

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**EFEITO DAS ADIÇÕES MINERAIS NA RESISTIVIDADE ELÉTRICA  
DE CONCRETOS CONVENCIONAIS**

Dissertação de Mestrado

**AGUIDA GOMES DE ABREU**

Porto Alegre  
1998

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**EFEITO DAS ADIÇÕES MINERAIS NA RESISTIVIDADE ELÉTRICA  
DE CONCRETOS CONVENCIONAIS**

**AGUIDA GOMES DE ABREU**

Dissertação apresentada ao corpo docente do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do grau de MESTRE EM ENGENHARIA

Porto Alegre  
1998

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pela orientadora e pelo Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (CPGEC/UFRGS).

---

Profª Denise C. C. Dal Molin  
Orientadora

---

Profª Denise C. C. Dal Molin  
Coordenadora do CPGEC

**BANCA EXAMINADORA:**

Prof. Ênio José Pazini Figueiredo  
Dr. pela Universidade de São Paulo

Prof. Iduvirges Lourdes Müller  
Dra pela Universidad Federal de Rosário

Prof. Cláudio Souza Kazmierczak  
Dr. pela Universidade de São Paulo

*A Deus  
Aos meus pais Tereza e Benedito  
Aos meus irmãos  
À Denise*

## **AGRADECIMENTOS**

À Denise Dal Molin, por sua orientação competente, incentivo, paciência e principalmente, amizade.

Aos professores Ênio J. P. Figueiredo e Cláudio Kazmierczak, pela atenção, incentivo e apoio recebidos desde a graduação. Ao Prof. Ênio, pelo auxílio na escolha do tema da pesquisa. A ambos, os meus sinceros agradecimentos.

À Joseanne, amiga de todas horas, pelas inúmeras sugestões e observações que muito contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos professores Renato Brito e Paulo Beyer, por seu exemplo de dedicação e auxílio na realização dos experimentos.

Ao pessoal do LEME, Airton, Fontes, Flávio, seu Teixerinha, pelo apoio prestado em todas as etapas do trabalho, e ao João Marcos, Diógenes, Renato, Paulinho, Virgínia e Júlio, pessoas sem as quais a caracterização dos materiais teria sido inviável.

Ao Márcio, Washington, Angela M., Angela F., Ivonne, Rafael, Fernanda, Lucília e Marlova, pelo auxílio e relevantes contribuições prestados durante a realização desta dissertação.

Aos colegas da turma de 95, Jairo, Márcio, Givanildo, Eduardo, Geísa, Margaret, Tarciso, Alicia e Paulo, amigos cuja convivência deixarão saudades. Aos colegas do NORIE, pela camaradagem no dia a dia. A Lúcia, por sua amizade.

Aos funcionários da biblioteca, por sua solicitude e atenção.

Aos meus pais, por seu carinho e estímulo e apoio incondicional. Aos meus irmãos, Aguides, Aguinaldo, Andréia e Airton. Sem eles não seria a pessoa que sou.

A Tere, Angela Scheibel, Angela Vargas e Gisani, amigas de longa data, pelo estímulo e apoio recebidos.

À CAPES, cujos recursos financeiros possibilitaram o desenvolvimento deste trabalho.

## SUMÁRIO

Lista de figuras .....	viii
Lista de quadros e tabelas .....	x
Resumo .....	xii
Abstract .....	xiii
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2 IMPORTÂNCIA DO TEMA.....	2
1.3 OBJETIVOS.....	3
1.4 MÉTODO.....	4
1.5 LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	5
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	5
<b>2 CORROSÃO DA ARMADURA NO CONCRETO E EFEITO DAS CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO NA RESISTIVIDADE ELÉTRICA</b>	
2.1 A CORROSÃO DA ARMADURA NO CONCRETO .....	7
2.2 CAUSAS DA CORROSÃO DA ARMADURA NO CONCRETO .....	9
<b>2.2.1 Iniciação .....</b>	<b>10</b>
<b>2.2.2 Propagação.....</b>	<b>11</b>
2.3 RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO.....	12
2.4 CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO E FATORES QUE INFLUENCIAM SUA RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	15
<b>2.4.1 Efeito da relação água/ aglomerante e consumo de cimento....</b>	<b>17</b>
<b>2.4.2 Efeito do grau de hidratação da pasta e tempo de cura.....</b>	<b>17</b>
<b>2.4.3 Efeito da permeabilidade e porosidade do concreto .....</b>	<b>18</b>
<b>2.4.4 Efeito do teor de umidade.....</b>	<b>18</b>
<b>2.4.5 Efeito do tipo de cimento e adições minerais.....</b>	<b>19</b>
2.4.5.1 Cinza volante.....	22
2.4.5.2 Cinzas de casca de arroz.....	23
2.4.5.3 Silica ativa.....	24
<b>3 MÉTODOS DE MEDIDA DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....</b>	<b>26</b>
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	26
3.2 DETERMINAÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA VOLUMÉTRICA DO CONCRETO NBR 9204/1985.....	26
3.3 MÉTODO DOS QUATRO ELETRODOS (MÉTODO DE WENNER).....	28
<b>3.3.1 Fatores intervenientes na utilização do Método dos quatro eletrodos.....</b>	<b>30</b>
3.3.1.1 Efeitos devidos à polarização.....	30
3.3.1.2 Problemas de contato.....	31

3.3.1.3	Efeito da intensidade de corrente, da frequência e do tipo de onda.....	32
3.3.1.4	Efeito da armadura nas medidas de resistividade aparente.....	32
3.3.1.5	Dimensões do corpo de prova e limitações na estrutura.....	34
3.3.1.6	Efeito de camadas superficiais de diferentes valores de resistividade sobre o concreto.....	34
3.4	MÉTODOS PARA USO EM LABORATÓRIO.....	35
<b>4</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>36</b>
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	36
4.2	VARIÁVEIS E ALEATORIZAÇÃO.....	37
4.3	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	40
	<b>4.3.1 Cimentos e adições.....</b>	<b>40</b>
	4.3.1.1 Cimentos.....	40
	4.3.1.2 Adições.....	42
	<b>4.3.2 Aditivos.....</b>	<b>46</b>
	<b>4.3.3 Água.....</b>	<b>46</b>
	<b>4.3.4 Agregados.....</b>	<b>46</b>
4.4	TRAÇOS E PRODUÇÃO DO CONCRETO.....	47
4.5	CURA E ARMAZENAMENTO DOS CORPOS DE PROVA.....	49
4.6	ENSAIOS.....	49
	<b>4.6.1 Resistência à compressão axial.....</b>	<b>49</b>
	<b>4.6.2 Índice de vazios.....</b>	<b>50</b>
	<b>4.6.3 Grau de saturação dos poros.....</b>	<b>50</b>
	<b>4.6.4 Perda de água em função do tempo.....</b>	<b>50</b>
	<b>4.6.5 Medidas de resistividade.....</b>	<b>51</b>
<b>5</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>54</b>
5.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	54
5.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	55
5.3	ÍNDICE DE VAZIOS, GRAU DE SATURAÇÃO DOS POROS E PERDA DE MASSA PELA EVAPORAÇÃO DA ÁGUA.....	63
	<b>5.3.1 Índice de vazios.....</b>	<b>63</b>
	<b>5.3.2 Grau de saturação dos poros.....</b>	<b>66</b>
	<b>5.3.3 Perda de massa pela evaporação da água.....</b>	<b>70</b>
5.4	RESISTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE.....	74
	<b>5.4.1 Resultados e análise geral dos dados.....</b>	<b>74</b>
	<b>5.4.2 Análise por tipo de adição de tipo de cimento.....</b>	<b>79</b>
	5.4.2.1 Cinza de casca de arroz.....	79
	5.4.2.2 Sílica ativa.....	81
	5.4.2.3 Cimento pozolânico.....	83
5.5	CONSIDERAÇÕES SOBRE OS ENSAIOS FEITOS PELO MÉTODO NBR 9204/ 1985.....	85
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>87</b>
6.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	87
6.2	SUGESTÕES PARA OUTROS TRABALHOS.....	89
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>90</b>
	<b>ANEXO A.....</b>	<b>100</b>
	<b>ANEXO B.....</b>	<b>103</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 2.1</b>	Formação de uma pilha de corrosão - adaptação (Moskvin 1983; Andrade, 1995).....	8
<b>FIGURA 2.2</b>	Modelo de vida útil (Tuutti, 1982).....	9
<b>FIGURA 2.3</b>	Resistividade verso taxa de corrosão (Gonzalez et al.,1992) .....	13
<b>FIGURA 2.4</b>	Influência da composição do concreto em parâmetros que governam a proteção da armadura contra a corrosão (Schiesl, 1987) .....	16
<b>FIGURA 2.5</b>	Relação entre a resistividade elétrica e a relação água cimento em concretos de cimento Portland comum aos 28 dias em cura úmida (Hughes et al., 1985) .....	17
<b>FIGURA 2.6</b>	Resistividade de pastas de diferentes tipos de cimentos, à 22 °C e 100% de umidade relativa (Hansson e Hansson, 1983) .....	20
<b>FIGURA 2.7</b>	Classificação de adições minerais para concreto ( adaptação de Mehta e Monteiro, 1994).....	21
<b>FIGURA 2.8</b>	Resistência à compressão axial de argamassas com cinzas de casca de arroz e relação água/aglomerante 0,52, aos 28 dias (Prudêncio Jr e Santos, 1996).....	24
<b>FIGURA 3.1</b>	Esquema elétrico para determinação da resistividade elétrica volumétrica segundo a NBR 9405 /85.....	27
<b>FIGURA 3.2</b>	Esquema de montagem do corpo de prova para o ensaio de resistividade elétrica volumétrica segundo a NBR 9405/ 85 .....	27
<b>FIGURA 3.3</b>	Método dos 4 eletrodos para medida de resistividade elétrica: A- amperímetro V voltímetro de alta impedância de entrada, e a distância entre os eletrodos.....	29
<b>FIGURA 3.4</b>	Resistividade aparente em função da corrente (Millard et al., 1989).....	32
<b>FIGURA 3.5</b>	Resistividade aparente em função da frequência (Millard et al., 1989) .....	33
<b>FIGURA 4.1</b>	Micrografia de cimento CP V ARI aumento de 4000x .....	41
<b>FIGURA 4.2</b>	Micrografias: (a) cimento CP IV-32; (b) cinzas volante aumento de 4000x .....	42
<b>FIGURA 4.3</b>	Curvas granulométricas das adições.....	43
<b>FIGURA 4.4</b>	Micrografia de sílica ativa: (a) aumento de 20000x; (b) aumento de 80000x .....	44
<b>FIGURA 4.5</b>	Difratograma de raios-X dos compostos da cinza de casca de arroz queimada à 700 °C.....	<b>44</b>
<b>FIGURA 4.6</b>	Micrografia: (a) cinzas de casca de arroz não moídas aumento 800x, (b) cinzas de casca de arroz moídas aumento de 16000x .....	45
<b>FIGURA 4.7</b>	Moinho de bolas utilizado para moagem das cinzas de casca de arroz .....	45
<b>FIGURA 4.8</b>	Esquema dos corpos de prova utilizados no ensaio de medida de resistividade pelo método dos 4 eletrodos .....	52
<b>FIGURA 4.9</b>	Detalhes: (a) eletrodos; (b) instante de moldagem dos corpos de prova ...	52
<b>FIGURA 4.10</b>	Ensaio de medida de resistividade elétrica aparente .....	53
<b>FIGURA 5.1</b>	Efeito da relação água/aglomerante e do tipo de adição ou tipo de cimento na resistência à compressão .....	57

<b>FIGURA 5.2</b>	Efeito dos fatores idade x relação a/agl na resistência à compressão axial do concreto .....	59
<b>FIGURA 5.3</b>	Efeito das interações dos fatores teor de adição, relação a/agl e idade na resistência à compressão de concretos com adição de CCA.....	59
<b>FIGURA 5.4</b>	Efeito das interações dos fatores teor de adição, relação a/agl e idade na resistência à compressão de concretos com adição de SA .....	61
<b>FIGURA 5.5</b>	Efeito do teor de adição de sílica ativa e da relação a/agl na resistência à compressão aos 28 dias ( Wolf, 1991) .....	61
<b>FIGURA 5.6</b>	Resistência à compressão de concretos com adição de Sa aos 28 dias (Dal Molin, 1995).....	62
<b>FIGURA 5.7</b>	Efeito das interações dos fatores tipo de cimento, relação a/c e idade na resistência à compressão de concretos com C POZ e C ARI .....	62
<b>FIGURA 5.8</b>	Efeito do tipo de adição e tipo de cimento no índice de vazios dos concretos.....	65
<b>FIGURA 5.9</b>	Efeito das interações dos fatores relação água/aglomerante e tipo de adição e tipo de cimento nos índice de vazios dos concretos.....	65
<b>FIGURA 5.10</b>	Efeito do tipo de adição ou tipo de cimento no grau de saturação dos poros dos concretos aos 63 e 91 dias de idade.....	68
<b>FIGURA 5.11</b>	Efeito dos fatores idade e relação a/agl no grau de saturação dos poros do concreto.....	68
<b>FIGURA 5.12</b>	Efeito dos fatores idade e t de adição/ t de cimento no grau de saturação dos poros do concreto .....	69
<b>FIGURA 5.13</b>	Efeito médio do fator tipo de adição e tipo de cimento na perda de massa pela evaporação da água .....	71
<b>FIGURA 5.14</b>	Efeito dos fatores tempo e tipo de adição e de cimento na perda de massa pela evaporação da água .....	71
<b>FIGURA 5.15</b>	Efeito dos fatores relação água/aglomerante <i>versus</i> tipo de adição e cimento na perda de massa pela evaporação da água do concreto .....	72
<b>FIGURA 5.16</b>	Efeito do fator tipo e teor de adição e tipo de cimento na resistividade elétrica média dos concretos .....	77
<b>FIGURA 5.17</b>	Efeito médio da relação água/aglomerante na resistividade elétrica do concretos .....	78
<b>FIGURA 5.18</b>	Efeito do teor de adição de CCA, da idade e do ambiente na resistividade elétrica do concreto.....	79
<b>FIGURA 5.19</b>	Efeito da relação água/aglomerante, idade e do ambiente na resistividade elétrica do concreto.....	80
<b>FIGURA 5.20</b>	Efeito do teor de adição de Sa, da idade e do ambiente na resistividade elétrica do concreto.....	81
<b>FIGURA 5.21</b>	Efeito do teor de adição de SA, da idade e do ambiente na resistividade elétrica do concreto.....	81
<b>FIGURA 5.22</b>	Efeito do tipo de cimento, da idade e do ambiente na resistividade elétrica do concreto.....	83
<b>FIGURA 5.23</b>	Efeito da relação água/ cimento, da idade e do ambiente na resistividade elétrica do concreto.....	84

