. O mesmo capítulo apresenta o método dos quatro eletrodos (método de Wenner) e os fatores intervenientes na utilização deste método para medir a resistividade elétrica do concreto.

O capítulo III relaciona as variáveis envolvidas e uma descrição pormenorizada dos materiais e ensaios utilizados na fase experimental da presente pesquisa. Apresenta também as questões que a pesquisa propõe-se a responder.

A análise e discussão dos resultados são abordadas no capítulo IV, onde, no decorrer das discussões, procurou-se comparar os resultados obtidos na presente pesquisa com as conclusões de outros pesquisadores. Também são apresentadas integrações dos resultados, análises das misturas em um mesmo patamar de resistência à compressão e resistividade elétrica e, por último, um estudo preliminar do comportamento das misturas investigadas, em relação à resistividade elétrica, quando submetidas a um ambiente agressivo.

Por fim, a conclusão retoma as respostas aos questionamentos levantados, resumindo e reafirmando os principais pontos de discussão do trabalho.

# 1 CORROSÃO DAS ARMADURAS NO CONCRETO

## 1.1 Considerações iniciais

Para produzir um metal é necessário aplicar energia, ao minério de ferro, em um processo de redução. O metal, perdendo energia através de reação espontânea, retorna, gradualmente, ao seu estado natural, que é mais estável. Tal fenômeno é chamado de corrosão metálica que, conforme Helene (1993), pode ser definida em seu sentido mais amplo, como a interação destrutiva de um material com o meio ambiente, seja por ação física, química, eletroquímica ou a combinação destas.

A corrosão das armaduras, segundo a natureza do processo, pode ser classificada em *química* ou *oxidação* e *eletroquímica* ou *aquosa*. A primeira se dá por uma reação gás-metal, com formação de uma película de óxido, sendo um processo extremamente lento à temperatura ambiente, que não provoca deterioração substancial das superfícies metálicas, exceto quando se tratar de gases extremamente agressivos. A segunda é a *corrosão* propriamente dita, pois é a que efetivamente traz problemas às obras civis. Trata-se de um ataque de natureza preponderantemente eletroquímica, que ocorre em meio aquoso, como resultado da formação de uma pilha ou célula de corrosão, com eletrólito, constituído a partir da presença de umidade no concreto e da diferença de potencial entre trechos da superfície do aço. Este tipo de corrosão é também responsável pelo ataque que sofrem as armaduras antes de sua utilização, quando ainda armazenadas no canteiro (HELENE, 1986; CASCUDO, 1997).

O concreto, em condições normais, fornece às armaduras um alto grau de proteção contra à corrosão, ou seja, uma proteção física através da camada de revestimento, que dificulta a entrada de agentes agressivos do meio, e uma proteção química devido ao pH elevado do extrato aquoso (em torno de 12,5), fator determinante para a formação de uma capa ou película protetora de caráter passivo, que envolve a armadura. Essa película forma-se logo após o início da hidratação do cimento e é composta por óxido de ferro, apresentando uma variação de composição que vai do  $Fe_3O_4$  (magnetita) ao  $\gamma-Fe_2O_3$ . Pode ser resultante da combinação da ferrugem superficial ( $Fe(OH)_3$ ) com o hidróxido de cálcio, formando o ferrato de cálcio ( $CaO \cdot Fe_2O_3$ ). O filme passivo é muito aderente e delgado

(normalmente invisível), cuja espessura varia de  $10^{-3}$  a  $10^{-1}$   $\mu\text{m}$ . Uma vez destruída essa película protetora, seja pela chegada da frente de carbonatação, seja pela ação deletéria dos cloretos, ou ainda, pela ação simultânea de ambos os fatores, a armadura ficará vulnerável ao fenômeno da corrosão (CASCUDO, 1997; NEVILLE, 1997).

## 1.2 Corrosão da armadura em meio aquoso

O processo de corrosão das armaduras em concreto armado é um caso específico de corrosão eletroquímica em meio aquoso. Esta corrosão conduz à formação de óxidos/hidróxidos de ferro, produtos de corrosão avermelhados, pulverulentos e porosos, denominados ferrugem. Segundo Helene (1986), só ocorre nas seguintes condições:

- *deve haver um eletrólito*: o eletrólito é a fase líquida contida nos poros do concreto. É uma solução saturada de hidróxido de cálcio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (portlandita), embora contenha também  $\text{NaOH}$  e  $\text{KOH}$ , além de íons agressivos oriundos do meio externo. Normalmente está disponível em quantidade suficiente para possibilitar o contato eletroquímico entre o cátodo e o ânodo. Apresenta-se sob a forma de uma película sobre a superfície do aço e é fornecido pela presença de umidade no concreto (HELENE, 1993; CASCUDO, 1997);
- *deve haver uma diferença de potencial*: a diferença de potencial pode ser gerada por diferença de umidade, concentração salina, tensão no concreto e no aço, aeração devido à maior ou menor compacidade e qualidade do concreto, etc., sendo esta última considerada a principal causa geradora de diferenças de potencial. A Figura 1.1 mostra que, na formação da pilha de aeração diferencial, as zonas menos aeradas (concretos mais densos) tornam-se cátodos e as zonas mais aeradas (concretos mais porosos) tornam-se áreas preferencialmente anódicas (HELENE, 1986; CASCUDO, 1997);
- *deve existir oxigênio*: o oxigênio é necessário para a formação da ferrugem (óxido/hidróxido de ferro). Seu acesso é possibilitado pela porosidade do concreto, que promove sua interação com o meio. Pode-se dizer que todo o processo eletroquímico de corrosão do aço é controlado pelo acesso de oxigênio dissolvido no eletrólito às regiões catódicas (CASCUDO, 1997);

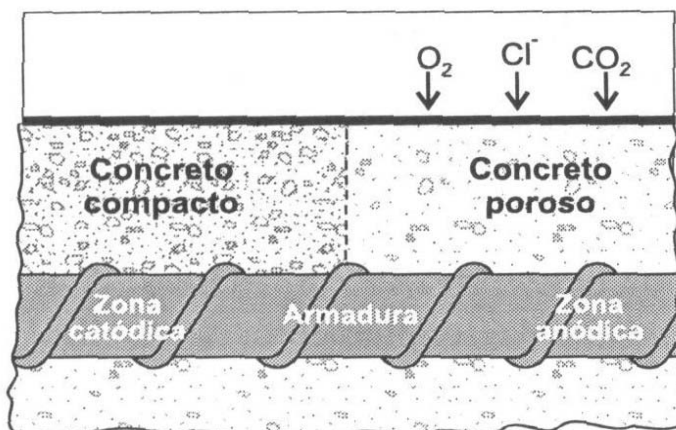


Figura 1.1 – Efeito do maior ou menor acesso de oxigênio (CASCUDO, 1997)

- *pode haver agentes agressivos*: a corrosão pode ser acelerada por agentes agressivos contidos ou absorvidos pelo concreto, uma vez que eles aumentam de forma significativa a condutividade elétrica do eletrólito. Os agentes agressivos podem ser: os íons sulfetos ( $S^{2-}$ ), os íons cloretos ( $Cl^-$ ), o dióxido de carbono ( $CO_2$ ), os nitritos ( $NO_3^-$ ), o gás sulfídrico ( $H_2S$ ), o cátion amônio ( $NH_4^+$ ), os óxidos de enxofre ( $SO_2$ ,  $SO_3$ ), fuligem etc. (CASCUDO, 1997).

Tendo-se os elementos básicos, a corrosão desenvolve-se com a presença das seguintes reações, de acordo com Cascudo (1997):

- *reações de dissolução do ferro (oxidação)* que ocorrem nas zonas anódicas (corroídas):



- *reações de redução do oxigênio* que ocorrem nas zonas catódicas (não corroídas):



A partir daí, os íons  $Fe^{2+}$  migram pelo eletrólito em direção ao cátodo e os íons hidroxila,  $OH^-$ , migram em direção ao ânodo. Numa região intermediária, eles encontram-se e precipita-se o hidróxido ferroso, de acordo com a seguinte reação:

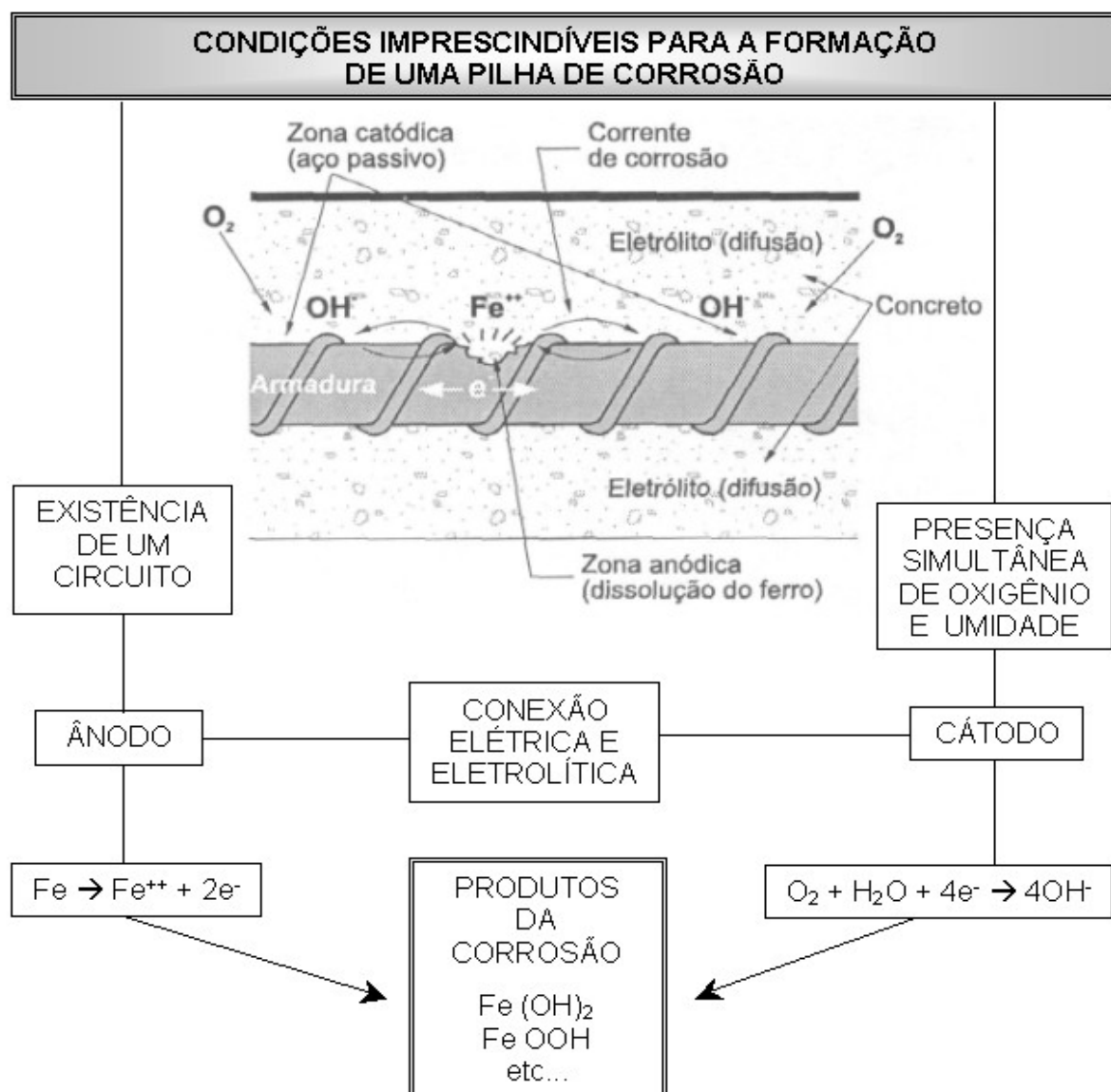


Este produto de corrosão pode ser formado inclusive em regiões próximas do cátodo (região não corroída), isto porque o  $\text{OH}^-$ , um íon maior e de maior massa do que o  $\text{Fe}^{2+}$ , apresenta mobilidade iônica menor do que o íon de ferro.

O hidróxido ferroso é um produto de cor marrom e fracamente solúvel; conforme o teor de oxigênio presente, ele pode sofrer transformações e gerar outros produtos de corrosão, conforme será visto.

A Figura 1.2 mostra esquematicamente as condições imprescindíveis para a formação de uma pilha ou célula de corrosão. Depois disso acontecer, tem-se um ânodo, um cátodo, um condutor metálico e um eletrólito. Qualquer diferença de potencial entre as zonas anódicas e catódicas acarreta o aparecimento de corrente elétrica. Dependendo da magnitude dessa corrente e do acesso de oxigênio, poderá ou não haver corrosão.

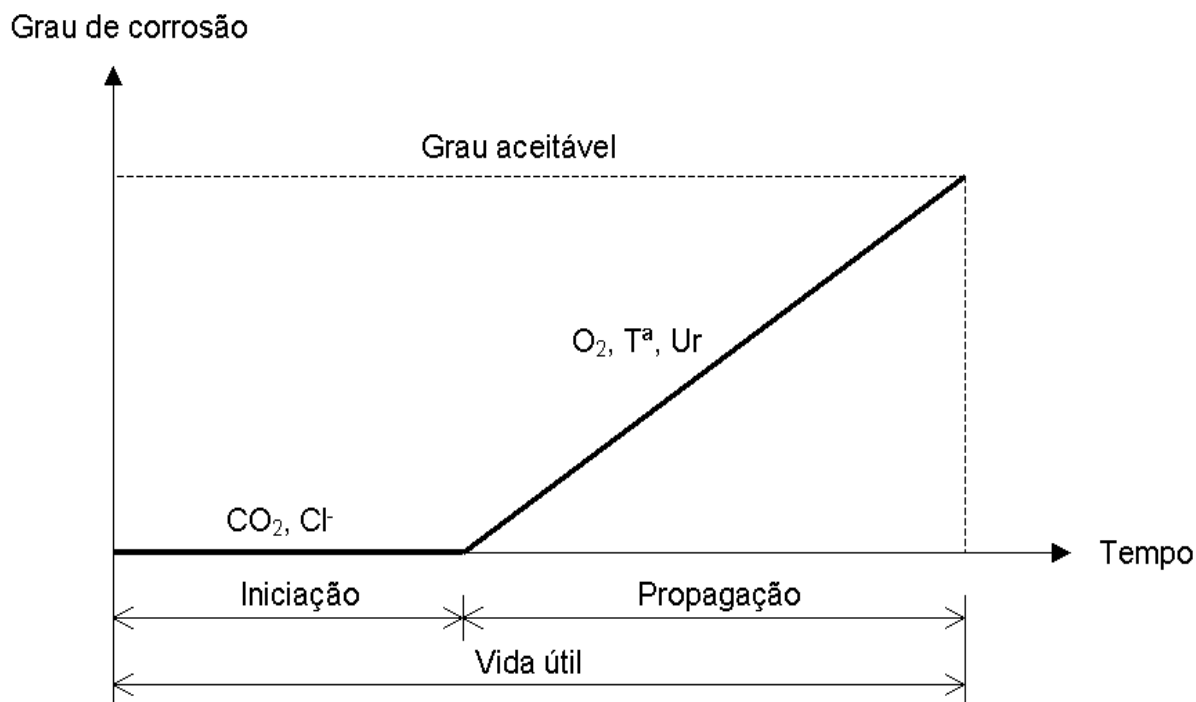
O *ânodo* é o local da superfície metálica onde se verificam as reações anódicas de oxidação do átomo metálico. Estas reações consistem em o átomo metálico deixar o metal para formar íons desse metal no eletrólito. No ânodo, há uma perda de elétrons, pois estes, oriundos das reações anódicas, movem-se para o cátodo, onde serão consumidos em outra reação superficial, sendo o ânodo a região que fica corroída. O *cátodo* é o local onde se verificam reações catódicas de redução de espécies eletroquímicas ou íons do eletrólito. No cátodo, há um ganho de elétrons oriundos de regiões anódicas, necessário para viabilizar as reações de redução de cátions em suas proximidades. No caso de estruturas de concreto armado, a água de poros do concreto tem a função de *eletrólito*, onde ocorre a condução iônica; e a transferência de cargas (condução eletrônica) se dá através da armadura, que atua como *condutor metálico*.



**Figura 1.2 – Formação de uma pilha de corrosão em concreto armado – adaptação (ANDRADE, 1992; CASCU DO, 1997)**

Com relação à corrosão das armaduras, Tuutti (1982) propôs um modelo simplificado de vida útil, representado na Figura 1.3, em que o processo de corrosão apresenta-se dividido em dois períodos: o de *iniciação*, que corresponde ao intervalo de tempo entre a execução da estrutura e a despassivação da armadura; e o de *propagação*, referente ao desenvolvimento da corrosão até o aparecimento de uma manifestação patológica considerada grave.



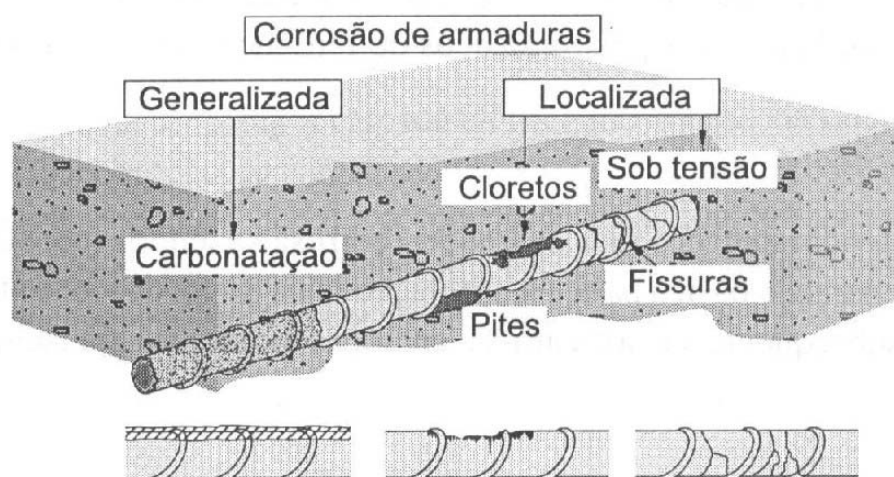


**Figura 1.3 – Modelo de vida útil em função da corrosão proposto por Tuutti (1982)**

### 1.2.1 Iniciação

O período de iniciação é determinado pela velocidade com que os agentes agressivos (frente de carbonatação ou ação dos cloretos) penetram pela camada de cobrimento até atingir a armadura, destruindo a película passiva, e pela concentração requerida desses agentes para iniciar o processo de corrosão (HELENE, 1993).

A presença de cloretos e a diminuição da alcalinidade são dois fatores que atuam durante o período de iniciação (fatores desencadeantes). Eles também determinam o tipo de corrosão que será desencadeada, podendo ser: *generalizada* (carbonatação), *localizada por pite* (cloretos) ou *localizada sob tensão fraturante* (ocorre geralmente em concreto protendido e não possui uma causa direta bem conhecida), conforme mostra a Figura 1.4 (ANDRADE, 1992; CASCUDO, 1997).



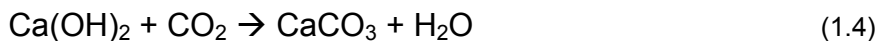
**Figura 1.4 – Tipos de corrosão e fatores que as provocam (CASCUDO, 1997)**

#### 1.2.1.1 Corrosão generalizada – carbonatação

A corrosão generalizada ocorre devido a uma redução da alcalinidade do concreto, que, por sua vez, possivelmente é causada por uma “lixiviação”, por circulação de águas puras ou ligeiramente ácidas, ou por reação dos compostos de caráter básico NaOH, KOH e  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  da fase aquosa do concreto com os componentes ácidos da atmosfera dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), para dar carbonatos-sulfatos e água. O mais abundante é o  $\text{CO}_2$ , o qual provoca o processo de redução de alcalinidade conhecido como “carbonatação” (ANDRADE, 1992).

A **carbonatação** caracteriza-se principalmente por formar uma frente de avanço do processo, conhecida como “frente de carbonatação”, que separa duas zonas com pH muito diferentes, uma com  $\text{pH} > 12$  e outra com  $\text{pH} < 9$ . O período de iniciação desse processo corresponde ao tempo que leva para a frente de carbonatação chegar até a armadura e, quando isso ocorre, a camada de passivação que envolve a armadura fica desestabilizada devido ao pH baixo, típico de um concreto carbonatado.

Segundo Neville (1997), dos componentes da pasta de cimento, o que reage mais rapidamente com o  $\text{CO}_2$  é o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Portanto, o  $\text{CO}_2$  existente no ar ou em águas agressivas combina-se, na presença de umidade, com o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , formando o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), conforme a reação simplificada:



Isso reduz o pH da água dos poros da pasta de cimento, que de 12,6 a 13,5 caem para cerca de 9, sendo que, quando todo o  $\text{Ca(OH)}_2$  carbonata-se, o pH é reduzido a 8,3. Assim, quando o pH baixo atinge as proximidades da armadura, a camada de passivação é destruída.

Para Andrade (1992), estando destruída a camada de passivação, o aço corrói-se de forma generalizada, tal como se estivesse exposto à atmosfera sem nenhuma proteção, porém com o fato agravante da umidade permanecer no interior do concreto e, portanto, em contato com a armadura muito mais tempo do que se estivesse livremente exposta ao ar, já que o concreto absorve umidade rapidamente, porém seca lentamente. Quando a carbonatação é produzida num concreto que tem cloretos, somam-se ambos os efeitos agressivos, provocando uma forte corrosão. Além disso, por efeito da ação do  $\text{CO}_2$  sobre as fases sólidas do cimento, os cloroaluminatos podem desagregar e deixar livres os cloretos que mantinham combinados.

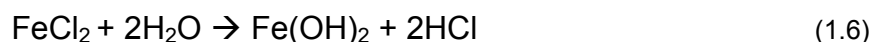
#### 1.2.1.2 Corrosão localizada por pite – cloretos

A corrosão localizada por pite pode ser desencadeada principalmente pela presença de cloretos. Os íons sulfetos e sulfatos são também agressivos, porém muito menos freqüentes e perigosos que os cloretos.

Os **cloretos** podem estar no concreto devido aos seus componentes, aditivos, água etc., ou por penetrarem do exterior através da rede de poros. Neste caso, a quantidade de cloretos vai incrementando com o tempo, podendo chegar a atacar toda a superfície da armadura e provocar velocidades de corrosão muito perigosas e intensas (ANDRADE, 1992).

O período de iniciação desse processo corresponde ao tempo que leva para os cloretos chegarem até a armadura. Quando isso ocorre, a camada de passivação que envolve a armadura é destruída de forma pontual.

Segundo Neville (1997), após os íons cloretos atravessarem a camada de passivação, estes ativam a superfície do aço e formam o ânodo, sendo o cátodo a superfície passiva. Daí ocorrem as seguintes reações:



Assim, o  $\text{Cl}^-$  foi regenerado de modo que o produto de corrosão passou a não conter cloreto, embora se forme cloreto ferroso no estágio intermediário.

Em relação ao limite de cloretos, Andrade (1992) comenta que parte dos cloretos presentes no momento de amassamento combina-se com as fases alumino-ferríticas, formando principalmente cloroaluminatos, que ficam dissolvidos na fase aquosa dos poros. De todas as formas, as normas referem-se sempre ao limite de cloretos “totais”, porque os cloretos combinados podem voltar à dissolução por efeito de processos como a carbonatação ou ataque por sulfatos. Um valor médio geralmente aceito é o de 0,4% em relação à massa de cimento.

### 1.2.2 Propagação

Uma vez despassivada a armadura, seja pela chegada da frente de carbonatação, seja pela ação deletéria dos cloretos, ou ainda, pela ação simultânea de ambos os fatores, ela fica vulnerável ao fenômeno da corrosão. Como visto anteriormente, só haverá corrosão com a presença dos três elementos, *eletrólito, diferença de potencial e oxigênio*, podendo existir ainda *agentes agressivos*. Esse período de propagação vai até o momento em que aparecem manchas de coloração vermelho-marron-acastanhado que, por serem relativamente solúveis, afloram na superfície, indicando o avanço da corrosão, ou ocorrem fissuras no concreto de cobrimento, ou ainda quando há destacamento deste.

A propagação do fenômeno depende de fatores como teor de umidade, acesso de oxigênio até a superfície da armadura, temperatura e resistividade elétrica, que influenciam e controlam a corrosão. Dentre eles, a princípio, a resistividade elétrica do concreto e a disponibilidade de oxigênio ao redor da armadura são os principais agentes do processo. A resistividade controla a

mobilidade dos íons, dificultando a sua circulação, enquanto a ausência de oxigênio no cátodo interrompe o processo. Por outro lado, pode-se simplificar dizendo apenas que, para um determinado concreto, o teor de umidade é o principal fator controlador, pois é quem determina a resistividade elétrica e a disponibilidade de oxigênio (CASCUDO, 1997; ABREU, 1998).

Com o aumento da umidade do concreto, há uma redução na sua resistividade elétrica, facilitando o desenvolvimento da corrosão. Quando os poros estão saturados, a resistividade é baixa, mas a difusão do oxigênio é reduzida, o que resulta em uma velocidade de corrosão baixa ou moderada. O mesmo acontece quando o concreto está seco, pois nesse caso a resistividade é muito elevada. Portanto, as maiores velocidades de corrosão ocorrem quando o teor de umidade do concreto é alto, porém não saturado, pois o oxigênio chega até a armadura e a resistividade elétrica é baixa o suficiente para permitir elevadas velocidades das reações de corrosão. Assim, a umidade relativa do ar ótima para a corrosão está entre 70 e 80% (ANDRADE, 1992, NEVILLE, 1997).

No período de propagação, os cloretos ( $Cl^-$ ) atuam como catalisadores das reações que formam produtos de corrosão, além de participarem no aumento da condutividade elétrica do eletrólito.

Segundo Andrade (1992), a temperatura tem um papel duplo nos processos de deterioração. Por um lado, seu incremento promove um aumento da velocidade de corrosão e da mobilidade dos íons, porém, visto de outro ângulo, a sua diminuição pode dar lugar a condensações que, por sua vez, podem produzir incrementos locais onde exista umidade. Devemos ter cuidado com a umidade, o oxigênio e a temperatura, pois podem ter efeitos opostos. Por exemplo, uma maior umidade facilita a corrosão mas impede o acesso de oxigênio; um incremento de temperatura acelera a corrosão, mas diminui a condensação.

### **1.3 Efeitos da corrosão**

A corrosão de armaduras em concreto tem como principais efeitos a perda de massa das armaduras e o surgimento de um estado de fissuração, podendo ocorrer o destacamento do concreto de cobertura, devido à ação de produtos de

corrosão de alta expansibilidade, os quais tensionam internamente o concreto à medida que vão sendo formados.

Nas regiões onde o concreto é de qualidade inadequada ou há cobertura deficiente da armadura, há progresso da corrosão com formação de óxido ou hidróxido de ferro, ocupando volumes bem maiores do que o inicial da armadura e causando, assim, pressões de expansão que podem chegar a 40 MPa (CÁNOVAS, 1988). Assim, surgem fissuras no concreto, já em processo de corrosão, na direção paralela à armadura. Desse modo, fica facilitada a penetração dos agentes agressivos, chegando a provocar o lascamento do concreto.

No entanto, para Andrade (1992), nem sempre são produzidas fissuras quando as armaduras se corroem. Se o concreto está muito úmido, os produtos da corrosão são gerados a uma velocidade constante e podem migrar através da rede de poros e aparecer na superfície em forma de manchas, que inclusive, às vezes, não coincidem com a posição das armaduras; se existir circulação de água, proveniente de chuva, por exemplo, aparecem onde emerge a umidade.

### 1.3.1 Produtos de corrosão

A natureza dos produtos finais da corrosão de armaduras depende de diversos fatores, como a temperatura e, principalmente, o teor de cloretos. No final do processo, os produtos encontrados são basicamente a goetita ( $\alpha\text{FeOOH}$ ), a lepidocrocita ( $\gamma\text{-}(8\text{FeOOH}, \text{FeOCl})$ ) e a magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Destes, a goetita e a lepidocrocita são expansivos, enquanto a magnetita não envolve um aumento de volume tão grande na formação da “ferrugem”. Os volumes relativos de alguns dos principais produtos de corrosão do ferro são apresentados na Figura 1.5 (CASCUDO, 1997).

A respeito da incidência dos diversos tipos de produtos de corrosão formados no concreto, Raharinaivo e Genin (1986 apud CASCUDO, 1997) apresentam dados em função do teor de cloretos (relação  $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$ ), à temperatura de 25°C, segundo os quais:

- para  $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-] < 1$ , tem-se apenas goetita e magnetita;

- para  $[Cl^-]/[OH^-] > 1$ , tem-se lepidocrocita, goetita, magnetita e akaganeita ( $\beta$ -FeOOH), sendo que a ocorrência da magnetita se dá para  $1 < [Cl^-]/[OH^-] < 2,5$  e a akaganeita ocorre para  $[Cl^-]/[OH^-] > 4$ .

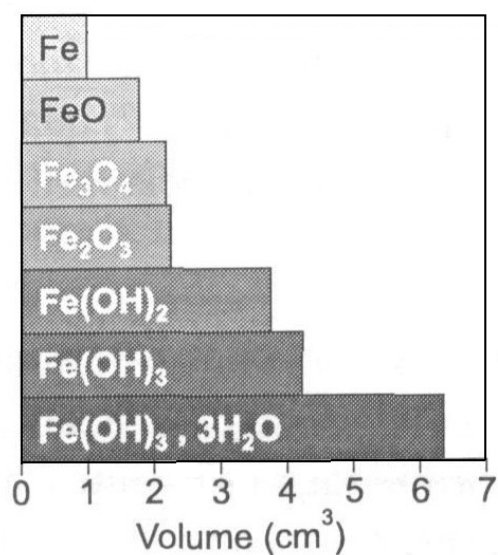


Figura 1.5 – Volumes relativos do ferro e de alguns de seus produtos de corrosão (CASCUDO, 1997)

## 2 RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO

### 2.1 Considerações iniciais

Resistividade elétrica é a propriedade que caracteriza a dificuldade com que os íons se movimentam no concreto, ou seja, controla o fluxo de íons que difundem no concreto através da solução aquosa presente nos seus poros, sendo altamente sensível ao teor de umidade de equilíbrio e à temperatura do concreto. É também chamada de resistência específica e definida como a resistência elétrica de um material homogêneo e isotrópico, de seção reta e comprimento unitário. Por condutividade elétrica entende-se o inverso da resistividade elétrica (HELENE, 1993).

Segundo Cascudo (1997), a resistividade elétrica do concreto, juntamente com o acesso de oxigênio à armadura constituem os dois elementos principais controladores do processo eletroquímico que gera o fenômeno da corrosão de armaduras. Dessa forma, a velocidade de corrosão do aço no concreto depende muito da resistividade elétrica ou, por outro lado, da condutividade elétrica do eletrólito (fase líquida do concreto).

Conforme o mesmo autor, são muitos os critérios que tentam correlacionar a resistividade elétrica do concreto com a qualidade do mesmo ou com seu risco de corrosão. No entanto, vários autores concordam que valores de resistividade menor do que  $5\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$  apresentam um grande risco de acarretarem o fenômeno da corrosão.

Smith et al. (2004) relacionaram várias interpretações existentes a respeito da indicação de probabilidade de corrosão, de acordo com a resistividade elétrica do concreto, as quais estão apresentadas da Tabela 2.1.

O critério de avaliação quanto à resistividade, que pode ser utilizado e que tem sido respeitado no meio técnico-científico, foi o estabelecido pelo Comitê Euro-International du Beton (CEB 192, 1988), o qual coincide com o critério apresentado na Tabela 2.1 (CASCUDO, 1997).



**Tabela 2.1 – Critérios de avaliação da resistividade (SMITH et al., 2004)**

<b>Resistividade elétrica do concreto - kΩ.cm</b>	
Millard, Gowers, Manual do TND com 2 eletrodos e Broomfield (apud SMITH et al., 2004)	<b>Indicação de probabilidade de corrosão</b>
< 5	Muito alta
5 a 10	alta
10 a 20	baixa
> 20	desprezível

TND = teste não destrutivo  
Obs.: Critério de avaliação em conformidade com o CEB 192 (1988)

A resistividade do concreto apresenta-se como uma propriedade extremamente sensível, e muitos são os fatores que a influenciam. São importantes para a resistividade do concreto aqueles que estão diretamente ligados a sua composição como a relação água/aglomerante, o consumo de cimento utilizado, o tipo de cimento, o tipo de agregado e as adições e aditivos utilizados. Esses fatores pré-descritos irão influenciar o tamanho e a distribuição dos poros, o teor de umidade, a reserva alcalina, a sensibilidade à cura, entre outros aspectos. Esses afetam as propriedades físicas e químicas do concreto e, de alguma forma, a sua condutibilidade elétrica, ou seja, a resistividade (SCHIESSL, 1987 apud ABREU, 1998).

Para Helene (1993), quanto maior a atividade iônica do eletrólito, menor a resistividade elétrica do concreto, sendo que um aumento na relação água/aglomerante, na umidade relativa do ambiente ou eventual presença de íons agressivos como  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{H}^+$  e outros, reduzirá significativamente a resistividade do concreto. Teores de apenas 0,6% de  $\text{Cl}^-$  são suficientes para diminuir a resistividade de uma argamassa em cerca de 15 vezes (NEVILLE, 1997). Helene (1986) diz ainda que “a resistividade de um líquido é inversamente proporcional ao teor de sais dissolvidos enquanto a de materiais porosos é inversamente proporcional à umidade salina absorvida”.

A durabilidade das estruturas de concreto armado é resultado da ação protetora do concreto sobre o aço. Quando esta proteção deixa de existir, a estrutura torna-se vulnerável ao fenômeno de corrosão e, nestas condições, é controlada pela

resistividade elétrica do concreto e pela disponibilidade de oxigênio ao redor da armadura (GJØRV et al., 1977; ANDRADE, 1995).

Portanto, a resistividade elétrica é altamente influenciada pelo teor de umidade do concreto. Diante desse fato, deve-se distinguir pelo menos duas regiões: uma superficial, a qual corresponde ao concreto de cobertura da armadura sujeita a ciclos permanentes de molhagem e secagem; outra interna, onde o teor de umidade do concreto é muito mais estável. Do ponto de vista da corrosão das armaduras, há um interesse maior em controlar a região superficial, que pode ser feito através da determinação da **resistividade elétrica aparente** (HELENE, 1993).

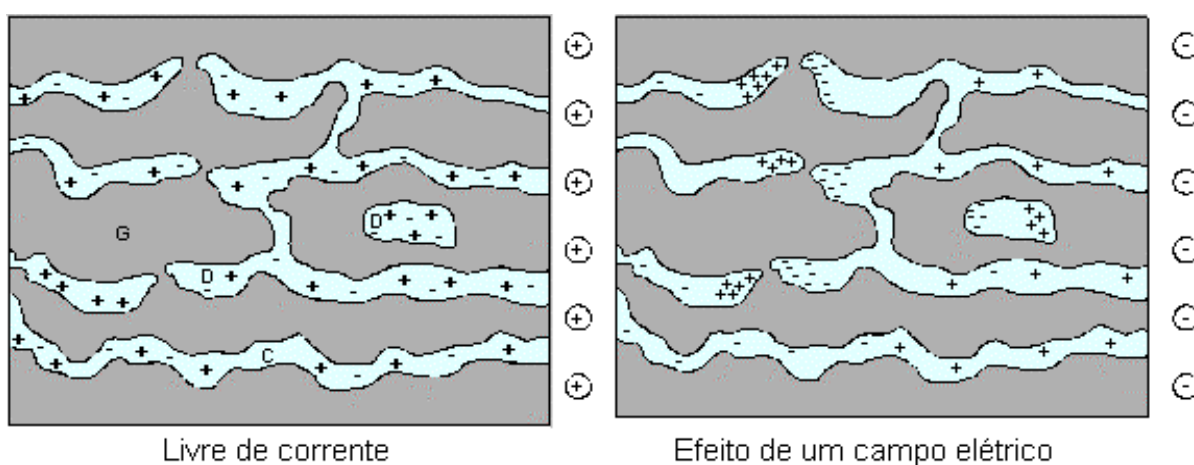
## 2.2 Características do concreto relacionadas à resistividade elétrica

A resistividade elétrica do concreto é uma propriedade extremamente sensível às suas características físicas e químicas. Existem várias teorias desenvolvidas para explicar a resistividade do concreto e como a corrente elétrica move-se através do concreto. Algumas teorias, considerando o concreto um sistema compósito, ou seja, formado por agregados embebidos em uma matriz de pasta de cimento, relacionam a resistividade elétrica do concreto com a resistividade de cada material constituinte. Sendo assim, a resistividade do concreto dependerá da resistividade dos agregados, da matriz e de ambos os volumes relativos. Outras teorias relacionam a resistividade elétrica do concreto com a resistividade da matriz de pasta de cimento e, dessa forma, a resistividade elétrica do concreto é determinada a partir da resistividade e da fração de volume da matriz do mesmo (WHITING e NAGI, 2003).

A pasta de cimento no concreto é constituída basicamente de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), sulfoaluminatos de cálcio e grãos de clínquer não hidratado. A estrutura da pasta de cimento hidratada também é constituída por diferentes tipos de vazios, os quais têm uma influência importante em suas propriedades, sendo classificados principalmente em função de suas dimensões. Os espaços interlamelares no C-S-H têm dimensões de poucos nanômetros (nm), já os poros não preenchidos pelos componentes sólidos da pasta, denominados vazios capilares, têm dimensões variando de 0,01 a  $1\mu\text{m}$ , dependendo da relação água/aglomerante e do grau de hidratação. Os vazios de ar incorporado são geralmente esféricos e suas dimensões variam normalmente entre 50 a  $200\mu\text{m}$ ,

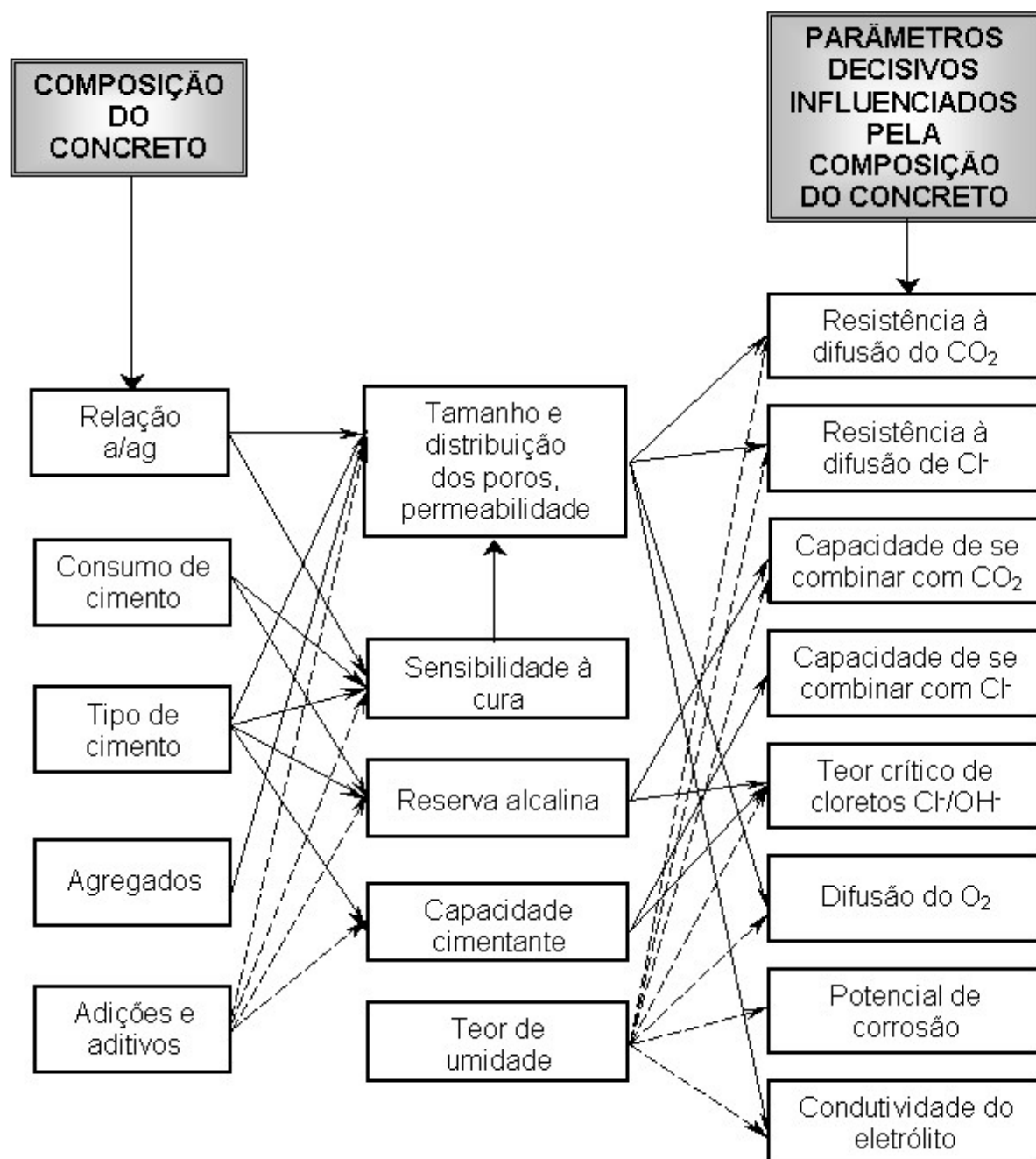
enquanto que os vazios de ar aprisionado podem chegar a 3 mm. Nestes vazios, a água pode ser encontrada sob diversas formas, tais como água capilar (descrita também com água livre), água adsorvida, água interlamelar (associada à estrutura do C-S-H) e água quimicamente combinada (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A resistividade elétrica do concreto depende principalmente da composição química da solução aquosa dos poros, da estrutura dos poros, da umidade e da temperatura do concreto, podendo o mesmo atuar como isolante ou como semicondutor elétrico. A Figura 2.1 apresenta a condução iônica na pasta de cimento endurecida, onde encontra-se o gel de cimento, os poros capilares contínuos e os poros capilares descontínuos ou fechados. A solução aquosa dos poros contém íons positivos e negativos ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) distribuídos uniformemente dentro da pasta de cimento endurecida, quando nenhuma corrente elétrica externa está agindo (livre de corrente). Quando um campo elétrico é estabelecido, os íons positivos (cátions) movem-se para o cátodo e os íons negativos (ânions) para o ânodo. A carga passante é bloqueada nos poros descontínuos ou fechados, que, por sua vez, passam a atuar como condensadores, sem afetar a resistência ôhmica do concreto. A condução iônica geralmente ocorre pela fase líquida da solução aquosa dos poros em concretos saturados, já em concretos não saturados a condução ocorre pelo filme de água adsorvida nas paredes dos poros. Em concretos muito secos, a condutividade é muito reduzida, o que torna o concreto um isolante (BRAMESHUBER e RAUPACH, 2003).