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

<b>QUADRO 2.1</b>	Critério de avaliação da resistividade CEB 192.....	14
<b>QUADRO 4.1</b>	Combinação dos fatores e convenção dos traços ensaiados.....	38
<b>QUADRO 4.2</b>	Relação dos ensaios realizados, idades de ensaio e número total de corpos de prova.....	38
<b>QUADRO 4.3</b>	Aleatorização dos traços.....	39
<b>TABELA 4.4</b>	Características químicas dos cimentos.....	40
<b>QUADRO 4.5</b>	Características físico mecânicas dos cimentos.....	41
<b>TABELA 4.6</b>	Composição química das adições.....	42
<b>QUADRO 4.7</b>	Características físicas das adições.....	43
<b>QUADRO 4.8</b>	Atividade pozolânica das adições NBR 5752.....	44
<b>QUADRO 4.9</b>	Ensaio de caracterização dos agregados.....	46
<b>TABELA 4.10</b>	Composição granulométrica dos agregados.....	47
<b>QUADRO 4.11</b>	Características físicas dos agregados.....	47
<b>QUADRO 4.12</b>	Traços em massa dos concretos e abatimento do tronco de cone.....	48
<b>TABELA 5.1</b>	Resultados médios dos ensaios de compressão axial, desvio padrão e coeficiente de variação obtidos a partir de 3 observações.....	56
<b>TABELA 5.2</b>	Análise de variância para resistência à compressão axial.....	57
<b>TABELA 5.3</b>	Resumo da análise de variância para resistência à compressão de concretos com CCA, SA e C POZ comparados aos concretos com C ARI (ref).....	59
<b>TABELA 5.4</b>	Resultados obtidos em ensaios de resistência à compressão axial (MPa) de concretos com adição de CCA (Silveira, 1996) curados em água.....	60
<b>TABELA 5.5</b>	Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação dos ensaios de índice de vazios após saturação e fervura, obtidos no ensaio de 3 corpos de prova aos 91 dias de idade.....	64
<b>TABELA 5.6</b>	Análise de variância para os resultados de índice de vazios, obtidos após saturação e fervura aos 91 dias de idade.....	64
<b>TABELA 5.7</b>	Resumo da análise de variância (ANOVA) para índice de vazios após saturação e fervura por tipo de adição de tipo de cimento.....	66
<b>TABELA 5.8</b>	Média dos ensaios de grau de saturação dos poros dos concretos.....	66
<b>TABELA 5.9</b>	Análise de variância para o ensaio de grau de saturação dos poros aos 28 dias de idade.....	67
<b>TABELA 5.10</b>	Análise de variância para o ensaio de grau de saturação dos poros aos 63 e 91 dias de idade.....	67
<b>TABELA 5.11</b>	Resumo da análise de variância para o grau de saturação dos poros de concretos com cinzas de casca de arroz, sílica ativa e cimento pozolânico, aos 63 e 91 dias de idade.....	70
<b>TABELA 5.12</b>	Análise de variância para o ensaio de perda de massa pela evaporação da água.....	70
<b>TABELA 5.13</b>	Resumo da análise de variância para perda de massa pela evaporação da água de concretos com adição de cinzas de casca de arroz, sílica ativa e cimento pozolânico.....	72

<b>QUADRO 5.14</b>	Classificação dos concretos em ordem decrescente, por tipo de ensaio .	73
<b>TABELA 5.15</b>	Resultados médios obtidos nos ensaios de resistividade elétrica aparente para concretos com relação a/agl 0,5.....	74
<b>TABELA 5.16</b>	Resultados médios obtidos nos ensaios de resistividade elétrica aparente para concretos com relação a/agl 0,65.....	75
<b>TABELA 5.17</b>	Resultados médios obtidos nos ensaios de resistividade elétrica aparente para concretos com relação a/agl 0,8.....	75
<b>TABELA 5.18</b>	Análise de variância para o ensaio de resistividade medidos aos 3, 7, 14 e 28 dias.....	76
<b>TABELA 5.19</b>	Análise de variância para o ensaio de resistividade medidos aos 63 e 91 dias.....	76
<b>TABELA 5.20</b>	Análise de variância para o ensaio de resistividade medidos aos 98, 112 dias.....	76
<b>TABELA 5.21</b>	Resumo dos fatores significativos para a resistividade por ordem de importância.....	77
<b>TABELA 5.22</b>	Fatores significativos para a resistividade por ordem.....	79
<b>TABELA 5.23</b>	Fatores significativos para a resistividade por ordem.....	81
<b>TABELA 5.24</b>	Resumo das análise de variância para o ensaio de resistividade elétrica.....	83

## RESUMO

Uma vez que a armadura se encontre despassivada, o processo de corrosão vai depender basicamente de dois fatores, que são a **resistividade elétrica** do concreto e do acesso de **oxigênio** à armadura. A resistividade elétrica do concreto pode atuar como acelerador ou retardador do processo corrosivo, dado que baixos valores de resistividade significam fácil mobilidade iônica, enquanto que altos valores de resistividade implicam numa baixa mobilidade iônica.

De acordo com sua composição e características, o concreto pode ter diferentes valores de resistividade elétrica. Assim, este trabalho objetiva comparar o efeito de diferentes tipos de adição e cimentos na resistividade elétrica aparente de concretos convencionais. São pesquisados concretos com adição de sílica ativa e cinzas de casca de arroz (0, 6 e 12%) cimento CP V -ARI e cimento CP IV 32 e relação água/aglomerante a 0,5, 0,65 e 0,8. Os valores de resistividade elétrica foram obtidos pelo método de Wenner (Método dos 4 eletrodos), em tres situações distintas de exposição do concreto (câmara úmida, câmara climatizada e submerso). Paralelamente foram realizados ensaios de resistência à compressão axial, índice de vazios, grau de saturação dos poros e perda de massa pela evaporação da água.

Os resultados obtidos permitiram concluir que, dependendo do tipo de adição ou tipo de cimento, existe um incremento significativo na resistividade elétrica. Foi observado que, de acordo com o ambiente de exposição, o fator mais significativo para a resistividade elétrica foi o tipo de adição ou o tipo de cimento. Também foi possível observar que a influência do ambiente é significativa, evidenciando a importância do grau de saturação dos poros do concreto para a propriedade pesquisada.

## **ABSTRACT**

When the steel reinforcement in concrete structures loses its passivity, the corrosion process depends on electrical resistivity and on oxygen diffusion through concrete cover. The electrical resistivity of concrete can act as a retardant or accelerator of the corrosion process. Low electrical resistivity values improve ion movement causing the corrosion process to intensify.

The electrical values of concrete vary according to its characteristics. The aim of this work is to study the effect of admixtures and cement types on concrete electrical resistivity. It investigates concretes with addition of silica fume and rice husk ash (6 and 12% of cement, in mass), cement types CP I S-32 and CPIV-32 POZ , as well as concretes with water-cementitious ratios of 0.5; 0.65 and 0.8. Electrical resistivity was measured using the Wenner method (four-pin method). At the same time essays of compressive strength resistivity, void ratio, degree of pore saturation, and loss of mass due to water evaporation were also conducted.

The results lead to the conclusion that, depending on the admixture or cement types, there is a significant development in the electrical resistivity of concrete. It was observed that, in the same environment and conditions, the kind of admixture or cement type was the most important factor in electrical resistivity. It was also possible to observe that the effect of the environment is significant, emphasizing the importance of the degree of pore saturation of the concrete in electrical resistivity.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Da interação das estruturas de concreto com o meio ambiente, submetidas aos mais diversos tipos de solicitações resulta, na maioria das vezes, na sua deterioração precoce. Estas deteriorações são causadas por processos químicos e físicos, como por exemplo: ataques por ácidos, sulfatos ou álcalis, reações alcali-agregado, ciclos de gelo e degelo, etc (Papadakis et al.,1991). Em estruturas de concreto armado, uma das conseqüências mais danosas da interação do concreto com o meio é a corrosão das armaduras, que tem sido citada como a principal causa de deterioração das estruturas (Mehta, 1992).

Dal Molin (1988), em trabalho de análise de manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos do Estado do Rio Grande do Sul, verificou que do total de fissuras em concreto armado, 11,89% eram devidas à corrosão e destas, 88,2% foram classificadas como graves. A grande incidência desta manifestação patológica também foi recentemente constatada por Andrade (1996), que através de levantamento das manifestações patológicas no estado de Pernambuco verificou que 64% delas eram devidas à corrosão da armadura.

A magnitude dos problemas causados pela corrosão das armaduras também está caracterizado em trabalhos como os desenvolvidos por Cascudo (1991), Figueiredo (1994), Helene (1993) e Isaia (1995). Estes autores constataram, através de levantamento bibliográfico que, nos mais diversos países, os gastos anuais com reparos, recuperações e reposições de elementos estruturais atacados pela corrosão da armadura são elevados, e os prejuízos tanto econômico quanto sociais são grandes.

De uma forma mais ampla, pode-se tomar como referência os estudos realizados em vários países, que segundo Gonzalez (1989) avaliam os custos diretos da corrosão em 3,5% do PIB, estimando-se que 1/4 a 1/3 da produção mundial de aço se destinem à reposição de estruturas de aço deterioradas.

Constata-se assim que os problemas decorrentes da corrosão da armadura no concreto são de grande relevância, justificando-se, desta forma, os estudos relacionados à

corrosão e a busca de maior conhecimento dos fenômenos e parâmetros que exercem influência sobre a durabilidade das estruturas de concreto.

## 1.2 IMPORTÂNCIA DO TEMA

A corrosão das armaduras em estruturas de concreto ocorre em meio aquoso, sendo, portanto, um fenômeno eletroquímico. Assim, para que ela ocorra é necessário que existam reações de oxidação e redução, bem como a circulação de íons num eletrólito (Andrade, 1995).

A propriedade elétrica que caracteriza a dificuldade com que os íons se movimentam no concreto é denominada de **resistividade elétrica ( $\rho$ )**, também chamada **resistência específica**, que é definida como a resistência (ohm) entre faces opostas de uma unidade cúbica de material, sendo a mesma o inverso da condutividade (Barrow, 1964).

Devido à heterogeneidade do concreto e sua interação com o meio ambiente, os fatores que intervêm na resistividade elétrica do concreto são muitos. Quando da execução do concreto, suas propriedades são consequência das relações entre os diversos materiais que o constitui, das características destes materiais, da forma de lançamento e adensamento e de sua cura. Mapas de resistividade de estruturas de concreto armado, juntamente com medidas de potencial de eletrodo, possibilitam saber o risco de corrosão (Ewins, 1990). Tendo em conta sua influência na taxa de corrosão ( $i_{corr}$ ), a **resistividade** e a difusão de oxigênio tem sido objeto de grande número de pesquisas (Feliu et al., 1989; Glass et al., 1991; Gonzalez et al., 1992 e Kranc e Sagües, 1994, Figueiredo et al., 1997, entre outros).

Além da importância da resistividade pela sua estreita relação com o fenômeno da corrosão, medidas de resistividade podem ser úteis na localização de regiões de maior porosidade, onde  $Cl^-$  poderão penetrar mais rapidamente (Polder et al., 1994), ou até mesmo para detectar pontos onde existem falhas na aderência entre a armadura e o concreto, conforme sugerem Fu e Chung (1995). Entretanto, na prática, a realização de medidas de resistividade conforme sugerem os autores já citados é muito difícil, senão inviável.

Muitos dos mecanismos de interação entre os vários fatores que influem na resistividade elétrica do concreto, tais como umidade relativa ambiente, relação água/ cimento e tipo de cimento já são de domínio do meio científico. Entretanto, o inter-relacionamento destes parâmetros com fatores como certos tipos de **adições minerais** e **cimentos**, por

exemplo, necessitam ser melhor estudados, uma vez que as pesquisas realizadas até então não são totalmente conclusivas.

Atualmente, a utilização de adições minerais ao concreto é decorrente de fatores que vão desde o aspecto econômico até o ecológico e, sob a ótica da engenharia, sua utilização é justificada pela influência que tem em características relevantes para a durabilidade (Malhotra e Mehta, 1996). Segundo Maslehuddin et al. (1994), embora existam esforços das indústrias de cimento no sentido de produzir concretos com alta resistência e baixo consumo de energia, aspectos de durabilidade dos produtos de cimento, devido às mudanças nas características químicas e físicas, não são adequadamente estudados. Um exemplo deste tipo de problema é colocado por Figueiredo (1994), que citando Segui, comenta que em 1992 os gastos estimados com reparo e substituição de estruturas afetadas por problemas de durabilidade devido à má utilização de cimento aluminoso na Catalúnia (Espanha) era da ordem de 1,5 bilhões de dólares. Mais recentemente, a influência de manifestações patológicas devidas à utilização do cimento aluminoso também foi tema de trabalho no CONPAT/ 97 (Cánovas e Ballán, 1997). Um fato desta natureza certamente evidencia a necessidade de um amplo conhecimento dos materiais e dos fatores intervenientes no seu desempenho, imprescindível para uma especificação adequada.

Dentro de uma das linhas de pesquisa que é atualmente desenvolvida no NORIE (Núcleo Orientado para a Inovação nas Edificações), a durabilidade de concretos com adições minerais e diferentes tipos de cimentos tem sido objeto de pesquisas contínuas. Assim, investigar o comportamento elétrico de concretos com adições constitui-se em mais um segmento na busca do conhecimento dos mecanismos que regem o comportamento do concreto e que determinam, em última instância, sua durabilidade.

### 1.3 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é comparar a resistividade elétrica de concretos com e sem adições.

Em conseqüência das variáveis escolhidas e dos ensaios complementares, podem ser estabelecidos os seguintes objetivos secundários:

- Investigar a significância do efeito das adições e de diferentes tipos de cimento na resistividade elétrica do concreto;

- Investigar o efeito da relação água/ aglomerante na resistividade elétrica do concreto, para as adições estudadas;
- Verificar se existe correlação entre resistividade elétrica e capacidade de absorção de água dos concretos estudados;
- Verificar se existe correlação entre resistividade elétrica e resistência à compressão axial;
- Correlacionar os resultados obtidos com os disponíveis na bibliografia.

#### 1.4 MÉTODO

Selecionada a **resistividade elétrica** como tema da pesquisa, devido a sua importância no fenômeno da corrosão das armaduras, a etapa seguinte foi a escolha da forma de abordagem, optando-se, assim, pela investigação do **efeito das adições**. Em bibliografias, buscou-se a correlação com outras propriedades do concreto, tais como resistência à compressão e porosidade, bem como métodos de ensaios.

A parte experimental foi desenvolvida com base em um projeto de experimento. Com apoio em bibliografia, e tendo em vista o objetivo da pesquisa, foi delineado o experimento, sendo então decidido pela utilização de uma câmara climatizada (temperatura e umidade controladas), onde os corpos de prova foram mantidos após a cura de 28 dias em câmara úmida. Embora este trabalho tenha sido o primeiro a utilizar a câmara climatizada, sua montagem teve por objetivo também atender a outros trabalhos, que encontram-se em andamento.

Os dados foram coletados conforme o planejamento do experimento, de forma que os resultados pudessem ser considerados representativos e estatisticamente analisados.

Finda a coleta de dados, partiu-se para a análise estatística. Em seguida, os resultados foram interpretados e discutidos, com base na bibliografia específica.

Parte da revisão bibliográfica, o planejamento dos experimento, os resultados, as análises, discussões e conclusões são relatados neste trabalho.

## 1.5 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

O estudo da durabilidade de estruturas é amplo, uma vez que interagem, no fenômeno, as propriedades dos materiais em si, as condições macro e microclimáticas e o uso que é dado a esta estrutura. O estudo da durabilidade das estruturas de concreto, mesmo que de forma restrita, como neste trabalho, à resistividade elétrica e influência das adições, ainda assim constitui-se num campo de pesquisa muito amplo. A restrição aos fatores relacionados às propriedades dos materiais em si, como relação água/aglomerante ou água/acimento, tipo de adição e tipo de cimento, entre outras tantas, é devida à limitação de recursos técnicos-financeiros e, principalmente, tempo.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

A apresentação do trabalho é feita em seis capítulos, conforme descrito na sequência.

No Capítulo 1 está a apresentação do assunto no qual se insere o tema da dissertação, focado sob o ponto de vista da durabilidade das estruturas de concreto. Constam ainda a justificativa, bem como os objetivos a serem atingidos pelo trabalho. Também estão explicitados o método de trabalho, sua estrutura e limitações.

A revisão bibliográfica está nos Capítulos 2 e 3. No Capítulo 2 são abordados aspectos gerais sobre o fenômeno da corrosão da armadura no concreto, seu mecanismo e os fatores que controlam a sua propagação. Também são abordados fatores que influenciam a resistividade elétrica do concreto, de modo a subsidiar, com informações necessárias, a análise dos resultados obtidos nos ensaios. Já o Capítulo 3 descreve as normas existentes para medidas de resistividade, métodos e fatores dos métodos que influenciam o resultado.

No Capítulo 4 está a descrição do programa experimental. São relatadas todas as etapas relacionadas aos ensaios, desde o planejamento, escolha dos ensaios realizados, procedimentos, bem como as justificativas para as decisões tomadas.

A apresentação e discussão dos resultados dos ensaios estão no Capítulo 5. Os argumentos são embasados na revisão bibliográfica, com considerações sobre os resultados fundamentados em análise estatística.

No Capítulo 6 são feitos os comentários finais, e são relatadas, de maneira sucinta, as conclusões obtidas com a realização do trabalho. Também faz parte deste capítulo sugestões para a continuidade do trabalho.

## 2 CORROSÃO DA ARMADURA NO CONCRETO E EFEITO DAS CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO NA RESISTIVIDADE ELÉTRICA

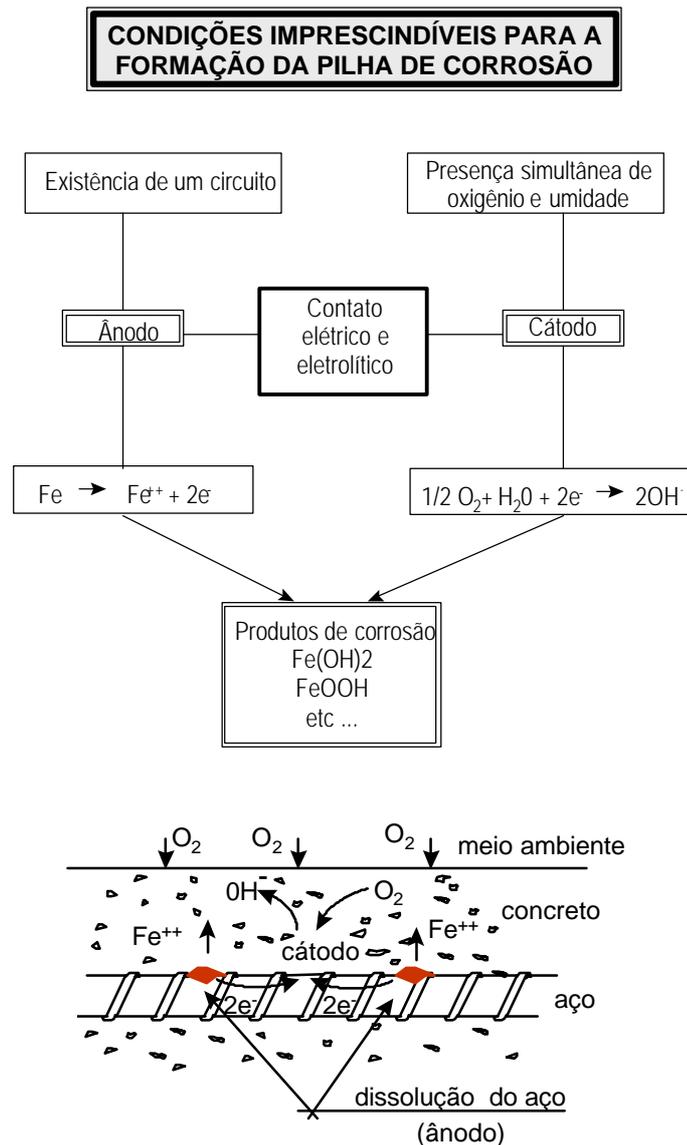
### 2.1 A CORROSÃO DA ARMADURA NO CONCRETO

A corrosão é a interação destrutiva entre um material e o meio ambiente, quer seja por reação química ou eletroquímica.

A corrosão metálica quando ocorre em um meio aquoso, como é o caso da corrosão da armadura no concreto, é um fenômeno eletroquímico, o que significa dizer que existe uma reação de oxidação e uma de redução, bem como a circulação de íons através do eletrólito em um circuito fechado. Assim, Helene (1986), coloca que para haver corrosão é necessário que sejam satisfeitas as seguintes condições:

- deve existir uma **diferença de potencial de eletrodo**: pode ser causada por diferença de umidade, aeração, concentração salina, tensão e/ou heterogeneidades no concreto ou no aço (Moskvin 1983; Helene, 1986);
- deve existir um **eletrólito**: caracterizado pela solução presente nos poros do concreto, o eletrólito normalmente está disponível em quantidade suficiente para possibilitar o contato eletroquímico entre o cátodo e o ânodo (Helene, 1993) e
- deve existir **oxigênio**: o acesso do oxigênio é possibilitado pela porosidade do concreto, que promove sua interação com o meio. Sua presença está intimamente ligada ao teor de umidade nos poros do concreto. No processo de corrosão o oxigênio é necessário para as que ocorram as reações de redução (Moskvin 1983).

Na Figura 2.1 é apresentado um esquema de uma pilha de corrosão bem como os fatores que possibilitam o processo corrosivo.



**FIGURA 2.1** Formação de uma pilha de corrosão - adaptação (Moskvin 1983; Andrade, 1995)

Devido às heterogeneidades inerentes ao concreto, os requisitos necessários para que ocorra a corrosão são sempre satisfeitos (Moskvin 1983). Entretanto, se a corrosão não ocorre normalmente é porque a alcalinidade da fase líquida do concreto ( pH ~12,6 a ~14), normalmente saturada com hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), propicia a passivação do aço (Andrade, 1995).

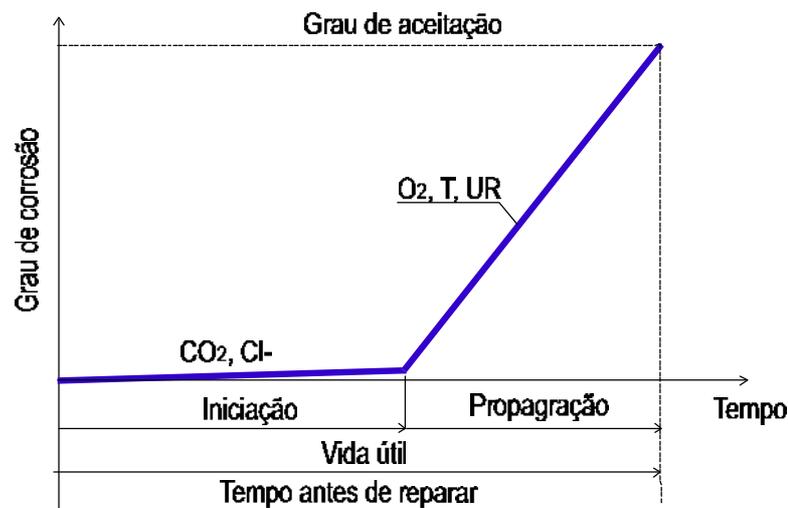
A passivação do aço ocorre pela formação de um filme constituído basicamente por  $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (West, 1970). A passivação mantém-se estável em concretos com pH acima de ~11,5, podendo ser caracterizada por potenciais superior a -200 mV (cobre-sulfato de cobre). Valores de potencial inferiores a -200 mV porém maiores que -1000 mV estariam associados ao estado ativo (ASTM C 876).

Pourbaix (1974) desenvolveu diagramas que relacionam potencial e pH, onde pode-se prever as circunstâncias nas quais tem-se corrosão, imunidade ou passividade (Gentil, 1996). De acordo com estes diagramas, o ferro em presença de oxigênio é passivo para pH de até aproximadamente 8, em consequência da formação de um filme de óxido protetor que se mantém íntegro, quando em soluções isentas de Cl<sup>-</sup> (Gentil, 1996).

## 2.2 CAUSAS DA CORROSÃO DA ARMADURA NO CONCRETO

A durabilidade das estruturas de concreto armado é resultado da ação protetora do concreto sobre o aço (Andrade, 1995). Quando a passivação do aço deixa de existir, a estrutura torna-se vulnerável ao fenômeno da corrosão e nestas condições é controlada pela resistividade elétrica e pela disponibilidade de oxigênio, fatores que são apresentados no item 2.3.

Tuutti (1982) propõe um modelo de vida útil baseado na corrosão em estruturas de concreto no qual são identificadas duas fases distintas: **iniciação** e **propagação**. Um esquema deste modelo está ilustrado na Figura 2.2.



**FIGURA 2.2** Modelo de vida útil (Tuutti, 1982)

Conforme pode ser constatado Figura 2.2, cada uma das fases ocorrem em circunstâncias diferentes, ou seja, os fatores que intervêm em cada uma destas fases são distintos, e estabelecem de forma clara a evolução do fenômeno da corrosão. Nos itens 2.2.1 e 2.2.2 são apresentadas estas duas fases, bem como os fatores intervenientes de maior relevância em cada uma delas.

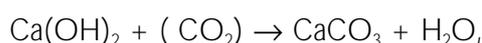
### 2.2.1 Iniciação

O período de iniciação é uma fase onde o concreto da estrutura pode estar sob a ação de dois fatores, que são:

- diminuição da alcalinidade do concreto por reação com substâncias ácidas do meio, principalmente o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), presente na atmosfera (carbonatação);
- presença de quantidade suficiente de cloretos, tanto os que estão contidos no concreto quanto os provenientes do exterior, e outros íons despassivantes em contato com a armadura.

Estes fenômenos podem ocorrer no concreto de forma simultânea ou isolada, provocando a destruição da camada passivante do aço.

No processo de **carbonatação**, o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) existente no ar ou em águas agressivas se combina com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), formando carbonato de cálcio, ( $\text{CaCO}_3$ ), menos solúvel (Gentil, 1996):



o que diminui o valor do pH da solução aquosa para 8,5-9, levando o aço à despassivação.

Outras substâncias alcalinas como o NaOH e o KOH também reagem no concreto de forma semelhante, contribuindo para a diminuição do pH.

A velocidade do processo de carbonatação é função de diversos fatores tais como: concentração de  $\text{CO}_2$  no meio, umidade relativa do ambiente, tipo e quantidade de cimento, relação água/ cimento, etc. De acordo com o ACI 201.2 R (1991), as taxas mais altas de carbonatação ocorrem quando a umidade relativa do ambiente é mantida entre 50 e 75%.