**Figura 2.1 – Diagrama de distribuição das cargas no sistema de poros de pasta de cimento endurecida. G = gel; C = poros capilares contínuos; D = poros capilares descontínuos ou fechados (BRAMESHUBER e RAUPACH, 2003)**

A Figura 2.2 apresenta, de forma esquemática, a influência da composição do concreto em suas propriedades, e seu efeito nos diversos parâmetros relacionados à corrosão das armaduras.



**Figura 2.2 – Influência da composição do concreto em parâmetros que governam a proteção da armadura contra a corrosão (SCHIESSL, 1987 apud ABREU, 1998)**

Verifica-se, através da Figura 2.2, que todos os fatores que participam da composição do concreto, bem como os que afetam as propriedades químicas e/ou físicas do mesmo influem, de alguma forma, na condutividade elétrica, ou seja, na resistividade.

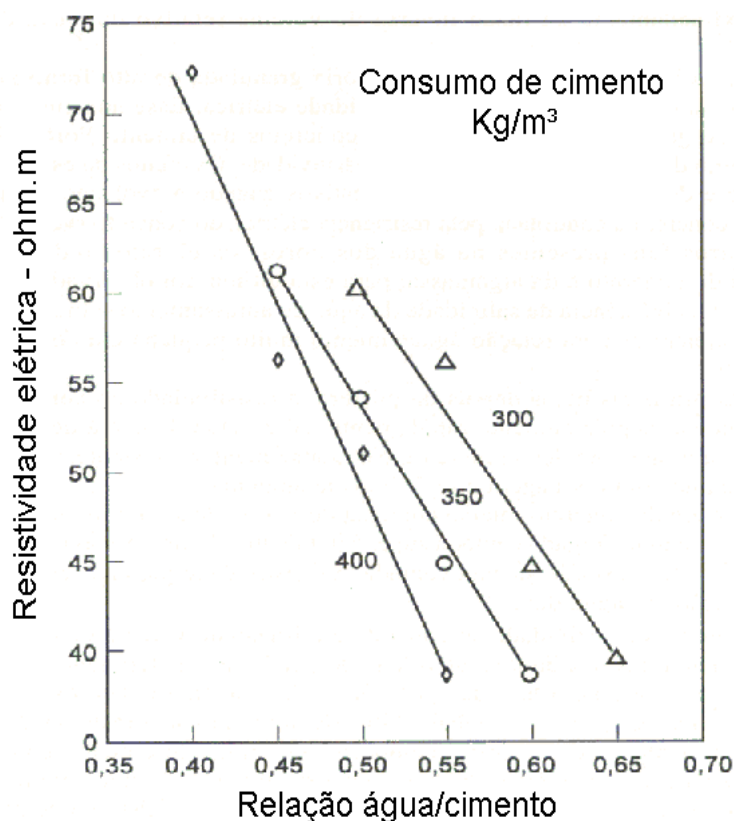
## **2.3 Efeito da dosagem e materiais do concreto na sua resistividade elétrica**

### **2.3.1 Relação água/aglomerante e consumo de cimento**

A relação água/aglomerante é sem dúvida o principal parâmetro controlador das características do concreto, influenciando a resistência mecânica e propriedades ligadas à durabilidade do mesmo. No caso da resistividade elétrica, a relação água/aglomerante tem influência indireta, ou seja, influencia a estrutura dos poros e a concentração iônica da solução aquosa dos poros, propriedades que têm atuação direta na resistividade elétrica do concreto.

Neville (1997) relata que qualquer aumento do volume de água e da concentração de íons na solução aquosa dos poros diminui a resistividade da pasta de cimento e, de fato, a resistividade decresce rapidamente com o aumento da relação água/cimento, devido principalmente a 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, conforme pode-se observar na Figura 2.3.

Percebe-se ainda em tal Figura que, à medida que a relação água/cimento diminui, a variação na resistividade elétrica também decresce, devido ao consumo de cimento. A Figura parece indicar que, para relações água/cimento baixas, a variação no consumo de cimento não causa mudanças relevantes na resistividade elétrica do concreto, sendo portanto um fator de pouca importância, nessas condições.



**Figura 2.3 – Resistividade elétrica x relação água/cimento e consumo de cimento Portland comum, ensaiado a 28 dias (NEVILLE, 1997)**

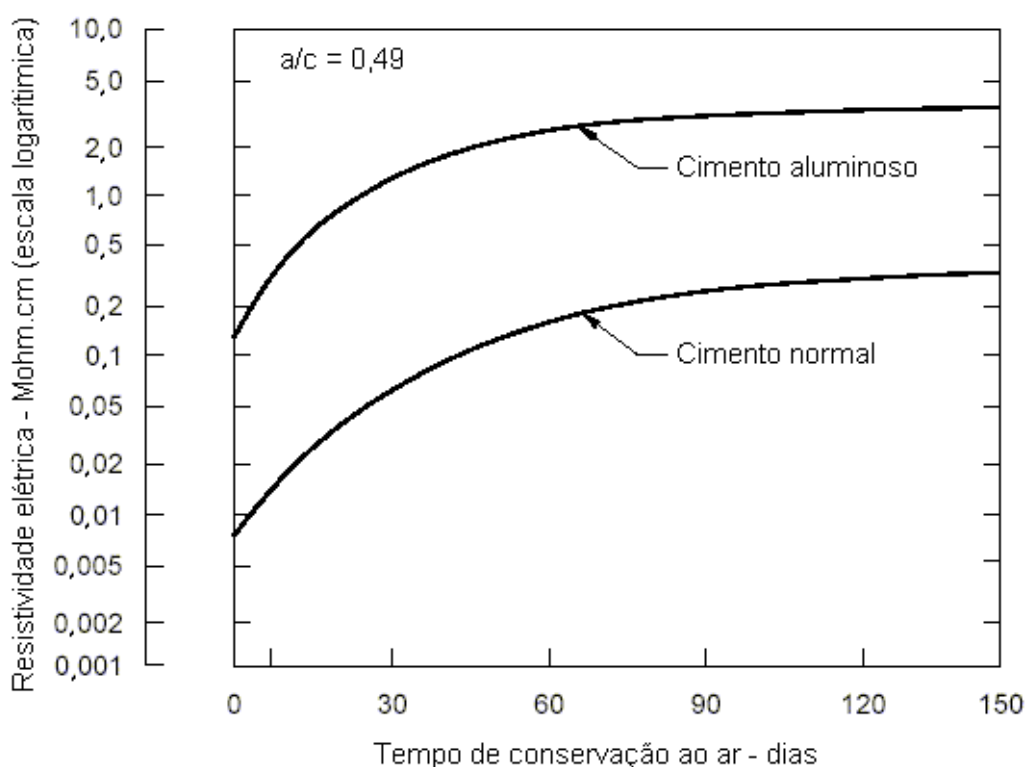
### 2.3.2 Características físicas e químicas do cimento

O tipo de cimento, o teor de álcalis e o teor de aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) são elementos relacionados à química do cimento que influem na resistividade elétrica do concreto (WHITING e NAGI, 2003).

Hammond e Robson (1955 apud WHITING e NAGI, 2003) estudaram o efeito de três tipos de cimento na resistividade elétrica do concreto, sendo eles, cimento Portland comum, cimento Portland de alta resistência inicial e cimento Portland aluminoso (alto teor de alumina). A relação água/cimento utilizada foi 0,49. Os concretos com cimento Portland comum e os com cimento Portland de alta resistência inicial obtiveram resistividades elétricas semelhantes. Entretanto, como pode-se observar na Figura 2.4, o concreto com cimento Portland aluminoso obteve resistividade elétrica muito maior do que o concreto com cimento Portland comum. Essa diferença na resistividade elétrica está relacionada com a composição química

dos cimentos, o que faz com que a composição química da solução aquosa dos poros dos concretos seja diferente e que esses tenham diferentes condutividades.

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

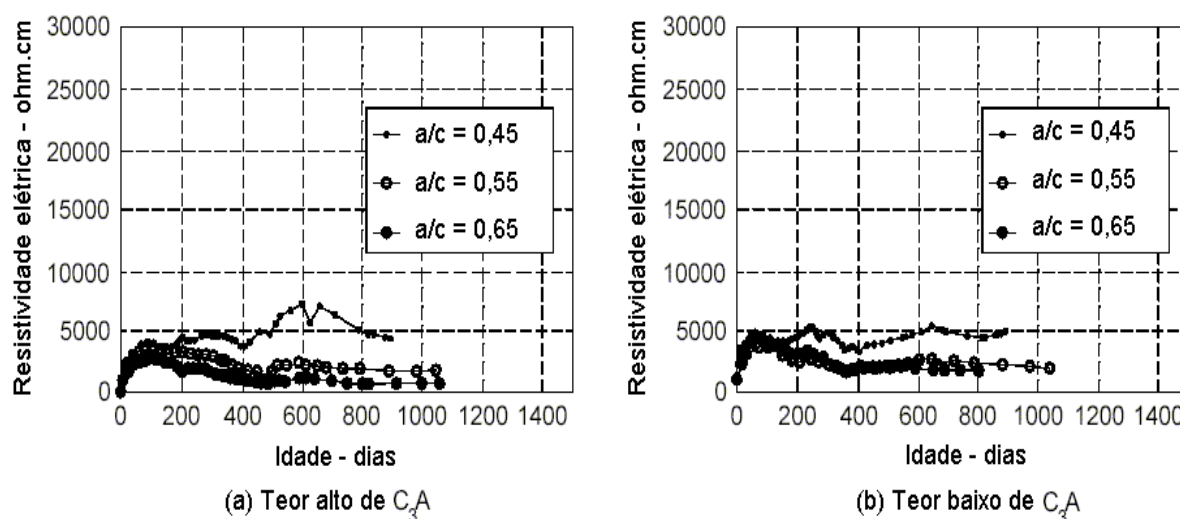


**Figura 2.4 – Efeito do tipo de cimento na resistividade elétrica do concreto (HAMMOND e ROBSON,1955 apud WHITING e NAGI, 2003)**

Monfore (1968) estudou o efeito do teor de álcalis do cimento na resistividade elétrica de concretos feitos com cimentos Portland comum, de diferentes teores de álcalis. O cimento com baixo teor continha 0,11% de  $K_2O$  e o com alto teor, 1,3% de  $K_2O$ . Os resultados mostraram que o teor de álcalis do cimento não tem influência significativa na resistividade elétrica do concreto.

Baweja et al. (1996 apud WHITING e NAGI, 2003) monitoraram o efeito do teor de aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) do cimento na resistividade elétrica do concreto. Foram utilizados cimentos com diferentes teores, sendo 9% o teor de  $C_3A$  do

cimento Portland com alto teor e 4,9% o cimento Portland com baixo teor de  $C_3A$ . Lajes de concreto com dimensões de 300x300x56mm, armadas com barras de aço de 8mm de diâmetro e adotando um cobrimento mínimo das armaduras de 20mm, ficaram imersas até a altura de 40mm em uma solução contendo 3% de cloreto de sódio (NaCl), simulando a água do mar, em ambiente climatizado (temperatura de  $23\pm 2^\circ C$  e umidade relativa de  $50\pm 5\%$ ). A resistividade elétrica foi determinada em quatro lajes idênticas (adotando-se a média), para cada uma das relações água/cimento utilizadas (0,45, 0,55 e 0,65). Os resultados obtidos durante mais de 1000 dias, conforme mostra a Figura 2.5, mostraram um comportamento semelhante nos dois concretos, o que leva à conclusão de que o teor de  $C_3A$  não causa efeitos significativos na resistividade elétrica do concreto.



**Figura 2.5 – Efeito do teor de  $C_3A$  na resistividade elétrica do concreto (BAWEJA et al., 1996 apud WHITING e NAGI, 2003)**

### 2.3.3 Agregados

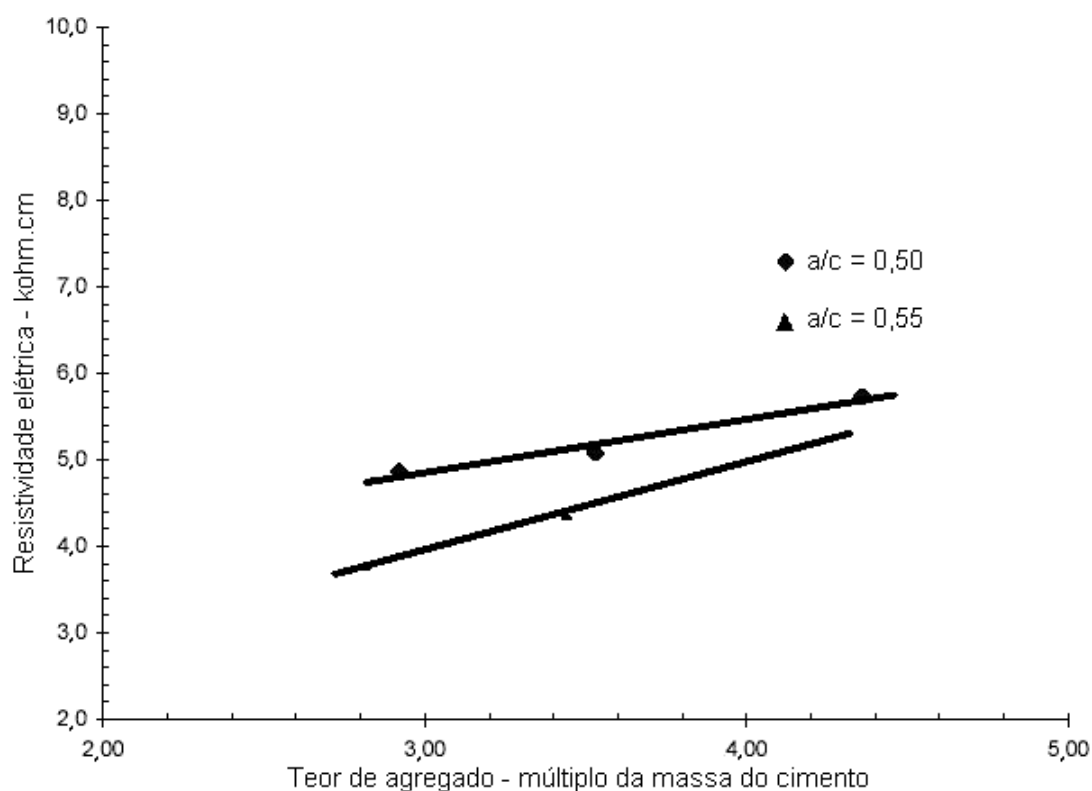
A resistividade elétrica dos agregados utilizados no concreto é muito maior do que a resistividade elétrica da pasta de cimento.

Monfore (1968) mediu a resistividade elétrica de vários agregados tipicamente utilizados no concreto, como: arenito ( $18k\Omega.cm$ ), pedra calcária ( $30k\Omega.cm$ ), mármore



(290k $\Omega$ .cm) e granito (880k $\Omega$ .cm). Comparada com a resistividade elétrica da pasta de cimento, a do granito, por exemplo, é muito maior. Embora a resistividade elétrica do concreto dependa principalmente da pasta de cimento, mudanças no tipo e teor do agregado influenciam na resistividade elétrica do concreto e, enquanto não houver um estudo específico em relação ao efeito do tipo de agregado na resistividade elétrica do concreto, é de se esperar que ao substituir um agregado por outro de maior resistividade elétrica, promova-se um aumento na resistividade elétrica do concreto.

Hughes et al. (1985) apresentaram em seus estudos a influência do teor do agregado na resistividade elétrica do concreto. A Figura 2.6 mostra os resultados obtidos. Quando o teor de agregado graúdo ( $D_{\text{máx}} = 40\text{mm}$ ), expresso como múltiplo da massa de cimento, aumentou de 2,92 para 4,36, a resistividade passou de 4,86 para 5,73 kohm.cm, para uma relação água/cimento de 0,50, mostrando que, com o aumento do teor do agregado, eleva-se a resistividade elétrica do concreto.



**Figura 2.6 – Efeito do teor do agregado na resistividade elétrica do concreto (HUGHES et al., 1985)**

Princigallo et al. (2003), investigando a influência do agregado na condutividade elétrica de concretos de cimento Portland, concluíram que, quando o teor de agregado aumenta, a condutividade elétrica do concreto diminui. Isso devido ao fato da resistividade elétrica do agregado ser muito maior do que a da pasta. Shi (2004) também chegou ao mesmo resultado. No entanto, para ele, isso ocorre devido à diluição do efeito condutivo dos íons na solução aquosa dos poros e adsorção de álcalis na superfície dos agregados. Ainda comenta que alguns íons condutivos podem ser extraídos do agregado, aumentando a condutividade elétrica do concreto.

#### 2.3.4 Aditivos

Os aditivos usados de maneira apropriada, certamente, trazem benefícios ao concreto, como, por exemplo, maior resistência ao gelo-e-degelo, aceleração ou retardamento do tempo de início de pega, melhora na trabalhabilidade, aumentando, de alguma forma, a qualidade do mesmo.

Para Whiting e Nagi (2003), o efeito específico do aditivo na resistividade elétrica do concreto aparentemente não foi atestado. Entretanto, o aditivo causa efeitos indiretos, como por exemplo, quando se utiliza um aditivo redutor de água para reduzir a relação água/aglomerante. Tem-se, como consequência da redução da relação água/aglomerante, um aumento da resistividade elétrica. Outro exemplo é o uso de aditivos incorporadores de ar, os quais modificam a estrutura dos poros e consequentemente afetam a resistividade elétrica.

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

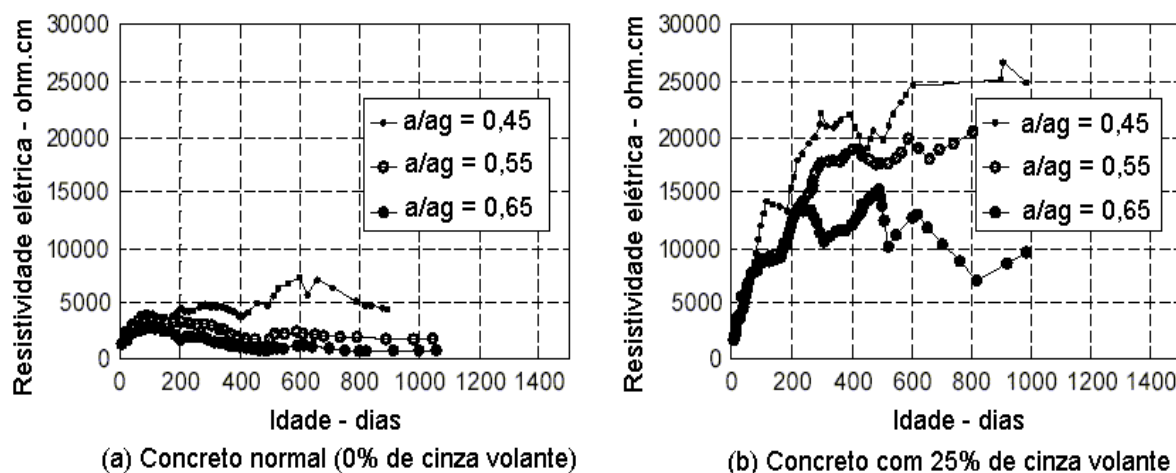
#### 2.3.5 Adições minerais

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

As adições minerais, devido a suas propriedades físicas e químicas, influenciam na microestrutura da pasta e na concentração e mobilidade dos íons da solução aquosa dos poros. Na microestrutura da pasta, ocorre um refinamento e melhor distribuição do tamanho dos poros, o que contribui para torná-la mais densa. Na composição da solução aquosa dos poros, ocorre uma redução na concentração dos íons, reduzindo a condutividade elétrica da solução dos poros. Esses são os principais efeitos promovidos pelo uso das adições minerais no concreto e que contribuem diretamente para o aumento da resistividade elétrica do concreto.

Para Neville (1997), não é exagero dizer que as adições minerais têm uma influência marcante sobre todos os aspectos da durabilidade relacionados com a movimentação dos agentes agressivos através do concreto. Isso porque as adições minerais melhoram a disposição das partículas e reduzem a permeabilidade do concreto, desde que feita uma cura adequada.

Baweja et al. (1996 apud WHITING e NAGI, 2003) estudaram o efeito da cinza volante na resistividade elétrica do concreto. Com a adição de 25% de cinza volante em substituição parcial do cimento, a resistividade elétrica do concreto aumentou significativamente nas três relações água/aglomerante investigadas (0,45, 0,55 e 0,65), conforme está apresentado na Figura 2.7. Vale comentar que as amostras foram imersas em água antes do ensaio. Aos 800 dias de idade, a resistividade elétrica do concreto, com 25% de cinza volante e relação água/aglomerante de 0,45, foi 5 vezes maior do que a obtida com o concreto normal.



**Figura 2.7 – Efeito da cinza volante na resistividade elétrica do concreto (BAWEJA et al., 1996 apud WHITING e NAGI, 2003)**

Hussain e Rasheeduzzafar (1994) estudaram as mudanças que ocorrem na composição química da solução aquosa dos poros e na estrutura dos poros com a utilização de cinza volante no concreto, e o efeito causado na resistividade elétrica. Quando 30% do cimento foi substituído por cinza volante, a concentração de íons hidroxila ( $\text{OH}^-$ ) diminuiu, se comparada ao concreto com 100% de cimento. Verificou-se também um refinamento e melhor distribuição do tamanho dos poros. Devido a esses efeitos, a resistividade elétrica do concreto, com adição de cinza volante, foi 2,2 vezes maior do que a obtida com o concreto com 100% de cimento.

Hope e Ip (1987) estudaram concretos de relação água/aglomerante 0,45 em três níveis de substituição de cimento Portland comum por escória de alto forno: concreto A com 0% (concreto de referência), concreto B com 25% e concreto C com 50%. Após vários ciclos de molhagem e secagem em solução agressiva contendo 3,5% de NaCl, concluíram que a resistividade elétrica do concreto aumenta com o teor de escória, e a taxa de corrosão da armadura é inversamente proporcional àquela. Os resultados estão apresentados na Figura 2.8.

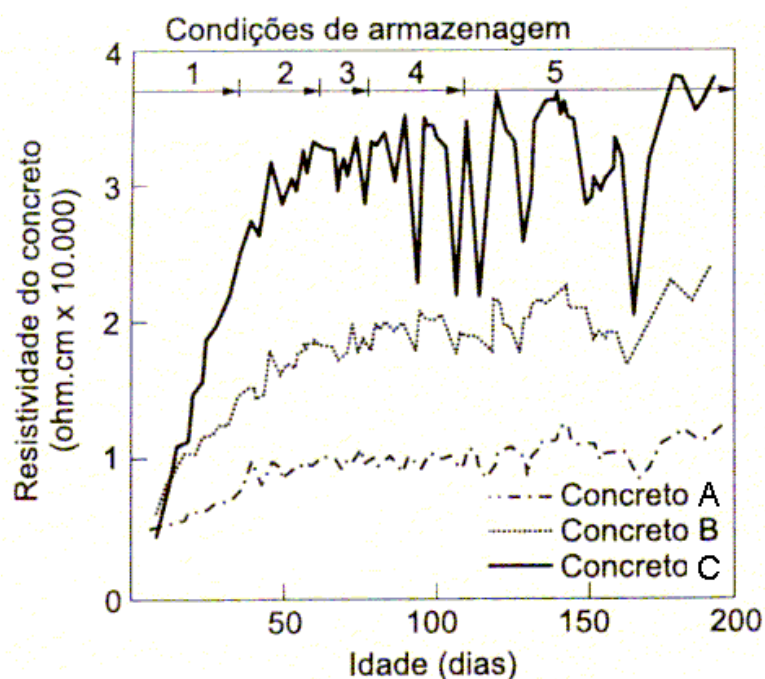
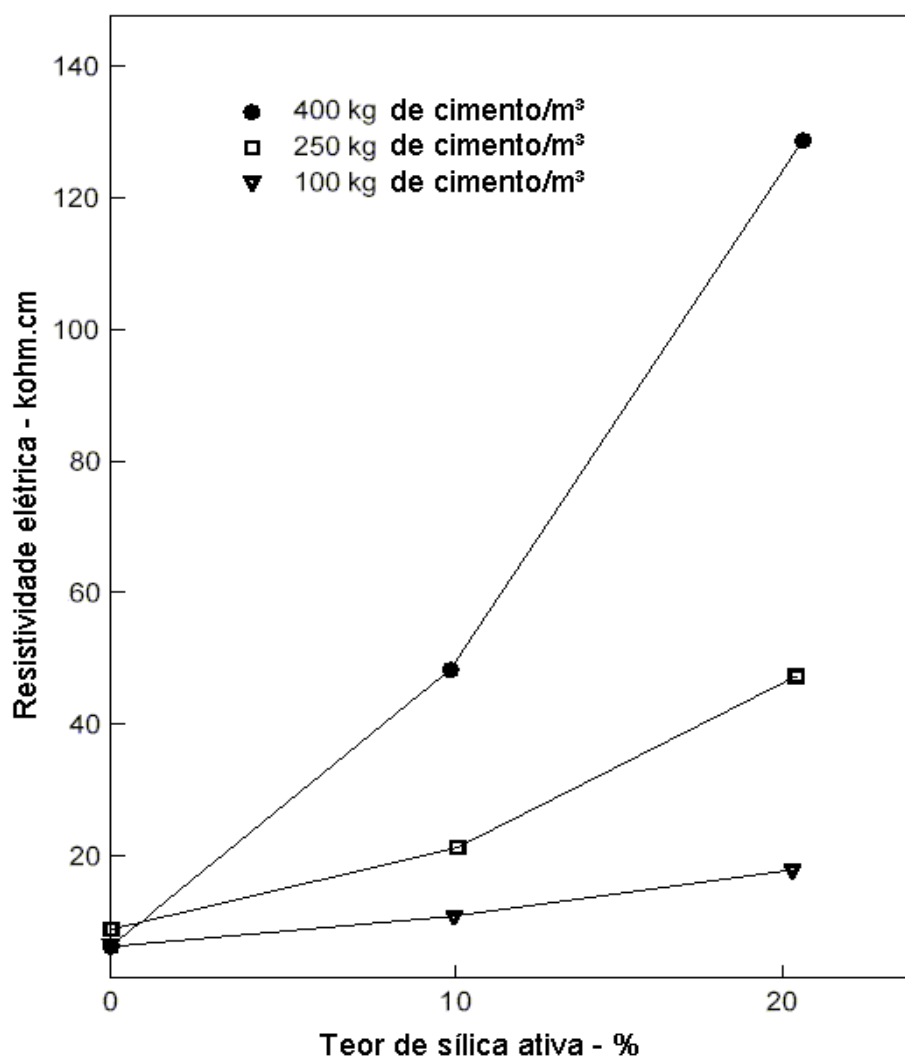


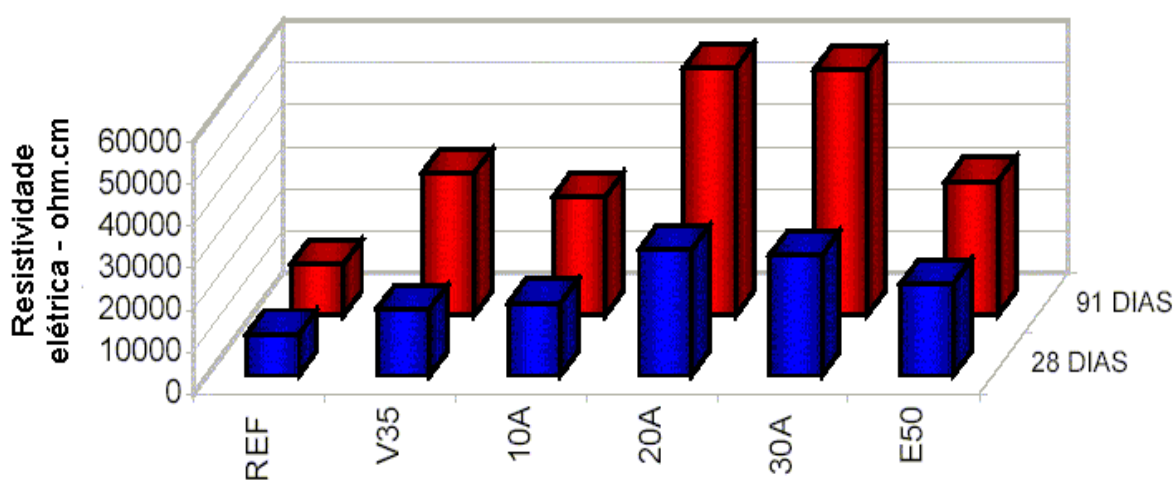
Figura 2.8 – Influência da escória de alto forno na resistividade elétrica de concretos submetidos a vários ciclos de molhagem e secagem (HOPE e IP, 1987)

Em seus estudos relativos à corrosão de armaduras, Wolsiefier (1991) investigou a influência do teor de sílica ativa na resistividade elétrica do concreto. Utilizou misturas com diferentes consumos de aglomerante por  $m^3$ . A taxa de aumento da resistividade elétrica com o acréscimo do teor de sílica ativa é maior para concretos com maior consumo de aglomerante, isso devido a estes possuírem uma maior quantidade de sílica ativa por unidade de volume. Com 20% de sílica ativa e consumo de aglomerante de 400  $Kg/m^3$ , a resistividade elétrica atinge o valor aproximado de 130  $kohm.cm$ , bem maior do que o de 4,2  $kohm.cm$  conseguido pelo concreto sem sílica ativa e mesmo consumo de aglomerante, conforme mostra a Figura 2.9.



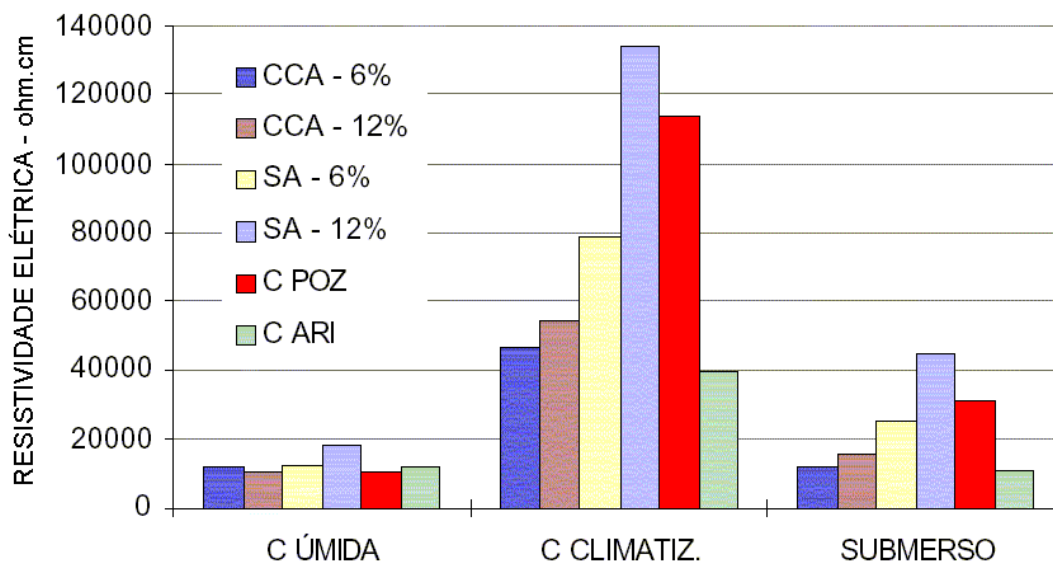
**Figura 2.9 – Influência da sílica ativa na resistividade elétrica do concreto (WOLSIEFIER, 1991)**

Missau (2004), em estudo preliminar, investigou a influência do teor de cinza de casca de arroz na resistividade elétrica de concretos curados em câmara úmida climatizada (umidade relativa maior que 95% e temperatura de  $23\pm 2^\circ\text{C}$ ). Os teores de substituição em massa do cimento por cinza de casca de arroz utilizados foram 10%, 20% e 30% e a relação água/aglomerante foi 0,50. Os resultados mostraram uma elevação na resistividade elétrica com o aumento do teor de substituição e grau de hidratação, como mostra a Figura 2.10.



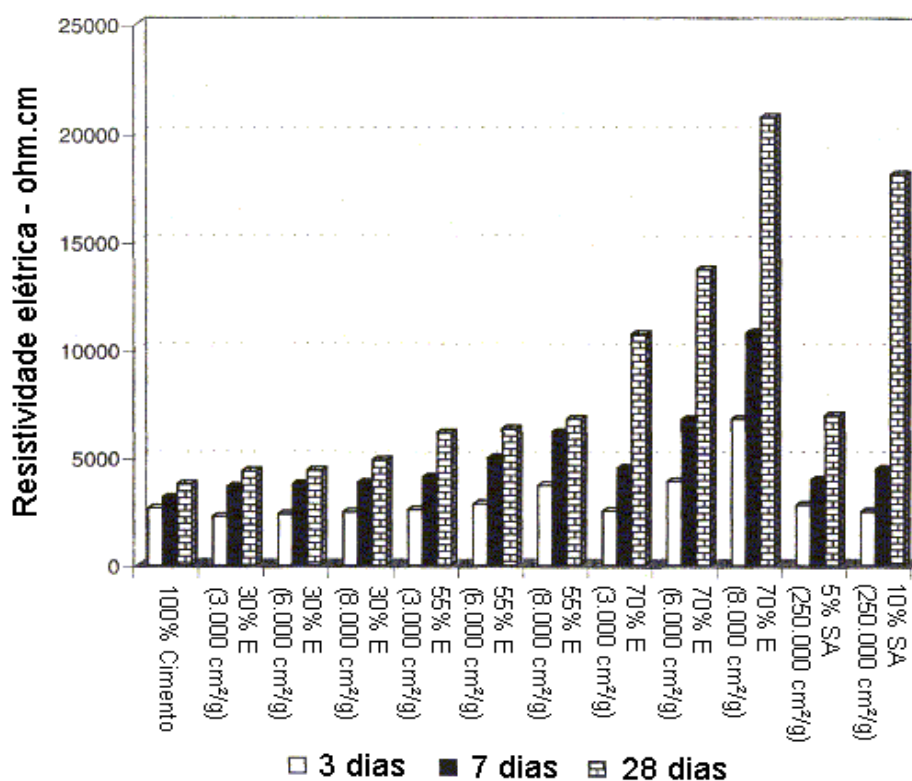
**Figura 2.10 – Efeito da cinza de casca de arroz na resistividade elétrica do concreto. REF = 100% cimento; V35 = 35% cinza volante; E50 = 50% escória de alto forno; 10A, 20A e 30A = 10%, 20% e 30% cinza de casca de arroz, respectivamente (MISSAU, 2004)**

Abreu (1998) investigou o efeito das adições minerais na resistividade elétrica de concretos convencionais. Utilizou adição de sílica ativa e de cinza de casca de arroz em dois teores (6% e 12%), em substituição em massa do cimento Portland ARI. As relações água/aglomerante adotadas foram 0,50, 0,65 e 0,80. Três condições de cura foram usadas: em câmara úmida até os 28 dias, em câmara climatizada dos 28 aos 91 dias e submerso dos 91 aos 217 dias. Os resultados médios (média entre os valores obtidos nas 3 relações água/aglomerante) mostraram um aumento na resistividade elétrica com o uso dessas adições em comparação ao concreto com 100% de cimento Portland ARI, como mostra a Figura 2.11.