Já os **íons cloreto** podem estar presentes no concreto tanto devido à sua incorporação ao concreto por ocasião da mistura, quanto devido ao ingresso por meio da rede de poros do concreto, necessitando da ocorrência de oxigênio em quantidade suficiente e de heterogeneidades geométricas na interface aço/ concreto para provocar a despassivação do aço (Moskvin 1983; Gonzalez et al., 1992).

A presença de cloretos sob a forma combinada no concreto não provoca a despassivação da armadura (Hansson e Hansson, 1985). Entretanto, existe um teor limite, acima do qual os íons cloreto estão livres para atacar a armadura. Acredita-se que a quantidade mínima de íons cloretos necessários para despassivar e atacar a armadura está relacionada com a

quantidade de íons hidroxilas ( $\text{OH}^-$ ). Tem sido sugerido valores em torno de 0,6 para relação  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$  (Bakker, 1988; Mehta e Monteiro, 1994).

Em pesquisas realizadas por Goñi et al. (1989) com soluções sintéticas, foi obtida uma relação linear (em dupla escala logarítmica) entre a relação  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$  e a taxa de corrente média, a partir da qual os autores obtiveram o limite 0,6 dos primeiros, originando valores de taxa de corrosão ( $i_{\text{corr}}$ ) de  $0,2 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$  (valor citado pelos autores como limite entre a taxa de corrosão significativa e não relevante). Os referidos autores também constataram que o efeito condutivo do íon  $\text{Cl}^-$  no valor global da condutividade decresce com o incremento do pH, sendo anulada quando o pH atinge o limite de 13,7, independente do teor de cloretos.

Em trabalhos subsequentes, Goñi et al. (1990) verificaram que a relação  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$  das soluções dos poros de corpos de prova de argamassa resultaram entre 0,25 e 0,41 para 1% de adição de cloreto de sódio (NaCl) e de 0,5 a 1,7 para 3% de NaCl. Foi observado que para baixos valores da relação  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$  (0, 0,25 e 0,41), a  $i_{\text{corr}}$  esteve sempre menor que  $0,2 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ , e portanto, de acordo com as expectativas.

Entretanto, segundo Kayyali e Haque (1995), o limite 0,6 da relação  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$  está também relacionado à fonte de cloretos, ou seja, se os cloretos estão incorporados ao concreto ou são provenientes do exterior, sendo que no último caso, o valor limite seria de 3 para a relação  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$ . Por outro lado existe o fato de que a relação entre o teor de  $\text{Cl}^-$  livres e o teor de cloretos totais no concreto é dependente das características individuais de cada concreto, o que torna difícil qualquer generalização (Kayyali e Haque, 1995 e Dhir et al., 1994).

Segundo Gonzalez et al. (1992), as características das **capas passivantes** em concretos **sem cloretos** e **não carbonatados** impõem a cinética de deterioração, conduzindo a corrosão à velocidades tão pequenas que são compatíveis com a vida útil prevista na etapa de projeto da estrutura.

### 2.2.2 Propagação

A corrosão das armaduras é resultante da incapacidade do concreto exercer sua função protetora. Uma vez que o aço se encontre desprotegido (despassivado), a velocidade de deterioração da estrutura de concreto é determinada pelos seguintes fatores: **oxigênio** e **resistividade** (Mehta e Gerwick, 1982; Tuutti, 1982; Andrade, 1995).

A umidade é necessária para que ocorram as reações catódicas de redução do  $\text{O}_2$ , influenciando na resistividade do concreto e na permeabilidade ao  $\text{O}_2$  e outros gases. É sensível à temperatura, que por sua vez tem dois papéis importantes no processo: se por um lado seu

aumento estimula a mobilidade das moléculas e afeta a solubilidade de várias substâncias, por outro, contribui para a perda de umidade; quando a temperatura diminui, pode ocorrer condensação no concreto, ocasionando aumento da umidade do material (Andrade, 1995).

Com o aumento da umidade, há o aumento da condutividade do concreto e o desenvolvimento da corrosão é facilitado. Quando os poros estão saturados, a resistividade é baixa e nestas condições, a difusão do oxigênio é reduzida, resultando em velocidade de corrosão baixa ou moderada, como é o caso das estruturas submersas.

Se os poros contém muito pouca umidade, a resistividade é muito elevada e o processo corrosivo é dificultado. Neste caso, a velocidade da corrosão será baixa mesmo que o concreto se encontre carbonatado e/ ou contaminado por cloretos (Andrade, 1995).

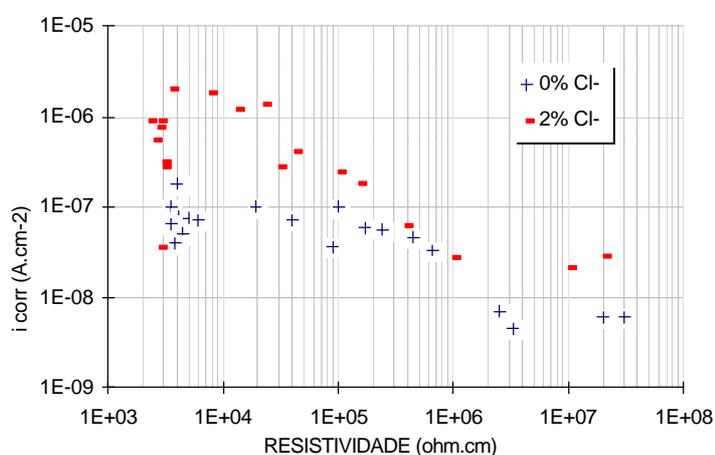
As maiores taxas de corrosão ocorrem quando o teor de umidade do concreto é alto, porém não saturado. O  $O_2$  chega até a armadura e a resistividade é baixa o suficiente para permitir elevadas velocidades de reação. De acordo com Gjordv et al. e Lopez, citados por Gonzalez et al. (1992), uma vez que a armadura se encontre despassivada, a **resistividade e difusão de oxigênio** é, em última análise, o fator limitante da velocidade de corrosão.

## 2.3 RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO

A resistividade do concreto é atribuída à comunicabilidade da rede de poros e à alta concentração de íons  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $OH^-$  e  $Cl^-$  na solução dos poros (Hansson et al. citados por Enevoldsen et al., 1994 e Hansson e Hansson, 1983), ou seja, a movimentação dos íons no concreto está intimamente relacionada à umidade contida nos poros do mesmo. Sendo assim, num mesmo elemento de concreto podem ser caracterizadas pelo menos duas regiões, onde os valores da resistividade são distintos: uma mais superficial, correspondente à região de cobertura da armadura e que sofre ciclos permanentes de molhagem e secagem, denominada **resistividade elétrica aparente**, e outra mais interna, onde a umidade é mais estável, chamada **resistividade elétrica volumétrica**. Do ponto de vista da corrosão das armaduras tem maior interesse a resistividade elétrica aparente (Helene, 1993).

Valores típicos de resistividade do concreto variam de 10 a  $10^5$  ohm.m, sendo influenciados, além de pela umidade, também pela composição do concreto. Geralmente aumenta para baixas relações a/c, ou adições de cinza volante, escória de alto forno ou sílica ativa. Normalmente, um concreto com altas relações a/c e sem adições tem baixa resistividade elétrica. O efeito destes fatores são abordados de forma mais detalhada no item 2.4.

Na célula de corrosão, a resistência do eletrólito representa a taxa de transporte iônico, que é um dos fatores controladores da taxa de corrosão. De acordo com a teoria, a taxa de corrosão é inversamente proporcional à resistividade, salvo em situações de saturação ou de valores de resistividade muito altos. Esta relação foi comprovada através de experimentos de laboratório e em investigação de campo por vários pesquisadores, como por exemplo Polder et al. (1994). Investigando corpos de prova expostos ao ambiente de laboratório e em ambiente marinho, estes pesquisadores verificaram que existe uma relação entre a resistividade do concreto e a taxa de corrosão, e que parecem existir diferentes relações para diferentes tipos de cimentos. É também considerado pelos autores a influencia de fatores como, no caso, o teor de cloretos. Através de ensaios em que os corpos de prova foram colocados na zona de respingos, foi identificado o efeito da composição do concreto e da espessura de revestimento das armaduras nas taxas de corrosão. Os melhores resultados foram obtidos nos concretos com adição de escórias alto forno e cinzas volantes em relação a concretos sem adição. Gonzalez et al. (1992) também constataram uma proporcionalidade inversa entre a resistividade e a  $i_{corr}$  para argamassas com cloretos, que se manteve por uma considerável gama de valores. Entretanto, esta relação não se verificou para as situações extremas, de resistividade menores que  $3 \times 10^3$  ohm.cm ou maiores que  $10^6$  ohm.cm. Os resultados obtidos pelos autores encontram-se na Figura 2.3.



**FIGURA 2.3** Resistividade versus taxa de corrente de corrosão (Gonzalez et al., 1992)

Observa-se que, em presença de  $Cl^-$ , a  $i_{corr}$  é multiplicada por um fator de dez ou mais em relação a taxa de corrosão de  $0,2 \mu A.cm^{-2}$ , o que para Gonzalez et al. (1992) parece indicar uma transição ao estado ativo. A redução da  $i_{corr}$  a valores quase dez vezes menores nos

corpos de prova sem  $Cl^-$  sugere aos autores o fortalecimento das características protetoras da capa de passivação.

Os resultados obtidos por Gonzalez et al. (1992) para resistividade *versus*  $i_{corr}$  (Figura 2.4) estão coerentes com o critério de avaliação da resistividade proposto CEB 192 (1988), apresentado no Quadro 2.1.

**QUADRO 2.1** Critério de avaliação da resistividade CEB 192

Resistividade do concreto	Probabilidade de corrosão
> 20000 ohm.cm	Desprezível
10000 a 20000 ohm.cm	Baixa
5000 a 10000 ohm.cm	Alta
< 5000 ohm.cm	muito alta

A relação entre a resistividade do concreto, a taxa de difusão de oxigênio e a taxa de corrosão é sugerida por Kranc e Sagüés (1994). Foi desenvolvido pelos autores um sistema de modelagem por elementos finitos para pilares cilíndricos de concreto armado de pontes em ambiente marinho. Como dados de entrada eram fornecidos, entre outros, a resistividade do concreto e a difusão de oxigênio ao longo do pilar a partir da concentração externa de oxigênio, sendo obtidos como resposta resultados de consumo de oxigênio e taxa de corrosão. A análise de vários casos com diferentes dimensões e distribuições de difusão de  $O_2$  leva os autores à conclusão de que a nível global, a corrosão aumenta com o incremento da difusão de oxigênio e redução da resistividade do concreto. A difusão do oxigênio, por sua vez, teria maior impacto na atividade de corrosão, que as trocas observadas nos valores da resistividade do concreto. Os valores de resistividade obtidos pelos autores foram de 2000 a 10000 ohm.cm. Comparando estes valores com os disponíveis na Tabela 2.1 e com os obtidos por Gonzalez et al. (1992), (Figura 2.3), verifica-se que os valores obtidos por Kranc e Sagüés (1994) encontram-se no intervalo no qual a probabilidade de haver corrosão é alta ou muito alta, e portanto parece coerente que estes tenham observado a pouca influência da troca dos valores de resistividade na taxa de corrosão em relação ao efeito da difusão de oxigênio.

Semelhante a esta investigação é o trabalho desenvolvido por Berke e Hicks (1994), que realizaram pesquisas de laboratório com o objetivo de validar um modelo para prognóstico de penetração de cloretos ao longo da vida útil da estrutura de concreto. Utilizando a ASTM 1202, os autores obtiveram coeficientes de difusão de cloretos ( $D_{eff}$ ) dos exemplares de concreto, que são diferentes em função da presença de pozolanas e outras adições, da relação a/c, temperatura, etc. A partir de equações relacionando  $D_{eff}$ , resistividade e permeabilidade, foram obtidos resultados em modelos unidimensionais e bidimensionais, destinados à

modelagem do ingresso de íons  $\text{Cl}^-$  em ambiente marinho. Entretanto, Gjorv (1996) considera que, embora o método normalizado pela ASTM 1202 não forneça informações específicas sobre o fluxo de cloretos ou mobilidade de cloretos através do concreto, o ensaio reflete sua resistividade elétrica. Esta colocação vai de encontro ao proposto por Berke e Hicks (1994), que sugerem o uso de medidas de resistividade elétrica como uma forma não destrutiva de estimar a difusão de cloretos, uma vez que os resultados de resistividade elétrica podem ser mais facilmente obtidos.