**Figura 2.11 – Influência da sílica ativa e cinza de casca de arroz na resistividade elétrica do concreto. CCA = cinza de casca de arroz; SA = sílica ativa; C POZ = cimento pozolânico; C ARI = cimento de alta resistência inicial (ABREU, 1998)**

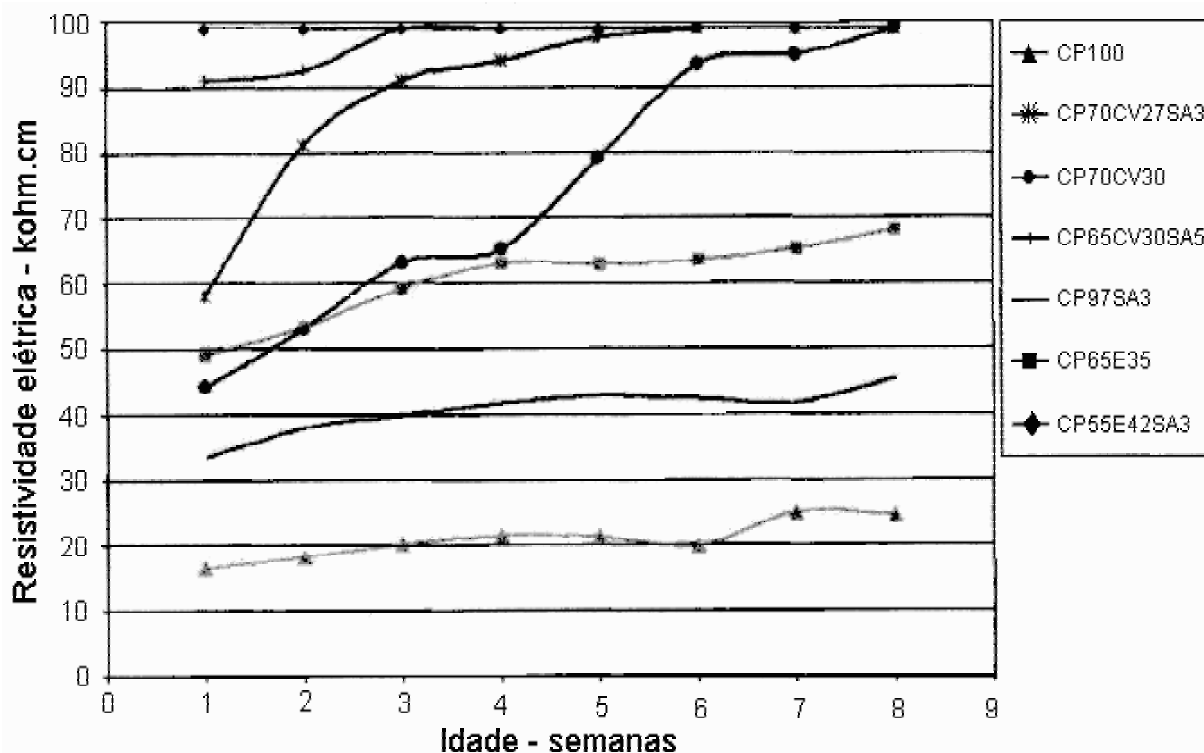
Wee et al. (2000) avaliaram a resistividade elétrica de concretos com adição de escória de alto forno, nos teores de 30%, 55% e 70%, com 3 níveis de finura (3.000 cm<sup>2</sup>/g, 6.000 cm<sup>2</sup>/g e 8.000 cm<sup>2</sup>/g), e adição de sílica ativa, nos teores de 5% e 10%, com finura de 250.000cm<sup>2</sup>/g, em substituição ao cimento em massa, além do concreto de referência com 100% de cimento. A relação água/aglomerante de 0,50 e o consumo total de aglomerante de 370 Kg/m<sup>3</sup> foram adotados para todas as misturas. Além do teor e finura das adições minerais, também a influência do período de cura úmida (3, 7 e 28 dias) foi avaliado. A Figura 2.12 apresenta os resultados, podendo-se observar a elevação da resistividade elétrica com o aumento da finura, teor de adição e período de cura. A resistividade elétrica da mistura com adição de 70% de escória de alto forno, com finura de 8.000 cm<sup>2</sup>/g e cura úmida de 28 dias, foi quase cinco vezes maior do que a resistividade elétrica do concreto de referência, curado por igual período. Isso é atribuído à maior densidade da pasta e menor condutividade elétrica da solução aquosa dos poros.



**Figura 2.12 – Relação entre a resistividade elétrica e o período de cura do concreto com 100% de cimento e de concretos com adições minerais. SA = sílica ativa; E = escória de alto forno (WEE et al., 2000)**

Smith et al. (2004), em seus estudos relacionados ao fenômeno da corrosão de armaduras, investigaram o desempenho das adições minerais - sílica ativa, cinza volante e escória de alto forno, formando misturas binárias e ternárias - na resistividade elétrica do concreto, com relação água/aglomerante 0,43. A Figura 2.13 mostra os resultados, a partir dos quais se verifica um grande acréscimo na resistividade elétrica com as adições minerais. A sílica ativa, mesmo em pequenas proporções, promove uma grande elevação na resistividade elétrica nas primeiras idades. A cinza volante e a escória de alto forno também promovem aumentos na resistividade elétrica nas primeiras idades, mas o maior ganho de resistividade ocorre com a maturidade do concreto. Os melhores resultados foram obtidos pelas misturas ternárias.





**Figura 2.13 – Efeito das adições minerais na resistividade elétrica do concreto. CP = cimento Portland; CV = cinza volante; E = escória de alto forno; SA = sílica ativa (SMITH et al., 2004)**

## 2.4 Efeito da exposição do concreto na sua resistividade elétrica

### 2.4.1 Cura e grau de hidratação do concreto

Para que um determinado concreto atinja o desempenho esperado, em termos de resistência mecânica e durabilidade frente aos agentes agressivos, é necessário que seja submetido a boas condições de cura, para obter-se o maior grau de hidratação possível. Para a resistividade elétrica não é diferente, ou seja, uma boa cura é imprescindível para que determinado concreto atinja a maior resistividade elétrica de que é capaz. Helene (1993) afirma que a resistividade elétrica do concreto depende do grau de hidratação do cimento e eleva-se com o aumento deste.

Segundo Monfore (1968), o volume da água evaporável na pasta, em um concreto saturado, varia de aproximadamente 60%, na hora da mistura, para

aproximadamente 40%, quando o cimento está completamente hidratado. Esta água contém íons, primeiramente  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , e  $\text{OH}^-$ , cujas concentrações variam com o tempo, aumentando para alguns íons e diminuindo para outros. Com a evolução da hidratação, a porosidade vai diminuindo e os vazios, que inicialmente eram ocupados pelo eletrólito, vão sendo preenchidos pelos produtos da hidratação do cimento. Medindo a resistividade elétrica de concretos com relação água/cimento 0,40 e submetidos à cura úmida, o pesquisador constatou que, dos 7 para os 90 dias, a resistividade elétrica do concreto duplicou seu valor.

O mesmo autor estudou o efeito das condições de cura na resistividade elétrica do concreto. As diferentes condições de cura adotadas por ele foram: cura úmida normal (temperatura de laboratório), cura a vapor ( $70^\circ\text{C}$ ) e cura em autoclave ( $170^\circ\text{C}$ ). Para a maioria dos concretos, a menor resistividade elétrica foi obtida com a cura úmida normal. As maiores resistividades inicialmente foram alcançadas com a cura em autoclave, mas, após 28 dias de armazenamento úmido, a resistividade dos concretos curados em autoclave não foi muito diferente da resistividade daqueles de cura úmida normal.

No estudo realizado por Wee et al. (2000), já mencionado, pode-se observar claramente a influência da cura na resistividade elétrica do concreto. Pode-se verificar também que a influência da cura na resistividade elétrica do concreto com adição mineral aumentou com o acréscimo do teor de adição.

#### 2.4.2 Temperatura

A temperatura ambiente tem um efeito significativo na resistividade elétrica do concreto, pois influencia a condutividade elétrica da solução aquosa dos poros. Ou seja, quando a temperatura aumenta, a viscosidade do eletrólito diminui, intensificando a mobilidade dos íons, o que leva a uma maior condutividade elétrica do eletrólito e conseqüentemente a uma menor resistividade elétrica do concreto.

De acordo com Whittington et al. (1981), a relação geral, entre resistividade elétrica e temperatura pode ser expressa pela lei de Hinrichson e Rasch, conforme a seguinte equação:

$$\rho_2 = \rho_1 \cdot e^{A \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)} \quad (2.1)$$

onde:

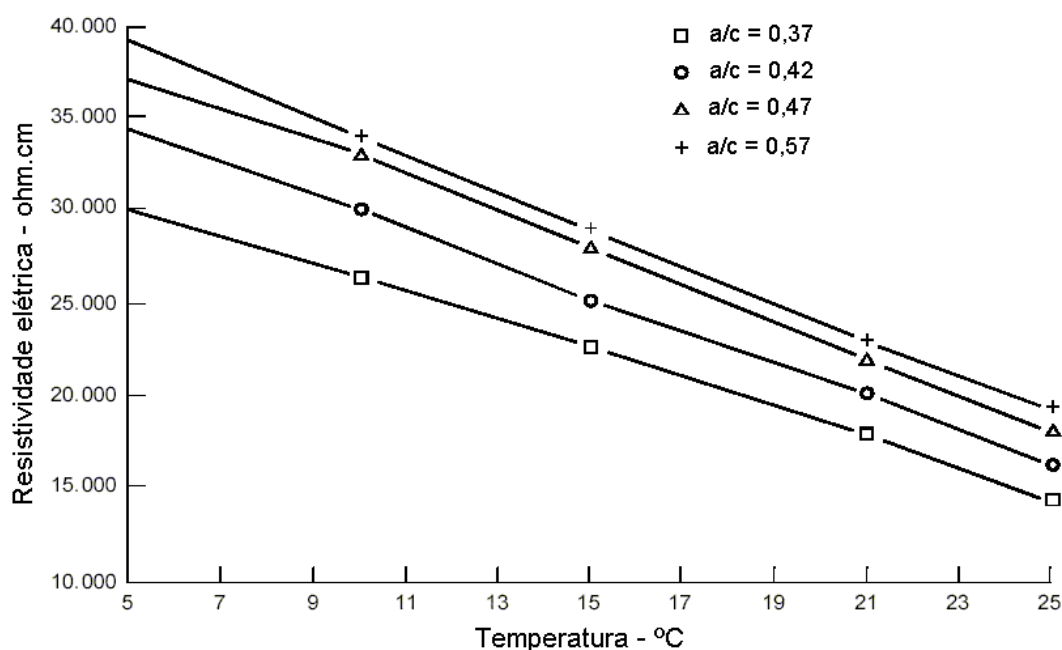
$\rho_1$  = resistividade elétrica na temperatura  $T_1$ ;

$\rho_2$  = resistividade elétrica na temperatura  $T_2$ ;

$T_1, T_2$  = temperaturas absolutas (Kelvin);

$A$  = constante.

Hope et al. (1985) investigaram o efeito da temperatura na resistividade elétrica do concreto, para várias relações água/cimento. Os concretos foram submetidos a uma série de diferentes temperaturas, mantendo-se a umidade relativa em 75%. A Figura 2.14 mostra os resultados obtidos, os quais seguem a lei de Hinrichson e Rasch com a constante “A” igual a 2889. Pela inclinação das retas, pode-se concluir que a variação na resistividade elétrica do concreto, em função da temperatura, eleva-se com o aumento da relação água/cimento. Isso devido à maior quantidade de eletrólito existente em concretos de maior relação água/cimento, que não estejam secos.



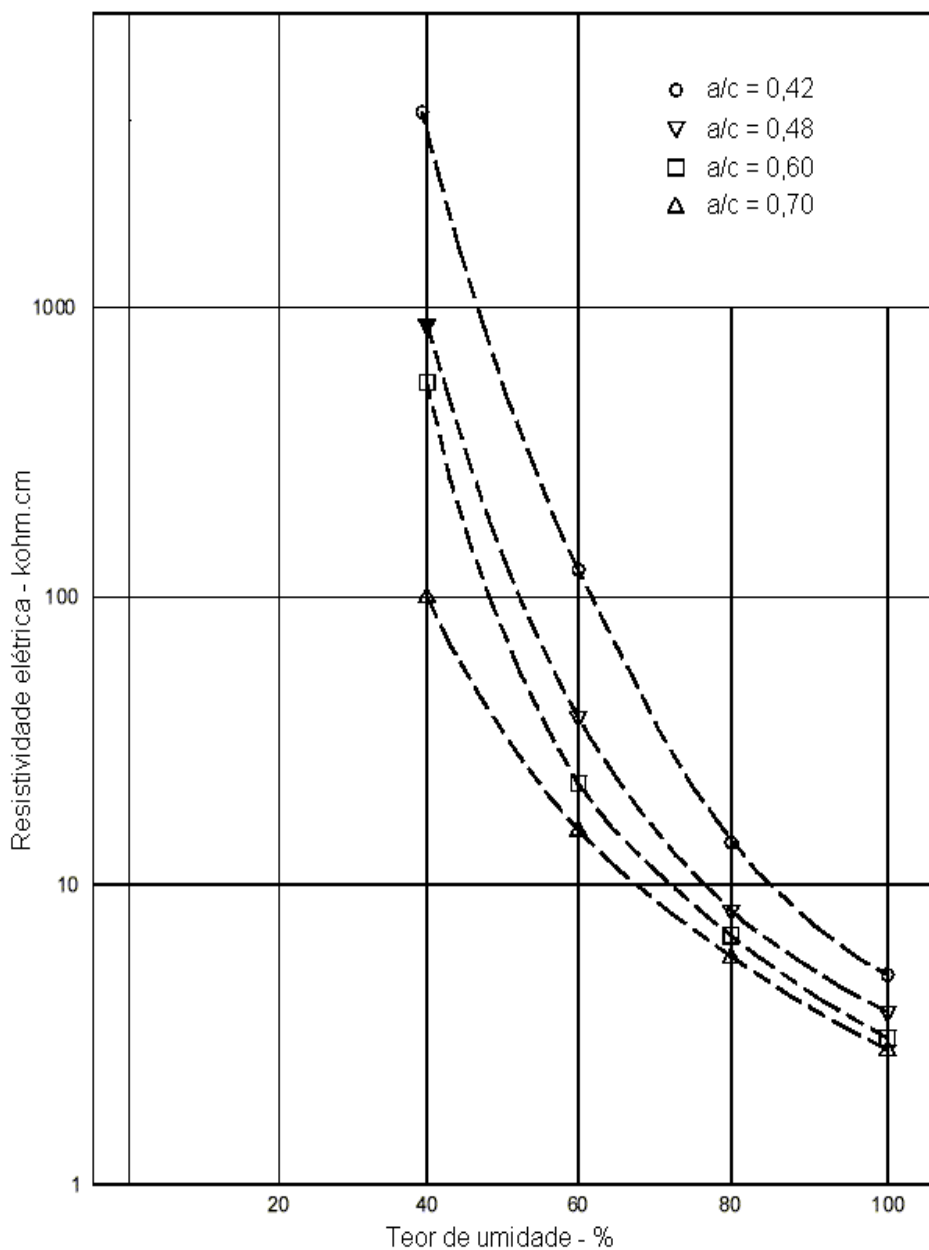
**Figura 2.14 – Efeito da temperatura na resistividade elétrica do concreto (HOPE et al., 1985)**

### 2.4.3 Teor de umidade

De todas as variáveis que de alguma maneira influenciam na resistividade elétrica do concreto, a variação do teor de umidade é sem dúvida a que exerce maior influência. Isso porque a corrente elétrica que atravessa o concreto é conduzida pela solução aquosa dos poros, que diminui de volume com a redução do teor de umidade. Sendo assim, a passagem de corrente elétrica é reduzida e conseqüentemente a resistividade elétrica aumenta.

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

Gjørsv et al. (1977) investigaram o efeito do teor de umidade na resistividade elétrica do concreto, para várias relações água/cimento (0,42, 0,48, 0,60 e 0,70). Concretos saturados foram secos até a umidade de 40%, sendo determinada a resistividade elétrica em determinados teores de umidade, conforme mostra a Figura 2.15. Com o concreto saturado, a resistividade variou aproximadamente de 4,5 a 7kohm.cm, para as diferentes relações água/cimento. No teor de umidade de 40%, os valores variaram de 100 a 7000kohm.cm, para as diferentes relações água/cimento. A resistividade elétrica aumentou com a redução da relação água/cimento, efeito este verificado mais intensamente à medida que o teor de umidade diminuiu. Por exemplo, com o concreto saturado, a resistividade elétrica aumentou em aproximadamente 1,6 vezes, com a redução da relação água/cimento de 0,70 para 0,42, enquanto que, com 60% de umidade, o aumento na resistividade elétrica foi de aproximadamente 7 vezes, com a redução da relação água/cimento de 0,70 para 0,42. Com isso o efeito do teor de umidade na resistividade elétrica parece ser mais importante do que o efeito da relação água/cimento.

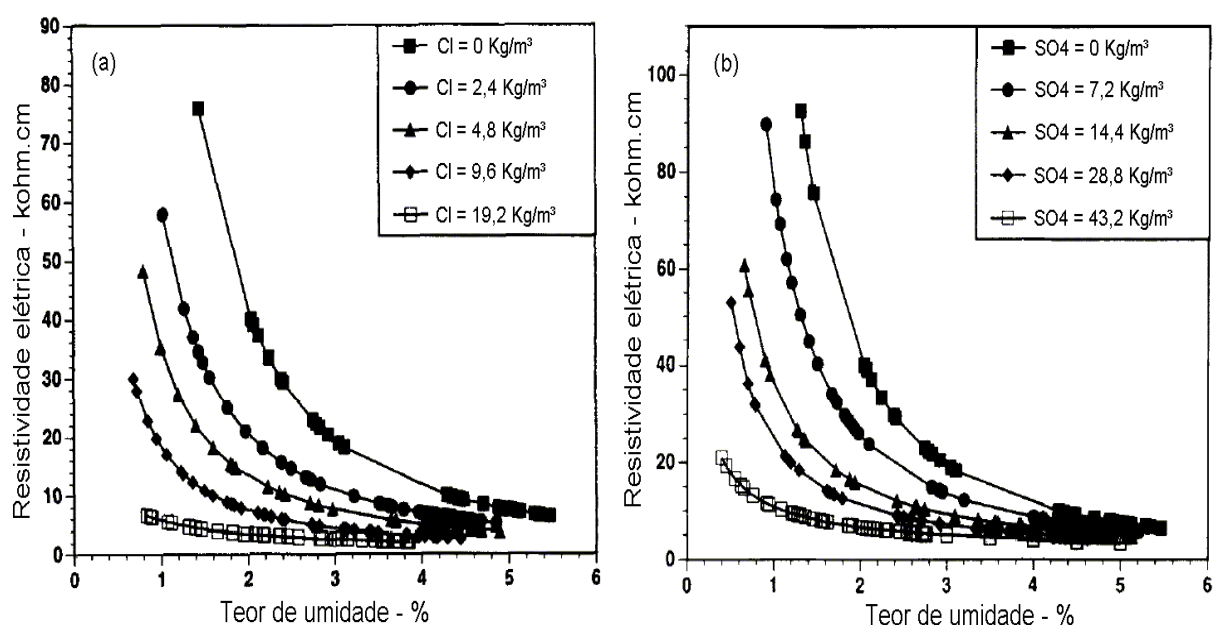


**Figura 2.15 – Efeito do teor de umidade na resistividade elétrica do concreto (GJØRV et al., 1977)**

#### 2.4.4 Íons agressivos

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

Saleem et al. (1996) investigaram a influência dos íons cloreto e sulfato na resistividade elétrica do concreto. Os concretos tiveram consumo de cimento (ASTM C 150 tipo V), com  $C_3A = 3,5\%$ , de  $350 \text{ Kg/m}^3$  e relação água/cimento  $0,45$ . No mesmo estudo, além da variação da concentração de cloreto ou sulfato, houve também variação no teor de umidade do concreto. A Figura 2.16 mostra a relação entre o teor de umidade e a resistividade elétrica de concretos contaminados com íons cloreto (a) e sulfato (b). Nela, pode-se observar uma redução exponencial da resistividade elétrica do concreto com o aumento do teor de umidade e também uma redução da resistividade elétrica com o aumento da concentração de cloreto ou sulfato. Esses dois comportamentos de redução da resistividade elétrica do concreto podem ser atribuídos à maior disponibilidade e à maior concentração iônica do eletrólito, respectivamente. Pode-se observar também que, para um nível elevado de concentração de íons cloreto ou sulfato, a redução do teor de umidade não repercutiu em grandes aumentos na resistividade elétrica do concreto, indicando que, mesmo em concretos com baixo teor de umidade, o fenômeno da corrosão poderá se desenvolver se a concentração de íons cloreto ou sulfato for elevada. Por outro lado, para um teor de umidade alto, o aumento da concentração de íons cloreto e sulfato não promoveu grandes alterações na resistividade elétrica.



**Figura 2.16 – Relação entre o teor de umidade e a resistividade elétrica de concretos contaminados com cloreto (a) ou sulfato (b) (SALEEM et al., 1996)**

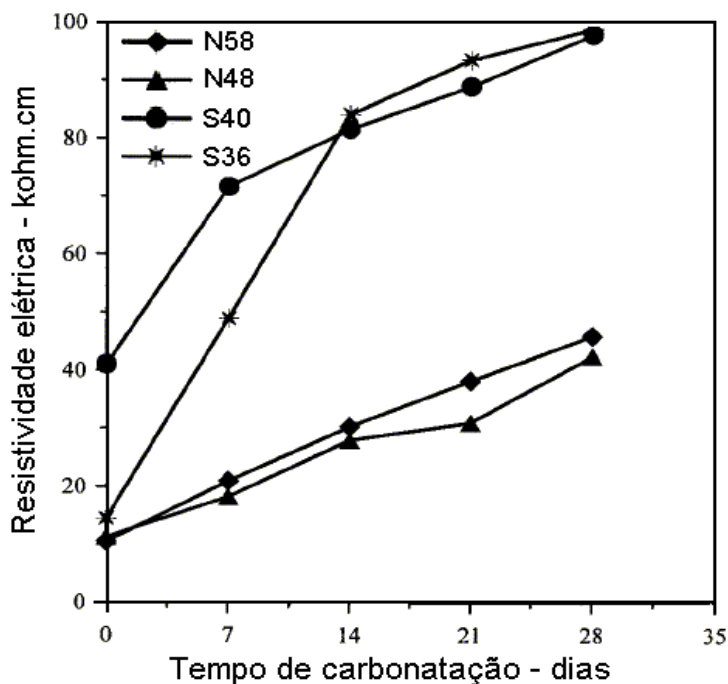
#### 2.4.5 Carbonatação

Neville (1997) descreve a carbonatação como sendo a reação do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) presente no ar, com a pasta de cimento hidratada, na presença de umidade, sendo o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) o componente que reage mais rapidamente formando o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ).

O mesmo autor cita alguns efeitos positivos da carbonatação, ou seja, o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) ocupa um volume maior do que o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), o qual ele substitui, sendo assim, a porosidade do concreto carbonatado é menor. Além disso, a água liberada na carbonatação do hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) pode ajudar na hidratação do cimento ainda não hidratado. Essas mudanças resultam em maior dureza superficial, menor permeabilidade superficial, menor movimentação de umidade, aumentando a resistência às formas de ataque controladas pela permeabilidade do concreto.

Brameshuber e Raupach (2003) dizem que a carbonatação aumenta a densidade da pasta de cimento endurecida, pois o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) ocupa um volume 11% maior do que o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), reduzindo a porosidade em até 20%. Isso conduz a um acréscimo na resistividade elétrica do concreto.

Chi et al. (2002) estudaram o efeito da carbonatação nas propriedades mecânicas e na durabilidade do concreto. Utilizaram concretos com 100% de cimento Portland, nas relações água/cimento 0,48 e 0,58 (N48 e N58) com abatimento normal (13-14cm), e concretos auto-adensáveis (abatimento  $\geq 23$ cm) com adição de escória de alto forno nos teores de 24% e 60% e relações água/aglomerante 0,36 e 0,40, respectivamente (S36 e S40), sendo todos submetidos ao ensaio acelerado de carbonatação. A Figura 2.17 mostra os resultados obtidos no que diz respeito à influência da carbonatação na resistividade elétrica do concreto, verificando um incremento na resistividade elétrica com o tempo de carbonatação. Isso pode ser explicado pela redução da porosidade da pasta, em função do aumento no volume dos sólidos, devido à conversão de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  em  $\text{CaCO}_3$ , decorrente da carbonatação. Entretanto, mesmo com a elevação da resistividade elétrica, houve também um acréscimo na taxa de corrosão das armaduras com a carbonatação do concreto.



**Figura 2.17 – Influência da carbonatação na resistividade elétrica do concreto (CHI et al., 2002)**

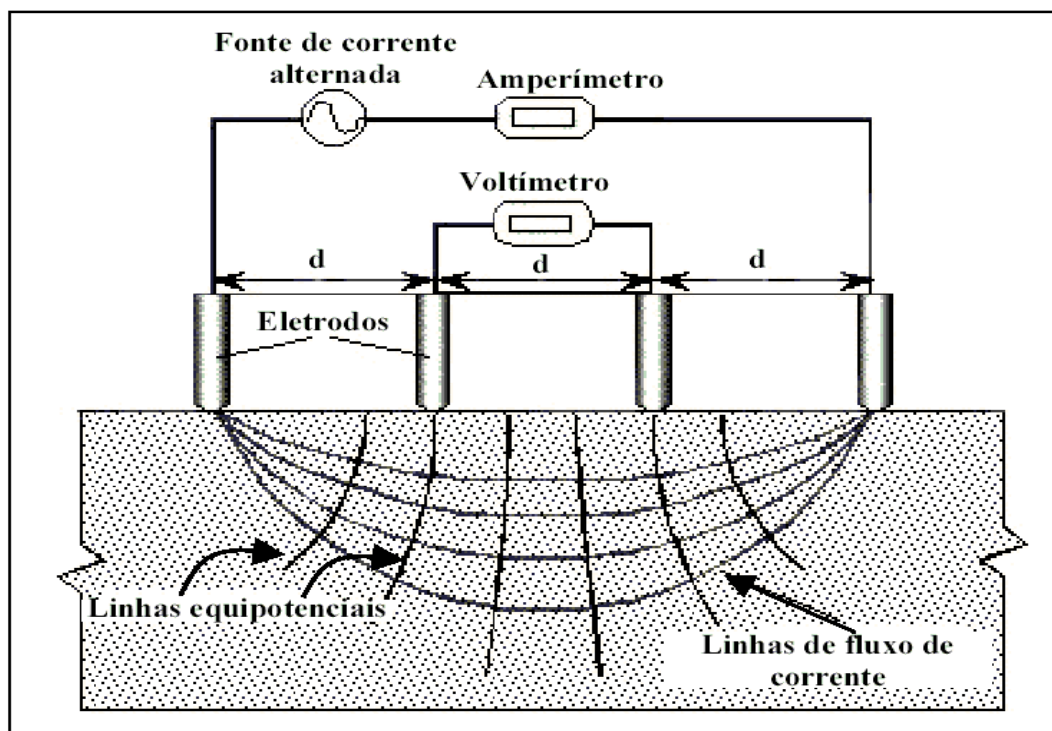
## 2.5 Medida da resistividade - método dos quatro eletrodos (método de Wenner)

O método dos quatro eletrodos é o mais comumente utilizado para medir a resistividade elétrica em situações práticas, de maneira não destrutiva. Originalmente foi desenvolvido para medir a resistividade elétrica do solo, mas atualmente tem sido também utilizado para medir a resistividade elétrica do concreto. Quatro eletrodos são colocados em contato com o concreto, equidistantes um do outro e alinhados, conforme mostra a Figura 2.18. Uma pequena corrente alternada ( $I$ ) passa pelos dois eletrodos extremos e mede-se a diferença de potencial ( $V$ ) entre os dois eletrodos internos. A resistividade do concreto ( $\rho$ ), para uma geometria semi-infinita, é obtida pela seguinte fórmula (GOWERS e MILLARD, 1999):

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot d \cdot \frac{V}{I} \quad (2.2)$$

onde “d” é a distância entre eixos dos eletrodos.





**Figura 2.18 – Método dos quatro eletrodos para medir a resistividade elétrica do concreto. “d” – distância entre eixos dos eletrodos (CARINO, 1998 apud LIMA, 2000)**

Para medir a resistividade elétrica do concreto pelo método dos quatro eletrodos, é necessário garantir um bom contato entre esses e o concreto. Em uma situação prática de campo, pode ser utilizado um gel de alta condutividade (GOWERS e MILLARD, 1999), mas, em estudos de laboratório, talvez o mais recomendado seja fazer com que uma parte dos eletrodos fique imersa no concreto. Com isso, surge uma nova variável que é a *profundidade de penetração dos eletrodos no concreto* e, nesse caso, é necessária a utilização de uma fórmula mais completa, que considere essa variável adicional, para determinar a resistividade elétrica do concreto.

A NBR 7117/81 normaliza a medição da resistividade elétrica do solo pelo método dos quatro eletrodos (Wenner). Para medir a resistividade elétrica, os eletrodos são cravados no solo, dessa forma, a fórmula considera, no cálculo da resistividade, a profundidade de penetração dos eletrodos no solo. Fazendo uma analogia com o concreto, pode-se usar a fórmula da NBR 7117/81, a qual também é indicada por Medeiros Filho (1979 apud ABREU, 1998), para determinar a

resistividade do concreto, quando os eletrodos estiverem imersos. A fórmula é a seguinte:

$$\rho = \frac{4 \cdot \pi \cdot d \cdot V}{\left(1 + \frac{2d}{\sqrt{d^2 + 4b^2}} - \frac{d}{\sqrt{d^2 + b^2}}\right) \cdot I} \quad (2.3)$$

onde:

$\rho$  = resistividade elétrica calculada do concreto, em ohm.cm;

$V$  = diferença de potencial medida, em Volts;

$I$  = corrente medida, em Amperes;

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

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

A NBR 7117/81 também informa que, se  $d > 20.b$ , a fórmula pode ser simplificada para:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot d \cdot \frac{V}{I} \quad (2.4)$$

que é igual à fórmula (2.2), descrita por Gowers e Millard (1999).

Outra informação trazida pela norma NBR 7117/81 é que o método dos quatro eletrodos determina a resistividade elétrica até uma profundidade aproximadamente igual à distância entre eixos dos eletrodos. Com isso, para determinar a resistividade elétrica em diferentes profundidades, basta variar a distância entre eixos dos eletrodos. Polder (2001) diz que, no método dos quatro eletrodos, o fluxo de corrente atinge uma profundidade aproximadamente igual à distância entre eixos dos eletrodos, confirmando a informação trazida pela norma NBR 7117/81.

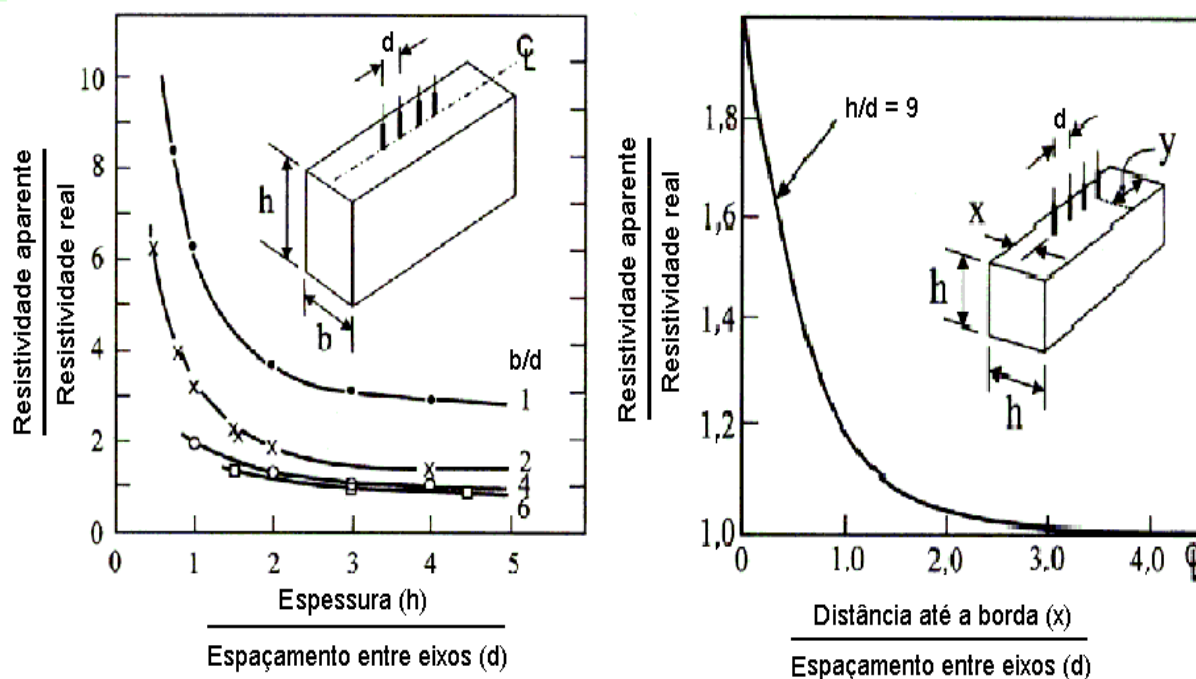
O método dos quatro eletrodos, embora simples, deve ser utilizado com alguns cuidados para evitar que ocorram erros significantes. A seguir, alguns fatores importantes relacionados com o método serão discutidos.

## 2.5.1 Fatores intervenientes na utilização do método dos quatro eletrodos

### 2.5.1.1 Dimensões e geometria do corpo de prova

Conforme descrito anteriormente, a determinação da resistividade elétrica através da fórmula (2.2) é utilizada quando existe uma geometria semi-infinita, ou seja, quando as dimensões da peça de concreto são muito maiores do que o espaçamento entre eixos dos eletrodos (GOWERS e MILLARD, 1999). A NBR 7117/81 utiliza a condição “se  $d > 20.b$ ” como critério de utilização da fórmula (2.2).

Gowers e Millard (1999) estudaram a influência da geometria e dimensões da peça de concreto na determinação da sua resistividade elétrica, utilizando a fórmula (2.2). Se a peça de concreto for relativamente pequena, a corrente será constringida para um fluxo restrito pelas dimensões da peça e diferente das condições padrões de campo (Figura 2.18) e resultará em erros significativos, superestimando o valor da resistividade elétrica. A Figura 2.19 apresenta os resultados obtidos, a partir dos quais os autores concluíram que seções muito estreitas ou linha de eletrodos muito próxima da borda da peça paralela a eles ( $x$ ) promovem erros significativos, mas a distância entre a borda perpendicular à linha de eletrodos e o primeiro eletrodo ( $y$ ) exerce muito pouca influência. Com isso, recomendam que o espaçamento entre eixos dos eletrodos ( $d$ ) não exceda a  $\frac{1}{4}$  da menor dimensão da seção transversal da peça. A distância entre a linha de eletrodos e a borda paralela ( $x$ ) deve ser de, no mínimo, duas vezes o espaçamento entre eixos ( $d$ ), e a distância ( $y$ ) pode ser ignorada.



**Figura 2.19 – Efeito da geometria e dimensões da peça de concreto na determinação da sua resistividade elétrica pelo método dos quatro eletrodos (GOWERS e MILLARD, 1999)**

Morris et al. (1996) estudaram a possibilidade de determinar a resistividade elétrica do concreto pelo método dos quatro eletrodos, utilizando cilindros semelhantes aos que são usados nos ensaios de resistência à compressão axial e permeabilidade a cloretos (ASTM C1202). Para que a resistividade elétrica determinada pela fórmula (2.2) seja aproximadamente igual à resistividade real do concreto, as dimensões da peça de concreto deverão ser muito maiores do que o espaçamento entre eixos dos eletrodos e também não poderá haver interferência de armaduras. Devido ao fato do cilindro caracterizar uma peça com dimensões finitas, a resistividade elétrica medida (aparente) poderá não ser exatamente a resistividade elétrica real do concreto. Para transformar essa resistividade elétrica aparente em real, é necessário aplicar um fator de correção “K”, o qual depende do espaçamento entre eixos dos eletrodos e da geometria e dimensões da peça de concreto. A Figura 2.20 apresenta o fator de correção  $K = \rho_a/\rho$  (relação entre resistividade elétrica aparente e resistividade elétrica real) para duas configurações, (a) na face transversal e (b) na lateral dos cilindros de concreto, com espaçamento entre eixos dos eletrodos (d) igual a 2,54cm. Aqui pode-se observar que, ao utilizar dimensões

de, no mínimo,  $h/d \geq 3$  e  $\phi/d \geq 6$  na primeira configuração e  $L/d \geq 6$  e  $\phi/d \geq 6$  na segunda, consegue-se minimizar a diferença entre resistividade elétrica aparente e resistividade elétrica real do concreto. Isso será útil em situações que não seja conhecido o fator de correção “K”.

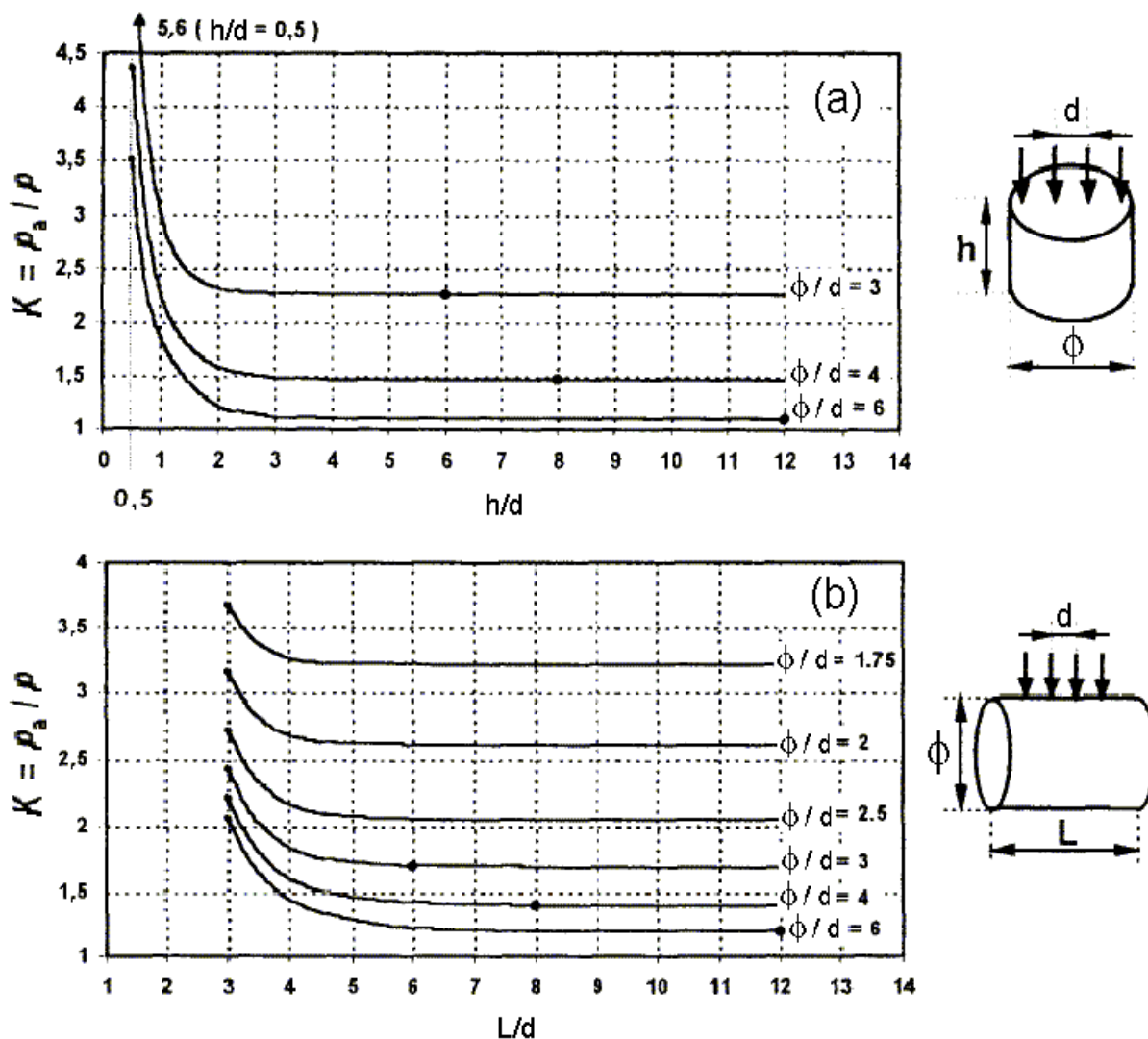


Figura 2.20 – Fator de correção “K”. (a) na face transversal do cilindro e (b) na lateral do cilindro. As curvas dos cilindros padrões com diâmetros de 7,62, 10,20 e 15,20cm possuem um círculo e correspondem a  $\phi/d = 3, 4$  e  $6$ , respectivamente (MORRIS et al., 1996)

### 2.5.1.2 Contato entre eletrodos e o concreto

Conforme já dito, um bom contato entre eletrodos e concreto é imprescindível para que a determinação da resistividade elétrica seja confiável. Outro fato importante é que os contatos de todos os eletrodos sejam iguais, ou o mais próximo disso, em especial nos eletrodos internos, caso contrário ocorrerão erros significativos.

O uso de corrente alternada (CA) e uma frequência relativamente baixa ajuda a minimizar os problemas de contato. Embora no método dos quatro eletrodos o efeito da polarização seja muito reduzido ou nulo, devido à diferença de potencial ser medida entre os eletrodos centrais, a utilização de corrente contínua (CC) deve ser evitada, pois pode promover erros oriundos do efeito da polarização (GOWERS e MILLARD, 1999). Para os mesmos autores, a área de contato entre eletrodos e concreto não apresentou efeito significativo na determinação da resistividade elétrica pelo método dos quatro eletrodos.