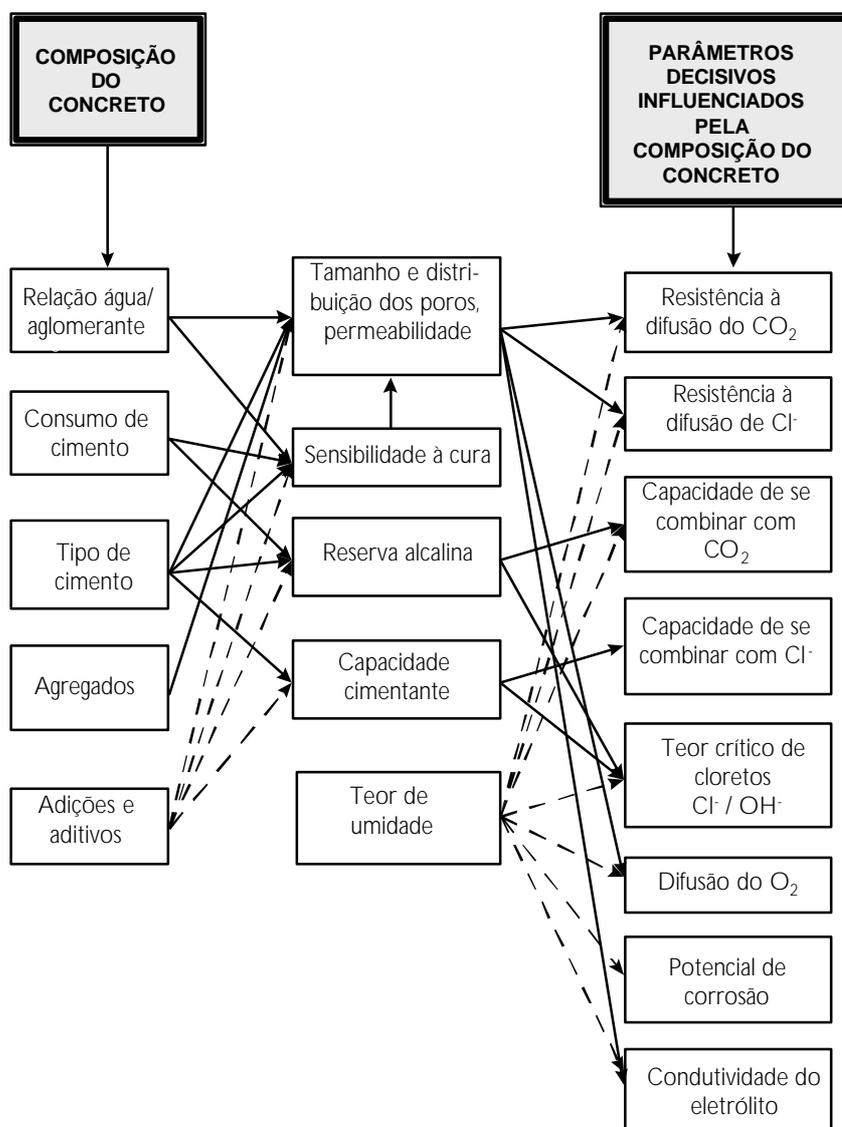
De acordo com o exposto, pode ser constatado que a resistividade elétrica é uma propriedade que reflete uma ampla gama de informações sobre as propriedades dos concretos pesquisados ou de uma estrutura em vistoria. Entretanto, devido à grande variedade nas propriedades do concreto e à forma como estes fatores interagem com o meio, resultados de ensaios de resistividade requerem informações adicionais para que possam ser devidamente interpretados.

## 2.4 CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO E FATORES QUE INFLUENCIAM SUA RESISTIVIDADE ELÉTRICA

A resistividade elétrica no concreto é uma propriedade extremamente sensível às características do mesmo, quer sejam elas físicas ou químicas. O concreto pode ser considerado como um sistema compósito, com vários tamanhos de agregados e partículas embebidas em uma matriz de pasta de cimento. A resistividade do compósito dependerá da resistividade das partículas, da resistividade da matriz e do volume relativo dos dois materiais (Monfore, 1968).

A matriz de cimento no concreto consiste basicamente em silicato de cálcio hidratado (C-S-H), hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), sulfoaluminatos de cálcio e grãos de clínquer anidro. A estrutura da pasta de cimento hidratada também é constituída por diferentes tipos de vazios, que são classificados principalmente em função de suas dimensões. Os espaços interlamelares no C-S-H tem dimensões de poucos Angstroms (Å). Já os poros não preenchidos pelos produtos de hidratação ou pelo cimento, denominados vazios capilares, tem dimensões variando entre 0,01 a 1  $\mu\text{m}$ , dependendo da relação água/cimento ou 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 Figura 2.4 apresenta, de forma esquemática, a influência da composição do concreto em suas propriedades, e seu efeito nos diversos parâmetros relacionados à corrosão da armadura.

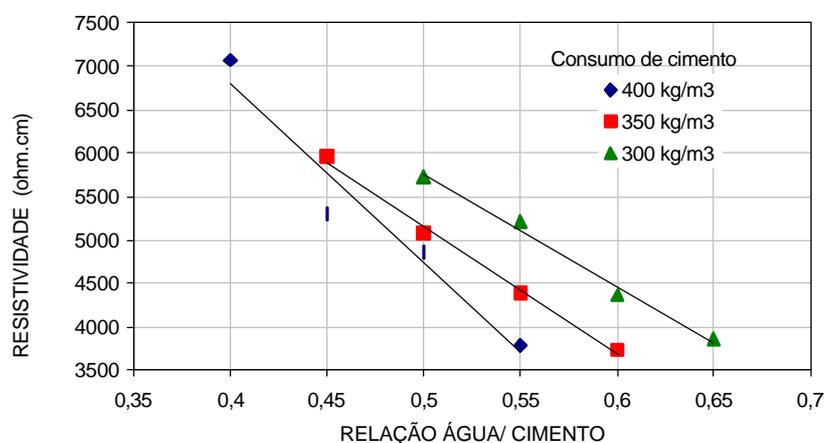


**FIGURA 2.4** Influência da composição do concreto em parâmetros que governam a proteção da armadura contra a corrosão (Schiessl,1987).

A partir da figura 2.4, verifica-se que todos os fatores que participam da composição do concreto, bem como fatores que afetam propriedades químicas ou físicas do concreto influem, de alguma forma, na sua condutividade elétrica, ou seja, na resistividade. Portanto, a resistividade é característica para as mais variadas composições de concreto e condições do entorno (influência da temperatura, umidade e agressividade do meio). Os itens a seguir descrevem os principais fatores que envolvem a composição e propriedades do concreto, relacionando-os à resistividade elétrica.

### 2.4.1 Efeito da relação água/ aglomerante e consumo de cimento

A qualidade potencial do concreto depende principalmente da relação água/ cimento e do tipo de cimento (Bakker, 1988). A relação água/ cimento desempenha um papel fundamental nas características físicas do concreto. Influi na permeabilidade e capacidade de absorção de água pelo concreto (Helene, 1986). Quanto maior a relação água/ cimento, maior será a porosidade e permeabilidade de um concreto e, a princípio, menor será sua resistividade elétrica. A Figura 2.5 ilustra a influência do teor de cimento e relação água/cimento na resistividade elétrica do concreto, obtidas por Hughes et al. (1985) utilizando cimento Portland comum aos 28 dias, em cura úmida.



**FIGURA 2.5** Relação entre a resistividade elétrica e a relação água/ cimento em concretos de cimento Portland comum aos 28 dias em cura úmida (Hughes et al., 1985).

Observa-se na Figura 2.5 que existe uma interação relacionando os valores da resistividade, a relação água/ cimento e o consumo de cimento por metro cúbico. À medida que a relação água/ cimento diminui, ocorre um incremento gradual no valor da resistividade do concreto, sendo que com a redução da relação água/ cimento, para uma mesma relação água/ cimento, a diferença de resistividade entre os diferentes concretos diminui. Isto parece indicar que o consumo de cimento é o fator de menor importância para concretos com baixa relação água/ cimento.

### 2.4.2 Efeito do grau de hidratação da pasta e tempo de cura

A variação do valor de resistividade no concreto com o tempo está relacionada com a hidratação da pasta de cimento e é um indicativo da taxa na qual as reações químicas ocorrem dentro da pasta (Laksminarayanan et al., 1992).

De acordo com 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  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{SO}_4^{--}$  e  $\text{OH}^-$ , cujas concentrações variam com o tempo. A concentração de alguns íons aumenta enquanto que a de outros diminui. Assim, com a evolução da hidratação a porosidade vai diminuindo e os vazios, que inicialmente eram ocupados pelo eletrólito, vão sendo preenchidos pelos compostos que se formam no decorrer do tempo.

Segundo Monfore (1968), a condutividade através da umidade do concreto pode ser visualizada como um movimento de íons na água evaporável da matriz, e em alguns casos nos poros das partículas de agregados; qualquer fator que afete a quantidade ou a propriedade do líquido, tipo ou quantidade de íons influenciará a resistividade.

### **2.4.3 Efeito da permeabilidade e porosidade do concreto**

De acordo com ACI 201.2R (1991), a permeabilidade do concreto aos gases, à água e aos cloretos é a propriedade mais afeta o processo de corrosão. A porosidade é inerente ao concreto, sendo consequência de fatores tais como relação água/cimento, tipo de cimento, adições, condições de cura, etc. A permeabilidade tanto à água quanto aos gases depende da maior ou menor comunicação entre os poros capilares, e não só da porosidade ou volume de vazios totais do concreto. A penetração de soluções de eletrólitos e gases, como o oxigênio e o  $\text{CO}_2$ , irá ocorrer em regiões mais permeáveis e porosas, tornando a resistividade do concreto baixa. Isto significa dizer que um concreto com alta resistividade é obtido com baixa porosidade (Gentil, 1996).

Para uma mesma umidade relativa ambiente, a distribuição de tamanho dos poros determina o teor de umidade, a espessura da camada de eletrólito e a disponibilidade de oxigênio na superfície do aço. A adição de pozolana pode ser uma solução para se obter uma melhoria na distribuição de tamanho dos poros, além de uma redução na porosidade (Mehta e Monteiro, 1994).

### **2.4.4 Efeito do teor de umidade**

A quantidade de água no concreto é consequência de fatores como relação água/cimento, porosidade, umidade relativa do ar, etc. A umidade relativa é um parâmetro decisivo para o grau de saturação dos poros, que por sua vez controla a resistividade elétrica do concreto de cobertura e desta forma, limita a transferência de carga elétrica entre áreas anódicas

e catódicas do aço. Assim, quanto mais saturado estiverem os poros de concreto, menor será a resistividade elétrica e mais elevada, a princípio, a velocidade de corrosão. Por outro lado, o grau de saturação dos poros é um dos fatores que controla a disponibilidade de oxigênio na barra de aço, porque a difusão de oxigênio é mais lenta no estado dissolvido que no estado gasoso (Enevoldsen et al., 1994). Sendo o oxigênio necessário para que ocorram as reações catódicas, é fato que se o concreto estiver saturado, a velocidade de corrosão será insignificante, compatível com a disponibilidade de oxigênio no local, conforme discutido no item 2.2.2.

Lopez e Gonzalez (1993) constataram que o grau de saturação dos poros (SP) tem um grande efeito na cinética de corrosão, determinando o estado de atividade na interface aço/concreto. Ensaios realizados em corpos de prova de argamassa permitiram aos autores identificar três valores críticos de saturação dos poros (SP):

- um limite superior (SP<sub>sup</sub>) coincidindo com a máxima taxa de corrosão, abaixo do qual começaria o controle por resistência; acima deste, o controle seria por difusão de O<sub>2</sub>;
- um limite inferior (SP<sub>inf</sub>), similar à umidade relativa crítica em corrosão atmosférica, abaixo da qual a corrosão que se desenvolve é insignificante e
- um limite superior prático (SP<sub>prat</sub>) que indica o início de uma taxa de corrosão inaceitável, e conseqüentemente, um potencial problema de durabilidade.

Analisando os resultados obtidos nos ensaios, os autores acima citados constataram que a resistividade permanece neutra à umidade  $SP > SP_{sup}$ , e a corrosão decresce gradualmente. Por outro lado, à  $SP < SP_{sup}$ , a resistividade aumenta exponencialmente e é inversamente proporcional à  $i_{corr}$  numa faixa de valores de resistividade de  $7 \times 10^3$  a  $1 \times 10^6$  ohm.cm, conforme pode ser constatado na Figura 2.4 (item 2.3).

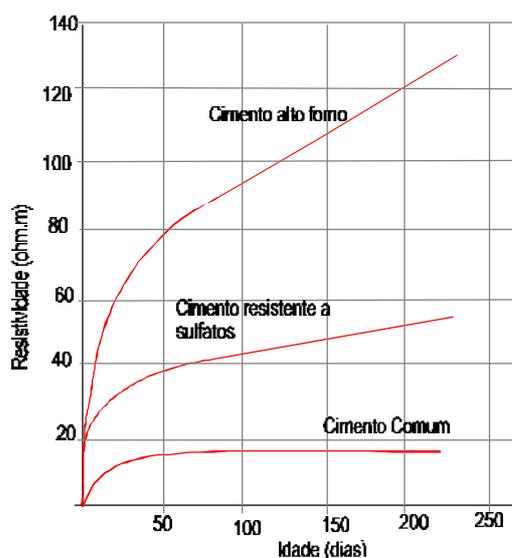
#### **2.4.5 Efeito do tipo de cimento e adições minerais**

As propriedades do concreto contendo cimento Portland são resultados das reações químicas entre os componentes do cimento e a água. Assim, diferenças existentes na composição do cimento repercutem nas propriedades do concreto. De acordo com Mehta e Monteiro (1994), estas diferenças existem como uma forma de adequar o concreto às necessidades da indústria da construção. Uma das formas de obtenção de cimentos diferenciados é através das adições minerais, que misturadas ao clínquer por ocasião da fabricação do cimento ou por ocasião da execução do concreto, contribuem para as alterações de propriedades químicas e físicas do concreto. Outra forma de obtenção de cimentos

diferenciados seria através da alteração dos teores dos seus compostos principais (Bickzók, 1972; Mehta e Monteiro, 1994).

As adições minerais tradicionalmente misturadas ao clínquer podem ser pozolânicas e/ou cimentantes. De acordo com a ASTM C618, as pozolanas caracterizam-se por ser um material silicoso ou silicoso e aluminoso, o qual por si mesmo possuem pouco ou nenhum poder cimentante, mas quando finamente divididos e em presença de umidade, reagem quimicamente com hidróxido de cálcio e em temperaturas normais formam compostos que possuem propriedades cimentantes.

Assim como para as demais propriedades do concreto, a presença de adições minerais também se manifestam de forma significativa na resistividade. A Figura 2.6 ilustra alteração da resistividade com a idade de pastas de cimento com diferentes tipos de cimento, onde pode ser observada a influência do tipo de cimento na resistividade elétrica bem como o incremento da resistividade com a evolução das reações da hidratação.



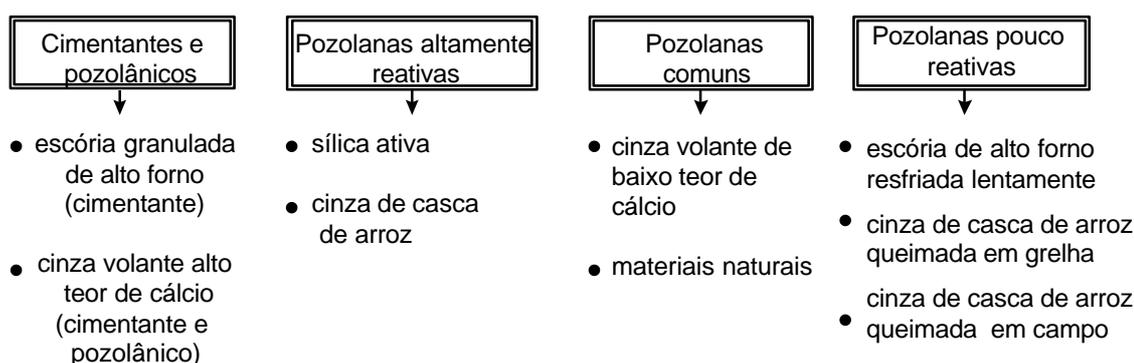
**FIGURA 2.6** Resistividade de pastas de diferentes tipos de cimentos, à 22°C e 100% e umidade relativa (Hansson e Hansson, 1983).

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

resistividade elétrica do concreto, como um resultado das características químicas que tem o concreto que recebe a adição.

Massazza (1993) classifica as adições minerais com base em sua origem. De acordo com este critério, as adições se dividem em: **pozolanas naturais**, que são derivados de rochas ou minerais vulcânicos e terras diatomáceas e **pozolanas artificiais**, representadas pelos subprodutos industriais cinzas volante, sílica ativa, cinzas de casca de arroz e argilas calcinadas ou termicamente ativadas.

Mehta e Monteiro (1994) classificam as adições minerais em dois grupos: **materiais naturais** e **subprodutos**. São materiais definidos como materiais naturais os que tenham sido processados com a única finalidade de servirem como adições pozolânicas. Já os subprodutos são materiais secundários obtidos de suas respectivas indústria produtora, que podem ou não requerer um processamento qualquer. A classificação das adições minerais é feita a partir de seu desempenho como material pozolânico e/ou cimentante, conforme ilustra a Figura 2.7.



**FIGURA 2.7** Classificação de adições minerais para concreto (adaptação de Mehta e Monteiro, 1994)

Concretos que são feitos com cimentos com adições apresentam características próprias decorrentes do tipo de adição utilizada. Entretanto, de uma forma geral, podem ser listados benefícios que são devidos a presença das adições tais como (Malhotra e Mehta, 1996):

- no concreto fresco, a utilização de pozolanas (exceto as de grande superfície específica, p. ex., sílica ativa), implica em melhoria na trabalhabilidade;
- como a reação entre a pozolana e o hidróxido é lenta, as reações de hidratação liberam baixo calor de hidratação, resultando em maior resistência à fissuração térmica;
- a reação pozolânica consome hidróxido, o que é uma importante contribuição para a durabilidade, uma vez que o hidróxido é um elemento que além de pouco

contribuir para a resistência, tem maior solubilidade que o C-S-H (Mehta e Monteiro, 1994);

- a distribuição de tamanho dos poros melhoram, porque ocorre maior preenchimento dos espaços capilares, conduzindo a concretos com melhores resistências e diminuindo a permeabilidade do sistema.

Além das vantagens técnicas obtidas com a utilização das adições, existem ainda aspectos ecológicos e econômicos a serem considerados. A quantidade de subprodutos pozolânicos e cimentantes gerados todos os anos em termelétricas e metalúrgicas é enorme, causando problemas relativos à sua disposição. Da mesma forma, a grande quantidade de cimento produzida (1 bilhão de toneladas/ano) é responsável por proporcional emissão de dióxido de carbono. Desta forma, a utilização de materiais pozolânicos parece ser uma forma de amenizar os problemas de poluição provocados pela produção do cimento, ao mesmo tempo que é uma forma de dar destino a alguns subprodutos, causadores de problemas ambientais (Malhotra e Mehta, 1996). Em vista da grande disponibilidade de literatura existente sobre adições minerais e materiais pozolânicos, bem como das investigações que tem sido feitas sobre concretos com adições minerais como os realizados por Silveira, (1996); Dal Molin, (1995); Isaia (1995); Vieira (1994); Kulakowski (1994), entre outros, os itens a seguir reportam-se apenas às pozolanas utilizadas neste trabalho.

#### 2.4.5.1 Cinza volante

Obtida pela queima do carvão em usinas termelétricas, as cinzas volantes contém alto teor de sílica e alumina. Possuem forma esférica, também apresentando-se em pequena quantidade como esferas ocas, denominadas cenosferas, quando estão vazias e plerosferas quando preenchidas com pequenas esferas. Normalmente, tem dimensões variando entre 1 e 100  $\mu\text{m}$  (Mehta e Monteiro, 1994). A maioria das cinzas usadas em concreto é a que contém baixo teor de cálcio (< 10% de cálcio), NBR 12653 Classe C. Entretanto, cinzas com alto teor de cálcio NBR 12653 Classe E têm sido comercializadas em países como os EUA, Canadá (Malhotra, 1993) e Grécia (Papayanni, 1993), onde o cimento contém teores de até 15% de adição. Além de propriedades pozolânicas, as cinzas com alto teor de cálcio também possuem propriedades cimentantes (ASTM C 618).

Devido a sua ação dispersante, as cinzas volantes proporcionam ao concreto melhor trabalhabilidade, reduzindo a demanda de água (Calleja, 1983), embora algumas exceções tenham sido verificadas (Alvarez et al., 1988; Malhotra, 1993).

A resistência do concreto com adição de cinza volante depende não apenas do método de proporcionamento da mistura (Malhotra, 1993), mas também do tipo de cinza, conforme exemplificam pesquisas realizadas por Alvarez et al. (1988). Os autores concluíram que os melhores resultados para ensaios de resistência à compressão foram obtidos em concretos com substituição de em torno de 30% de cinzas, sendo os resultados, neste caso, superiores aos do concreto de referência. No Brasil, de acordo com a NBR 5736, cinzas volantes podem ser adicionadas ao cimento em teores de até 50%.

Quando em meios com íons cloretos, concretos com adição de cinzas volantes normalmente apresentam melhor desempenho que concretos feitos com cimentos Portland sem adição, conforme atestam pesquisas realizadas por Tikalski et al. (1988) e Torii et al. (1994), entre outros. Hussain e Rasheeduzzafar (1994) constataram que 30% de cinzas volantes misturadas a cimentos com 14% de  $C_3A$  provocou grande melhoria na estrutura física do concreto endurecido, refinando significativamente a distribuição de tamanho dos poros e reduzindo o diâmetro médio dos poros de 240 Å para 166 Å. Como consequência, o coeficiente de permeabilidade e a difusividade dos cloretos diminuiu em torno de cinco vezes e a resistividade aumentou em 2,2 vezes. Da mesma forma, Rasheeduzzafar et al. (1987) verificaram que a resistividade elétrica de concretos de cimento Portland pozolânico (25% de cinzas volantes) apresentou incrementos 3 vezes superior aos concretos sem adição. Este incremento foi verificado em traços com relação água/cimento 0,35 a 0,65.

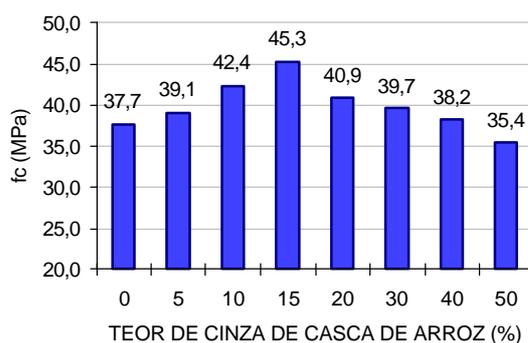
#### 2.4.5.2 Cinzas de casca de arroz

A adequação da cinza de casca de arroz como material pozolânico está intimamente relacionada ao seu processo de obtenção. Cinzas provenientes de combustão não controlada são geralmente cristalinas e de baixo valor pozolânico (Malhotra, 1993). Já a queima controlada, com temperaturas aproximadamente entre 500 até 700 °C, possibilita a obtenção de cinzas de alta pozolanicidade (Malhotra, 1993; James e Rao, 1986; Silveira et al., 1996 e Prudêncio Jr. e Santos, 1996).

A formação do silicato de cálcio hidratado, por reação da cinza de casca de arroz com a cal, é dependente da concentração de cal e das propriedades físico-químicas da cinza, ainda não muito claras (James e Rao, 1986). Análises químicas de cinzas produzidas por incineração mostram teor de sílica entre 90 e 95%, álcalis ( $K_2O$  e  $Na_2O$ ) de 1 a 2% e teor de carbono de 3 à 18 por cento (Malhotra, 1993), observando-se que neste último caso, o teor de sílica reduziria a valores em torno de 80%. Embora a composição química e mineralógica das pozolanas seja da maior importância para a reação pozolânica, a curto prazo a atividade

pozolânica depende, segundo Massazza (1993), da superfície específica da pozolana. De acordo com pesquisas realizadas por Al Khalaf e Yousift (1984), a reatividade mínima requerida para cinza de casca de arroz se obtém quando a superfície específica está próxima a  $11,50 \text{ m}^2/\text{g}$ .

Ensaio de resistência à compressão axial demonstram que a substituição de cinzas de casca de arroz em teores de até 50% a argamassas feitas com cimento CP-I-S-32 apresentaram resultados satisfatórios, conforme ilustra a Figura 2.8 (Prudêncio Jr. e Santos, 1996).



**FIGURA 2.8** Resistência à compressão axial de argamassas com cinzas de casca de arroz e relação água/aglomerante 0,52, aos 28 dias (Prudêncio Jr. e Santos, 1996).

Com base nos resultados observados na Figura 2.8 pode-se dizer que, do ponto de vista da resistência à compressão, a cinza de casca de arroz pode ser utilizada, a exemplo das cinzas volantes, em altos teores. Bons resultados em ensaios de resistência à compressão também foram obtidos por pesquisadores como Silveira (1996), que observou aumentos médios acima de 10% para adição de cinza de casca de arroz em teores de 0, 5 e 10%.

#### 2.4.5.3 Sílica Ativa

A sílica ativa é um subproduto de fornos a arco e indução das indústrias de ligas de ferro silício e de silício metálico (Mehta e Monteiro, 1994). A sílica ativa contém entre 85 e 98% de sílica e consiste de partículas esféricas extremamente finas, tendo diâmetro médio menor que  $0,1 \mu\text{m}$ , densidade  $2,2 \text{ g/cm}^3$  e superfície específica em torno de  $20 \text{ m}^2/\text{g}$  (Malhotra, 1993).

De acordo com Malhotra e Carrette (1983), a sílica ativa tem melhor desempenho que a cinza volante ou escória em relação à resistência à compressão, e os resultados de sua reação pozolânica são evidentes ainda nas primeiras idades.

Através de ensaios, Zhang et al. (1996) obtiveram incrementos de resistência à compressão de 5% em concretos com relação água/aglomerante 0,30 e com 10% de sílica ativa substituindo parte do cimento. Dal Molin(1995) observou aumentos entre 7 e 16%, em concretos com adição de 10% de sílica ativa, e com relação água/aglomerante entre 0,25 e 0,58.

De acordo com Pfeifer, Landgren e Zoob, citados pelo ACI 202.2R (1991), ensaios realizados em concretos de relação água/ cimento de 0,3 e 0,5 apresentaram basicamente a mesma resistência elétrica aos 28 dias. Os mesmos testes feitos em concretos com sílica ativa resultaram resistências elétricas extremamente altas, quando comparadas aos concretos sem adição. Da mesma forma Preece et al. (1983) observaram, em argamassas com adição de 24% de sílica ativa, valores de resistividade aproximadamente três ordens de grandeza superior às encontradas em argamassas de cimento resistente a sulfatos. Com base em pesquisas realizadas durante cinco anos, Torii et al. (1994) concluíram que corpos de prova com adição de 10% de sílica ativa, expostos a ambiente marinho, obtiveram melhor desempenho em meio corrosivo que concretos sem a adição, o que está coerente com os resultados de maior resistividade normalmente observado em concretos com adição de sílica ativa em relação a concretos sem adição.

## **3 MÉTODOS DE MEDIDA DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA**

### **3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Conforme visto em capítulos anteriores, medidas de resistividade elétrica do concreto podem ser utilizadas tanto para investigação de propriedades do concreto em laboratório ou para monitoramento *in loco* de estruturas de concreto. Especialmente neste último caso, quando associado com medidas de potencial de eletrodo, é um bom indicador do risco de corrosão.

Existem vários métodos de medida de resistividade. Entretanto, a grande maioria deles foi desenvolvida com a finalidade de atender projetos experimentais específicos, sendo adequados para pesquisas em laboratório. Foi descrito no item 2.3, que dependendo da região do elemento de concreto no qual se mede a resistividade, obtém-se informações diferentes: aparente, no caso de a resistividade corresponder a parte mais superficial do concreto, ou volumétrica, quando se referir a parte mais interna do concreto. Assim, o método a ser escolhido para medir valores de resistividade depende de como estes serão utilizados, uma vez que diferentes informações podem ser obtidas de cada uma das técnicas.

Neste capítulo são apresentados dois métodos de medida de resistividade. São também comentados alguns fatores que influenciam nos resultados obtidos, relacionados aos ensaios e aos concretos.