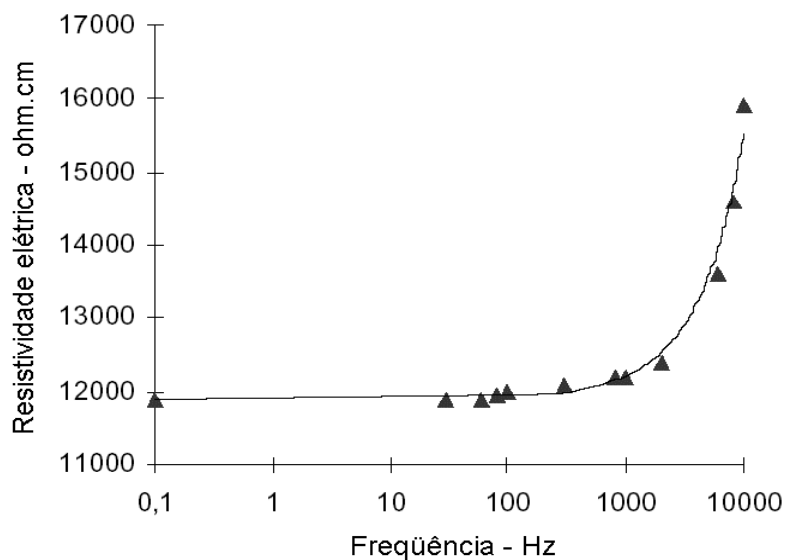
Millard et al (1989) recomendam que seja utilizado um voltímetro de alta impedância de entrada (superior a 2Mohm) para minimizar os problemas de contato.

### 2.5.1.3 Efeito do tipo de onda, da frequência e da intensidade da corrente

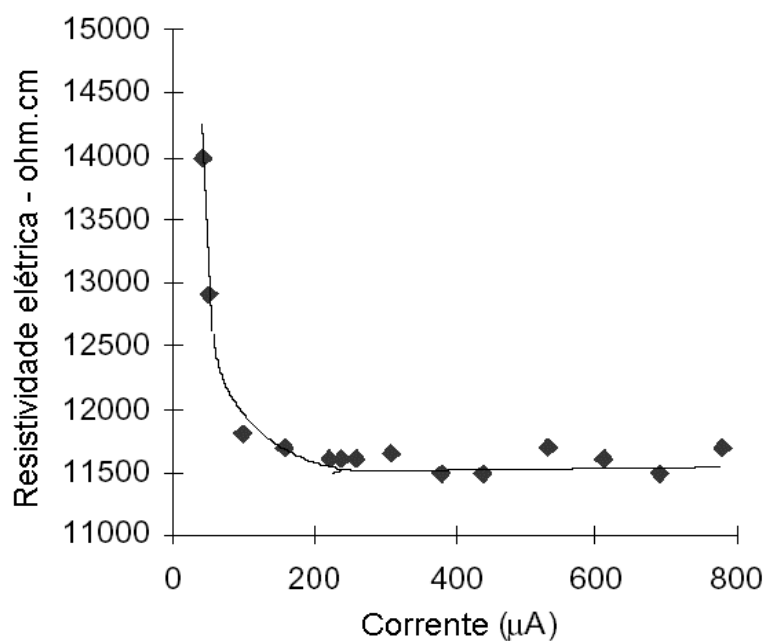
O aumento da resistividade elétrica do concreto, com a elevação da frequência, é atribuído, pelo menos em parte, ao efeito capacitivo. Ewins (apud MILLARD et al., 1989) propõe o uso da corrente com ondas quadradas para eliminar o efeito capacitivo. Entretanto, Millard et al. (1989) consideram satisfatórios os resultados de medidas de resistividade com correntes de ondas senoidais. Eles obtiveram boas correlações quando compararam os dois tipos de ondas, verificando que nenhuma das medidas diferiu mais do que 6%. A Figura 2.21 mostra o aumento da resistividade com a elevação da frequência.

O efeito da intensidade da corrente na determinação da resistividade elétrica do concreto foi estudado por Millard et al. (1989). Fixando a frequência em 300 Hz, eles fizeram variar a corrente. A Figura 2.22 mostra os resultados, a partir dos quais concluíram que correntes inferiores a 200  $\mu$ A devem ser evitadas. Por outro lado, se

o fluxo de corrente for muito grande, serão introduzidos erros devidos à resistência de contato entre o eletrodo e o eletrólito (SHREIR, 1963 apud ABREU, 1998).



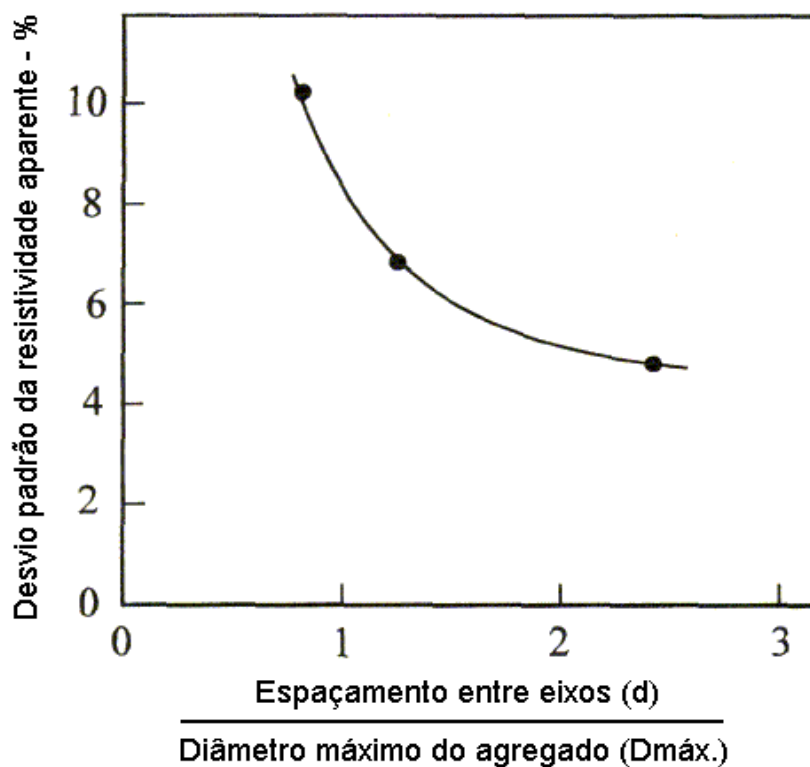
**Figura 2.21 – Efeito da frequência na determinação da resistividade elétrica do concreto pelo método dos quatro eletrodos (MILLARD et al., 1989)**



**Figura 2.22 - Efeito da intensidade da corrente na determinação da resistividade elétrica do concreto pelo método dos quatro eletrodos (MILLARD et al., 1989)**

#### 2.5.1.4 Heterogeneidade do concreto

De acordo com Gowers e Millard (1999) é assumido que o material, cuja resistividade elétrica será determinada pelo método dos quatro eletrodos, é homogêneo. No entanto, o concreto não é homogêneo, sendo muito diferentes as resistividades da pasta e dos agregados. Para que a influência da alta resistividade individual do agregado na determinação da resistividade elétrica não seja significativa, é necessário que a distância entre eixos dos eletrodos ( $d$ ) seja pelo menos uma vez e meia maior do que o diâmetro máximo do agregado ( $d \geq 1,5.D_{\text{máx}}$ ), conforme mostra a Figura 2.23.

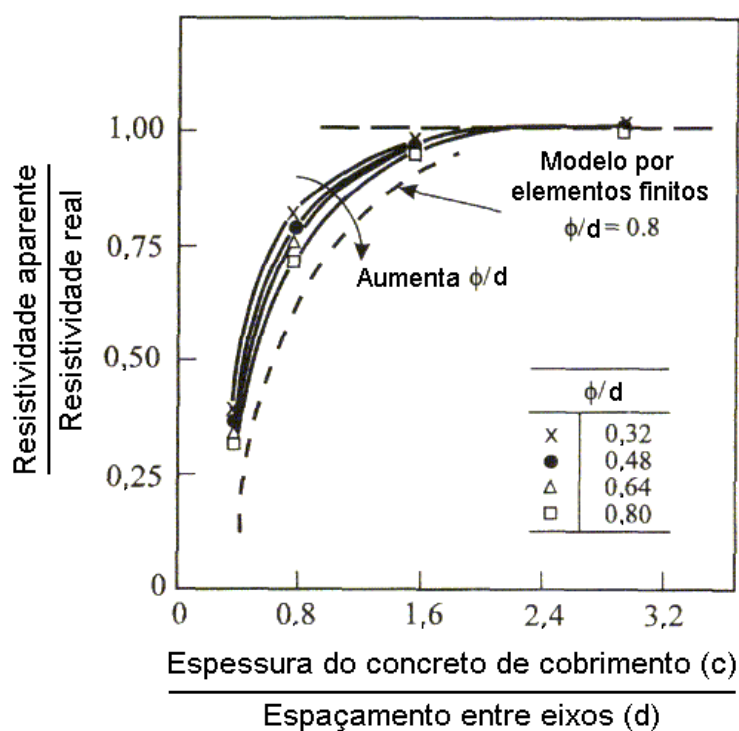


**Figura 2.23 – Efeito da heterogeneidade do concreto na determinação da sua resistividade elétrica pelo método dos quatro eletrodos (GOWERS e MILLARD, 1999)**



### 2.5.1.5 Efeito da presença de armaduras

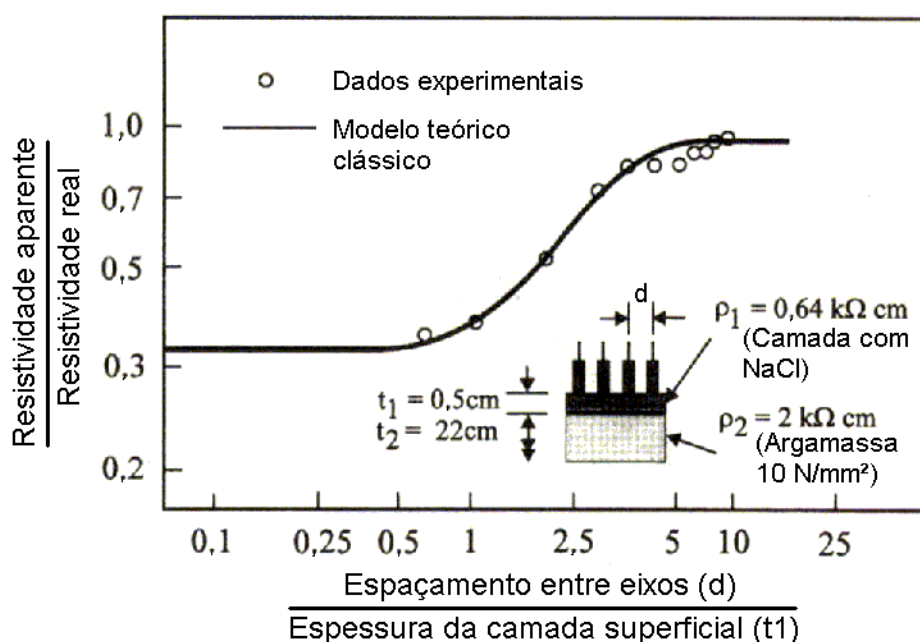
Para Gowers e Millard (1999), a presença de armaduras no interior do concreto faz com que o campo de corrente seja distorcido, quando a determinação da resistividade elétrica pelo método dos quatro eletrodos é realizada sobre a armadura. Estudos determinaram que o efeito das armaduras será minimizado se a disposição da linha de eletrodos for perpendicular às armaduras ou, caso seja paralela, for mantido um afastamento lateral entre a armadura e a linha de eletrodos. Caso a determinação da resistividade seja sobre a armadura, os erros podem ser minimizados se a camada de cobertura da armadura for de pelo menos uma vez e meia maior que a distância entre eixos dos eletrodos ( $c \geq 1,5.d$ ), conforme mostra a Figura 2.24. Mas, se a espessura de cobertura for pequena, implicará uma redução excessiva na distância entre eixos dos eletrodos ( $d$ ), que não é conveniente, então, recomenda-se o uso de equipamentos capazes de localizar a posição das armaduras, para evitar medições sobre elas.



**Figura 2.24 - Efeito da presença de armaduras na determinação da resistividade elétrica do concreto pelo método dos quatro eletrodos (GOWERS e MILLARD, 1999)**

### 2.5.1.6 Efeito de camadas com diferentes resistividades

De acordo com Gowers e Millard (1999), as diferentes resistividades das camadas superficiais causam uma distorção no campo de corrente aplicado. O efeito resultante depende de a resistividade dessas camadas ser maior ou menor do que a resistividade no interior da massa de concreto. Uma camada superficial com resistividade baixa promove um erro maior do que uma camada com resistividade alta. A Figura 2.25 mostra a influência de uma camada com baixa resistividade (camada com NaCl) na determinação da resistividade elétrica, pelo método dos quatro eletrodos. Para minimizar os erros devido à presença dessa camada, é necessário que a distância entre eixos dos eletrodos seja pelo menos 8 vezes maior do que a espessura da referida camada ( $d \geq 8.t_1$ ).



**Figura 2.25 – Efeito de uma camada superficial de baixa resistividade na determinação da resistividade elétrica pelo método dos quatro eletrodos (GOWERS e MILLARD, 1999)**

Para Gowers e Millard (1999), a presença de uma camada superficial com resistividade diferente, seja maior ou menor do que a resistividade no interior da

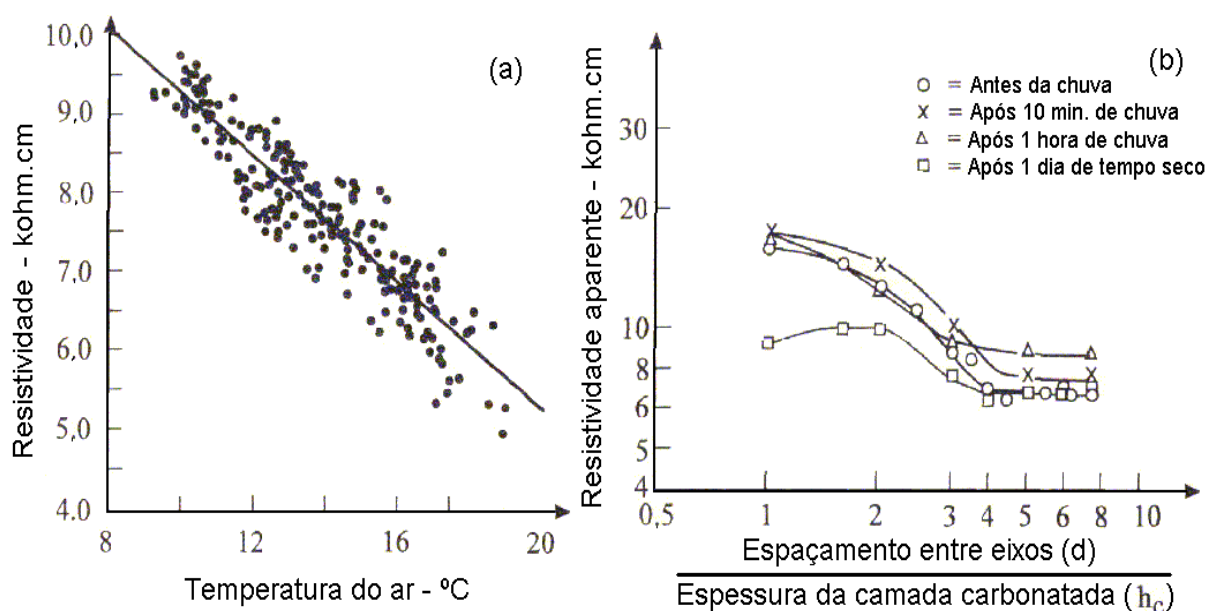
massa de concreto, causa erros facilmente quantificáveis e que podem ser minimizados com a escolha de um adequado espaçamento entre eixos dos eletrodos (d). Entretanto, a presença de uma dupla camada superficial com resistividades diferentes, como por exemplo um concreto carbonatado (alta resistividade), com uma película de umidade (baixa resistividade), produz erros difíceis de serem quantificados e minimizados, podendo, nesse exemplo, produzir uma alta resistividade artificial. Com isso, não é recomendado que a determinação da resistividade elétrica seja feita com a superfície do concreto recentemente umedecida (película de umidade), especialmente se existir camada carbonatada. Na presença de uma delgada camada superficial carbonatada, deverá ser determinada a sua espessura para adotar um espaçamento entre eixos dos eletrodos de pelo menos 8 vezes essa espessura. Caso a camada carbonatada exceda a espessura de cobertura das armaduras, será a sua resistividade que irá influenciar na taxa de corrosão e não a resistividade do interior da massa de concreto. Nesse caso, a distância entre eixos dos eletrodos (d) deverá ser igual ou menor do que a espessura da camada carbonatada, para assegurar que a resistividade elétrica medida seja referente à camada carbonatada.

#### 2.5.1.7 Efeito das condições ambientais

Gowers e Millard (1999) determinaram a resistividade elétrica de prismas de diferentes tipos de concreto, juntamente com a temperatura do concreto (superficial e interna), temperatura do ar, umidade relativa e condições de chuva. Verificaram que em geral a resistividade diminui com aumento da temperatura. Entre as três temperaturas medidas, a que apresentou a melhor correlação foi a do interior do concreto. Entretanto, essa temperatura não mostra as variações extremas de temperatura do ambiente, como a do ar e, além disso, é inconveniente a sua determinação em uma estrutura de concreto existente. A Figura 2.26 (a) mostra uma relação linear e inversa entre a resistividade elétrica determinada pelo método dos quatro eletrodos e a temperatura do ar, verificando que um ajuste de  $+1\text{kohm.cm}$  para cada  $-3^{\circ}\text{C}$  de variação de temperatura pode ser adotado para obter-se a resistividade elétrica em uma temperatura padrão. Não foram encontradas boas

correlações entre resistividade elétrica e umidade relativa do ar ou ocorrência de chuva.

Outro estudo variou o espaçamento entre eixos dos eletrodos ( $d$ ) em prismas de concreto, com uma camada carbonatada de 1cm, em que foram feitas determinações da resistividade elétrica em quatro momentos: (1º) antes da chuva, tendo decorrido um longo período de tempo seco; (2º) após 10 minutos de chuva; (3º) 1 hora do início da chuva e; (4º) 1 dia de tempo seco, após a chuva ter parado, conforme mostra a Figura 2.26 (b). Aqui, observa-se um aumento na resistividade após o início da chuva, indicando o efeito da dupla camada, comentado anteriormente. Para espaçamentos entre eixos de eletrodos de pelo menos 4cm ( $d \geq 4$ cm), um dia mais tarde, quando a superfície do concreto estava seca, a resistividade retornou para o valor determinado antes da chuva, fato que não ocorreu para espaçamentos menores. Com isso, utilizar “ $d \geq 4$ cm” e determinar a resistividade elétrica pelo menos 1 dia após a chuva parar são cuidados recomendados para minimizar o efeito da umidade na superfície, em medições de campo.



**Figura 2.26 – Efeito das condições ambientais na determinação da resistividade elétrica pelo método dos quatro eletrodos - (a) relação entre resistividade e temperatura do ar – (b) Variação da resistividade antes, durante e depois da chuva, em concretos carbonatados (GOWERS e MILLARD, 1999)**

## **3 INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL**

### **3.1 Considerações iniciais**

A exigência constante de aperfeiçoamentos e evoluções da tecnologia torna necessário o desenvolvimento de novas descobertas e suas confirmações. Sob este ponto de vista, é essencial uma análise teórica dos conhecimentos já existentes, bem como um desenvolvimento prático das questões propostas. Pode-se ainda dizer que, devido à abrangência de fatores e variáveis que estão interligados às pesquisas, torna-se necessário uma análise conjunta entre teoria e modelos experimentais.

Para que os objetivos propostos na pesquisa fossem alcançados, mostrou-se necessário a realização dos seguintes ensaios: resistência à compressão axial (NBR 5738/03 e NBR 5739/94), resistividade elétrica aparente (NBR 7117/81 – método de Wenner adaptado para uso em concreto), composição, pH e condutividade elétrica específica da solução aquosa dos poros e porosimetria por intrusão de mercúrio.

No intuito de obter uma análise mais precisa da influência da substituição de parte do cimento por cinza de casca de arroz nas propriedades do concreto, investigou-se misturas com aglomerantes compostos por diferentes teores de adições minerais, ou seja, misturas com teores de 10%, 20% e 30% de cinza de casca de arroz; uma mistura contendo 100% de cimento, denominada mistura de referência, uma com teor de 35% de cinza volante e uma com teor de 50% de escória de alto forno. Além da mistura de referência, as duas últimas citadas também foram utilizadas como parâmetro de comparação por corresponderem aos teores (35% e 50%) médios usados na produção do cimento Portland pozolânico (CP IV) e cimento Portland de alto forno (CP III), respectivamente.

### **3.2 Variáveis envolvidas na pesquisa**

Em termos metodológicos, para alcançar as metas desejadas, deve-se, em primeiro lugar, definir-se e quantificar-se as variáveis envolvidas na pesquisa, as quais são relacionadas a seguir:

a) variáveis independentes: São aquelas inerentes à própria constituição do concreto, ou seja, as que determinam o seu grau de compacidade ou relação sólido/espaco da pasta ao longo do tempo. São elas:

- *relação água/aglomerante (a/ag):* é a proporção em massa de líquido (água + aditivo) em relação à quantidade de aglomerante (cimento + adição), sendo adotadas 0,35, 0,50 e 0,65, proporções mantidas fixas para todas as misturas investigadas;<sup>1</sup>
- *Idade de ensaio:* 28 e 91 dias para o ensaio de resistência à compressão axial<sup>2</sup>; 3, 7, 14, 28, 91, 119, 182 e 364 dias para o ensaio de resistividade elétrica aparente<sup>3</sup>; e 91 dias para as demais propriedades estudadas.

b) variáveis intervenientes: São aquelas que alteram as propriedades do material cimentante. São elas:

- *tipo de adição mineral:* cinza de casca de arroz, cinza volante e escória de alto forno;
- *teor de substituição:*
  - cinza de casca de arroz: 10%, 20% e 30%,
  - cinza volante: 35% e
  - escória de alto forno: 50%.

c) variáveis dependentes: São aquelas que dependem das demais variáveis para serem determinadas. São elas:

- *Em concreto:*
  - resistência à compressão axial e
  - resistividade elétrica aparente.

---

<sup>1</sup> A rigor, somente a parte líquida do aditivo deve ser considerada na relação água/aglomerante, mas nessa pesquisa, devido à quantidade de aditivo utilizado por betonada ser pequena, desprezamos esse rigor e considerou-se todo o aditivo, pois entende-se que tal método não levaria a diferenças significativas.

<sup>2</sup> Os corpos-de-prova utilizados no ensaio de resistência à compressão axial foram curados em câmara climatizada ( $T=23\pm 2^{\circ}\text{C}$  e  $\text{UR}>95\%$ ) até os 28 dias e, dos 28 aos 91 dias, permaneceram em prateleiras dentro do laboratório (protegidas de sol, chuva e ventos).

<sup>3</sup> Os corpos-de-prova utilizados no ensaio de resistividade elétrica aparente foram curados em câmara climatizada ( $T=23\pm 2^{\circ}\text{C}$  e  $\text{UR}>95\%$ ) até os 91 dias e, dos 91 aos 364 dias, permaneceram imersos em solução salina (NaCl) à concentração de cloreto de 19,38ppm (WEE et al., 2000), mantida constante.

- *Em pasta:*
  - solução aquosa dos poros (concentração dos íons  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ),
  - condutividade elétrica específica da solução aquosa dos poros,
  - pH da solução aquosa dos poros e
  - porosimetria por intrusão de mercúrio.

### 3.3 Caracterização dos materiais

Os materiais envolvidos nesta pesquisa passaram por análises laboratoriais, segundo as normas pertinentes para a determinação de suas propriedades físicas e químicas, o que permite a realização de outras pesquisas com materiais de características semelhantes, seguindo os mesmos experimentos e conseqüentemente permitindo a comparação de resultados.

#### 3.3.1 Cimento

Foi utilizado cimento Portland de alta resistência inicial, tipo CP V - ARI, em conformidade com a EB 2 - NBR 5733/91. O emprego deste cimento justifica-se em virtude de apresentar maior quantidade de clínquer, ou seja, menor quantidade de qualquer tipo de adição, além de um alto teor de  $\text{C}_3\text{S}$  (silicato tricálcico), o que disponibiliza, em um menor espaço de tempo, uma maior quantidade de hidróxido de cálcio para as reações pozolânicas.

A Tabela 3.1 apresenta as características físico-mecânicas do cimento e a Tabela 3.2, a composição química.

Os ensaios de caracterização físico-mecânica e química do cimento foram realizados de acordo com as seguintes normas:

Resistência à compressão da argamassa normal – NBR 7215/91

Tempo de pega – NBR 11581/91

Massa específica – NBR 6474/84

Finura # 0,075 mm – NBR 11579/91

Superfície específica BLAINE – NBR 7224/84

Superfície específica BET – ASTM D 3663/92  
 Análise química – NBR 5743/89; 5744/89; 5745/89; 5747/89; 7227/89 e  
 9203/91

**Tabela 3.1 – Características físico-mecânicas do cimento**

<b>Cimento</b>	<b>CP V - ARI</b>
Resistência à compressão 1 dia (MPa)	22,5
Resistência à compressão 3 dias (MPa)	35,1
Resistência à compressão 7 dias (MPa)	41,2
Resistência à compressão 28 dias (MPa)	49,6
Tempo de início de pega (h:m)	02:14
Tempo de fim de pega (h:m)	03:15
Massa específica (Kg/dm <sup>3</sup> )	3,11
Finura na peneira #200, malha de 0,075mm (%)	0,13
Superfície específica BLAINE (m <sup>2</sup> /Kg)	423
Superfície específica BET (m <sup>2</sup> /Kg)	1,48

**Tabela 3.2 – Composição química dos materiais aglomerantes (% em massa)**

<b>Material Aglomerante</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>MgO</b>	<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>Perda ao fogo</b>
Cimento	19,59	4,79	3,07	64,35	1,69	2,75	0,07	0,98	2,09
Cinza volante	64,57	27,27	2,21	1,51	0,76	0,06	0,15	1,50	1,16
Escória de alto forno	34,98	13,06	1,11	42,28	6,01	0,11	0,17	0,40	0,71
Cinza de casca de arroz	90,00	0,28	0,14	0,45	0,28	0,02	0,08	1,55	5,00

### 3.3.2 Adições minerais

As adições minerais empregadas foram a cinza de casca de arroz, a cinza volante e a escória de alto forno.

A cinza de casca de arroz essencialmente amorfa, obtida por queima controlada, proveniente da usina termoeletrica de Uruguaiana/RS, sofreu moagem prévia em moinho de bolas de aço, pelo tempo de 10 minutos, para



homogeneização e uniformização de sua finura. A cinza volante é procedente da queima do carvão mineral na usina termoeletrica de Candiota/RS e a escória de alto forno, da indústria siderúrgica nacional de Tubarão/ES (CST), sendo utilizadas conforme foram entregues.

A Tabela 3.2 apresenta a composição química das adições minerais e a Tabela 3.3 as características físicas.

Os ensaios de caracterização física e química das adições minerais foram realizados de acordo com as seguintes normas:

Massa específica – NBR 6474/84

Superfície específica BET – ASTM D 3663/92

Análise química – procedimento IPT

**Tabela 3.3 – Características físicas dos materiais aglomerantes**

<b>Material Aglomerante</b>	<b>Massa específica (Kg/dm<sup>3</sup>)</b>	<b>Superfície específica BET (m<sup>2</sup>/Kg)</b>
Cimento	3,11	1,48
Cinza volante	2,19	2,32
Escória de alto forno	2,89	1,07
Cinza de casca de arroz	2,17	4,00

As adições minerais foram utilizadas em substituição parcial do cimento, em massa. Assim, foram investigadas 6 misturas com diferentes combinações de aglomerantes. A Tabela 3.4 apresenta a nomenclatura utilizada para cada mistura, relacionada com a porcentagem de substituição.

**Tabela 3.4 – Proporções das misturas investigadas**

<b>Mistura</b>	<b>Cimento (%)</b>	<b>Cinza volante (%)</b>	<b>Escória de alto forno (%)</b>	<b>Cinza de casca de arroz (%)</b>
REF	100	---	---	---
35V	65	35	---	---
50E	50	---	50	---
10A	90	---	---	10
20A	80	---	---	20
30A	70	---	---	30

### 3.3.3 Agregados

Utilizou-se, como agregado miúdo, areia natural de origem quartzosa, proveniente do município de Santa Maria, RS. Esta areia foi lavada para a retirada de eventuais impurezas sendo, posteriormente, peneirada na peneira #4,8 mm. Foi seca em estufa e armazenada em caixas de madeira com tampa. Através do ensaio granulométrico caracterizou-se a areia como média, conforme mostra a Figura 3.1.

Como agregado graúdo, utilizou-se rocha diabásica britada, proveniente do município de Itaara, RS. A brita foi peneirada, utilizando-se a fração passante na peneira #19,0 mm e retida na peneira 6,3 mm. Posteriormente foi lavada, seca em estufa e estocada em caixas de madeira com tampa. Através do ensaio granulométrico caracterizou-se a brita como nº 1, conforme mostra a Figura 3.2.

A obtenção das características físicas dos agregados, apresentadas na Tabela 3.5, baseou-se nos ensaios normalizados citados abaixo:

Composição granulométrica – NBR 7217/87

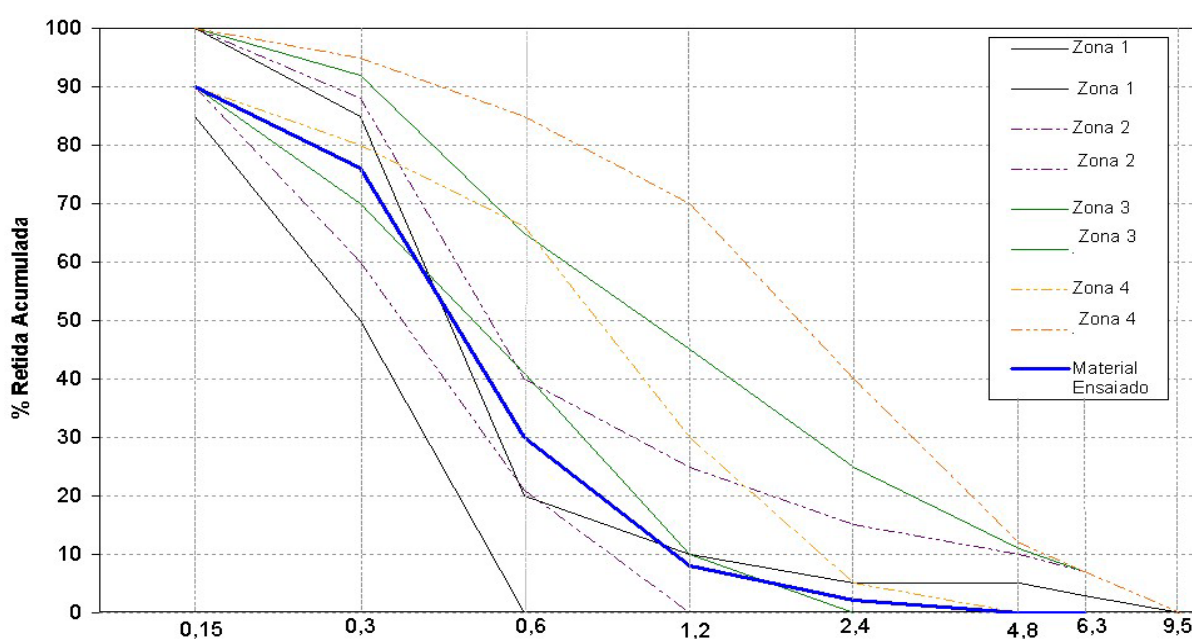
Massa específica do agregado miúdo – NBR 9776/87

Massa específica do agregado graúdo – NBR 9937/87

Absorção de água do agregado graúdo – NBR 9937/87

Massa unitária solta – NBR 7251/82

Índice de forma pelo método do paquímetro – NBR 7809/83



**Figura 3.1 – Gráfico da granulometria do agregado miúdo – Areia média**

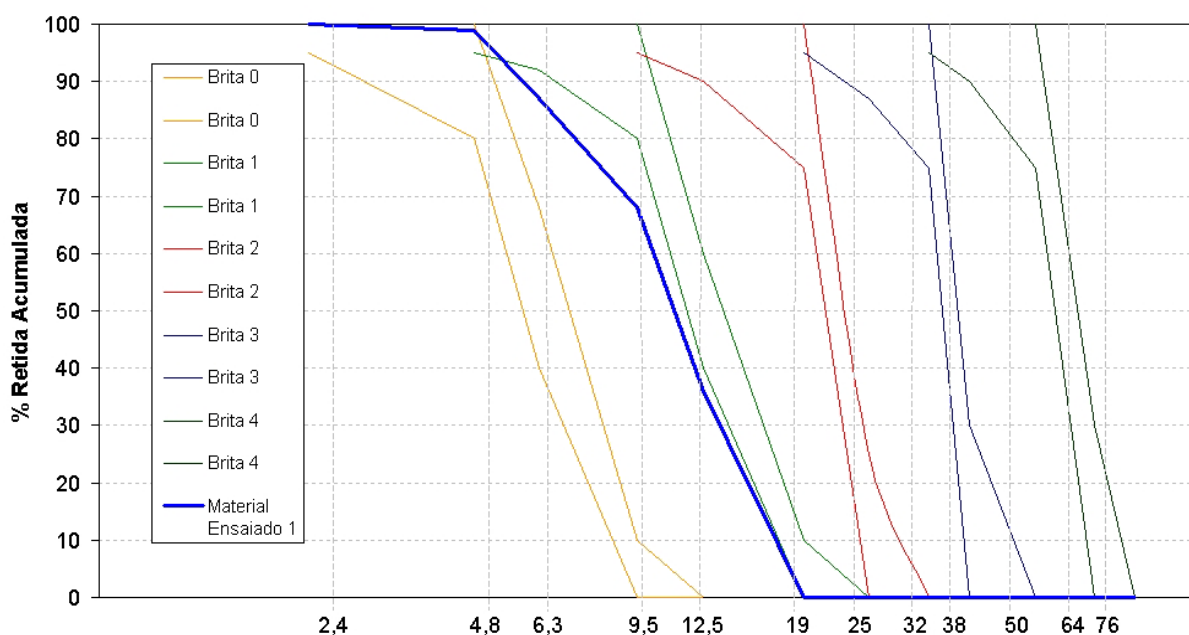


Figura 3.2 – Gráfico da granulometria do agregado graúdo – Brita nº 1

Tabela 3.5 – Características físicas dos agregados

# peneiras (mm)	Porcentagens retidas acumuladas	
	Brita	Areia
12,5*	36	-
9,5	68	-
6,3*	87	-
4,8	99	-
2,4	100	2
1,2	100	8
0,6	100	30
0,3	100	76
0,15	100	90
Módulo de finura	6,67	2,06
Dimensão máxima característica - mm	19,0	2,4
Massa específica – Kg/dm <sup>3</sup>	2,50	2,61
Massa unitária solta – Kg/dm <sup>3</sup>	1,31	1,67
Absorção de água - %	2,81	---
Índice de forma	2,99	---

\* Peneiras da série intermediária

### 3.3.4 Aditivo

Para que todas as misturas fossem moldadas com consistências semelhantes, fez-se necessário o uso de aditivo superplastificante devido a relações água/aglomerante baixas e/ou diferenças nas superfícies específicas dos aglomerantes utilizados. O aditivo superplastificante utilizado é considerado de 3ª geração, com base em uma cadeia de éter carboxílico modificado, isento de cloretos e atende às prescrições da norma ASTM C 494/92 (tipos A e F).

### 3.3.5 Água

A água utilizada na produção dos concretos é procedente do Reservatório Central da Universidade Federal de Santa Maria, alimentado por poços artesianos. O mesmo abastece inúmeros pontos de consumo dentro do campus universitário, fornecendo água potável própria para o consumo humano.

## 3.4 Dosagem dos concretos

As misturas investigadas foram dosadas com base em procedimentos propostos por Helene e Terzian (1992), para o proporcionamento dos materiais e para determinar os demais parâmetros referentes à utilização conjunta de cimento, agregados, aditivos e adições minerais.

Foram moldadas seis misturas, sendo uma com 100% de cimento e as demais com adições minerais em substituição parcial do cimento, em massa. Para compor a curva de Abrams (mínimo três pontos), de cada mistura, foi necessário estabelecer três relações água/aglomerante 0,35; 0,50 e 0,65, com proporções de aglomerante para agregados de 1:3,5; 1:5,0 e 1:6,5, respectivamente, em massa. Essa proporção sofreu pequenas variações nas misturas com adições minerais, pois, devido à diferença nas massas específicas dos aglomerantes, fez-se uma compensação na quantidade de agregado miúdo para manter-se o volume de argamassa constante e igual ao da mistura de referência. O agregado graúdo permaneceu constante para todas as misturas de mesma relação água/aglomerante.

O teor de argamassa, dado em volume de material seco, foi fixado em 51%, por ser o que proporcionou melhor coesão ao concreto sem apresentar excesso de argamassa.

A Tabela 3.6 apresenta os traços unitários de todas as misturas, já com as correções no agregado miúdo. A Tabela 3.7 traz as quantidades dos materiais utilizados por m<sup>3</sup> de concreto fresco.

A determinação da dosagem inicial do aditivo superplastificante, a ser utilizada nos concretos investigados, deu-se através de ensaios de trabalhabilidade para cada mistura e relação água/aglomerante. Estes resultados serviram de parâmetro para as moldagens definitivas, buscando obter, no ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone (NBR 7223/82), valores entre 70 ± 10 mm.

**Tabela 3.6 – Traços unitários**

Mistura	Aglomerantes				a/ag = 0,35		a/ag = 0,50		a/ag = 0,65	
	Cimento	Escória de alto forno	Cinza volante	Cinza de casca de arroz	Areia	Brita	Areia	Brita	Areia	Brita
REF	1,00	---	---	---	1,30	2,21	2,06	2,94	2,83	3,68
35V	0,65	---	0,35	---	1,17	2,21	1,94	2,94	2,70	3,68
50E	0,50	0,50	---	---	1,26	2,21	2,03	2,94	2,79	3,68
10A	0,90	---	---	0,10	1,26	2,21	2,02	2,94	2,79	3,68
20A	0,80	---	---	0,20	1,22	2,21	1,99	2,94	2,75	3,68
30A	0,70	---	---	0,30	1,19	2,21	1,95	2,94	2,72	3,68

Tabela 3.7 – Quantidade dos materiais utilizados por m<sup>3</sup>

Mis- tura	a/ag	Cimen- to (Kg/m <sup>3</sup> )	Cinza volante (Kg/m <sup>3</sup> )	Escó- ria de alto forno (Kg/m <sup>3</sup> )	Cinza de casca de arroz (Kg/m <sup>3</sup> )	Aditivo (%)	Água + Aditivo (Kg/m <sup>3</sup> )	Areia (Kg/m <sup>3</sup> )	Brita (Kg/m <sup>3</sup> )
REF	0,35	488	---	---	---	0,20	171	632	1076
35V	0,35	317	171	---	---	0,25	171	572	1076
50E	0,35	244	---	244	---	0,17	171	616	1076
10A	0,35	439	---	---	49	0,50	171	614	1076
20A	0,35	390	---	---	98	0,95	171	596	1076
30A	0,35	342	---	---	146	1,95	171	579	1076
REF	0,50	359	---	---	---	0,00	179	739	1055
35V	0,50	233	126	---	---	0,10	179	695	1055
50E	0,50	179	---	179	---	0,00	179	728	1055
10A	0,50	323	---	---	36	0,20	179	726	1055
20A	0,50	287	---	---	72	0,50	179	713	1055
30A	0,50	251	---	---	108	1,05	179	700	1055
REF	0,65	284	---	---	---	0,00	184	802	1043
35V	0,65	184	99	---	---	0,00	184	767	1043
50E	0,65	142	---	142	---	0,00	184	793	1043
10A	0,65	255	---	---	28	0,00	184	791	1043
20A	0,65	227	---	---	57	0,30	184	781	1043
30A	0,65	199	---	---	85	0,70	184	771	1043

Obs.:

- Abatimento do tronco de cone: 70±10mm - Temperatura do concreto fresco: 19±1°C

- O teor de aditivo é em relação à massa total de aglomerante e sua massa é descontada da quantidade total de água.