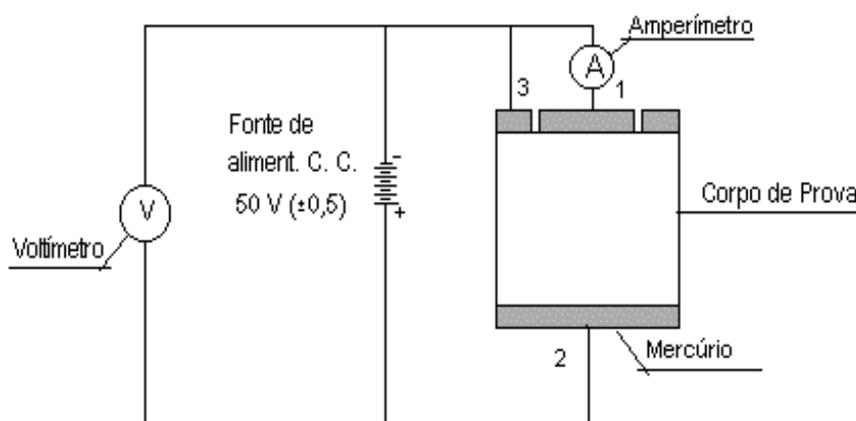
### **3.2 DETERMINAÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA VOLUMÉTRICA DO CONCRETO NBR 9204/1985**

O método descrito pela NBR 9204 permite a medida de resistividade elétrica volumétrica em laboratório, em corpos de prova moldados ou extraídos de estruturas.

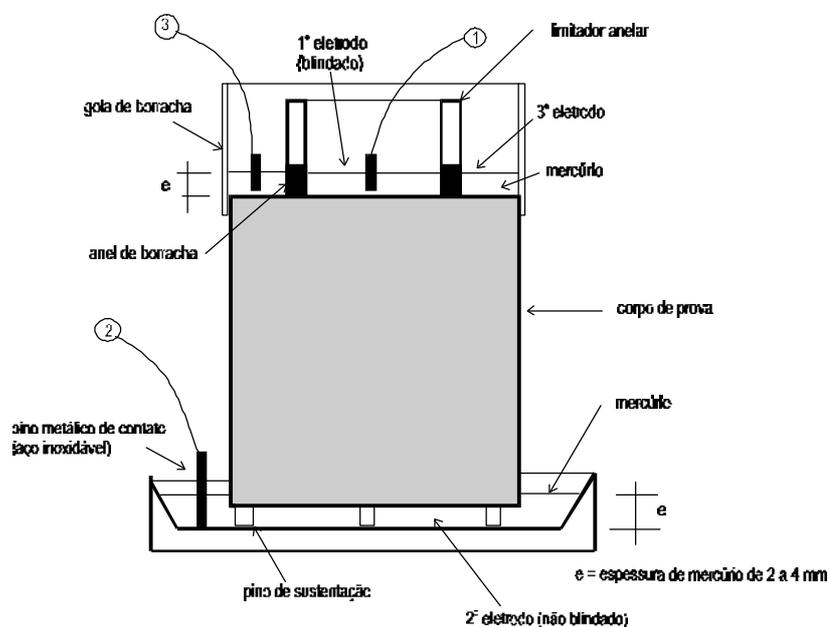
Neste ensaio são utilizados corpos de prova cilíndricos (15x15cm), obtidos de corpos de prova moldados de acordo com a NBR 5738, com dimensões 15x30. Aos sete dias de idade (incluindo as 24 horas de cura inicial), os corpos de prova tem suas extremidades

serradas ( $h = 7,5$  cm em cada extremidade), de forma a obter o tamanho de corpo de prova especificado.

São feitas medidas de resistividade elétrica volumétrica em diversas idades até a conclusão dos ensaios. Este ensaio é realizado monitorando-se a umidade do corpo de prova. A Figura 3.1 ilustra o esquema elétrico do ensaio e a Figura 3.2 ilustra a montagem do corpo de prova para ensaios. Segundo Palermo (1982), a colocação do terceiro eletrodo serve para eliminar erros causados por efeitos de superfície.



**FIGURA 3.1** Esquema elétrico para determinação da resistividade elétrica volumétrica segundo a NBR 9405/ 85.



**FIGURA 3.2** Esquema de montagem do corpo de prova para o ensaio de resistividade elétrica volumétrica segundo a NBR 9405/ 85.

Para realização do ensaio, aplica-se uma tensão de  $50 \pm 0,5V$ , com corrente contínua. Após 10 minutos faz-se a leitura da corrente (mA) que atravessa o corpo de prova. Por ocasião de cada ensaio são coletados os seguintes dados: massa do corpo de prova, temperatura e umidade nas imediações, tensão e corrente. O cálculo da resistividade elétrica volumétrica ( $\rho_v$ ) é feito usando a seguinte fórmula:

$$r_v = \frac{V.A}{I.h} \quad (3.1)$$

onde:

$\rho_v$  - resistividade elétrica volumétrica do corpo de prova na idade de ensaio, em ohm.cm;

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

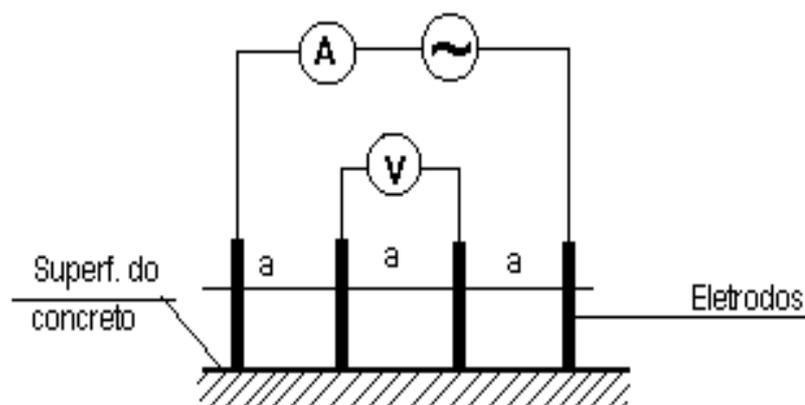
A - área do eletrodo principal ou blindado, em centímetros quadrados, (cm<sup>2</sup>), dada pela expressão:  $\pi.D^2/4$ , onde D é a média do diâmetro interno e externo do limitador anelar;

h - altura total do corpo de prova (cm);

I - corrente elétrica que atravessa o corpo de prova em miliampéres (mA).

### 3.3 MÉTODO DOS QUATRO ELETRODOS (MÉTODO DE WENNER)

O Método dos quatro eletrodos é um método normalizado pela ASTM G57, originalmente desenvolvido para uso em solos. A adaptação para uso em concreto tem sido objeto de muitos estudos, e em consequência disto foram desenvolvidos equipamentos que possibilitam medidas de resistividade *in situ*, de forma não destrutiva. A figura 3.3 ilustra o esquema elétrico para medida de resistividade.



**FIGURA 3.3** Método dos 4 eletrodos para medição de resistividade elétrica: A - Amperímetro V- voltímetro de alta impedância de entrada, e a distância entre os eletrodos.

O ensaio é realizado fazendo-se uso de uma fonte de alimentação de corrente alternada. É aplicada corrente entre os eletrodos externos. Entre os eletrodos internos é medida a diferença de potencial. Para a aquisição de dados confiáveis, Shreir (1963) comenta que os eletrodos devem estar equidistantes e em linha reta. O valor da resistividade, de acordo com a fórmula de Frank Wenner, é feito da seguinte forma (Medeiros Filho, 1979):

$$\mathbf{r} = R.k; \quad (3.2)$$

$$k = \frac{4\pi a}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}} \quad (3.3)$$

onde:

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

R - resistência medida pelo instrumento, em ohm;

a - distância de separação entre os eletrodos, em cm;

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

Entretanto, à profundidade  $b \leq \frac{a}{20}$ , Palmer concluiu que a resistividade pode ser

calculada da seguinte forma (Medeiros Filho, 1979):

$$\mathbf{r} = 2\rho a \frac{V}{I} \quad (3.4)$$

onde:

$\rho$  - resistividade elétrica (ohm.cm);

a - distância entre os eletrodos (cm);

V - diferença de potencial entre os eletrodo internos (mV);

I - corrente (mA).

Por ocasião de cada ensaio é importante que sejam coletados dados como: corrente, diferença de potencial, distância entre os eletrodos, temperatura do ar, umidade relativa, entre outros.

A expressão apresentada em 3.4 é a normalmente utilizada, uma vez que o contato elétrico é feito na superfície do concreto.

Shreir (1963) sugere o uso associado de eletrodos de referência (internos) com instrumentos de leitura direta. Entretanto, o autor comenta que somente será possível obter resultados precisos se a resistividade do eletrólito não exceder 2000 ohm.cm. Para medir potencial com resistividade do eletrólito acima de 2000 ohm.cm é recomendado o uso de um potenciômetro de alta resistência ou um voltímetro do tipo potenciômetro (Shreir, 1963).

### **3.3.1 Fatores intervenientes na utilização do método dos quatro eletrodos**

Dado a adequação do método dos quatro eletrodos para uso tanto em estrutura quanto em laboratório, foram desenvolvidos equipamentos para medida de resistividade de forma não destrutiva, uma vez que o uso de eletrodos enterrados em estruturas é impraticável (Millard et al., 1989). Em consequência disto, investigações feitas para o desenvolvimento desses equipamentos geraram informações sobre o comportamento do concreto. Algumas dessas informações são apresentadas na seqüência, e outras poderão ser encontradas nas referências relacionadas no texto.

#### **3.3.1.1 Efeitos devidos à polarização**

De acordo com vários autores, entre eles Monfore (1968), Ewins (1990) e Laksminarayanan et al. (1992), o uso de uma fonte de corrente contínua (CC) produz resultados que são difíceis de serem interpretados devido ao fenômeno da polarização. Assim, para evitar problemas de polarização, normalmente são utilizadas correntes alternadas (AC) para medidas de resistividade. O potencial de polarização resulta de reações que dependem de íons presentes e do material do eletrodo. Finos filmes de oxigênio, hidrogênio e outros gases podem formar-se nos eletrodos, interferindo no potencial criado (Monfore 1968). O potencial criado opõe-se ao aplicado, havendo assim queda no valor da corrente. Entretanto, segundo Monfore (1968), aparentemente os efeitos de polarização não são realmente evitados com uso de corrente AC, porém manifestam-se de formas diferentes. Jones e Christian, citados por Monfore (1968),

apresentam dados indicando que a polarização associada com a passagem de corrente AC através de um eletrólito tem efeito de uma capacitância em série com a resistência do eletrólito, enquanto Hamond e Robson, também citados por Monfore (1968), consideram a capacitância em paralelo com a resistência, modelo adotado pelo autor em sua pesquisa. Hasson e Hasson (1983), bem como Monfore (1968), sugerem que medidas de resistividade com correntes CC são mais adequadas desde que sejam descontados do valor total de corrente ou potencial, a corrente ou potencial devidos à polarização, respectivamente, conforme demonstra Monfore (1968) em seu trabalho.

### 3.3.1.2 Problemas de contato

Além da necessidade do uso de AC para resolver os problemas devidos ao fenômeno de polarização que ocorrem na interface entre o eletrodo e a superfície do concreto, outro problema, e maior, segundo Ewins (1990), é a resistência de contato entre o eletrodo e a superfície do concreto. A natureza de um contato elétrico ruim é variável e freqüentemente dificulta a avaliação dos resultados. Segundo Millard et al. (1989), o efeito pode ser insignificante se a resistência de entrada do voltímetro for alta o suficiente, sendo sugerido pelos autores o uso de equipamentos com resistência superior a 2 M.ohm.

Assim, observa-se que existe a necessidade da utilização de equipamentos de alta resistência não apenas devido às altas resistências de contato que podem haver na interface eletrodo/eletrólito, mas também devido à alta resistência do eletrólito, conforme comentado anteriormente.

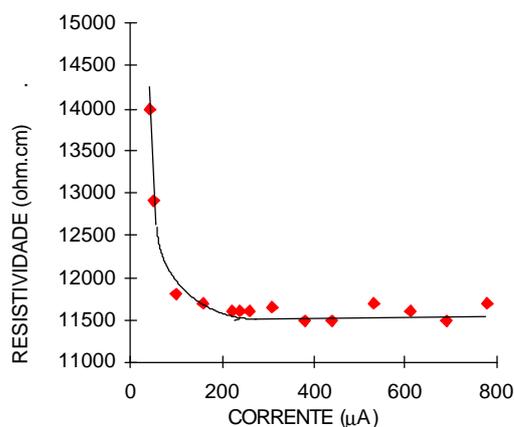
Millard et al. (1991) observaram, em medidas preliminares, utilizando eletrodos de metal pressionados contra a superfície do concreto, que os valores de resistividade apresentaram repetibilidade somente quando o concreto se encontrava úmido. Foi verificado também que, freqüentemente, as medidas de resistividade variavam significativamente com o grau de contato e a pressão aplicada.

Segundo Ewins (1990), se problemas de contato existem, é muito improvável que seja o mesmo em cada um dos quatro eletrodos. Assim, o instrumento de medida de resistência necessita não apenas ser capaz de superar a existência de alta resistência de contato, mas também os problemas criados pela possibilidade de grandes diferenças de resistência de contato entre os eletrodos, o que pode conduzir a erros significativos. De acordo com o já referido autor, resistências da ordem de 1Mohm podem ser encontradas na prática, especialmente em eletrodos enterrados. Entretanto, Millard et al. (1989), em testes de equipamentos de medida de

resistividade, confirmam a repetibilidade nos valores de resistividade medidos, com erros menores que em concretos secos, o que sugere o bom desempenho desses equipamentos.