### 3.5 Moldagem, armazenamento e cura dos corpos de prova

#### 3.5.1 Concretos

Foram moldados, para cada relação água/aglomerante e mistura, 8 corpos-de-prova cilíndricos  $\phi 10 \times 20$ cm e 4 corpos-de-prova prismáticos 10x10x17cm. Os

corpos-de-prova cilíndricos foram utilizados para o ensaio de resistência à compressão axial e os prismáticos, para o de resistividade elétrica aparente.

As moldagens dos corpos-de-prova foram realizadas de acordo com a NBR 5738, adensados em mesa vibratória, em duas camadas. A colocação dos materiais na betoneira obedeceu à seguinte ordem:

- 100% do agregado graúdo;
- 60% da água;
- 100% do aglomerante (homogeneizado);
- 100% do aditivo superplastificante + 20% da água. Aqui esperou-se o aditivo agir, passando para a etapa seguinte somente após a homogeneização dos materiais;
- 100% do agregado miúdo + 20% da água.

As moldagens ocorreram durante o inverno, fato que determinou a conveniência do aquecimento da água da mistura. Essa foi aquecida na temperatura necessária para que a massa de concreto resultasse em 19°C. Para esse fim, foi utilizada uma fórmula (MEHTA e MONTEIRO, 1994) que considera as massas dos aglomerantes, dos agregados e da água, assim como suas temperaturas.

$$T = \frac{0,22.(T_m.M_m + T_c.M_c) + T_a.M_a}{0,22.(M_m + M_c) + M_a} \quad (3.1)$$

onde:

$T$  = Temperatura da massa de concreto (°F)

$T_m$  = Temperatura dos agregados (°F)

$T_c$  = Temperatura do aglomerante (°F)

$T_a$  = Temperatura da água (°F)

$M_m$  = Massa dos agregados (Kg)

$M_c$  = Massa do aglomerante (Kg)

$M_a$  = Massa de água (Kg)

Os corpos-de-prova foram mantidos nos moldes por 24 horas, devidamente protegidos para evitar a perda de água superficial e, após esse período, foram desmoldados, identificados e armazenados em câmara climatizada, à temperatura de  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa maior que 95%. Os corpos-de-prova prismáticos permaneceram ali até os 91 dias, e os corpos-de-prova cilíndricos até os 28 dias. Dos 91 aos 364 dias, os corpos-de-prova prismáticos ficaram imersos em solução salina (NaCl) à concentração de cloreto de 19,38ppm (WEE et al., 2000), mantida constante. Os corpos-de-prova cilíndricos, dos 28 aos 91 dias, permaneceram em prateleiras dentro do laboratório (protegidas de sol, chuva e ventos).

### 3.5.2 Pastas

Foram moldados, para cada relação água/aglomerante e mistura, 3 corpos-de-prova cilíndricos  $\phi 4 \times 8\text{cm}$  e 3 corpos-de-prova cilíndricos  $\phi 3 \times 4\text{cm}$ . Os primeiros foram utilizados para os ensaios de composição, condutividade específica e pH da solução aquosa dos poros e os segundos, para o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio.

Na produção das pastas de aglomerantes, foram utilizados os mesmos teores de aditivo superplastificante utilizados na produção dos concretos. Por se tratar de pastas que apresentavam consistência bastante fluida, a moldagem dos corpos-de-prova tornou-se bastante simples, mas não dispensou a vibração dos mesmos, a qual foi feita com mesa vibratória, em uma camada.

Os corpos-de-prova cilíndricos  $\phi 4 \times 8\text{cm}$ , foram mantidos nos moldes por 24 horas, devidamente protegidos para evitar a perda de água superficial e, após esse período, foram desmoldados, identificados e armazenados em câmara climatizada, à temperatura de  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa maior que 95%, onde permaneceram até o dia do ensaio. Mesmo dentro da câmara climatizada, os corpos-de-prova foram mantidos submersos em água com um pouco de cal dissolvida, sendo que o motivo de estarem dentro da câmara foi apenas para mantê-los em uma temperatura controlada.

Os corpos-de-prova  $\phi 3 \times 4\text{cm}$ , por terem sido moldados em potes plásticos utilizando aproximadamente 2/3 de seu volume, foram mantidos na fôrma com água no terço superior do pote, até o dia do ensaio.



## 3.6 Ensaios em concreto

### 3.6.1 Resistência à compressão axial

Este ensaio, destinado a caracterizar as misturas investigadas diante da resistência à compressão, foi realizado segundo à norma NBR 5739. Romperam-se 4 corpos-de-prova cilíndricos  $\phi 10 \times 20$ cm para cada mistura e relação água/aglomerante na idade de 28 dias, mantidos em câmara climatizada até o dia do ensaio. Além disso, romperam-se 4 corpos-de-prova cilíndricos  $\phi 10 \times 20$ cm para cada mistura e relação água/aglomerante na idade de 91 dias, mantidos em câmara climatizada até os 28 dias e, posteriormente, em prateleiras dentro do próprio laboratório (protegidas de sol, chuva e ventos) até o dia do ensaio. No dia do ensaio, foram capeados com enxofre e ensaiados.

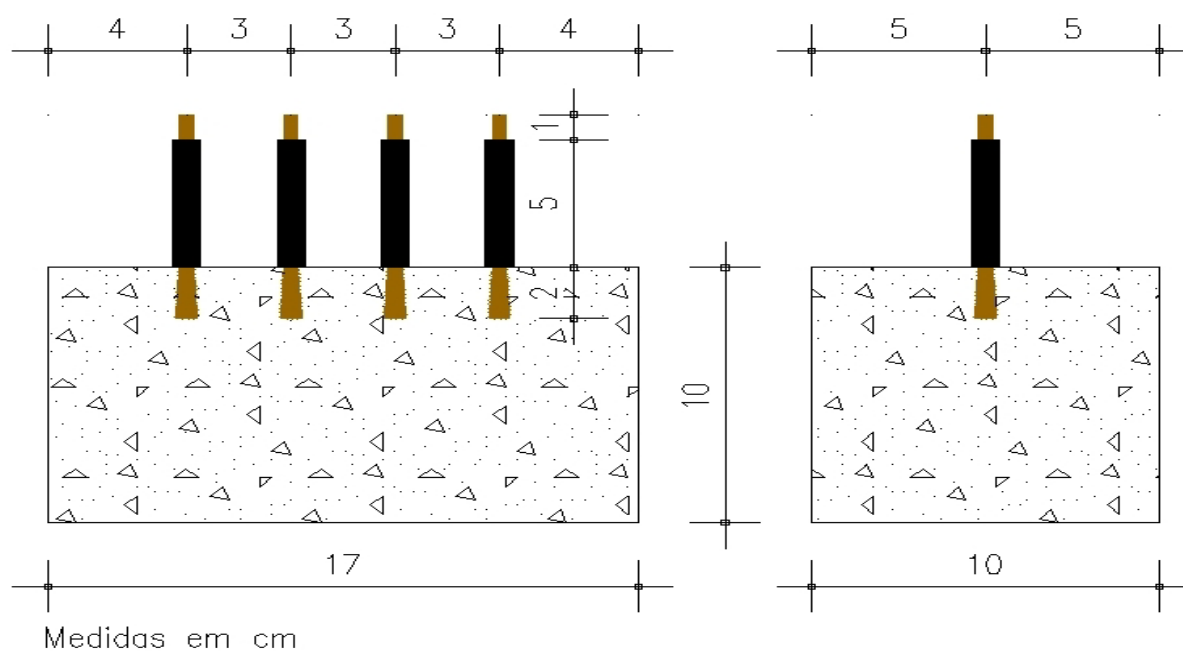
### 3.6.2 Resistividade elétrica aparente

Com o objetivo de caracterizar as misturas investigadas diante da resistividade elétrica aparente, realizou-se este ensaio utilizando o método dos quatro eletrodos (pontos) ou método de Wenner, como também é conhecido, adaptado para uso em concreto.

Para a realização do ensaio, foram moldados 4 corpos-de-prova prismáticos  $10 \times 10 \times 17$ cm iguais aos utilizados por Abreu (1998), conforme mostra a Figura 3.3, para cada mistura e relação água/aglomerante. Esses corpos-de-prova permaneceram em câmara climatizada até os 91 dias, sendo ensaiados aos 3, 7, 14, 28 e 91, de maneira não destrutiva. Dos 91 aos 364 dias, eles permaneceram dentro de um tanque, imersos em solução salina (NaCl) à concentração de cloreto de 19,38ppm (WEE et al., 2000), mantida constante, sendo ensaiados aos 119, 182 e 364 dias de idade, de maneira não destrutiva. Foram ensaiados individualmente, sendo retirados da câmara climatizada ou do tanque apenas no momento do ensaio e, após o mesmo, retornaram para a câmara ou tanque, momento que o corpo-de-prova seguinte era retirado e levado para a sala de ensaio, e assim procedeu-se sucessivamente até o último ser ensaiado.

A produção e moldagem das misturas investigadas, sempre, começaram a ser feitas pela relação água/aglomerante 0,35. Assim, o ensaio de resistividade elétrica também seguiu esta ordem, sendo realizado em horário próximo ao que os corpos-de-prova foram moldados.

Para moldar os corpos-de-prova apresentados na Figura 3.3, foi necessário construir fôrmas específicas. Foram construídas em madeira e possuíam sistemas de encaixe, que as tornava estanques. Outro detalhe que vale destacar é que a fôrma precisava garantir a distribuição equidistante e o alinhamento dos eletrodos e não podia provocar nenhum esforço sobre eles no momento da desfôrma, pois isso iria comprometer o contato entre o eletrodo e o concreto. Sendo assim, o gabarito que garantia a distribuição e o alinhamento dos eletrodos não ficou em contato com o concreto, ou seja, deixou-se uma folga de  $\pm 1$ cm. A Figura 3.4 apresenta a fôrma utilizada.



**Figura 3.3 – Detalhe dos corpos-de-prova utilizados para o ensaio de resistividade elétrica aparente**

Como eletrodos foram utilizados fios de cobre, seção (bitola) 10mm<sup>2</sup>. O preparo envolveu as seguintes etapas:

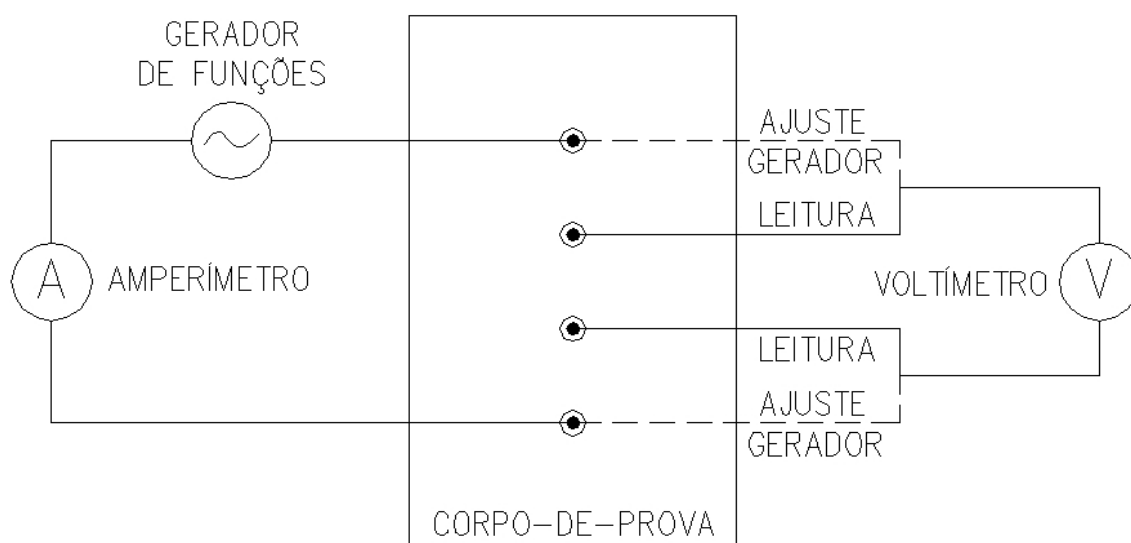
- corte do fio em pedaços de 8cm;
- decapagem do fio, retirando 1cm em uma das extremidades e 2cm na outra, restando 5cm de fio coberto, medida que corresponde à altura do gabarito da fôrma;
- remoção do verniz (existente sobre o fio) nas extremidades, com lixa e amassamento da extremidade maior (que fica em contato com o concreto) para aumentar a aderência entre o eletrodo e o concreto. Para amassar o eletrodo utilizou-se uma morsa.



**Figura 3.4 – Fôrma utilizada na moldagem dos corpos-de-prova para o ensaio de resistividade elétrica aparente**

O ensaio propriamente dito foi realizado fazendo-se uso basicamente de um gerador de funções de corrente alternada e dois multímetros de alta impedância de entrada. Assim, retirou-se o corpo-de-prova da câmara climatizada, levando-o para a sala de realização do ensaio onde o circuito, representado na Figura 3.5, foi montado. Com o gerador de funções gerando corrente alternada de onda senoidal a uma frequência de 10Hz, fez-se seu ajuste de modo que a diferença de potencial medida entre os eletrodos extremos fosse de 5V. Com o gerador de funções ajustado, aguardou-se no mínimo 10 minutos para que ocorresse a estabilização do circuito. Após essa estabilização, fez-se a primeira leitura da corrente (em mA) e da

diferença de potencial entre os eletrodos internos (em mV) e, para certificar-se dos resultados, 1 minuto depois, fez-se a segunda leitura. Além da corrente e diferença de potencial, dados como distância entre eixos dos eletrodos, profundidade de penetração dos eletrodos no concreto, umidade relativa do ar e temperatura ambiente, também foram coletados.



(a) esquema do circuito utilizado para o ensaio de resistividade elétrica aparente



(b) circuito montado – pronto para leitura

**Figura 3.5 – Circuito utilizado no ensaio de resistividade elétrica aparente – (a) esquema do circuito – (b) circuito montado (pronto para leitura)**

O valor da resistividade elétrica aparente é determinado através da seguinte fórmula (NBR 7117/81):

$$\rho = \frac{4 \cdot \pi \cdot d \cdot V}{\left(1 + \frac{2d}{\sqrt{d^2 + 4b^2}} - \frac{d}{\sqrt{d^2 + b^2}}\right) \cdot I} \quad (3.2)$$

onde:

$\rho$  = resistividade elétrica aparente calculada do concreto, em ohm.cm;

$V$  = diferença de potencial medida em Volts;

$I$  = corrente medida em Amperes;

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

$b$  = profundidade de penetração dos eletrodos no corpo de prova, em cm.

De acordo com a NBR 7117/81, o método dos quatro eletrodos mede a resistividade do solo até uma profundidade aproximadamente igual à distância entre eixos dos eletrodos. Considerando o mesmo aspecto para o concreto, teríamos a medida da resistividade elétrica até uma profundidade de aproximadamente 3cm a qual representa, em termos de durabilidade, a região mais crítica de uma estrutura, ou seja, a região do recobrimento das armaduras.

Os equipamentos utilizados no ensaio foram os seguintes:

- um gerador de funções, com a finalidade de gerar corrente alternada de onda senoidal a uma frequência de 10Hz, regulado de forma que a diferença de potencial medida entre os dois eletrodos extremos fosse de 5V, marca MINIPA, modelo MFG-4202;
- um multímetro com impedância de entrada de  $10^6 \Omega$ , regulado para leitura com onda senoidal e finalidade de medir a corrente, marca MINIPA, modelo ET-2082;
- um multímetro com impedância de entrada de  $10^6 \Omega$ , regulado para leitura com onda senoidal e finalidade de medir a diferença de potencial, marca MINIPA, modelo ET-2082;

- Um relógio termo-higrômetro para medir a umidade relativa e a temperatura, marca MINIPA, modelo MT-241.

### 3.7 Ensaios em pastas

#### 3.7.1 Solução aquosa dos poros

O ensaio de solução aquosa dos poros teve por objetivo determinar a composição química e, a partir daí, poder-se calcular a condutividade elétrica específica em o pH da solução aquosa dos poros, de cada mistura e relação água/aglomerante investigada.

Na idade do ensaio, os corpos-de-prova cilíndricos  $\phi 4 \times 8$  cm de pastas foram retirados da câmara climatizada, lavados com escova para livrar-se da cal e, após estarem secos, foram perfurados com broca de aço  $\phi 8,0$  mm para pulverizá-los, sendo esse material posteriormente peneirado na peneira #100. Para formar a amostra de solução a ser analisada, 80g do pó passante na peneira #100 foi misturado com 80g de água deionizada (proporção 1:1) e agitados por 30 minutos, tempo necessário para que o pH se estabilize, depois, filtrados e encaminhados para a determinação das concentrações dos íons  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{OH}^-$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ . Esse procedimento foi adotado devido à impossibilidade de extração, no equipamento proposto por Longuet et al. (1973), da quantidade mínima de solução necessária para a realização dos ensaios na idade de 91 dias, para relação água/aglomerante inferior a 0,50.

A concentração dos íons  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  foram determinadas através de ensaio de espectroscopia de absorção atômica. A concentração de íons  $\text{OH}^-$ , através de titulação direta com HCl. Os valores de pH da solução dos poros, a partir das concentrações de íons hidroxilas. Por fim, a concentração de íons  $\text{SO}_4^{2-}$  foi determinada, indiretamente, pela precipitação de  $\text{BaSO}_4$  em uma solução contendo  $\text{BaCl}_2$  em excesso.

Para o cálculo da condutividade elétrica da solução dos poros, utilizaram-se as equações propostas por Shi et al. (1998):

$$\sigma = \sigma_{\text{água}} + \frac{\sum C_i \lambda_i}{1000} \quad (3.3)$$

onde:

$\sigma$  = condutividade específica da solução aquosa dos poros;

$\sigma_{\text{água}}$  = condutividade específica da água;

$C_i$  = concentração equivalente do íon  $i$ ;

$\lambda_i$  = condutividade equivalente do íon  $i$ .

sendo que:

$$\lambda_i = \lambda_{i,0} - A_i \sqrt{C_i} \quad (3.4)$$

onde  $\lambda_{i,0}$  é a condutividade equivalente à concentração infinita. A constante  $A_i$  da equação é determinada teoricamente por:

$$A_i = 0,2289 \lambda_{i,0} + 60,19 \quad (3.5)$$

A Tabela 3.8 apresenta os valores de  $\lambda_{i,0}$  dos íons presentes na solução dos poros do concreto.

**Tabela 3.8 – Condutividade equivalente de íons aquosos numa concentração infinita em 25°C**

Íon	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	OH <sup>-</sup>
Condutividade equivalente, $\lambda_{i,0}$ (m <sup>2</sup> .equiv <sup>-1</sup> .ohm <sup>-1</sup> )	0,00501	0,00735	0,00595	0,00798	0,0198

### 3.7.2 Porosimetria por intrusão de mercúrio

O ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio teve por objetivo determinar a porosidade da pasta de cada mistura e relação água/aglomerante investigada.

Na idade do ensaio, os corpos-de-prova cilíndricos  $\phi 3 \times 4$  cm de pastas foram retirados do pote plástico (fôrma) e extraídos deles pequenos cubos (aresta de  $\pm 6$  mm), os quais foram deixados imersos em álcool isopropílico por uma semana, para interromper a hidratação. Após essa etapa, fez-se a secagem dos cubos em estufa, iniciando com temperatura de 40°C no primeiro dia, 60°C no segundo, 80°C no terceiro e 90°C no quarto dia, retirando-se as amostras no quinto dia e deixando-as esfriar para posterior realização do ensaio. Cada amostra foi formada por seis cubos.

Os ensaios para a determinação do volume total de intrusão de mercúrio, que se constitui em dados comparativos aceitáveis para a determinação da porosidade, foram realizados em equipamento da marca Micromeritics, modelo Autopore II 9220, à pressão de 414 MPa, permitindo a determinação de tamanho de poro de até 0,003  $\mu\text{m}$ . Foi considerado um ângulo de contato de 130° e uma tensão superficial de mercúrio de  $4,85 \times 10^{-1}$  N/m.



## 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1 Considerações iniciais

Neste capítulo, são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial, resistividade elétrica aparente, composição, pH e condutividade elétrica específica da solução aquosa dos poros e porosimetria por intrusão de mercúrio. Analisou-se cada propriedade separadamente e também de maneira correlacionada. Na seqüência, os resultados de resistência à compressão e resistividade elétrica foram avaliados, a partir da especificação do valor de uma dessas propriedades. Os níveis adotados foram 45MPa e 65MPa de resistência à compressão e 30k $\Omega$ .cm e 60k $\Omega$ .cm de resistividade elétrica. Após, realizou-se uma análise de custos, com o objetivo de verificar a relação CUSTO/BENEFÍCIO das misturas investigadas, considerando as propriedades estudadas. Por fim, são apresentados os resultados de um estudo preliminar que teve como objetivo verificar o comportamento do concreto, no que diz respeito à resistividade elétrica, quando imerso em solução salina (NaCl), à concentração de cloreto de 19,38ppm.

Os ensaios foram realizados de forma similar e independente para todas as misturas e relações água/aglomerante investigadas, de modo a permitir uma análise comparativa, verificando o comportamento dos diferentes aglomerantes.

Os resultados são apresentados na forma de tabelas e de gráficos de maneira a possibilitar uma melhor visualização.

### 4.2 Resistência à compressão axial

A utilização de adições minerais, formando misturas aglomerantes binárias com o CPV-ARI, propicia atribuir a determinado concreto as mais variadas propriedades e características frente à durabilidade. Porém, para um mesmo patamar de resistência à compressão, estas propriedades podem variar substancialmente, cabendo então uma análise criteriosa das qualidades que devem estar presentes no concreto para dotá-lo de características adequadas frente aos

agentes agressivos do meio em que estará inserido durante a sua vida útil de projeto.

Os resultados de resistência à compressão axial são apresentados na Tabela 4.1 e Figuras 4.1 e 4.2, para as diferentes idades e relações água/aglomerante investigadas. Essa mesma tabela também apresenta a equação de Abrams e coeficiente de correlação das misturas investigadas, assim como o índice de resistência à compressão, que corresponde à relação entre a resistência das misturas com adição mineral e a de referência em igual relação água/aglomerante e idade.

**Tabela 4.1 – Resultados de resistência à compressão axial**

Mistura	a/ag	fc	lfc	R	fc	lfc	R
		28 dias (MPa)	28 dias	(Abrams) 28 dias	91 dias (MPa)	91 dias	(Abrams) 91 dias
REF	0,35	53,7	1,00	-0,9593	67,9	1,00	-0,9999
	0,50	47,3	1,00	$\left( fc = \frac{125,0327}{9,1950^x} \right)$	51,4	1,00	$\left( fc = \frac{149,7281}{9,1062^x} \right)$
	0,65	27,6	1,00		35,0	1,00	
35V	0,35	58,2	1,08	-0,9997	66,8	0,98	-0,9997
	0,50	36,6	0,77	$\left( fc = \frac{263,4618}{64,1734^x} \right)$	44,6	0,87	$\left( fc = \frac{227,3222}{29,9133^x} \right)$
	0,65	16,7	0,61		24,1	0,69	
50E	0,35	52,8	0,98	-0,9941	61,8	0,91	-0,9997
	0,50	35,2	0,74	$\left( fc = \frac{138,0802}{15,5055^x} \right)$	46,1	0,90	$\left( fc = \frac{153,7021}{12,4538^x} \right)$
	0,65	23,2	0,84		29,0	0,83	
10A	0,35	68,1	1,27	-0,9955	76,4	1,13	-0,9903
	0,50	46,9	0,99	$\left( fc = \frac{166,7015}{12,7926^x} \right)$	62,1	1,21	$\left( fc = \frac{177,1880}{9,7354^x} \right)$
	0,65	31,7	1,15		38,6	1,10	
20A	0,35	72,0	1,34	-1,0000	85,6	1,26	-0,9998
	0,50	52,3	1,11	$\left( fc = \frac{181,6832}{13,2022^x} \right)$	62,9	1,22	$\left( fc = \frac{201,5192}{10,9932^x} \right)$
	0,65	33,2	1,20		41,7	1,19	
30A	0,35	67,4	1,26	-0,9990	78,9	1,16	-0,9816
	0,50	50,1	1,06	$\left( fc = \frac{180,4558}{15,0186^x} \right)$	65,1	1,27	$\left( fc = \frac{200,9413}{12,1496^x} \right)$
	0,65	29,9	1,08		37,3	1,07	

x= a/ag; R = coeficiente de correlação; fc = resistência à compressão axial; lfc = índice de fc.

Como esperado, constata-se para todos os concretos investigados um aumento em sua resistência à compressão axial com a diminuição da relação água/aglomerante, com coeficientes de correlação muito satisfatórios. Verifica-se também elevação na resistência à compressão axial, para todos os traços e relações água/aglomerante, com o aumento do grau de hidratação.

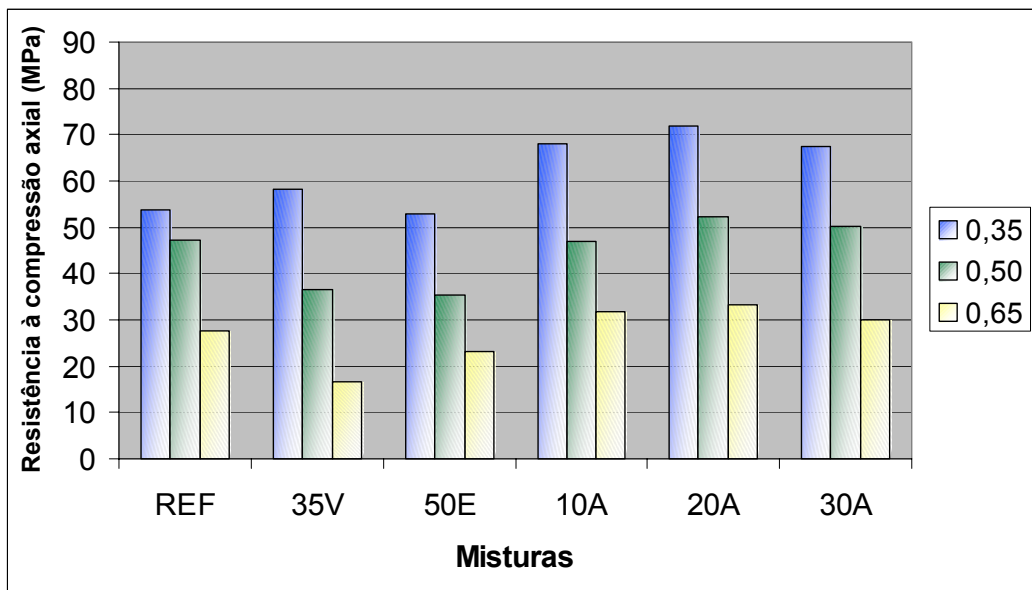
Assim, observa-se, para a mistura de referência e relações a/ag 0,35, 0,50 e 0,65, um incremento nos valores de resistência à compressão, dos 28 para 91 dias, de 26%, 9% e 27%, respectivamente. Da mesma forma, para as amostras compostas com cinza de casca de arroz (CCA), nos teores de 10% (10A), 20% (20A) e 30% (30A) e relações a/ag 0,35, 0,50 e 0,65, os acréscimos foram de 12%, 32% e 22%; 19%, 20% e 26%; e 17%, 30% e 25%, respectivamente e, para as amostras com 35% (35V) de cinza volante (CV) e as com 50% (50E) de escória de alto forno (EAF), nas mesmas relações água/aglomerante, os incrementos foram de 15%, 22% e 44%; e 17%, 31% e 25%, respectivamente. Esses aumentos foram expressivos, mesmo com os concretos sendo submetidos à cura úmida apenas até os 28 dias.

De maneira geral, verifica-se uma superioridade das misturas compostas com CCA em relação às demais, tanto aos 28 quanto aos 91 dias. Isso fica evidenciado através da análise dos índices de resistência à compressão. Essa superioridade justifica-se principalmente devido à grande reatividade da CCA e ao maior refinamento dos poros promovido com sua utilização no concreto.

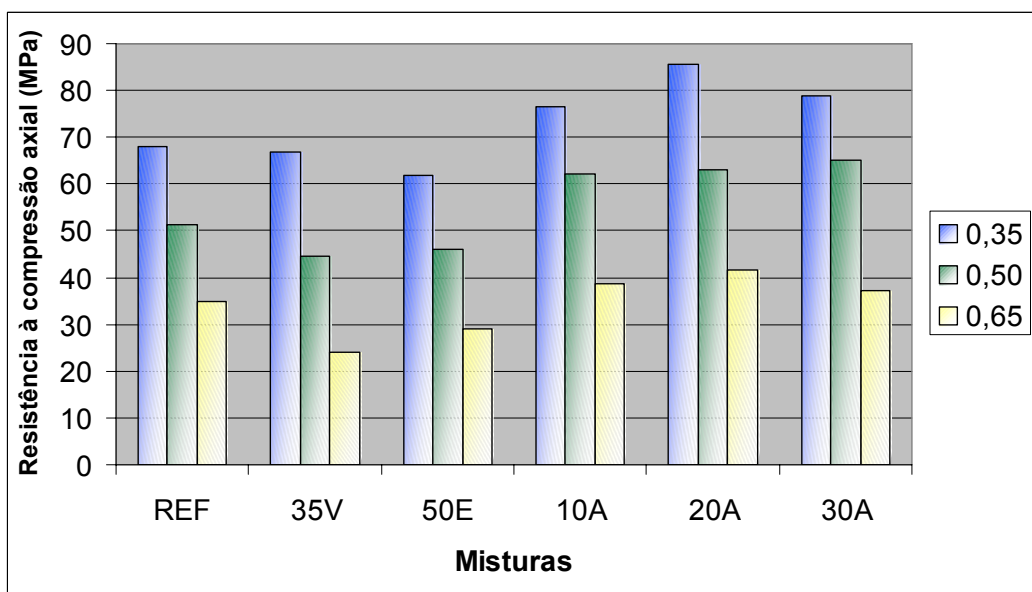
Analisando os gráficos das Figuras 4.1 e 4.2, constata-se que, aos 28 dias, o melhor desempenho foi obtido pela mistura 20A (20% de CCA) em todas as relações água/aglomerante. Comportamento semelhante também ocorreu aos 91 dias, sendo que apenas na relação a/ag 0,50 a mistura 30A (30% de CCA) apresentou resistência levemente superior. Verifica-se também que a resistência à compressão axial, até 91 dias, não evoluiu linearmente com o aumento do teor de substituição.

A mistura 35V (35% de CV), aos 28 dias, apresentou resistência à compressão 8% superior à obtida pela referência (REF), na relação a/ag 0,35. Nas relações 0,50 e 0,65, as resistências foram 23% e 39% inferiores, respectivamente. Aos 91 dias as resistências foram 2%, 13% e 31% inferiores para as relações a/ag 0,35, 0,50 e 0,65, respectivamente.

A mistura 50E (50% de EAF) apresentou valores 2%, 26% e 16% inferiores aos obtidos pela referência (REF), aos 28 dias, e 9%, 10% e 17% inferiores, aos 91 dias, respectivamente para as relações a/ag 0,35, 0,50 e 0,65.



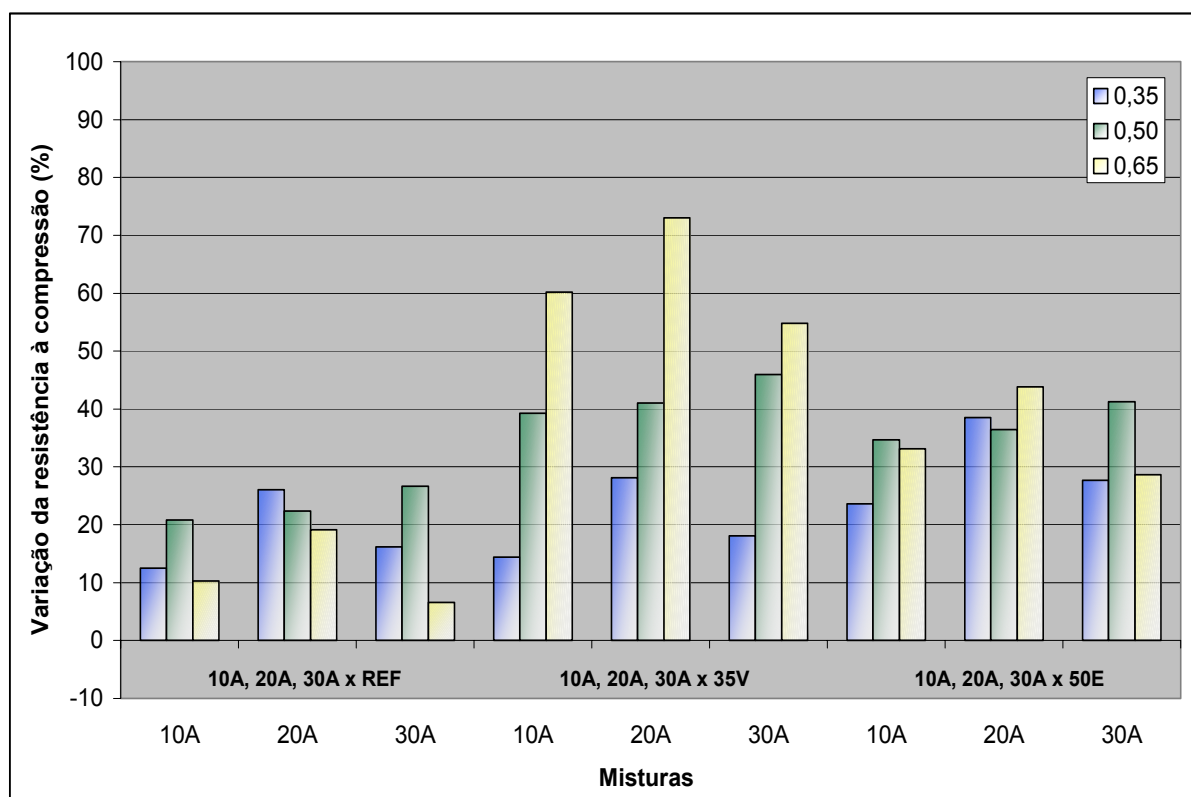
**Figura 4.1 – Resistência à compressão axial aos 28 dias**



**Figura 4.2 – Resistência à compressão axial aos 91 dias**

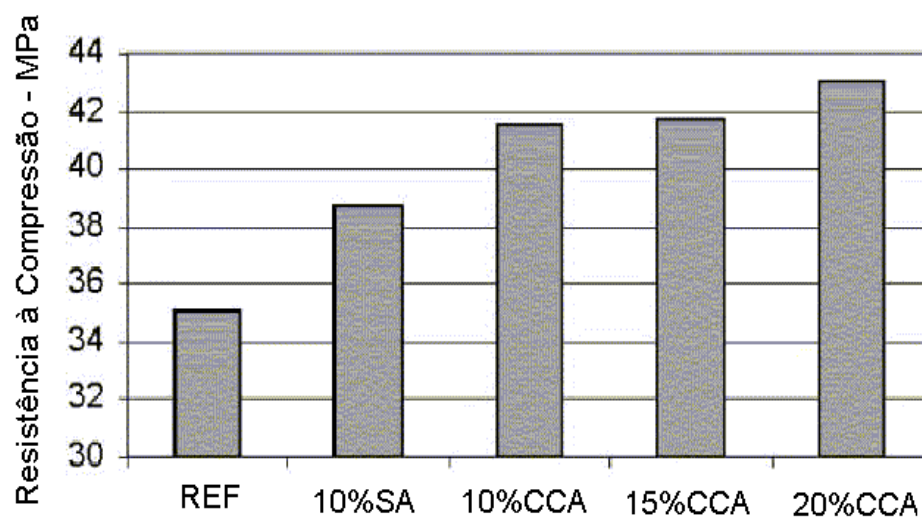
A Figura 4.3 apresenta, em forma de gráfico, a variação da resistência à compressão axial das misturas compostas com cinza de casca de arroz em relação às demais misturas, aos 91 dias, em que se verifica a grande superioridade da CCA, principalmente em relação às misturas compostas com CV e as compostas com EAF.

Comparando-se as misturas 10A (10% de CCA), 20A (20% de CCA) e 30A (30% de CCA), na idade de 91 dias, com a referência (REF), verifica-se que, para a relação a/ag 0,35, os concretos com adição apresentaram valores 13%, 26% e 16% superiores, respectivamente. Para a relação a/ag 0,50, as misturas 10A, 20A e 30A apresentaram valores 21%, 22% e 27% superiores e, para a relação a/ag 0,65, essas mesmas misturas apresentaram acréscimos, nos valores de resistência à compressão, de 10%, 19% e 7%, respectivamente. Da mesma forma, quando comparadas à mistura 35V (35% de CV), na mesma idade, verifica-se também uma superioridade dos concretos com CCA de 14%, 28% e 18%, para a relação a/ag 0,35, 39%, 41% e 46% para a relação a/ag 0,50 e 60%, 73% e 55% para a relação a/ag 0,65. Em relação à mistura 50E (50% de EAF), na idade de 91 dias, os resultados não são diferentes, e a superioridade das misturas 10A, 20A e 30A, chegam a 24%, 39% e 28% para a relação a/ag 0,35; 35%, 36% e 41% para a relação a/ag 0,50 e 33%, 44% e 29% para a relação a/ag 0,65, respectivamente.



**Figura 4.3 – Variação da resistência à compressão axial das misturas com CCA em relação às demais, aos 91 dias**

Para justificar a evolução da resistência à compressão axial com o aumento do teor de CCA, pode-se utilizar a pesquisa de Coutinho (2003), o qual, em seus estudos relacionados com a durabilidade do concreto, determinou a resistência à compressão axial, aos 80 dias, de concretos com relação água/aglomerante de 0,43 e 10%, 15% e 20% de adição de CCA, em substituição parcial do cimento CEM II 32,5 (EN 197). A Figura 4.4 mostra os resultados obtidos, que confirmam o melhor desempenho da mistura com teor de 20% de CCA. Observa-se também que a mistura com 10% obteve um desempenho bastante satisfatório, aproximando-se muito do resultado obtido com 20%, comportamento este, também verificado na presente pesquisa.



**Figura 4.4 - Resistência à compressão axial aos 80 dias. Relação a/ag de 0,43. REF = mistura de referência (100% cimento); SA = sílica ativa; CCA = cinza de casca de arroz (COUTINHO, 2003)**

Outro trabalho que vem ao encontro da presente pesquisa é o realizado por Ismail e Waliuddin (1996), em que investigaram o efeito da cinza de casca de arroz em concretos de alta resistência. Utilizaram cinzas de casca de arroz com finuras diferentes, uma passada pela peneira #200 e outra, pela #325, nos teores de substituição de 10%, 20% e 30%. As relações água/aglomerante das misturas com CCA variaram de 0,30 a 0,36 (o teor de aditivo plastificante foi mantido constante,

variando apenas a relação água/aglomerante para obter-se abatimentos semelhantes) e a da mistura de referência foi de 0,24. As amostras foram submetidas à cura úmida e ensaiadas à compressão axial aos 3, 7, 28 e 150 dias. Os autores concluíram que o teor ideal de substituição do cimento por CCA encontra-se entre 10% e 20%. Tal resultado corrobora o obtido na presente pesquisa.

### **4.3 Resistividade elétrica aparente**

Os resultados de resistividade elétrica aparente do concreto são apresentados na Tabela 4.2 e Figuras 4.5, 4.6 e 4.7, para as diferentes idades e relações água/aglomerante investigadas.

Dos dados obtidos, constata-se, em todas as misturas e relações água/aglomerante, um crescimento na resistividade elétrica, à medida que o grau de hidratação do concreto aumenta. Isto é reflexo da evolução das reações de hidratação, as quais tornam a estrutura mais compacta.

Para todas as misturas, a resistividade elétrica elevou-se à medida que a relação água/aglomerante diminuiu. Este fato deve-se principalmente ao aumento na compacidade do concreto e redução da quantidade de eletrólito.

Observa-se, segundo os critérios de avaliação da resistividade elétrica do concreto quanto à indicação de probabilidade de corrosão (ver Tabela 2.1, p.40), que todos os concretos compostos com adições minerais apresentaram, aos 91 dias, uma probabilidade desprezível de corrosão, mesmo para a relação  $a/ag$  0,65.

Analisando os gráficos das Figuras 4.5, 4.6 e 4.7, verifica-se que a idade, a relação água/aglomerante e o teor de substituição proporcionaram uma influência muito grande na evolução da resistividade elétrica do concreto, confirmando que esta propriedade é fortemente influenciada pela composição iônica da solução aquosa dos poros, e pela continuidade do sistema de poros da pasta endurecida, entre outras. Assim sendo, qualquer fator que tiver atuação na composição da solução aquosa dos poros e na estrutura dos poros também terá influência sobre a resistividade elétrica do concreto.

**Tabela 4.2 – Resultados de resistividade elétrica aparente**

Mistura	a/ag	Resistividade elétrica aparente - $\rho$ (k $\Omega$ .cm)				
		Idades (dias)				
		3	7	14	28	91
REF	0,35	12,33	15,54	18,54	30,74	31,65
50E	0,35	11,61	25,20	40,17	59,42	77,22
35V	0,35	10,55	14,11	18,94	32,40	73,45
10A	0,35	10,90	16,20	20,15	32,79	44,57
20A	0,35	9,58	14,85	21,39	31,25	81,33
30A	0,35	9,57	15,26	24,58	59,83	139,51
REF	0,50	7,07	9,56	11,06	15,87	15,44
50E	0,50	6,48	14,49	23,63	37,22	57,65
35V	0,50	8,53	10,54	12,65	21,98	50,75
10A	0,50	7,80	10,62	13,31	20,58	29,10
20A	0,50	8,12	10,88	16,11	25,75	56,90
30A	0,50	8,30	12,10	20,48	43,09	83,68
REF	0,65	5,81	9,06	10,31	13,65	12,83
50E	0,65	4,85	11,72	20,21	31,56	50,20
35V	0,65	7,14	9,56	9,66	15,47	41,04
10A	0,65	5,78	8,65	10,52	15,82	22,90
20A	0,65	5,47	8,11	12,72	19,80	44,00
30A	0,65	7,45	10,44	17,26	30,93	64,62

Comparando as misturas com adição mineral e a de referência, aos 91 dias, verifica-se, para a relação a/ag 0,35, que as misturas 10A (10% de CCA), 20A (20% de CCA) e 30A (30% de CCA) apresentaram valores de resistividade elétrica 41%, 157% e 341%, respectivamente maiores que aqueles da referência (REF). Para a relação a/ag 0,50, os valores foram 88%, 269% e 442% maiores e, para a de 0,65, foram 79%, 243% e 404% maiores que os obtidos no concreto de referência. A mistura 35V (35% de CV) obteve resistividade elétrica 132%, 229% e 220% superior a de referência, respectivamente nas relações a/ag 0,35, 0,50 e 0,65, e a mistura 50E (50% de EAF), aos 91 dias, também obteve resistividade elétrica superior ao



concreto de referência, em 144%, 273% e 291%, respectivamente nas relações  $a/ag$  0,35, 0,50 e 0,65.

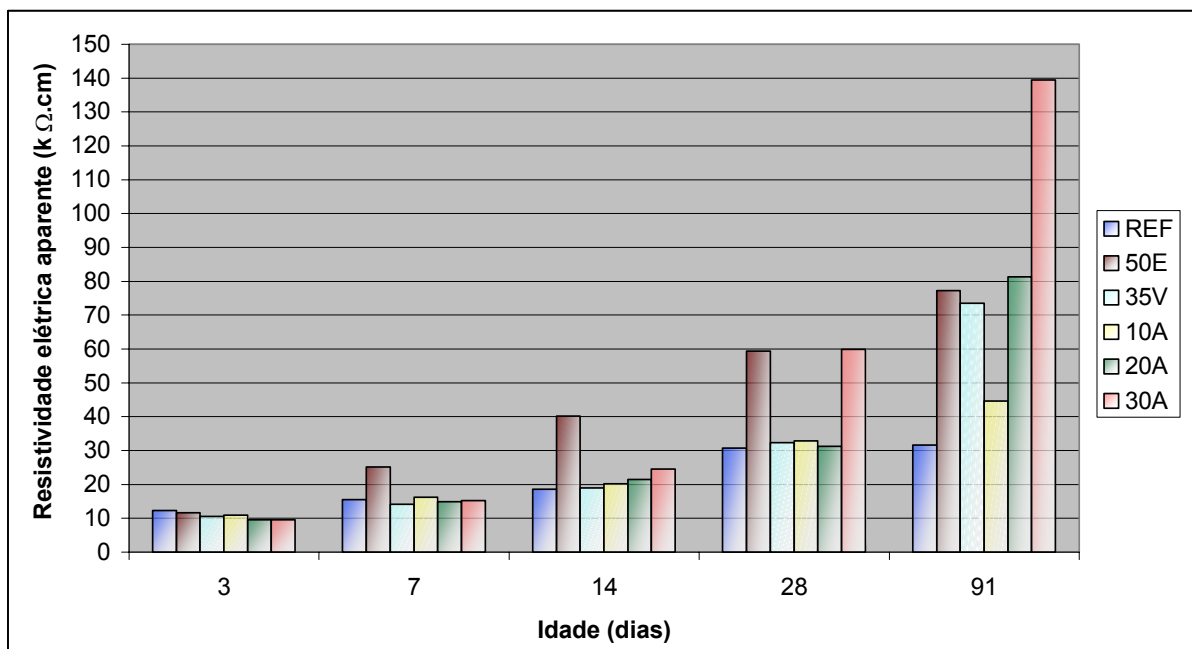


Figura 4.5 – Resistividade elétrica aparente –  $a/ag = 0,35$

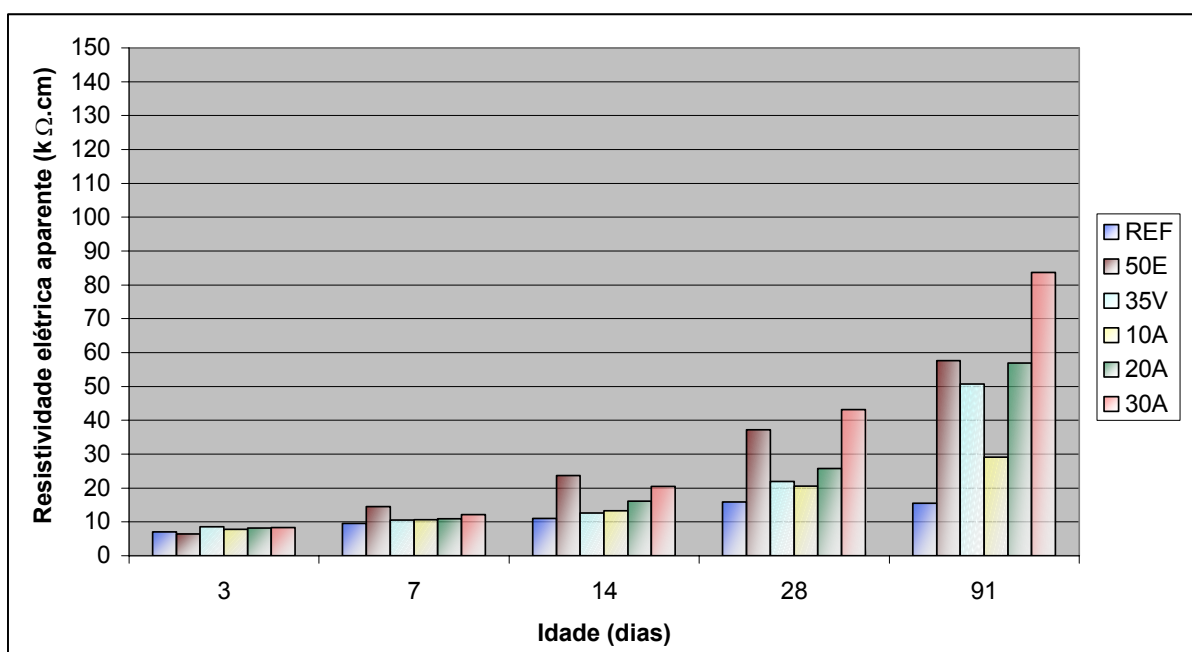
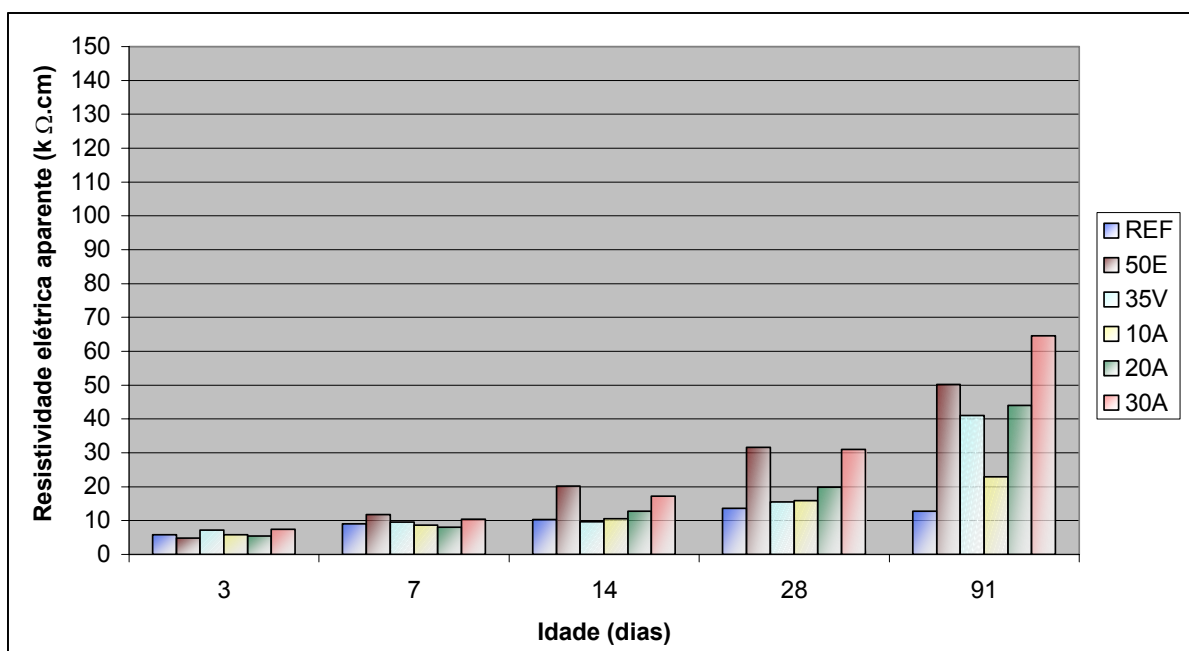


Figura 4.6 – Resistividade elétrica aparente –  $a/ag = 0,50$



**Figura 4.7 – Resistividade elétrica aparente –  $a/ag = 0,65$**

Analisando a evolução da resistividade elétrica das misturas com o aumento do grau de hidratação, verifica-se, para a relação  $a/ag$  0,35, que aos 91 dias as misturas 10A (10% de CCA), 20A (20% de CCA) e 30A (30% de CCA) obtiveram valores de resistividade elétrica 309%, 749% e 1357% maiores do que os valores obtidos aos 3 dias, respectivamente. Para a relação  $a/ag$  0,50, os valores aos 91 dias foram 273%, 600% e 909% maiores do que aos 3 dias e, para a relação  $a/ag$  0,65, os valores aos 91 dias foram 296%, 705% e 767% maiores do que os obtidos aos 3 dias. A mistura de referência e as misturas 35V (35% de CV) e 50E (50% de EAF), tiveram suas resistividades aos 91 dias maiores do que aos 3 dias, em 157%, 596% e 565%, para a relação  $a/ag$  0,35, 118%, 495% e 789% para a relação  $a/ag$  0,50, 121%, 475% e 935% para a relação  $a/ag$  0,65, respectivamente. Esse comportamento demonstra a grande influência do grau de hidratação, em especial nos concretos com adição mineral.

Verifica-se também, para as misturas compostas com CCA, um incremento maior de resistividade elétrica, dos 3 para os 91 dias, com o aumento do teor de substituição, para todas as relações água/aglomerante investigadas. A mistura 50E (50% de EAF) apresentou um incremento maior na resistividade elétrica, dos 3 para

os 91 dias, com o aumento da relação água/aglomerante. Nas demais misturas, no geral, observa-se um comportamento inverso.

A Tabela 4.3 apresenta os índices de resistividade elétrica das misturas nas idades de 28 e 91 dias. Tais índices correspondem à relação entre a resistividade elétrica das misturas com adição mineral e a da mistura de referência, em igual relação água/aglomerante e idade.

**Tabela 4.3 – Índice de resistividade elétrica das misturas investigadas**

Mistura	a/ag	Resist. elét. aparente - $\rho$ (k $\Omega$ .cm)		Ip 28	Ip 91
		Idade (dias)			
		28	91		
REF	0,35	30,74	31,65	1,00	1,00
	0,50	15,87	15,44	1,00	1,00
	0,65	13,65	12,83	1,00	1,00
50E	0,35	59,42	77,22	1,93	2,44
	0,50	37,22	57,65	2,35	3,73
	0,65	31,56	50,20	2,31	3,91
35V	0,35	32,40	73,45	1,05	2,32
	0,50	21,98	50,75	1,39	3,29
	0,65	15,47	41,04	1,13	3,20
10A	0,35	32,79	44,57	1,07	1,41
	0,50	20,58	29,10	1,30	1,88
	0,65	15,82	22,90	1,16	1,79
20A	0,35	31,25	81,33	1,02	2,57
	0,50	25,75	56,90	1,62	3,69
	0,65	19,80	44,00	1,45	3,43
30A	0,35	59,83	139,51	1,95	4,41
	0,50	43,09	83,68	2,72	5,42
	0,65	30,93	64,62	2,27	5,04

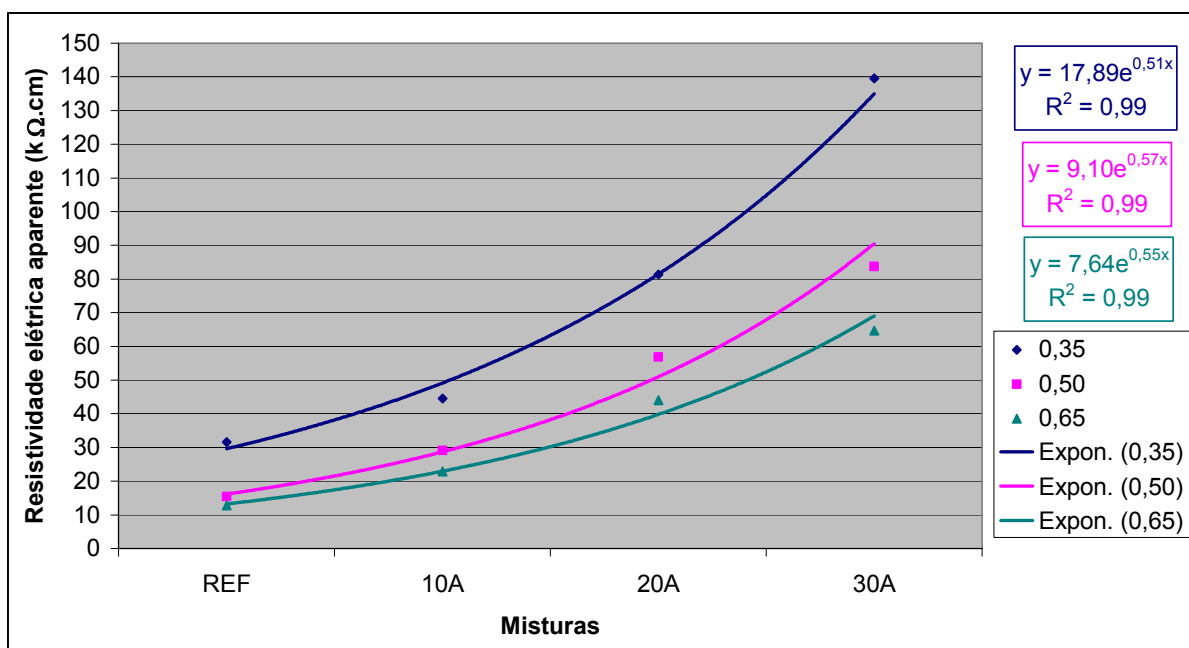
$\rho$  = resistividade elétrica aparente; Ip = índice de  $\rho$ .

Os concretos com CCA mostraram superioridade, aos 91 dias, em relação ao concreto de referência, para todas as relações água/aglomerante. Isto é devido principalmente à alteração na estrutura dos poros (refinamento dos poros) e na composição da solução aquosa dos mesmos. Comportamento semelhante foi observado na mistura com CV e na mistura com EAF, em relação à de referência. Verifica-se também que, aos 91 dias, o aumento na resistividade elétrica dos concretos compostos com CCA foi tão maior quanto maior o teor de substituição. Isso fica claro quando analisamos os índices de resistividade elétrica.

Abreu (1998) também verificou grande influência das adições minerais na resistividade elétrica do concreto, principalmente em idades mais avançadas. O aumento na resistividade tão maior quanto maior o teor de substituição também foi verificado em sua pesquisa.

Wee et al. (2000) avaliaram a resistividade elétrica de concretos com adição de escória de alto forno nos teores de 30%, 55% e 70% e relação a/ag 0,50. Verificaram que a resistividade elétrica eleva-se à medida que o teor de substituição também aumenta. Tal comportamento foi verificado nesta pesquisa com a variação do teor de CCA, podendo ser generalizado para as principais adições minerais, seja em misturas binárias ou ternárias, conforme verificado na pesquisa de Smith et al. (2004).

A Figura 4.8 apresenta, em forma de gráfico, a variação da resistividade elétrica com o aumento do teor de CCA, aos 91 dias, demonstrando uma evolução exponencial entre 0% e 30% de substituição. Isso é reflexo do comportamento semelhante verificado a partir do maior refinamento dos poros e da menor condutividade elétrica específica da solução aquosa dos mesmos, à medida que o teor de substituição aumenta. A Tabela 4.4 apresenta as variações percentuais de resistividade elétrica, alcançadas por meio do aumento do teor de CCA.



**Figura 4.8 – Variação da resistividade elétrica com o aumento do teor de CCA, aos 91 dias**

**Tabela – 4.4 - Variação percentual de resistividade elétrica, com o aumento do teor de CCA**

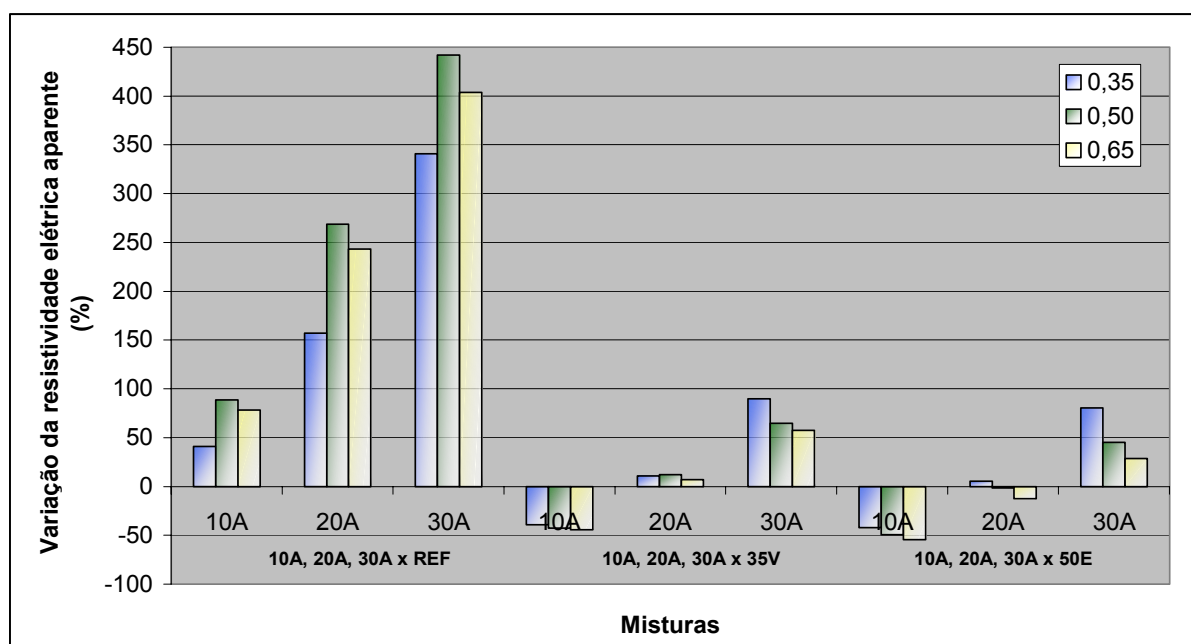
Teor de CCA	% de variação, aos 91 dias		
	Relação a/ag		
	0,35	0,50	0,65
0% - 10%	41	88	79
10% - 20%	82	96	92
20% - 30%	72	47	47
10% - 30%	213	188	182

A Figura 4.9 apresenta, em forma de gráfico, a variação na resistividade elétrica dos concretos compostos com cinza de casca de arroz em relação aos demais, aos 91 dias, a partir da qual nota-se a grande superioridade das misturas com CCA em relação à mistura de referência.

Comparando-se as misturas 10A (10% de CCA), 20A (20% de CCA) e 30A (30% de CCA), na idade de 91 dias, com a referência (REF), verifica-se que, para a relação a/ag 0,35, os concretos com adição apresentaram valores 41%, 157% e 341% superiores, respectivamente. Para a relação a/ag 0,50, as misturas 10A, 20A e 30A apresentaram valores 88%, 269% e 442% superiores à mistura de referência e,

para a relação a/ag 0,65, acréscimos nos valores de resistividade elétrica de 79%, 243% e 404%, respectivamente, conforme analisado anteriormente. Quando confrontadas com a mistura 35V (35% de CV), na mesma idade, constata-se que a mistura 10A (10% de CCA) obteve um desempenho 39%, 43% e 44% inferior, respectivamente para as relações a/ag 0,35, 0,50 e 0,65; e as demais misturas com CCA (20% e 30%) obtiveram valores de resistividade elétrica superiores em 11% e 90% para a relação a/ag 0,35, 12% e 65% para a/ag 0,50 e 7% e 57% para a relação a/ag 0,65, respectivamente. Na comparação com a mistura 50E (50% de EAF), na idade de 91 dias, observa-se que a mistura 10A obteve um desempenho 42%, 50% e 54% inferior, respectivamente para as relações a/ag 0,35, 0,50 e 0,65. A mistura 20A alcançou um desempenho 5% superior, na relação a/ag 0,35, e 1% e 12% inferior, nas relações a/ag 0,50 e 0,65, respectivamente. A mistura 30A obteve um desempenho 81%, 45% e 29% superior, aos 91 dias, do que os atingidos pela 50E, respectivamente para as relações a/ag 0,35, 0,50 e 0,65.

Constata-se, aos 91 dias, que a mistura 30A (30% de CCA) foi a que apresentou melhor desempenho em todas as relações água/aglomerante, demonstrando que a adição de CCA ao concreto em substituição parcial do cimento, é benéfica a sua resistividade elétrica.



**Figura 4.9 – Variação da resistividade elétrica aparente das misturas com CCA em relação às demais, aos 91 dias**

#### 4.4 Solução aquosa dos poros

As Tabelas 4.5 e 4.6 apresentam os resultados do ensaio de solução aquosa dos poros, aos 91 dias, para todas as misturas e relações água/aglomerante investigadas.

**TABELA 4.5 – Análise química da solução aquosa dos poros (Mmol/l), aos 91 dias**

Mistura	a/ag	pH	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	OH <sup>-</sup>
REF	0,35	13,17	15,090	83,000	1,51	0,67040	147,911
	0,50	13,13	10,700	52,200	3,12	0,06131	134,896
	0,65	13,06	5,300	22,200	1,52	0,02321	114,815
50E	0,35	12,78	15,360	73,944	0,30	0,55692	60,800
	0,50	12,65	13,810	62,174	0,26	0,52104	45,000
	0,65	12,59	9,496	35,817	0,24	0,41171	39,200
35V	0,35	12,87	21,504	66,530	1,60	0,37583	74,800
	0,50	12,72	13,136	37,606	0,60	0,36131	52,400
	0,65	12,59	7,254	23,569	0,35	0,34050	38,800
10A	0,35	13,12	10,800	68,800	0,45	0,57770	131,826
	0,50	13,09	8,700	47,000	1,40	0,58370	123,027
	0,65	13,07	4,300	19,000	6,60	0,02440	117,490
20A	0,35	13,09	8,800	64,000	0,43	0,49330	123,027
	0,50	13,05	4,700	23,000	0,67	0,05399	122,202
	0,65	13,04	4,300	19,000	0,20	0,03421	109,648
30A	0,35	13,06	7,000	55,100	0,32	0,38000	114,815
	0,50	13,04	4,000	19,500	0,63	0,08642	109,648
	0,65	13,02	3,100	15,800	0,93	0,02420	104,713

**TABELA 4.6 – Condutividade elétrica específica e índice de condutividade elétrica específica da solução aquosa dos poros, aos 91 dias**

Mistura	a/ag	Condutividade elétrica específica - $\sigma$ ( $\Omega^{-1}$ )	$I\sigma$
REF	0,35	2,834	1,00
	0,50	2,504	1,00
	0,65	2,101	1,00
50E	0,35	1,504	0,53
	0,50	1,191	0,48
	0,65	0,951	0,45
35V	0,35	1,719	0,61
	0,50	1,193	0,48
	0,65	0,870	0,41
10A	0,35	2,525	0,89
	0,50	2,294	0,92
	0,65	2,076	0,99
20A	0,35	2,371	0,84
	0,50	2,137	0,85
	0,65	1,929	0,92
30A	0,35	2,204	0,78
	0,50	1,933	0,77
	0,65	1,897	0,90

$I\sigma$  = índice de condutividade elétrica específica, que corresponde à relação entre a condutividade elétrica específica das misturas com adição mineral e a de referência em igual relação água/aglomerante e idade.

A presente pesquisa faz parte de um projeto maior que contempla três dissertações. Uma delas já foi concluída (MISSAU, 2004) e nela consta a análise e a discussão dos resultados do ensaio de solução aquosa dos poros das misturas de referência e com 10%, 20% e 30% de CCA, nas relações a/ag 0,35, 0,50 e 0,65. No entanto, é oportuna a transcrição dos resultados, para facilitar o entendimento das análises e discussões contidas na presente pesquisa. Além dos dados transcritos, as Tabelas 4.5 e 4.6 apresentam os resultados da mistura com 50% de EAF e da mistura com 35% de CV, nas três relações água/aglomerante investigadas. Das análises apresentadas por Missau (2004), vale citar duas, que se considera aqui



mais importantes e que podem ser estendidas para as demais adições utilizadas na presente pesquisa, a seguir:

- com a substituição parcial do cimento por adições minerais, ocorre uma redução na alcalinidade, porém o valor mais baixo verificado de 12,59, obtido pela mistura 50E (50% de EAF) e pela 35V (35% de CV), ambas com relação  $a/ag$  0,65, é suficiente para assegurar a passivação da armadura;
- todas as misturas com adições minerais apresentaram condutividade elétrica específica menor do que a obtida pela mistura de referência, em especial as misturas 35V (35% de CV) e 50E (50% de EAF), em todas as relações água/aglomerante investigadas, isso devido às alterações na composição da solução aquosa dos poros.

Esses dois comportamentos também foram verificados por Dal Ri (2002), utilizando misturas com 50% de CCA, com 70% de EAF e misturas com 50% de CV, e Gomes (2003), usando misturas com 20% de CCA, com 70% de EAF e misturas com 20% de CV.

#### **4.5 Porosimetria por intrusão de mercúrio**

A Tabela 4.7 apresenta os resultados do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, aos 91 dias, para todas as misturas e relações  $a/ag$  investigadas.

Na dissertação de Missau (2004) consta a análise e a discussão dos resultados do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio das misturas de referência e das compostas com 10%, 20% e 30% de CCA, nas relações  $a/ag$  0,35, 0,50 e 0,65. A Tabela 4.7 apresenta os resultados da mistura com 50% de EAF e da mistura com 35% de CV, nas três relações água/aglomerante investigadas. Entre as conclusões apresentadas por Missau (2004), ressalta-se a que contribui especialmente para as discussões do presente trabalho e que também pode ser estendida para as demais adições utilizadas na presente pesquisa, a seguir:

- com a substituição parcial do cimento por adições minerais, ocorre um refinamento dos poros. Comparando com a mistura de referência, na mesma relação água/aglomerante, as misturas com adições minerais apresentam volume total de intrusão de mercúrio maior, no entanto, a maior parte desse volume encontra-se nos poros menores que 50nm, justificando o refinamento. Os poros maiores que 50nm

são prejudiciais à resistência à compressão e à permeabilidade do concreto. Com a redução desses a resistência à compressão axial aumenta e a permeabilidade diminui, elevando a resistividade elétrica do concreto.

**Tabela 4.7 – Porosimetria por intrusão de mercúrio, aos 91 dias**

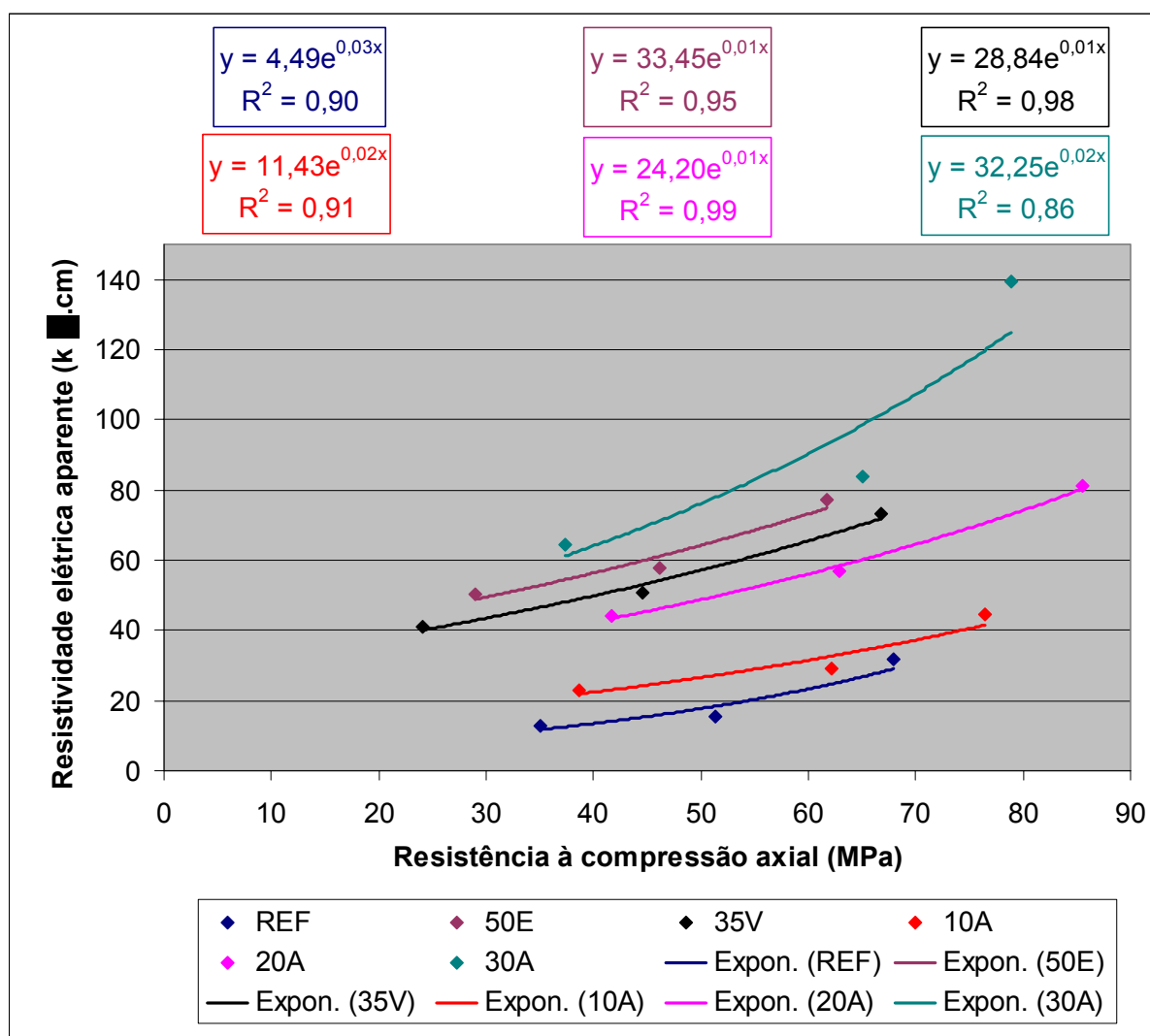
Mistura	a/ag	Porosidade (%)	Volume de Intrusão (mL/g)	Ø Médio (µm)	Ø > 50nm (mL/g)	Ø < 50nm (mL/g)	Ø crítico (µm)
REF	0,35	17,4	0,0979	0,0424	0,0404	0,0575	0,0786
	0,50	18,3	0,1055	0,0434	0,0448	0,0607	0,1016
	0,65	34,7	0,2438	0,0550	0,1278	0,1160	0,1292
50E	0,35	18,2	0,1110	0,0184	0,0138	0,1248	0,0605
	0,50	28,9	0,2104	0,0171	0,0397	0,1707	0,0789
	0,65	34,1	0,2808	0,0175	0,0440	0,2368	0,1003
35V	0,35	23,3	0,1583	0,0181	0,0066	0,1517	0,0363
	0,50	26,2	0,1876	0,0278	0,0553	0,1323	0,0603
	0,65	33,3	0,2525	0,0341	0,0142	0,2383	0,0724
10A	0,35	20,3	0,1189	0,0347	0,0427	0,0762	0,1005
	0,50	30,8	0,2060	0,0284	0,0686	0,1374	0,1200
	0,65	38,2	0,2929	0,0446	0,1381	0,1548	0,1294
20A	0,35	19,9	0,1194	0,0344	0,0359	0,0835	0,0790
	0,50	28,8	0,1953	0,0332	0,0681	0,1272	0,1010
	0,65	39,3	0,3172	0,0381	0,1367	0,1805	0,1297
30A	0,35	22,1	0,1363	0,0305	0,0301	0,1062	0,0605
	0,50	31,0	0,2273	0,0240	0,0221	0,2052	0,0725
	0,65	39,5	0,3191	0,0286	0,1066	0,2125	0,1007

#### 4.6 Integração dos resultados

Com a análise particular de cada ensaio, consegue-se averiguar o comportamento de cada mistura individualmente e em comparação com as demais misturas investigadas, mas precisamos verificar também se existem relações entre as propriedades. Com a integração dos resultados, pode-se entender melhor o comportamento das propriedades investigadas, analisando o inter-relacionamento existente entre elas.

#### 4.6.1 Resistividade elétrica aparente versus resistência à compressão axial

A Figura 4.10 apresenta o inter-relacionamento entre a resistividade elétrica aparente e a resistência à compressão axial das misturas investigadas, aos 91 dias. Da análise deste, verifica-se, em todas as misturas, uma evolução da resistividade elétrica devido ao aumento da resistência à compressão com uma relação entre as duas propriedades muito satisfatória, demonstrada pelos altos coeficientes de correlação exponencial. Isso em virtude principalmente da forte influência da relação água/aglomerante e da estrutura dos poros comum às duas propriedades.



**Figura 4.10 – Resistividade elétrica aparente versus resistência à compressão axial, aos 91 dias**

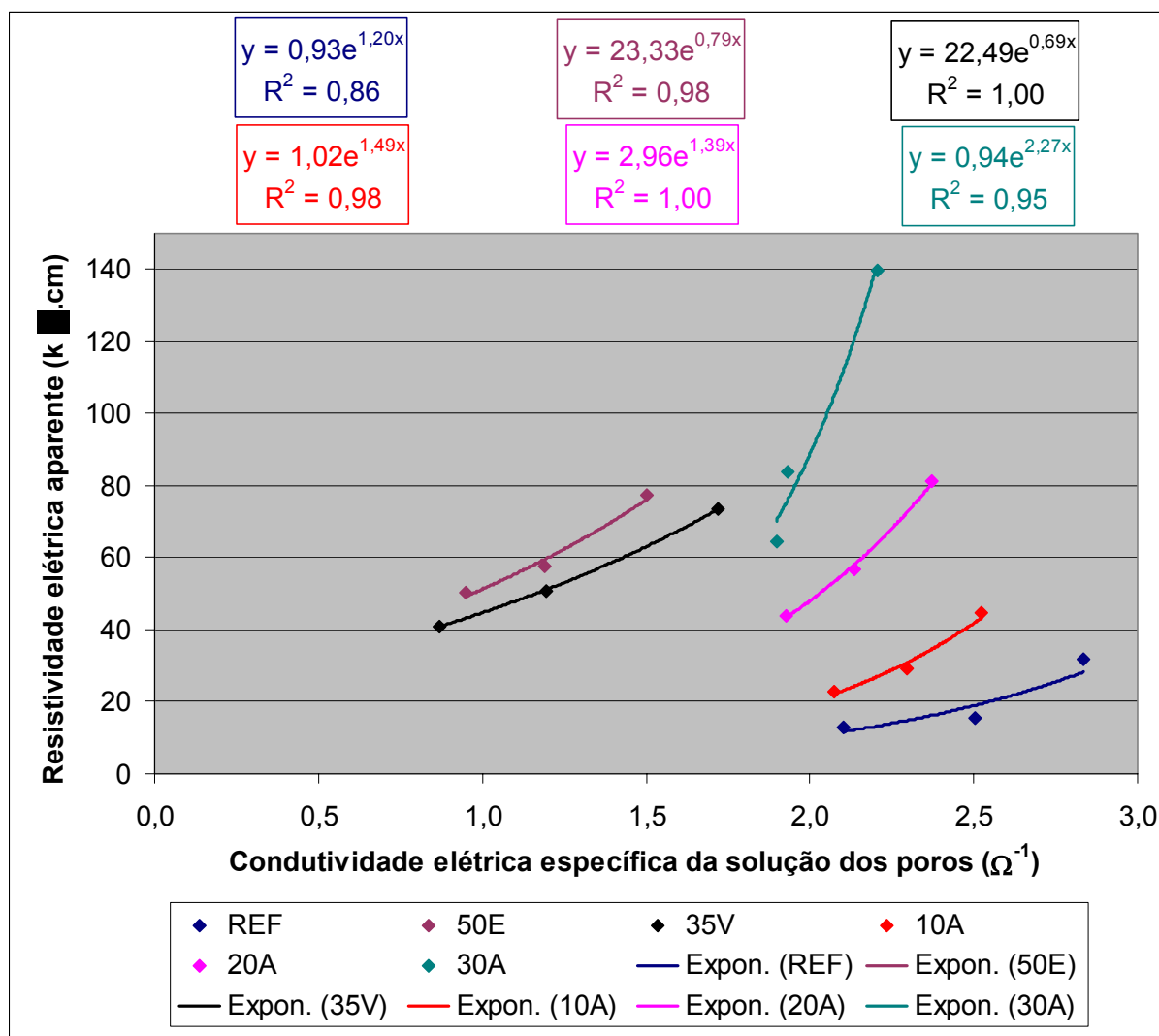
Na mesma Figura 4.10, constata-se que, para uma determinada resistência à compressão, diferentes valores de resistividade elétrica foram obtidos a partir dos concretos analisados. Isso demonstra que, quando se trata da durabilidade da estrutura de concreto, não se pode considerar apenas a sua resistência mecânica, mas também todas as demais propriedades que, de alguma maneira, influenciam na durabilidade do concreto.

#### 4.6.2 Resistividade elétrica aparente versus condutividade elétrica específica da solução dos poros

A Figura 4.11 apresenta o inter-relacionamento entre a resistividade elétrica aparente e a condutividade elétrica específica da solução dos poros das misturas investigadas, aos 91 dias. Da análise de tal gráfico verifica-se, em todas as misturas, uma evolução da resistividade elétrica com o aumento da condutividade elétrica, demonstrando um comportamento aparentemente contraditório. Isso ocorre pois a condutividade elétrica específica da solução dos poros aumenta com a redução da relação água/aglomerante, em virtude da maior concentração iônica, mas o acréscimo da resistividade elétrica aparente devido a diminuição da relação água/aglomerante é superior, em virtude da maior compacidade do concreto, resultando nesse comportamento aparentemente contraditório. Essa evolução é mais acentuada para as misturas com adição mineral, sendo tão maior quanto maior o teor de adição.

Nota-se uma grande correlação entre as duas propriedades, principalmente nas misturas com adição mineral, demonstrada pelos altos coeficientes de correlação exponencial. Isso devido principalmente a grande influência que a relação água/aglomerante e a composição da solução dos poros exercem nas duas propriedades.

Observa-se claramente que a resistividade é maior e a condutividade menor para as misturas com adição mineral, em relação à mistura de referência.



**Figura 4.11 – Resistividade elétrica aparente versus condutividade elétrica específica da solução dos poros, aos 91 dias**

#### 4.6.3 Resistividade elétrica aparente versus concentração do íon $\text{OH}^-$

A Figura 4.12 apresenta o inter-relacionamento entre a resistividade elétrica aparente e a concentração do íon  $\text{OH}^-$  das misturas investigadas, aos 91 dias. Da análise deste gráfico, constata-se, em todas as misturas, uma evolução da resistividade elétrica aparente com o aumento da concentração do íon  $\text{OH}^-$ , demonstrando um comportamento aparentemente contraditório semelhante ao ocorrido entre a resistividade elétrica aparente e a condutividade elétrica específica

da solução dos poros. Essa evolução é mais acentuada para as misturas com adição mineral, sendo tão maior quanto maior o teor de adição.

Verifica-se, no geral, uma boa correlação entre a resistividade elétrica aparente e a concentração do íon  $\text{OH}^-$ , principalmente nas misturas com adição mineral, demonstrada pelos altos coeficientes de correlação exponencial. Isso devido a este íon ser geralmente o de maior concentração e, portanto, o principal responsável pela condutividade elétrica específica da solução dos poros. Tal fato justifica o comportamento semelhante ao do caso anterior.

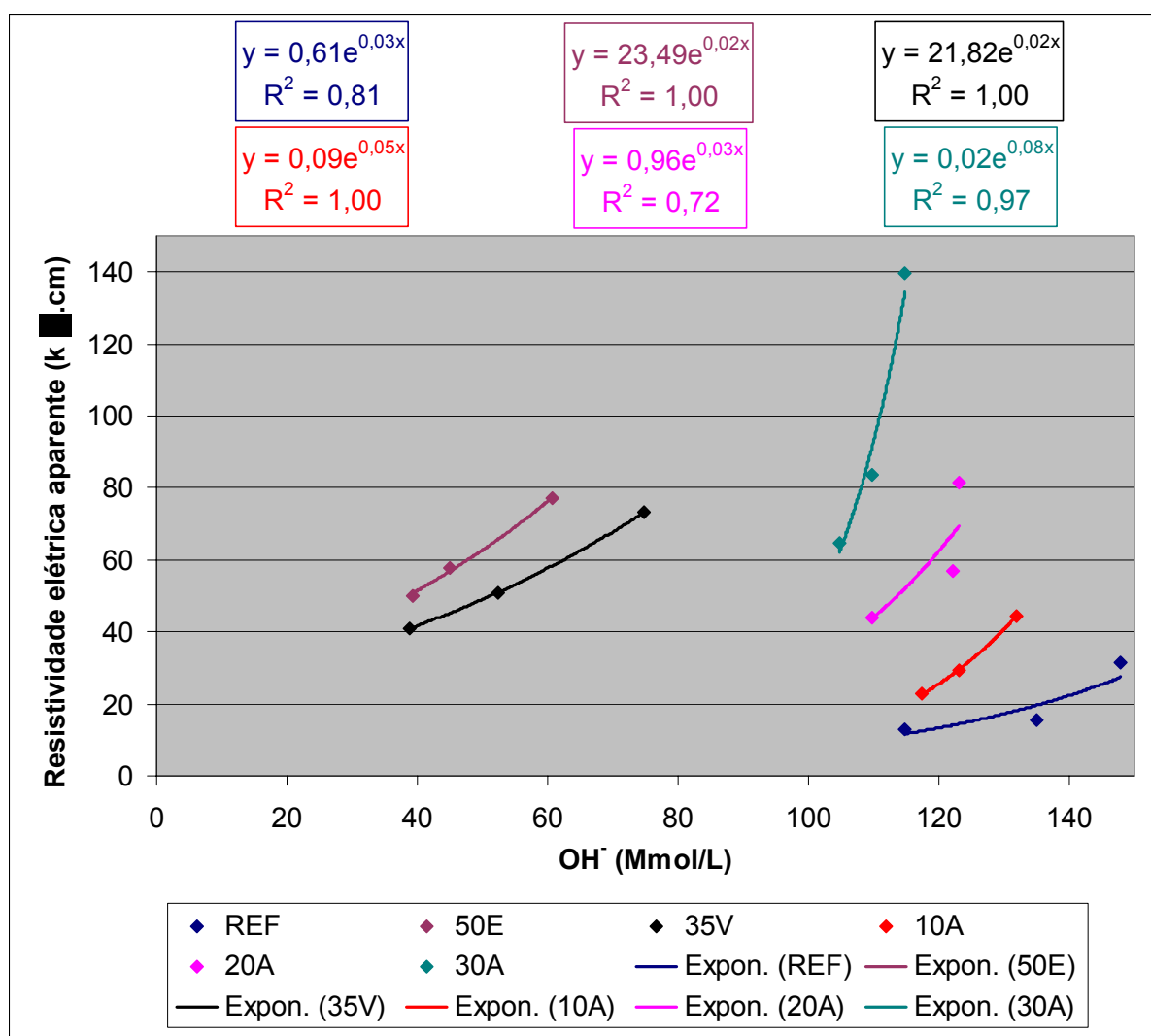


Figura 4.12 – Resistividade elétrica aparente versus concentração do íon  $\text{OH}^-$ , aos 91 dias

#### 4.6.4 Resistividade elétrica aparente versus volume total de intrusão de mercúrio e diâmetro crítico dos poros

A Figura 4.13 apresenta o inter-relacionamento entre a resistividade elétrica aparente e o volume total de intrusão de mercúrio, das misturas investigadas, aos 91 dias. Daí é possível constatar, em todas as misturas, uma redução da resistividade elétrica com a elevação do volume total de intrusão. Isso devido ao volume de poros elevar-se e a resistividade elétrica diminuir com o aumento da relação água/aglomerante. Essa redução mostra-se levemente mais acentuada nas misturas com adição mineral.

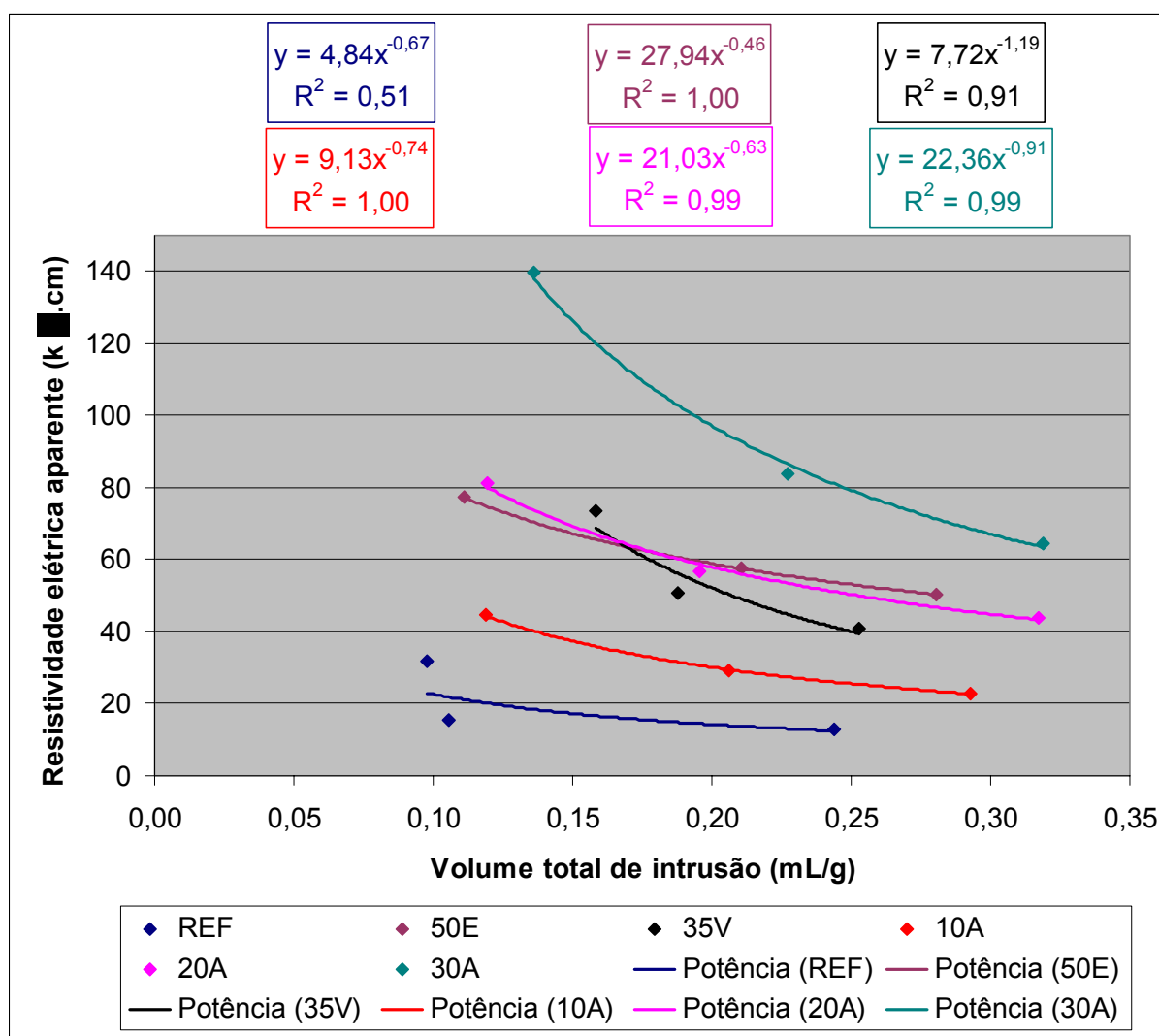
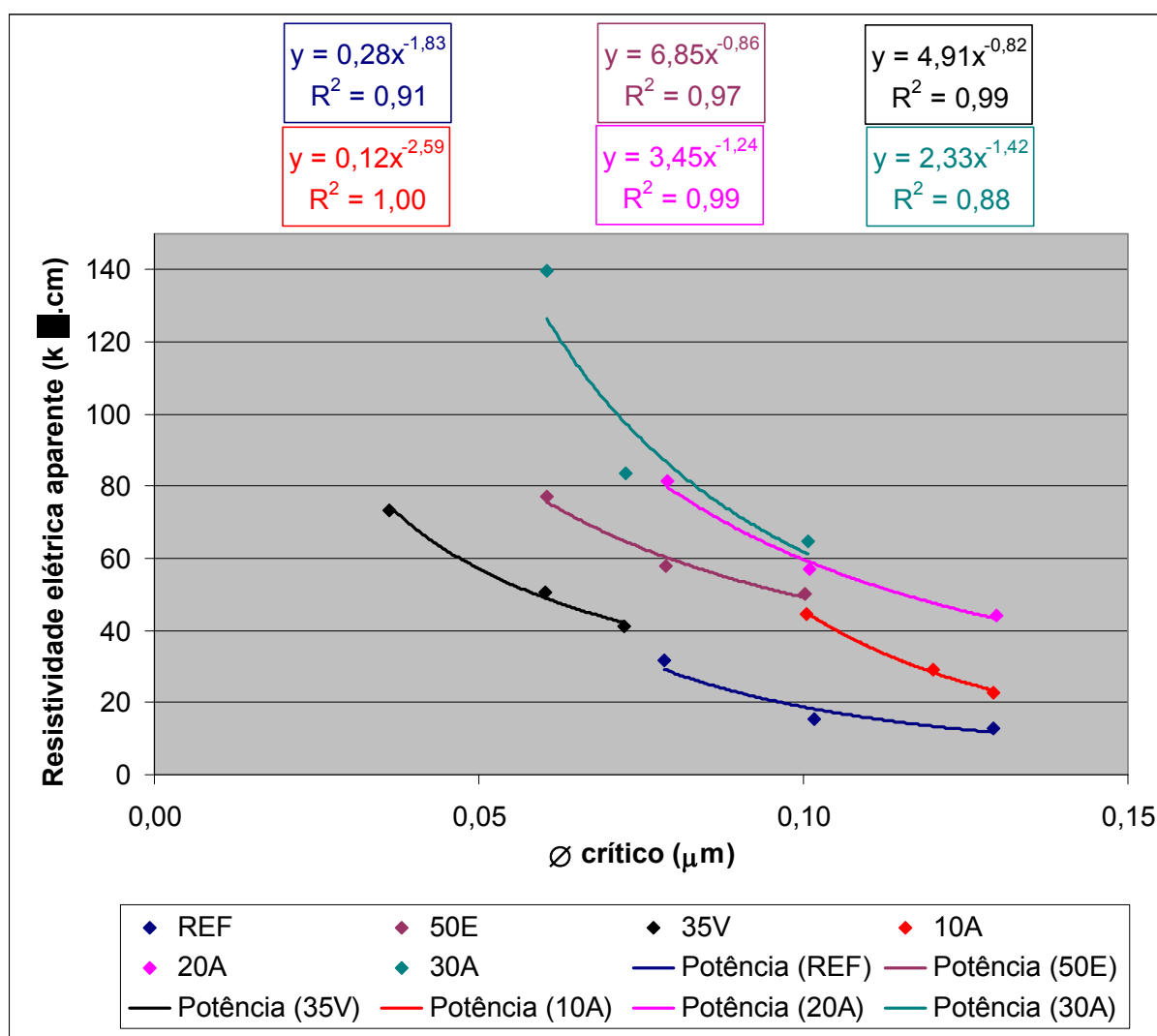


Figura 4.13 – Resistividade elétrica aparente versus volume total de intrusão de mercúrio, aos 91 dias

Verifica-se, com exceção da mistura de referência, uma boa correlação entre a resistividade elétrica aparente e o volume total de intrusão de mercúrio. Isso em virtude principalmente da expressiva influência da relação água/aglomerante comum à porosidade e à resistividade elétrica do concreto.

A Figura 4.14 apresenta o inter-relacionamento entre a resistividade elétrica aparente e o diâmetro crítico dos poros, das misturas investigadas, aos 91 dias. Da análise de tal gráfico, verifica-se, em todas as misturas, uma redução da resistividade elétrica com a elevação do diâmetro crítico. Isso devido ao diâmetro crítico elevar-se e a resistividade elétrica diminuir com o aumento da relação água/aglomerante. Essa redução mostra-se levemente mais acentuada nas misturas com adição mineral.



**Figura 4.14 – Resistividade elétrica aparente versus diâmetro crítico dos poros, aos 91 dias**



Observa-se, uma boa relação entre a resistividade elétrica aparente e o diâmetro crítico dos poros, demonstrada pelos altos coeficientes de correlação potencial. Isso em virtude principalmente da grande influência da relação água/aglomerante comum à estrutura dos poros e à resistividade elétrica do concreto.

4.6.5 Análise do comportamento das misturas investigadas em relação à resistividade elétrica e resistência à compressão, a partir da especificação do valor de uma dessas propriedades

Como dito anteriormente, a utilização de adições minerais, formando misturas aglomerantes binárias com o CPV-ARI, propicia atribuir a determinado concreto as mais variadas propriedades e características frente à durabilidade. Porém, para um mesmo patamar de resistência à compressão axial, estas propriedades podem variar substancialmente, cabendo então uma análise criteriosa das qualidades que devem estar presentes no concreto para dotá-lo de características adequadas frente aos agentes agressivos do meio em que estará inserido durante a sua vida útil de projeto.

Como a resistência à compressão axial é uma propriedade utilizada como referência para o cálculo de estruturas de concreto, ver-se-á nesse tópico como se comporta a resistividade elétrica do concreto, nos diferentes concretos investigados, quando se fixa a resistência à compressão axial. Para isso adotou-se as resistências de 45MPa e 65MPa, que são alcançadas com relações água/aglomerante dentro dos limites de cálculo confiável da equação de Abrams, para todas as misturas.

A Tabela 4.8 apresenta os resultados de resistividade elétrica aparente e resistência à compressão axial, aos 91 dias, juntamente com as equações de Abrams e coeficientes de correlação das misturas investigadas.

**Tabela 4.8 – Resistividade elétrica aparente e resistência à compressão axial, aos 91 dias**

Mistura	a/ag	$\rho$ 91 dias (k $\Omega$ .cm)	R (Abrams) 91 dias	$f_c$ 91 dias (MPa)	R (Abrams) 91 dias
REF	0,35	31,6	-0,9230	67,9	-0,9999
	0,50	15,4	$\left(\rho = \frac{83,0730}{20,3017^x}\right)$	51,4	$\left(f_c = \frac{149,7281}{9,1062^x}\right)$
	0,65	12,8		35,0	
35V	0,35	73,5	-0,9742	66,8	-0,9997
	0,50	50,7	$\left(\rho = \frac{141,0852}{6,9587^x}\right)$	44,6	$\left(f_c = \frac{227,3222}{29,9133^x}\right)$
	0,65	41,0		24,1	
50E	0,35	77,2	-0,9680	61,8	-0,9997
	0,50	57,6	$\left(\rho = \frac{124,3952}{4,2019^x}\right)$	46,1	$\left(f_c = \frac{153,7021}{12,4538^x}\right)$
	0,65	50,2		29,0	
10A	0,35	44,6	-0,9708	76,4	-0,9903
	0,50	29,1	$\left(\rho = \frac{93,9547}{9,2053^x}\right)$	62,1	$\left(f_c = \frac{177,1880}{9,7354^x}\right)$
	0,65	22,9		38,6	
20A	0,35	81,3	-0,9845	85,6	-0,9998
	0,50	56,9	$\left(\rho = \frac{163,7734}{7,7495^x}\right)$	62,9	$\left(f_c = \frac{201,5192}{10,9932^x}\right)$
	0,65	44,0		41,7	
30A	0,35	139,5	-0,9621	78,9	-0,9816
	0,50	83,7	$\left(\rho = \frac{328,3022}{13,0058^x}\right)$	65,1	$\left(f_c = \frac{200,9413}{12,1496^x}\right)$
	0,65	64,6		37,3	

x= a/ag; R = coeficiente de correlação;  $f_c$  = resistência à compressão axial;  $\rho$  = resistividade elétrica aparente

A Tabela 4.9 apresenta as relações água/aglomerante calculadas, com base nas equações da Tabela 4.8, para os níveis de resistência à compressão de 45MPa e 65MPa e também os valores das resistividades elétricas correspondentes, aos 91 dias. Esses resultados são apresentados em forma de gráfico na Figura 4.15.

Analisando os resultados da Tabela 4.9 e Figura 4.15, verifica-se que de acordo com os critérios de avaliação da resistividade elétrica do concreto quanto à indicação de probabilidade de corrosão (ver Tabela 2.1, p.40), apenas o concreto de referência, com resistência à compressão de 45MPa, apresenta probabilidade baixa

de que ocorra a corrosão. Os demais concretos apresentaram probabilidade desprezível.

**Tabela 4.9 – Relações  $a/ag$  para resistência à compressão de 45MPa e 65MPa e resistividades elétricas correspondentes, aos 91 dias**

$f_c$ (MPa) – 91 dias	Mistura	$a/ag$	$\rho$ (k $\Omega$ .cm) – 91 dias
45	REF	0,54	16,14
	35V	0,48	55,96
	50E	0,49	61,82
	10A	0,60	24,68
	20A	0,63	45,51
	30A	0,60	70,58
65	REF	0,38	26,64
	35V	0,37	69,04
	50E	0,34	76,22
	10A	0,44	35,33
	20A	0,47	62,30
	30A	0,45	102,98

$f_c$  = resistência à compressão axial;  $\rho$  = resistividade elétrica aparente

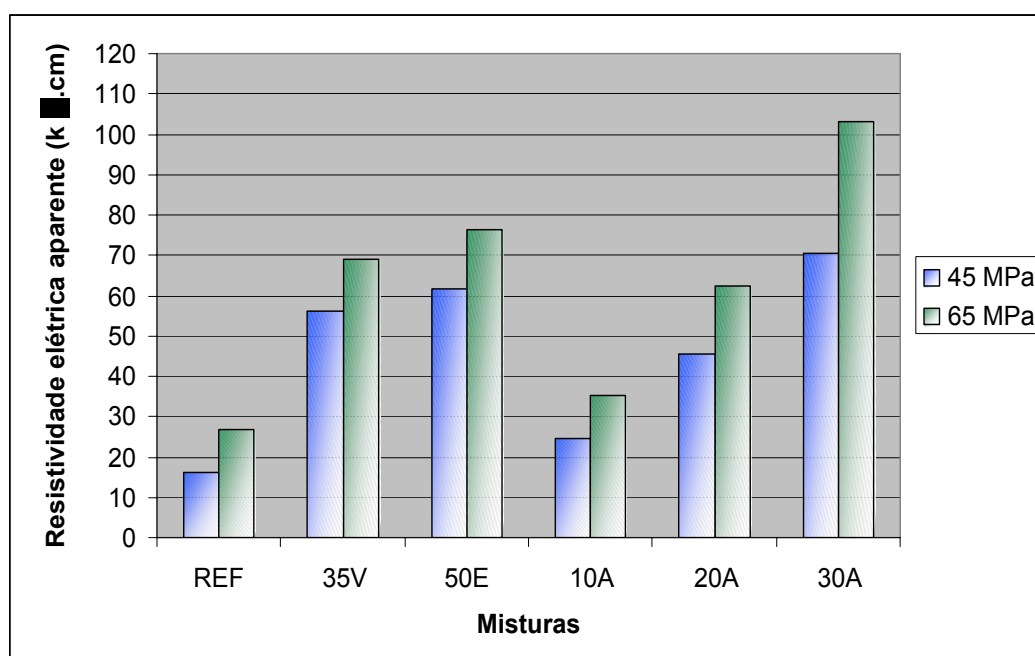
Especificando apenas a resistência à compressão axial, verifica-se uma grande disparidade dos valores de resistividade elétrica, entre os concretos investigados.

Para algumas estruturas de concreto, para as quais a durabilidade é imprescindível e o risco de corrosão é presente, como, por exemplo, estruturas próximas a linhas férreas, os índices de resistividade requeridos são bastante elevados e mesmo estando acima dos limites estabelecidos pelos critérios apresentados na Tabela 2.1, a resistividade elétrica pode não ser suficiente para garantir a durabilidade da estrutura.

Cascudo (1997) comenta que, para as estruturas do Metrô de São Paulo, foi solicitada uma resistividade elétrica mínima de 60k $\Omega$ .cm, que é considerado um

índice rígido entre os pesquisadores, porém compatível com as exigências e o rigor da obra.

Diante deste comentário, é importante verificar qual nível de resistência à compressão é necessário para se atingir uma resistividade elétrica de  $60\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ , nos concretos investigados, considerando ambas as propriedades aos 91 dias. Para complementar, também é determinada a resistência à compressão dos concretos investigados, para obter  $30\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$  de resistividade elétrica. Tal valor foi escolhido com a finalidade de garantir, seguramente, uma probabilidade de corrosão desprezível, segundo os critérios apresentados na Tabela 2.1.



**Figura 4.15 – Resistividade elétrica aparente correspondente às resistências à compressão axial de 45MPa e 65MPa, aos 91 dias**

A Tabela 4.10 apresenta as relações água/aglomerante calculadas, com base nas equações da Tabela 4.8, para o nível de resistividade elétrica de  $30\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$  e  $60\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$  e também os valores das resistências à compressão correspondentes, aos 91 dias de idade. Esses resultados são apresentados em forma de gráfico na Figura 4.16. Para  $30\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ , as relações água/aglomerante obtidas para as misturas 35V (35% de CV), 50E (50% de EAF), 20A (20% de CCA) e 30A (30% de CCA) são

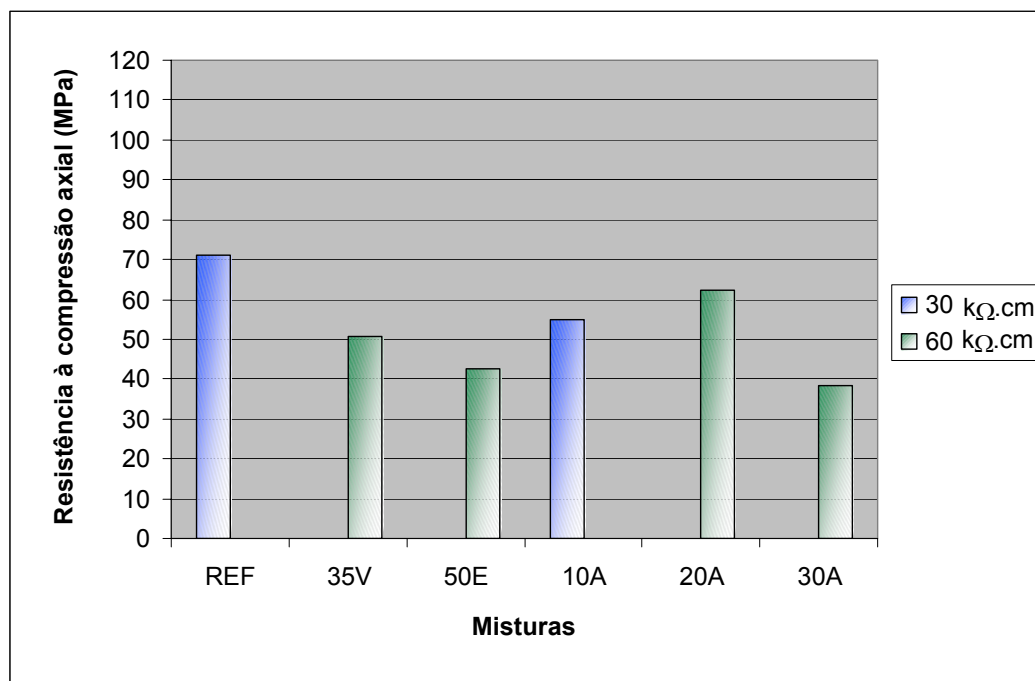
muito elevadas. Ainda, para 60 k $\Omega$ .cm, as relações água/aglomerante obtidas para a mistura de referência e para a 10A (10% de CCA) são muito baixas, extrapolando o intervalo de estudo previamente estabelecido através das relações água/aglomerante adotadas na pesquisa. Sendo assim, estão fora dos limites de cálculo confiável da equação de Abrams, portanto, não são apresentadas na referida tabela.

Diante desse comportamento, verifica-se que os concretos com adição mineral conseguem atingir a resistividade elétrica de 30k $\Omega$ .cm com facilidade, mesmo estando com um teor elevado de umidade. O mesmo ocorre em relação ao nível de resistividade elétrica de 60k $\Omega$ .cm, exceto para a mistura 10A. Destaca-se o concreto com 30% de CCA (30A) que, com apenas 38,4MPa ( $a/ag= 0,66$ ), consegue atingir os 60k $\Omega$ .cm de resistividade elétrica, demonstrando, nesse sentido, o grande efeito benéfico que a adição de CCA no concreto representa.

**Tabela 4.10 – Relações água/aglomerante para resistividade elétrica de 30k $\Omega$ .cm e 60k $\Omega$ .cm e resistências à compressão correspondentes, aos 91 dias**

$\rho$ (k $\Omega$ .cm) – 91 dias	Mistura	a/ag	fc (MPa) – 91 dias
30	REF	0,34	70,9
	35V	*	--
	50E	*	--
	10A	0,51	55,0
	20A	*	--
	30A	*	--
	60	REF	*
60	35V	0,44	50,8
	50E	0,51	42,7
	10A	*	--
	20A	0,49	62,2
	30A	0,66	38,4

fc = resistência à compressão axial;  $\rho$  = resistividade elétrica aparente; \* = relações água/aglomerante não apresentadas porque extrapolam o intervalo de estudo.



**Figura 4.16 – Resistência à compressão axial correspondente às resistividades elétricas aparentes de 30kΩ.cm e 60kΩ.cm, aos 91 dias**

#### 4.7 Análise de custos

As vantagens da utilização de adições minerais em substituição parcial do cimento, no que diz respeito à resistividade elétrica do concreto, foram apresentadas ao longo desta pesquisa. Neste tópico, em específico, é analisada a viabilidade econômica dos concretos investigados, em especial os compostos com cinza de casca de arroz, para assim poder-se determinar qual a mistura que proporcionou melhor relação CUSTO/BENEFÍCIO, considerando as propriedades estudadas.

A Tabela 4.11 apresenta as quantidades dos materiais utilizados para produzir um metro cúbico de concreto. A Tabela 4.12 traz os preços dos materiais utilizados, e a Tabela 4.13, o custo total dos materiais para produzir um metro cúbico de concreto, a relação (R\$/m³)/(MPa), dada pelo quociente entre o custo total dos materiais por metro cúbico e a resistência à compressão aos 91 dias, e a relação (R\$/m³)/(MPa) média, dada pela média aritmética das relações (R\$/m³)/(MPa) das três relações água/aglomerante de cada mistura. A relação (R\$/m³)/(MPa) é apresentada em forma de gráfico na Figura 4.17.

Tabela 4.11 – Quantidade dos materiais utilizados por m<sup>3</sup>

Mis- tura	a/ag	Cimen- to (Kg/m <sup>3</sup> )	Cinza volante (Kg/m <sup>3</sup> )	Escó- ria de alto forno (Kg/m <sup>3</sup> )	Cinza de casca de arroz (Kg/m <sup>3</sup> )	Aditivo (Kg/m <sup>3</sup> )	Água (Kg/m <sup>3</sup> )	Areia (Kg/m <sup>3</sup> )	Brita (Kg/m <sup>3</sup> )
REF	0,35	488	---	---	---	0,98	170	632	1076
35V	0,35	317	171	---	---	1,22	170	572	1076
50E	0,35	244	---	244	---	0,83	170	616	1076
10A	0,35	439	---	---	49	2,44	169	614	1076
20A	0,35	390	---	---	98	4,63	166	596	1076
30A	0,35	342	---	---	146	9,51	162	579	1076
REF	0,50	359	---	---	---	0,00	179	739	1055
35V	0,50	233	126	---	---	0,36	179	695	1055
50E	0,50	179	---	179	---	0,00	179	728	1055
10A	0,50	323	---	---	36	0,72	178	726	1055
20A	0,50	287	---	---	72	1,79	177	713	1055
30A	0,50	251	---	---	108	3,77	175	700	1055
REF	0,65	284	---	---	---	0,00	184	802	1043
35V	0,65	184	99	---	---	0,00	184	767	1043
50E	0,65	142	---	142	---	0,00	184	793	1043
10A	0,65	255	---	---	28	0,00	184	791	1043
20A	0,65	227	---	---	57	0,85	183	781	1043
30A	0,65	199	---	---	85	1,99	182	771	1043

Tabela 4.12 – Preço dos materiais utilizados

	Cimento	Cinza volante	Escória de alto forno	Cinza de casca de arroz	Aditivo	Areia	Brita
R\$/Kg	0,40	0,08	0,17	0,45	12,50	0,02	0,03

Analisando a Figura 4.17, verifica-se que os concretos com adição mineral, no geral, tiveram uma relação (R\$/m<sup>3</sup>)/(MPa) menor do que a obtida pelo concreto de referência, além de alcançar melhores resultados de resistividade elétrica.

As misturas 35V (35% de CV), 50E (50% de EAF) e 20A (20% de CCA) apresentaram desempenhos semelhantes quanto à resistividade elétrica, aos 91 dias e, também, relações (R\$/m<sup>3</sup>)/(MPa), no geral, parecidas.

A mistura 35V (35% de CV), comparada com as demais, apresentou a menor relação (R\$/m<sup>3</sup>)/(MPa) na proporção a/ag 0,35 e a maior relação (R\$/m<sup>3</sup>)/(MPa) na 0,65, aos 91 dias. A menor relação (R\$/m<sup>3</sup>)/(MPa) média foi obtida pela mistura 50E (50% de EAF) e a maior pela 30A (30% de CCA).

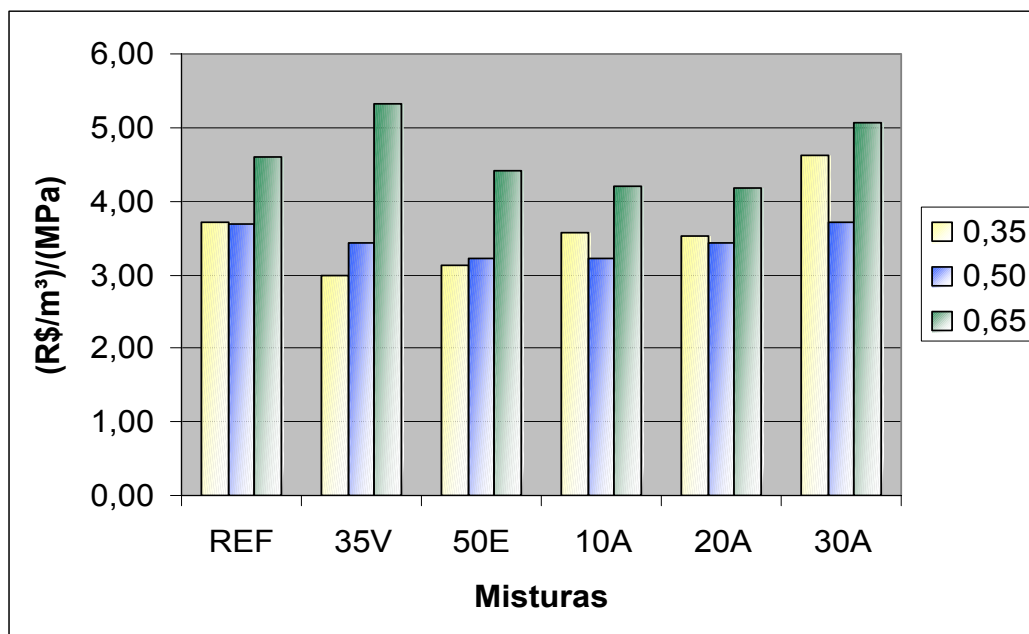
**Tabela 4.13 – Custo dos materiais por m<sup>3</sup> e relação (R\$/m<sup>3</sup>)/(MPa)**

Mistura	a/ag	Custo dos materiais por m <sup>3</sup> (R\$/m <sup>3</sup> )	fc 91 dias (MPa)	(R\$/m <sup>3</sup> )/(MPa)	(R\$/m <sup>3</sup> )/(MPa) média
REF	0,35	252,25	67,9	3,72	4,00
	0,50	189,97	51,4	3,70	
	0,65	160,83	35,0	4,60	
35V	0,35	199,46	66,8	2,99	3,92
	0,50	153,38	44,6	3,44	
	0,65	128,35	24,1	5,33	
50E	0,35	194,01	61,8	3,14	3,59
	0,50	148,47	46,1	3,22	
	0,65	128,01	29,0	4,41	
10A	0,35	272,63	76,4	3,57	3,66
	0,50	200,47	62,1	3,23	
	0,65	162,04	38,6	4,20	
20A	0,35	302,16	85,6	3,53	3,71
	0,50	215,46	62,9	3,43	
	0,65	173,90	41,7	4,17	
30A	0,35	365,23	78,9	4,63	4,47
	0,50	241,66	65,1	3,71	
	0,65	189,30	37,3	5,07	

fc = resistência à compressão axial.

Obs.: No cálculo do custo total dos materiais por metro cúbico não foi considerado o custo da água, por ser um valor irrisório.





**Figura 4.17 – Relação (R\$/m<sup>3</sup>)/(MPa) das misturas investigadas, aos 91 dias**

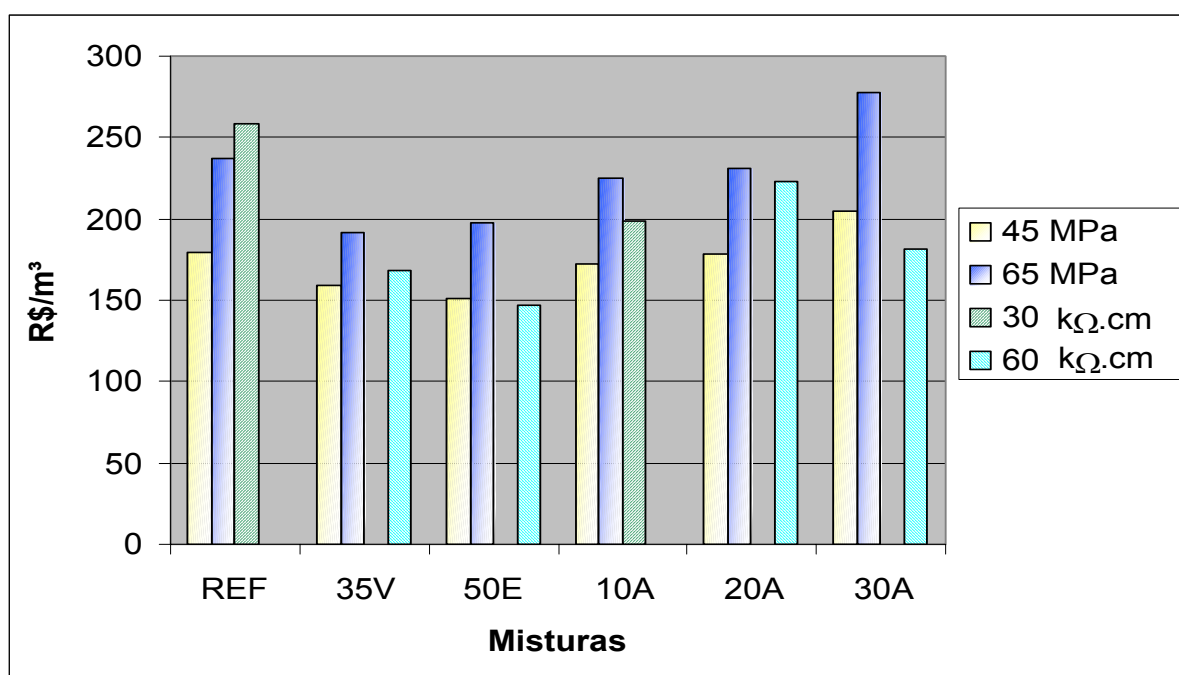
A Tabela 4.14 apresenta o custo dos materiais para produzir um concreto com resistência à compressão de 45MPa e de 65MPa, e também um concreto com resistividade elétrica de 30kΩ.cm e de 60kΩ.cm, considerando ambas as propriedades aos 91 dias de idade. A Figura 4.18 apresenta esses custos através de gráfico.

Os custos dos materiais para produzir um concreto com resistividade elétrica de 30kΩ.cm utilizando as misturas 35V (35% de CV), 50E (50% de EAF), 20A (20% de CCA) e 30A (30% de CCA) não foram calculados, pois as relações água/aglomerante são muito altas, ficando fora dos limites de cálculo confiável da equação de Abrams. As relações água/aglomerante altas comprometem as demais propriedades do concreto relacionadas com a durabilidade, portanto não são recomendadas. Fato semelhante aconteceu na resistividade elétrica de 60kΩ.cm para a mistura de referência e a 10A (10% de CCA), em que o custo não foi possível de ser calculado, pois as relações água/aglomerante são muito baixas, ficando fora dos limites de cálculo confiável da equação de Abrams.

**Tabela 4.14 – Custo dos materiais para produzir concretos com 45MPa e 65MPa de resistência à compressão e concretos com 30kΩ.cm e 60kΩ.cm de resistividade elétrica, aos 91 dias**

Mistura	45 MPa		65 MPa		30 kΩ.cm		60 kΩ.cm	
	a/ag	Custo (R\$/m <sup>3</sup> )	a/ag	Custo (R\$/m <sup>3</sup> )	a/ag	Custo (R\$/m <sup>3</sup> )	a/ag	Custo (R\$/m <sup>3</sup> )
REF	0,54	179,89	0,38	237,57	0,34	258,04	*	--
35V	0,48	159,48	0,37	191,78	*	--	0,44	168,67
50E	0,49	151,43	0,34	197,70	*	--	0,51	147,13
10A	0,60	172,38	0,44	224,60	0,51	198,61	*	--
20A	0,63	178,71	0,47	230,82	*	--	0,49	223,05
30A	0,60	204,45	0,45	278,15	*	--	0,66	181,91

\* = relações água/aglomerante não apresentadas porque extrapolam o intervalo de estudo.



**Figura 4.18 – Custo dos materiais por m<sup>3</sup> para produzir concretos com 45MPa e 65MPa de resistência à compressão e concretos com 30kΩ.cm e 60kΩ.cm de resistividade elétrica, aos 91 dias**

Analisando a Figura 4.18, verifica-se que, em igualdade de resistência à compressão, somente a mistura 30A (30% de CCA) tem um custo maior do que o da referência (REF).

Entre as misturas com cinza de casca de arroz, em igualdade de resistência à compressão, a que obteve menor custo foi a mistura com 10% (10A), mas vale comentar que a com 20% (20A) teve um custo superior ao da mistura com 10% de, apenas, 4% para 45MPa e 3% para 65MPa, e o desempenho na resistividade elétrica é 84% e 76% superior, respectivamente para as resistências à compressão de 45MPa e 65MPa.

Entre os concretos investigados, as misturas 35V (35% de CV) e 50E (50% de EAF) apresentaram boa relação CUSTO/BENEFÍCIO, pois atingiram as especificações propostas com baixo custo e, além disso, foram necessárias relações água/aglomerante baixas, 0,48 e 0,49 para 45MPa, 0,37, 0,34 para 65MPa e 0,44 e 0,51 para 60k $\Omega$ .cm, respectivamente para as misturas 35V e 50E, o que não compromete as demais propriedades do concreto relacionadas com a durabilidade.

Entre os concretos que continham cinza de casca de arroz, com resistividade elétrica de 60k $\Omega$ .cm, o que apresentou menor custo foi o composto com 30% de CCA (30A), mas com relação a/ag 0,66, considerada elevada e inadequada. Seguindo esse raciocínio, compara-se entre si os diferentes concretos com CCA e 65MPa de resistência à compressão, cujas relações a/ag 0,44, 0,47 e 0,45, respectivamente para as misturas 10A (10% de CCA), 20A (20% de CCA) e 30A (30% de CCA), são compatíveis com o objetivo de obter concretos resistentes e duráveis. Sendo assim, a determinação da mistura com melhor desempenho depende do nível de resistividade elétrica exigido, pois, para essa resistência de 65MPa, as resistividades elétricas foram 35,33k $\Omega$ .cm, 62,30k $\Omega$ .cm e 102,98k $\Omega$ .cm, respectivamente para 10A, 20A e 30A. Para 65MPa e 30k $\Omega$ .cm, a mistura com CCA mais econômica é a 10A (10% de CCA). Para 65MPa e 60k $\Omega$ .cm, a mais econômica é a mistura 20A (20% de CCA).

A NBR 6118/2003 estabelece parâmetros mínimos de relação água/cimento e resistência à compressão axial, que devem ser atendidos caso não sejam realizados ensaios comprobatórios de desempenho da estrutura frente ao tipo e nível de agressividade previsto em projeto. Para um ambiente urbano, considera-se uma agressividade ambiental moderada (classe II) e os parâmetros mínimos para concreto armado são: relação água/cimento menor ou igual a 0,60 e resistência à compressão característica maior ou igual a 25MPa, aos 28 dias.

Simulando uma situação de projeto de uma estrutura em ambiente urbano e comparando o comportamento dos concretos com cinza de casca de arroz em relação ao concreto de referência, com relação  $a/ag$  0,60, tem-se que aqueles atingem resistências à compressão de 36,1MPa, 38,6MPa e 35,5MPa, a um custo dos materiais por  $m^3$  de R\$172,93, R\$185,67 e R\$204,14, respectivamente para os teores de 10%, 20% e 30%, aos 28 dias. Considerando uma resistência de dosagem de 30,8MPa ( $S_d = 3,5MPa$ ), verifica-se que as misturas com CCA obtiveram resistência superior. Levando em conta a resistividade elétrica, aos 91 dias, percebe-se que estas misturas atingem respectivamente 24,8k $\Omega$ .cm, 47,94k $\Omega$ .cm e 70,44k $\Omega$ .cm, sendo que mesmo no teor de 10% a probabilidade de corrosão é desprezível, de acordo com os critérios apresentados na Tabela 2.1. A mistura de referência consegue atender o critério de resistência à compressão, com 33MPa, aos 28 dias, custando R\$169,09, mas a resistividade elétrica obtida de 13,64k $\Omega$ .cm, aos 91 dias, é bem menor que as alcançadas pelas misturas com CCA. Com isso, no que diz respeito à resistência à compressão e à resistividade elétrica do concreto, constata-se que a mistura 10A (10% de CCA) satisfaz os parâmetros da norma e os critérios apresentados na Tabela 2.1, a um custo muito próximo ao da mistura de referência e apresenta melhor qualidade no concreto. As demais misturas com CCA (20A e 30A) também satisfazem esses parâmetros, mas a um custo mais elevado.

#### **4.8 Resistividade elétrica do concreto em ambiente agressivo**

Realizou-se um estudo preliminar, que poderá servir de base para uma pesquisa futura, sobre o comportamento das misturas investigadas, em relação à resistividade elétrica, quando submetidas a um ambiente agressivo. Como o ensaio de resistividade elétrica pelo método dos quatro eletrodos não é destrutivo, utilizou-se os mesmos corpos-de-prova usados nos ensaios até os 91 dias.

Esse estudo teve como objetivo verificar a resistividade elétrica dos concretos investigados quando imersos em solução salina (NaCl), à concentração de cloreto de 19,38 ppm (WEE et al., 2000).

Os resultados de resistividade elétrica aparente do concreto são apresentados na Tabela 4.15 e Figuras 4.20, 4.21 e 4.22, para as diferentes idades e relações água/aglomerante investigadas.

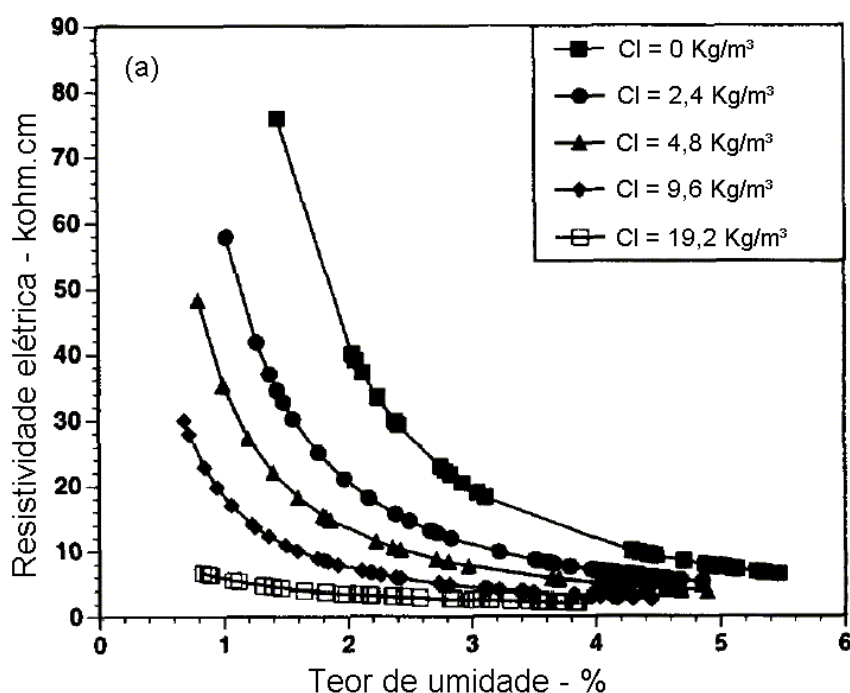
Apenas com o objetivo de facilitar a análise do comportamento da resistividade elétrica antes e depois dos concretos serem submetidos a um ambiente agressivo, é que os resultados aos 91 dias são apresentados novamente na Tabela 4.15.

**Tabela 4.15 – Resultados de resistividade elétrica aparente**

Mistura	a/ag	Resistividade elétrica aparente - $\rho$ (k $\Omega$ .cm)			
		Idades (dias)			
		91	119	182	364
REF	0,35	31,65	25,74	33,19	26,43
50E	0,35	77,22	44,38	39,48	53,02
35V	0,35	73,45	54,38	113,22	215,38
10A	0,35	44,57	36,96	39,19	48,96
20A	0,35	81,33	36,46	34,45	70,68
30A	0,35	139,51	63,85	139,93	174,91
REF	0,50	15,44	13,16	15,17	16,52
50E	0,50	57,65	40,86	44,63	40,40
35V	0,50	50,75	32,39	63,58	101,87
10A	0,50	29,10	24,48	30,63	35,65
20A	0,50	56,90	42,05	47,19	89,14
30A	0,50	83,68	60,78	54,57	56,56
REF	0,65	12,83	10,85	11,46	12,07
50E	0,65	50,20	34,39	40,96	45,49
35V	0,65	41,04	21,26	34,47	76,92
10A	0,65	22,90	18,18	24,57	28,13
20A	0,65	44,00	26,32	36,60	63,42
30A	0,65	64,62	42,23	28,93	44,51

Analisando as Figuras 4.20, 4.21 e 4.22, verifica-se, que em todas as misturas e relações água/aglomerante investigadas, ocorreu uma diminuição na resistividade elétrica dos 91 para os 119 dias. Isso provavelmente devido às amostras, nesse intervalo de tempo, estarem submetidas a um ambiente agressivo (imersas em solução salina) e este promover uma maior concentração iônica do eletrólito.

Saleem et al. (1996) investigaram a influência dos íons cloreto na resistividade elétrica do concreto. Os concretos tiveram consumo de cimento (ASTM C 150 tipo V), com  $C_3A = 3,5\%$ , de  $350 \text{ Kg/m}^3$  e relação água/cimento 0,45. No mesmo estudo, além da variação da concentração de cloreto, houve também variação no teor de umidade do concreto. A Figura 4.19 mostra a relação entre o teor de umidade e a resistividade elétrica de concretos contaminados com íons cloreto, em que se pode observar uma redução exponencial da resistividade elétrica do concreto com o aumento do teor de umidade e também uma redução da resistividade elétrica com o aumento da concentração de cloreto. Esses dois comportamentos podem ser atribuídos à maior disponibilidade e maior concentração iônica do eletrólito, respectivamente. Os autores verificaram também que, para um nível elevado de concentração de íons cloreto, a redução do teor de umidade não repercutiu em grandes aumentos na resistividade elétrica do concreto, indicando que, mesmo em concretos com baixo teor de umidade o fenômeno da corrosão poderá se desenvolver se a concentração de íons cloreto for elevada. Por outro lado, para um alto teor de umidade, o aumento da concentração de íons cloreto não promoveu grandes alterações na resistividade elétrica.

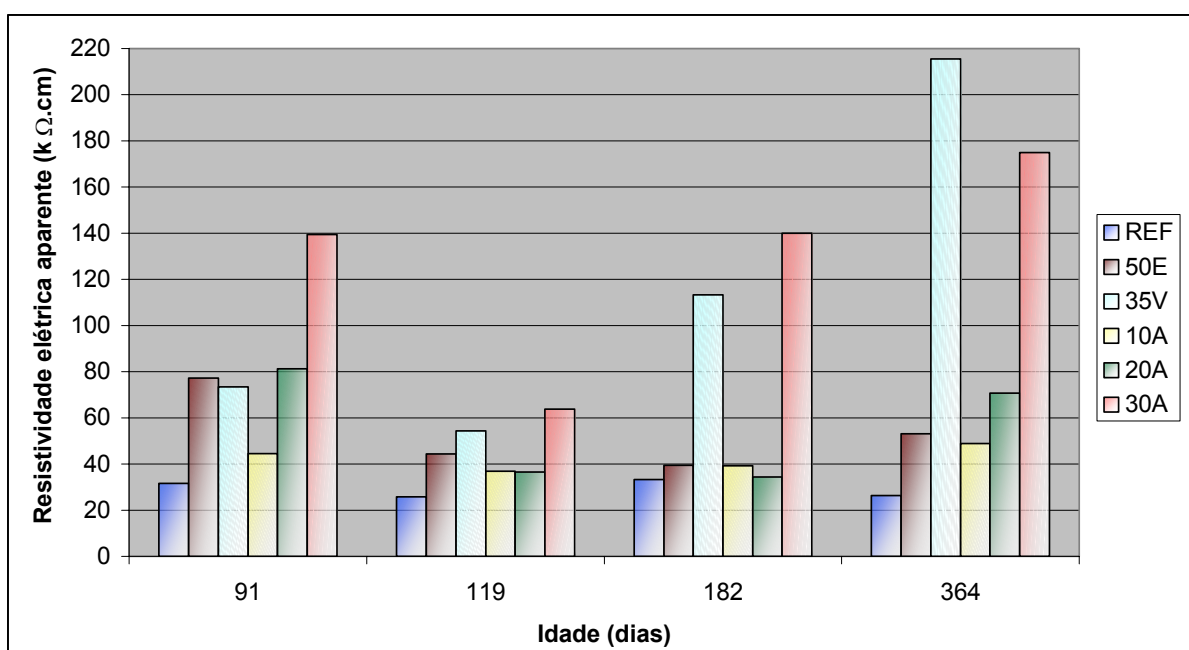


**Figura 4.19 – Relação entre o teor de umidade e a resistividade elétrica de concretos contaminados com cloreto (SALEEM et al., 1996)**

Na Figura 4.19, para o nível de concentração de  $19,2\text{Kg/m}^3$ , em um teor elevado de umidade, observa-se uma variação pequena na resistividade elétrica devido à presença de cloreto, talvez pelo fato da disponibilidade maior de eletrólito ter sido predominante em relação ao aumento da concentração iônica, na redução da resistividade elétrica.

A mistura de referência (REF) e a 50E (50% de EAF) não apresentaram grandes variações na resistividade elétrica dos 119 aos 364 dias, nas três relações água/aglomerante. Já a mistura 35V (35% de CV) teve ganhos expressivos de resistividade elétrica nas três relações água/aglomerante, 296% (0,35), 215% (0,50) e 262% (0,65).

As misturas compostas com 10% (10A) e 20% (20A) de CCA apresentaram ganhos de resistividade elétrica nas três relações água/aglomerante. O melhor desempenho foi da mistura composta com 20% e relação a/ag 0,65, com ganho de resistividade elétrica de 141%. Entretanto, na relação a/ag 0,35, das misturas compostas com CCA, a que apresentou maior ganho de resistividade elétrica foi aquela que continha 30% de adição, com acréscimo dos 119 dias para os 364 dias de 174%.



**Figura 4.20 – Resistividade elétrica aparente – a/ag= 0,35**

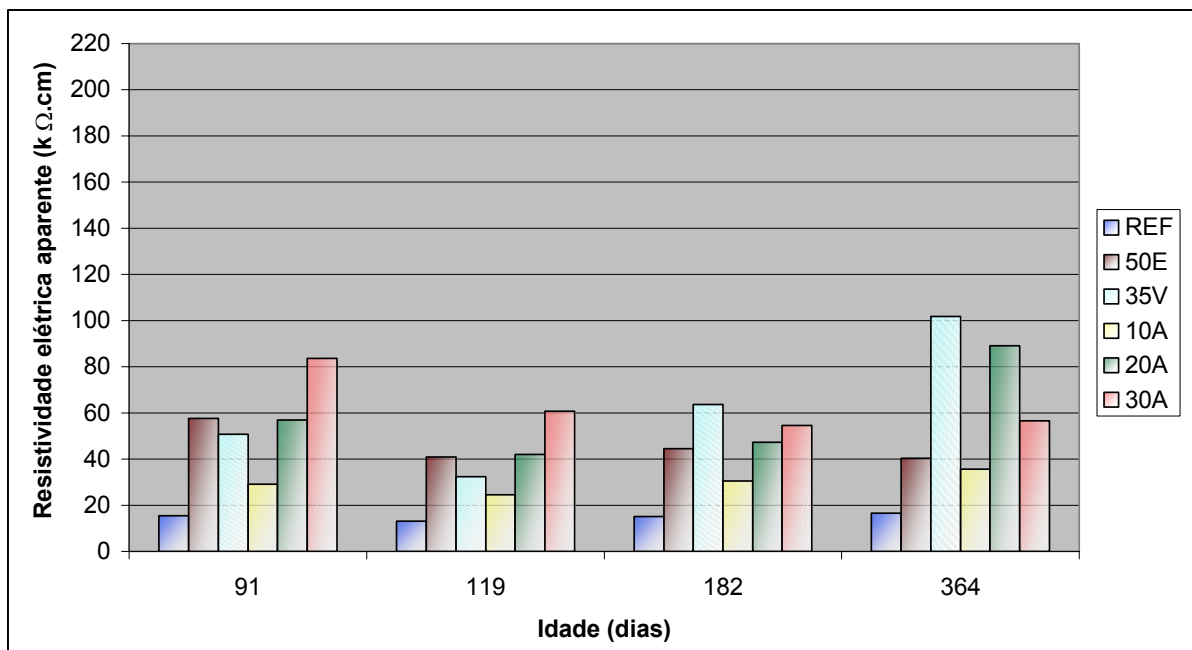


Figura 4.21 – Resistividade elétrica aparente – a/ag= 0,50

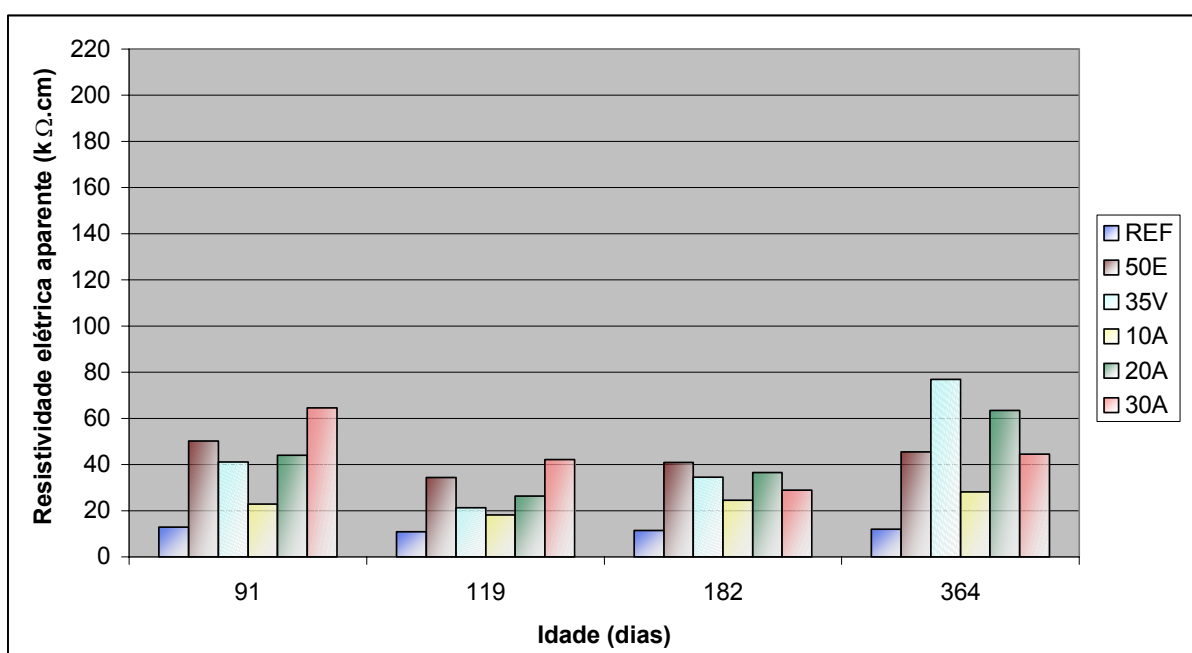


Figura 4.22 – Resistividade elétrica aparente – a/ag= 0,65

Acredita-se que esse comportamento diverso das misturas investigadas esteja relacionado às alterações diferenciadas ocorridas na estrutura de poros e



composição da solução aquosa dos mesmos, após os 91 dias, bem como na capacidade intrínseca de fixação de cloreto e conseqüente diminuição deste na solução dos poros, assunto que pode ser objeto de pesquisas futuras.

## CONCLUSÕES

Esta pesquisa teve por objetivo investigar a influência que a substituição de parte do cimento por cinza de casca de arroz exerce sobre algumas propriedades ligadas à durabilidade do concreto de alto desempenho, em especial a resistividade elétrica, buscando determinar qual teor que proporciona as melhores características.

Investigou-se a influência do teor de substituição de cinza de casca de arroz (CCA) na resistência à compressão. Os resultados mostraram que a adição dessa pozolana, nos teores de 10%, 20% e 30%, interfere, de maneira benéfica, na resistência à compressão, obtendo valores superiores aos alcançados pelas misturas REF, 35V e 50E, tanto aos 28 quanto aos 91 dias. Verifica-se também que, nas misturas com CCA, a resistência à compressão não evoluiu linearmente com o aumento do teor de substituição, sendo o teor de 20% o que apresentou melhor desempenho. No entanto, a relação  $(R\$/m^3)/(MPa)$  das misturas com 10% e 20% de CCA foi semelhante, levando a crer que o teor que proporciona melhor relação CUSTO/BENEFÍCIO, considerando a resistência à compressão, encontra-se nesse intervalo.

Da revisão bibliográfica, constatou-se que a resistividade elétrica do concreto apresenta-se como uma propriedade sensível às suas características físicas e químicas. A temperatura e o teor de umidade do concreto também exercem influência na sua resistividade elétrica, sendo esse último o mais importante. Dos resultados obtidos, verificou-se que a idade, a relação água/aglomerante e as adições minerais têm uma relação expressiva com a resistividade elétrica do concreto, em virtude principalmente das alterações na estrutura dos poros e na quantidade e composição da solução aquosa dos mesmos, corroborando os preceitos teóricos.

As misturas apresentaram aumento na resistividade elétrica com a diminuição da relação água/aglomerante. Isso devido principalmente a uma maior compactidade do concreto e menor quantidade de eletrólito. Esse aumento na resistividade elétrica também foi observado nas 3 relações água/aglomerante, com o aumento do grau de hidratação, até os 91 dias, cujas reações tornam a estrutura do concreto mais compacta.

Conforme os critérios de avaliação da resistividade elétrica, verificou-se que todos os concretos compostos com adições minerais apresentaram, aos 91 dias, probabilidade desprezível de corrosão, inclusive na relação água/aglomerante 0,65 e estando com alto teor de umidade. O mesmo verificou-se também aos 364 dias, quando submetidos a um ambiente agressivo e completamente saturados.

O uso de adições minerais foi muito benéfico para a resistividade elétrica do concreto, conferindo valores significativamente superiores aos obtidos quando utilizado apenas cimento. Nas misturas com CCA, verificou-se um acréscimo exponencial na resistividade elétrica com o aumento do teor de 0% a 30%. Isso apresenta-se como reflexo do maior refinamento dos poros e da menor condutividade elétrica específica da solução dos mesmos, constatados com o aumento do teor de CCA. Dessa forma, conclui-se que a adição de cinza de casca de arroz contribui para elevar a durabilidade do concreto, em especial a sua resistividade elétrica. A mistura com 30% de CCA apresentou o melhor resultado, aos 91 dias, nas 3 relações água/aglomerante.

Observou-se uma redução na alcalinidade da solução dos poros com a substituição parcial do cimento por adições minerais, porém o valor mais baixo verificado de 12,59, obtido pelas misturas 35V e 50E na relação água/aglomerante 0,65, é suficiente para assegurar a passivação da armadura. Em relação à condutividade elétrica específica, todas as misturas com adição mineral obtiveram valores menores do que o alcançado pela mistura de referência, em todas as relações água/aglomerante, o que decorre das alterações na composição da solução dos poros. O uso de adições minerais também influenciou a estrutura dos poros, resultando em um maior refinamento destes.

A análise integrada dos resultados de algumas propriedades do concreto revelou algumas constatações, como:

- Houve evolução da resistividade elétrica com o aumento da resistência à compressão, alcançando uma correlação muito satisfatória, em virtude principalmente da influência da relação água/aglomerante e da estrutura dos poros comum às duas propriedades;
- A resistência à compressão não é um parâmetro adequado para estimar a durabilidade de concretos, frente à corrosão, considerando a resistividade elétrica, ou seja, para uma determinada resistência à compressão, diferentes valores de resistividade elétrica foram obtidos a partir dos concretos analisados;

- Existe uma grande correlação entre a resistividade elétrica do concreto e a condutividade elétrica específica da solução dos poros, principalmente nas misturas com adição mineral, em virtude sobretudo da grande influência que a relação água/aglomerante e a composição da solução dos poros exercem nas duas propriedades. Observou-se claramente que a resistividade é maior e a condutividade menor para as misturas com adição mineral, em relação à mistura de referência. Correlação semelhante observou-se entre a resistividade elétrica e a concentração de íon  $\text{OH}^-$ , devido este ser geralmente o de maior concentração e, portanto, o principal responsável pela condutividade elétrica da solução dos poros. Nos dois casos, observou-se uma evolução da resistividade com o aumento da condutividade (ou concentração do  $\text{OH}^-$ ), aparentemente contraditória. Essa evolução foi mais acentuada para as misturas com adição mineral, sendo tão maior quanto maior o teor de substituição;

- A resistividade elétrica diminuiu com o aumento do volume total de intrusão e aumento do diâmetro crítico e, no geral, verificou-se uma boa correlação entre esses fatores. Isso em virtude principalmente da grande influência da relação água/aglomerante comum à estrutura dos poros e à resistividade elétrica do concreto. Essa redução mostrou-se levemente mais acentuada nas misturas com adição mineral.

Quando o valor da resistividade foi fixado em 30  $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$  e 60  $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ , verificou-se que os concretos com adição mineral conseguem atingir a resistividade elétrica de 30 $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$  com facilidade, ainda que o concreto tenha um teor elevado de umidade. O mesmo observou-se para o nível de resistividade elétrica de 60 $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ , exceto para a mistura 10A. Destacou-se o concreto com 30% de CCA que, com apenas 38,4MPa ( $a/a_g = 0,66$ ), conseguiu atingir os 60 $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$  de resistividade elétrica, demonstrando, nesse sentido, o grande efeito benéfico que a adição de cinza de casca de arroz no concreto representa para mesmo.

Na busca de determinar a mistura com melhor relação CUSTO/BENEFÍCIO, considerando as propriedades estudadas, observou-se, para a resistência à compressão, que a relação ( $\text{R}\$/\text{m}^3$ )/(MPa) dos concretos com adição mineral, no geral, foi menor do que o obtido pelo de referência. A maior relação ( $\text{R}\$/\text{m}^3$ )/(MPa) média foi obtida pelo concreto com 30% de cinza de casca de arroz e a menor pelo concreto com 50% de escória de alto forno.

Para os patamares de resistência de 45MPa e 65MPa, somente a mistura com 30% de CCA teve um custo (14% e 17%, respectivamente) superior ao da mistura de referência. Entre as misturas com CCA, a que obteve menor custo foi a mistura 10A (R\$172,38 e R\$224,60, respectivamente). No entanto constatou-se que a mistura 20A teve um custo superior ao da mistura 10A, de apenas 4% para 45MPa e 3% para 65MPa, e o desempenho na resistividade elétrica foi 84% e 76% superior, respectivamente.

Sendo assim, para determinar o teor de CCA que proporciona a melhor relação CUSTO/BENEFÍCIO, considerando a resistência à compressão e a resistividade elétrica, é necessário que ambas sejam especificadas. Por exemplo, para a resistência de 65MPa, as resistividades elétricas foram 35,33kΩ.cm, 62,30kΩ.cm e 102,98kΩ.cm, respectivamente para 10A, 20A e 30A. Então, para 65MPa e 30kΩ.cm, o teor mais econômico é 10%. Para 65MPa e 60kΩ.cm, o mais econômico é o teor de 20%.

Finalmente, fica claro que a utilização de cinza de casca de arroz, em substituição parcial do cimento, traz grandes benefícios técnicos ao concreto. Entretanto, devem ser também enfatizados os benefícios ecológicos que esse uso proporciona, tais como: redução da emissão de gases como o CO<sub>2</sub> e o CH<sub>4</sub>, redução da poluição dos rios, do solo e do ar e redução da utilização dos combustíveis fósseis.

### **Sugestões para trabalhos futuros**

Na presente pesquisa, realizou-se um estudo preliminar, sobre o comportamento dos concretos investigados, em relação à resistividade elétrica, quando submetidos a um ambiente agressivo. Sugere-se então que, concretos compostos com adições minerais sejam submetidos a ambientes agressivos (cloreto e/ou sulfato) para investigar o comportamento destes, em relação à resistividade elétrica. Paralelamente às investigações de resistividade, sugere-se, estudos de propriedades do concreto como permeabilidade a cloretos, porosidade, composição e condutividade elétrica específica da solução dos poros, cloretos totais, entre outros.

## REFERÊNCIAS

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.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C 494**: Standard specification for chemical admixtures for concrete. Philadelphia, 1992.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 3663**: Standard test methods for surface area of catalysts. Philadelphia, 1992.

ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. São Paulo: Pini, 1992.

\_\_\_\_\_. Conceitos básicos sobre corrosão de armaduras. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL PREVENÇÃO, INSPEÇÃO E REPARO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ATACADAS PELA CORROSÃO DA ARMADURA. **Anais ...** Porto Alegre, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7251**: Agregados em estado solto - determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.

\_\_\_\_\_. **NBR 7809**: Agregado graúdo - determinação do índice de forma pelo método do paquímetro. Rio de Janeiro, 1983.

\_\_\_\_\_. **NBR 7217**: Agregados - determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. **NBR 9776**: Agregados - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de chapman. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. **NBR 9937**: Agregados - determinação da absorção e da massa específica do agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211**: Agregados para concreto. Rio de Janeiro, 1993.

\_\_\_\_\_. **NBR 5743**: Análise química de cimento Portland - determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 1989.

\_\_\_\_\_. **NBR 9203**: Cimento Portland comum e clínquer. Análise química por complexometria. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 11579**: Cimento Portland - determinação da finura por meio da peneira número 200. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 7215**: Cimento Portland - determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro 1991.

\_\_\_\_. **NBR 5745:** Cimento Portland - determinação de anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro, 1989.

\_\_\_\_. **NBR 7227:** Cimento Portland - determinação de óxido de cálcio livre. Rio de Janeiro, 1989.

\_\_\_\_. **NBR 5747:** Cimento Portland - determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama. Rio de Janeiro, 1989.

\_\_\_\_. **NBR 5744:** Cimento Portland - determinação do resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 1989.

\_\_\_\_. **NBR 11581:** Cimento Portland - determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_. **NBR 7224:** Cimento Portland e outros materiais em pó - determinação da área específica. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_. **NBR 6474:** Cimento Portland e outros materiais em pó - determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_. **NBR 7223:** Determinação da consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone - ensaio de abatimento. Rio de Janeiro, 1982.

\_\_\_\_. **NBR 5739:** Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_. **NBR 12653:** Materiais pozolânicos - especificação. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_. **NBR 7117:** Medição da resistividade do solo pelo método dos quatro pontos (Wenner). Rio de Janeiro, 1981.

\_\_\_\_. **NBR 5738:** Moldagem e cura dos corpos de prova de concreto cilíndricos e prismáticos. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

BASHEER, P. A. M.; GILLEECE, P. R. V.; LONG, A. E.; MC CARTER, W. J. Monitoring electrical resistance of concretes containing alternative cementitious materials to assess their resistance to chloride penetration. **Cement and Concrete Composites**, v. 24, n. 5, p. 437-449, 2002.

BRAMESHUBER, W.; RAUPACH, M. **Non-destructive determination of the water-content in the concrete cover using the multiring-electrode**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM NON-DESTRUCTIVE TESTING IN CIVIL ENGINEERING (NDT-CE). Berlin, September 16-19, 2003. Disponível em: <<http://www.ndt.net/article/ndtce03/papers/p041/p041.htm>>. Acesso em: 15/06/2005.

CÁNOVAS, M. F. **Patologia e terapia do concreto armado**. São Paulo: Pini, 1988.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. São Paulo: Pini; Goiânia: Ed. UFG, 1997.

CHI, J. M.; HUANG, R.; YANG, C. C. Effects of carbonation on mechanical properties and durability of concrete using accelerated testing method. **Journal of Marine Science and Technology**, v. 10, n. 1, p. 14-20, 2002.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON - CEB. **Diagnosis and assessment of concrete structures: state-of-the-art report**. Lausanne, 1988. (Bulletin d'Information, 192).

COUTINHO, J. S. the combined benefits of CPF and RHA in improving the durability of concrete structures. **Cement and Concrete Composites**, n. 25, p. 51-59, 2003.

DAL RI, M. **Efeitos da adição de cal hidratada em concretos com altos teores de adição mineral na penetração de cloretos e na solução aquosa dos poros do concreto**. Santa Maria, 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **Rice Market Monitor**. Junho de 2005. Disponível em: <[http://www.fao.org/es/ESC/en/20953/21026/21631/highlight\\_23001en.html](http://www.fao.org/es/ESC/en/20953/21026/21631/highlight_23001en.html)>. Acesso em: 26/09/2005.

GJØRV, O. E. et al. Electrical resistivity of concrete in the oceans. In: 9<sup>o</sup> ANNUAL OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE. **Anais...**Houston, Texas, p. 581-588, 1977.

GOMES, N. S. **Influência de ativadores químicos e de adições minerais no comportamento de concretos frente a cloretos**. Santa Maria, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

GOWERS, K. R.; MILLARD, S. G. Measurement of concrete resistivity for assessment of corrosion severity of steel using Wenner technique. **ACI Materials Journal**, v. 96, n. 5, p. 536 to 541, september-october, 1999.

HELENE, P. R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo: Pini: Instituto de pesquisas tecnológicas, 1986.

\_\_\_\_\_. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. 231 p. Tese (Livre-Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Civil, São Paulo, 1993.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. 1<sup>a</sup> ed. São Paulo: Pini, 1992. 149 p.

HOPE, B. B.; IP, A. K. C. Corrosion of steel in concrete made with slag cement. **ACI Materials Journal**, v. 84, n. 6, p. 525-531, november-december, 1987.



HOPE, B. B.; IP, A. K. C.; MANNING, D. G. Corrosion and electrical impedance in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 15, n. 3, p. 525-534, 1985.

HUGHES, B. P.; SOLEIT, A. K. O.; BRIERLEY, R. W. New technique for determining the electrical resistivity of concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 37, n. 133, p. 243-248, december, 1985.

HUNKELER, F. The resistivity of pore water solution: A decisive parameter of rebar corrosion and repair methods. **Construction and Building Materials**, v. 10, n. 5, p. 381-389, 1996.

HUSSAIN, S. E.; RASHEEDUZZAFAR. Corrosion resistance performance of fly ash blended cement concrete. **ACI Materials Journal**, vol. 91, n. 3, p. 264-272, may-june, 1994.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Indicadores Agropecuários 1996-2003**. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/indicadoresagro\\_19962003/agro.pdf](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/indicadoresagro_19962003/agro.pdf)>. Acesso em: 09/06/2005.

ISAIA, G. C. **Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura**. São Paulo. 1995. 280p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G. A influência da resistência à compressão do projeto estrutural sobre o desempenho do concreto com altos teores de pozolanas. In: 45º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Anais eletrônicos...** Vitória-ES, 2003. 1 CD-ROM

ISMAIL, M. S.; WALIUDDIN, A. M. Effect of rice husk ash high strength concrete. **Construction and Building Materials**, vol. 10, n. 10, p. 521-526, 1996.

LIMA, R. C. **Avaliação da eficiência de inibidores de corrosão em reparos de estruturas de concreto**. São Paulo. 2000. 169 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

LONGUET, P.; BURGLEN, L. M.; ZELWER, A. La phase liquide du ciment hydraté. **Revue du Materiaux de Construcion**, Paris, n. 767, p. 34-41, 1973.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

MILLARD, S. G.; HARRISON, J. A; EDWARDS, A J. Measurements of the electrical resistivity of reinforcement concrete structures for the assessment of corrosion risk. **British Journal of NDT**, v. 31, n. 11, p. 617-621, nov. 1989.

MISSAU, F. **Penetração de cloretos em concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz**. Santa Maria, 2004, 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

MONFORE, G. E. The electrical resistivity of concrete. **Journal of the PCA Research and Development Laboratories**, v. 10, n. 2, p. 35-48, may, 1968.

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

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

ODLER, I. Hidration, setting and hardening of Portland cement. In: ODLER, I et al. **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**, 4ª ed., p. 241-297, 1998.

PEROZZI, M. **Arroz em foco**. 05 março, 2004. Disponível em: <<http://www.arroz.agr.br/site/arrozemfoco/040305.php>>. Acesso em: 09/06/2005.

PEROZZI, M.; PEREZ, P. **Arroz em foco**. 19 fevereiro, 2005. Disponível em: <<http://www.arroz.agr.br/site/arrozemfoco/050219.php>>. Acesso em: 21/09/2005.

PENTTALA, V. Concrete and sustainable development. **ACI Materials Journal**, v. 94, n. 5, p. 409-416, September-october, 1997.

POLDER, R. B. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete: A RILEM TC-154 technical recommendation. **Construction and Building Materials**, n. 15, p. 125-131, 2001.

PRINCIGALLO, A.; BREUGEL, K. V.; LEVITA, G. Influence of the aggregate on the electrical conductivity of Portland cement concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 11, p. 1755-1763, November, 2003.

ROSKOVIC, R.; BJEGOVIC, D. Role of mineral additions in reducing CO<sub>2</sub> emission. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 5, p. 974-978, 2005.

SALEEM, M. et al. Effect of moisture, chloride and sulphate contamination on the electrical resistivity of Portland cement concrete. **Construction and Building Materials**, n. 3, p. 209-214, 1996.

SENSALE, G. R.; DAL MOLIN, D. C. C. Estudo comparativo entre as propriedades mecânicas e durabilidade de concretos de alta resistência e convencionais com cinza de casca de arroz. In: 43º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Anais eletrônicos...** Foz do Iguaçu-PR, 2001. 1 CD-ROM

SHI, C. Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and the rapid chloride permeability test (ASTM C1202 or ASSHTO T277) results. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 3, p. 537-545, march, 2004.

SILVEIRA, A. A.; DAL MOLIN, D. C. C. A influência do tratamento térmico da cinza de casca de arroz na pozolanicidade e na resistência à compressão de argamassas. In: I SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS. **Anais...** Goiânia-GO, 1995.

SMITH, K. M.; SCHOKKER, A. J.; TIKALSKY, P. J. Performance of supplementary cementitious materials in concrete resistivity and corrosion monitoring evaluations. **ACI Materials Journal**, v. 101, n. 5, p. 385-390, september-october, 2004.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD). **The cement sustainability initiative**. Progress report, 2005. Disponível em: <<http://www.wbcscement.org/>>. Acesso em: 21/09/2005.

WEE, T. H.; SURYAVANSHI, A. K.; TIN, S. S. Evaluation of rapid chloride permeability test (RCPT) results for concrete containing mineral admixtures. **ACI Materials Journal**, v. 97, n. 2, p. 221-232, march-april, 2000.

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

WHITTINGTON, H. W.; McCARTER, J.; FORDE, M. C. The conduction of electricity through concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 33, n. 114, march, 1981.

WOLSIEFER, J. T. Silica fume concrete: A solution to steel reinforcement corrosion in concrete. In: SECOND CANMET/ACI INTERNATIONAL CONFERENCE ON DURABILITY OF CONCRETE. **Proceedings...** American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, SP-126, p. 527-553, 1991.

ZHANG, M.; MALHOTRA, V. M. High-performance concrete incorporating rice husk ash as a supplementary cementing material. **ACI Materials Journal**, v. 93, n. 6, November-december, 1996.