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

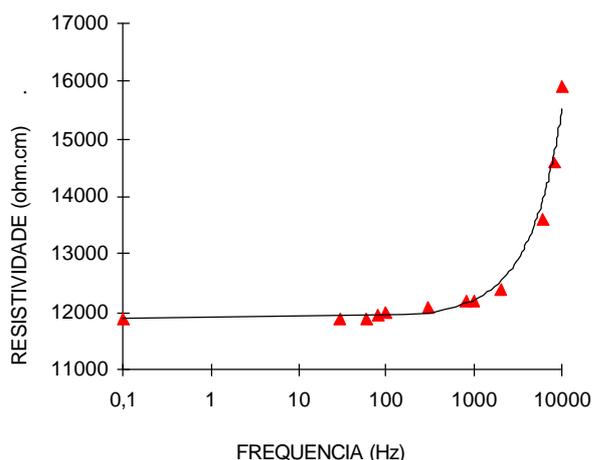
Millard et al. (1989) investigaram o efeito da intensidade de corrente no resultado de medida de resistividade. Fixando a frequência em 300 Hz, os autores fizeram variar a corrente. A Figura 3.4 ilustra o comportamento da resistividade em função do incremento de corrente.



**FIGURA 3.4** Resistividade aparente em função da corrente (MILLARD et al., 1989).

Dos resultados obtidos, os autores concluíram que correntes inferiores a 200  $\mu\text{A}$  devem ser evitadas. Por outro lado, se o fluxo de corrente for muito grande, são introduzidos erros devidos à resistência de contato entre o eletrodo e o eletrólito (Shreir, 1963).

O incremento da resistividade com o aumento da frequência foi identificada por Millard et al. (1989), conforme ilustra a Figura 3.5.



**FIGURA 3.5** Resistividade aparente em função da frequência (Millard et al., 1989).

O aumento da resistividade com o aumento da frequência é atribuído, pelo menos em parte, ao efeito capacitivo. Ewins, citado por Millard et al. (1989), propõe o uso da corrente com ondas quadradas para eliminar o efeito capacitivo, fazendo medidas de voltagem no meio do semi ciclo positivo. Entretanto, Millard et al. (1989) consideram os resultados de medidas de resistividade com correntes com ondas senoidais satisfatórias. Os autores obtiveram boas correlações quando compararam medidas realizadas utilizando ondas quadradas e senoidais e, segundo os autores, nenhuma das medidas diferiram mais que 6%.

#### 3.3.1.4 Efeito da armadura nas medidas de resistividade aparente

A influência da armadura na resistividade aparente do concreto pelo Método dos quatro eletrodos foi pesquisada por Gowers e Millard (1991) que constataram que a medida da resistividade pode ser dependente da frequência, devido à capacitância da dupla camada da interface aço-concreto, que possibilita um curto circuito ao longo da barra a altas frequências, mas não a baixas frequências. Os autores pesquisaram barras de aço imersas em solução de hidróxido de cálcio, argamassa e concreto. No primeiro caso (Figura 3.5), foram obtidas leituras de resistividade reduzidas a altas frequências (foram utilizadas pelos autores frequências entre 0,1 e 100 kHz), porém leituras de valores de resistividade verdadeiras a frequências abaixo de 10 Hz. As barras em estado ativo e passivo dos corpos de prova de concreto e argamassa apresentaram efeitos similares aos em solução de hidróxido de cálcio. Foi verificado que o valor da resistividade aparente diminui a altas frequências, porém tem aproximadamente o mesmo valor da resistividade verdadeira a baixas frequências. Entretanto, os autores verificaram uma não conformidade na situação extrema, de frequências muito baixas, nas situações pesquisadas. De acordo com Gowers e Millard (1991), a grande resistência da argamassa ou do concreto

comparada à do hidróxido de cálcio causa uma mudança a frequências muito baixas, e assim, para a barra em estado passivo, valores de resistividade aproximadamente verdadeiras foram medidas a frequências inferiores a 0,1Hz, enquanto que para barras em estado ativo, foram necessárias frequências de 0,02 Hz.

### 3.3.1.5 Dimensões do corpo de prova e limitações na estrutura

Segundo Millard et al. (1989), o uso de grandes espaçamentos pode conduzir a imprecisões devidas ao fato do campo de corrente ser restrito pelas bordas da estrutura estudada. O uso de grandes espaçamento entre os eletrodos também pode incrementar o erro na medida de resistividade devido ao aumento da condutividade do aço abaixo da superfície do concreto. De acordo com os autores, estes efeitos são inevitáveis, não podendo ser ignorados quando se interpreta resultados. Se o espaçamento é pequeno, a presença ou ausência de partículas individuais de agregado, que normalmente tem alta resistividade<sup>1</sup>, também induz a erros. Gowers e Millard (1991) sugerem que o espaçamento seja superior a duas vezes o diâmetro máximo do agregado.

O campo de corrente não penetra infinitamente. Wilkins, citado por Millard et al. (1989), diz que a proporção ( $p$ ) de corrente que passa dentro dos limites de uma distância  $Z$  da superfície é dada por:

$$p = \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left[ \frac{Z}{1,5 a} \right] \quad (3.5)$$

onde  $a$  é a distância entre dois eletrodos quaisquer. Assim, 77% da corrente flui dentro dos limites de  $4.a$  da superfície. Segundo Millard et al. (1989), na prática foi verificado que se os eletrodos estão espaçados a uma distância menor que um quarto da seção do concreto, então o erro devido à restrição do fluxo é menor que 20%. Em uma estrutura, o espaçamento dos quatro eletrodos determina a região do concreto a ser medida (Millard et al., 1989).

### 3.3.1.6 Efeito de camadas superficiais sobre a resistividade.

O efeito de camadas superficiais como às devidas à carbonatação ou secagem da camada mais externa do concreto foi investigado por Millard e Gowers (1991). Estes pesquisadores observaram que medidas em concretos carbonatados recentemente secos devem ser evitadas. Segundo os autores, os erros causados por uma baixa resistividade da camada

superficial serão muito maiores que por uma camada de alta resistividade, de espessura similar. Uma camada superficial com espessura da ordem de 0,01 vezes o espaçamento dos eletrodos pode dar resultados subestimados da resistividade do concreto na região de atividade de corrosão.

### 3.4 MÉTODOS PARA USO EM LABORATÓRIO

A literatura apresenta ampla variedade de técnicas de medida de resistividade elétrica de pastas de cimento e concreto. Além dos métodos descritos anteriormente, existem métodos possíveis de utilização apenas em laboratório, cujas técnicas, adequadas aos objetivos de cada investigação, não são padronizadas.

Entre os diversos métodos, um bastante utilizado para obtenção da resistividade é a da impedância eletroquímica.

A resistividade elétrica também pode ser obtida do AASHTO Standard T277/ 83 Rapid Chloride Permeability Test. Os valores são calculados pela determinação da constante da célula de teste, sendo usadas soluções de resistividade conhecida (Wolsiefer, 1991).

---

<sup>1</sup> Granito; 1.000.000 a 2.000.000 ohm.cm; basalto 150.000 a 1.000.000 ohm.cm (MEDEIROS FILHO, 1979)

## 4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O programa experimental foi planejado de forma a caracterizar o comportamento da resistividade elétrica de concretos convencionais, investigando o efeito dos fatores relação água/ aglomerante (a/agl), adições, idade e condições de armazenamento. O planejamento visava, inicialmente, identificar características do concreto tais como o aumento da resistividade do concreto em função da idade, o decréscimo da resistividade com o aumento da relação a/agl, bem como o comportamento diferenciado quando comparados concretos como diferentes tipos de adições e consumos de cimentos. As medidas de resistividade seriam feitas usando duas técnicas diferentes de medidas de resistividade, quais sejam: determinação da resistividade elétrica-volumétrica através do método de ensaio normalizado pela NBR 9204/85 (Determinação da resistividade elétrica volumétrica) e a determinação da resistividade elétrica aparente, fazendo-se uso do Método dos quatro eletrodos (Método de Wenner, adaptado para uso em concreto). Também estavam previstos ensaios de resistência à compressão axial, bem como a determinação da umidade, também descrito pela norma NBR 9204.

Assim, foram escolhidas como adições a cinza de casca de arroz (CCA) e a sílica ativa (SA), que foram adicionadas aos concretos feitos com cimento CPV-ARI. Os traços de concreto feitos com cimento CP V-ARI sem as adições são os concretos de referência. Também foi escolhido trabalhar com cimento Portland pozolânico (CP IV-32), por ser ele o cimento de uso corrente na região. Foram escolhidas três relações água/ aglomerante (0,5, 0,65 e 0,8).

Entretanto, com o desenvolvimento dos ensaios e já de posse de alguns resultados foi verificada a necessidade de melhor caracterizar propriedades do concreto relacionadas com a umidade e a porosidade. Com base nos trabalhos desenvolvidos por Lopez e Gonzalez (1993), optou-se por substituir a determinação da umidade (NBR 9204) pelo ensaio de grau de saturação dos poros, que foi realizado dentro dos critérios estabelecidos pela norma NBR 9778 Argamassa e concretos endurecidos determinação da absorção de água por imersão índice de vazios e massa específica, que foi executada na íntegra.

Por fim, ao término dos trabalhos de laboratório, decidiu-se verificar a perda de massa pela evaporação da água, visando complementar informações obtidas com os ensaios de índice de vazios e grau de saturação dos poros.

Os resultados de resistividade obtidos pelo método da norma NBR 9204 apresentaram grande variabilidade. Em alguns casos foram identificados coeficiente de variação de até 98%. Assim, devido a pouca consistência dos resultados obtidos, optou-se pela não análise neste trabalho. Por outro lado, a execução deste experimento possibilitou observar alguns eventos, que são comentados no item 5.5. Os resultados deste ensaio são apresentados no ANEXO B.

Neste capítulo estão relatados o projeto experimental, a caracterização dos materiais e a descrição dos ensaios. Os resultados, bem como a discussão, estão no capítulo 5.

## 4.2 VARIÁVEIS E ALEATORIZAÇÃO

A parte experimental foi realizada com base em um planejamento de experimento (Ribeiro, 1995).

Considerando que o objetivo do trabalho é a medida de resistividade elétrica do concreto e tendo em vista os diversos fatores que interferem no valor de resistividade, bem como as propriedades do concreto que correlacionam com a mesma, foram realizados os seguintes ensaios:

- Resistência à compressão axial;
- Índice de vazios e grau de saturação dos poros;
- Perda de água em função do tempo;
- Resistividade elétrica aparente (Método de Wenner)
- Resistividade elétrica volumétrica.

Conforme exposto anteriormente (item 4.1), foram escolhidos os seguintes fatores para serem investigados:

- Adições CCA e SA em teores de 6 e 12%, adicionados ao CP V-ARI;
- Tipo de cimento CP IV-32 e CP V-ARI (referência);
- Relação água/ aglomerante 0,5, 0,65 e 0,8;
- Idade conforme especificada em cada tipo de ensaio;
- Condições de armazenamento em função do tipo de ensaio.

O Quadro 4.1 apresenta a combinação dos fatores, e convenções utilizadas para os traços.

**QUADRO 4.1** Combinação dos fatores e convenção dos traços ensaiados

Água/ Aglomerante *	Adições ou Cimento	Teores		
		0%	6%	12%
0,50	Cinza casca arroz	-	C56	C52
	Sílica ativa	-	S56	S52
	Cim. Portl. Pozolânico (CP IV)	PZ5	-	-
	C. ARI (CPV ARI)	T5	-	-
0,65	Cinza casca arroz	-	C66	C62
	Sílica ativa	-	S66	S62
	Cim. Portl. Pozolânico (CP IV)	PZ6	-	-
	C. ARI	T6	-	-
0,80	Cinza casca arroz	-	C76	C72
	Sílica ativa	-	S76	S72
	Cim. Portl. Pozolânico (CP IV)	PZ7	-	-
	C. ARI (CPV ARI)	T7	-	-
Total				18 traços

Água/ aglomerante = (água + 0,6 aditivo)/ (cimento + adição)

No Quadro 4.2, estão totalizados os corpos de prova moldados para a execução dos ensaios.

**QUADRO 4.2** Relação dos ensaios realizados, idades de ensaio e número total de corpos de prova.

Ensaio	Idade dos ensaios (dias)	Número de corpos-de- prova
Resistência à compressão	3, 7, 28 e 91	216
Resistividade aparente Perda de água em função do tempo <sup>1</sup>	3, 7, 14, 28, 63, 91, 98, 112 e 217	72
Resistividade volumétrica Grau de saturação dos poros Índice de vazios <sup>2</sup>	28, 62 e 91	54
<b>Total</b>		<b>342</b>

<sup>1</sup> ensaios realizados aos 140 dias;

<sup>2</sup> ensaios realizados aos 91 dias de idade

A aleatorização para a execução dos traços de concreto é um fator de suma importância porque visa minimizar o efeito de variáveis como umidade relativa e temperatura, que embora interfiram nos resultados, não são possíveis de serem controlados. Em sendo assim, os dezoito traços foram divididos aleatoriamente em três grupos, cada um com seis traços e correspondendo a um dia de concretagem. Devido à otimização no uso da betoneira,

foram necessárias três betonadas de cada um dos traços para moldagem dos corpos de prova previstos, resultando assim três séries de concretagem. O Quadro 4.3 apresenta os diversos grupos de traços e sua organização.

**QUADRO 4.3** Aleatorização dos traços

Série	Grupo	Traços	Data moldagem
1	1	C56/1 T7/1 S52/1 S76/1 S62/1 C66/1	26/08
	2	S56/1 S72/1 C52/1 C76/1 PZ7/1- PZ5/1	27/08
	3	PZ6/1 C72/1 -T5/1 S66/1 C62/1 -T6/1	30/08
2	4	C56/2 T7/2 S52/2 S76/2 S62/2 C66/2	06/09
	5	S56/2 S72/2 C52/2 C76/2 PZ7/2 PZ5/2	09/09
	6	PZ6/2 C72/2 -T5/2 S66/2 C62/2 T6/2	10/09
3	7	C56/3 T7/3 S52/3 S76/3 S62/3 C66/3	13/09
	8	S56/3 S72/3 C52/3 C76/3 PZ7/3 PZ5/3	16/09
	9	PZ6/3 C72/3 -T5/3 S66/3 C62/3 T6/3	17/09

De cada betonada foram obtidos corpos de prova distribuídos da seguinte forma: quatro corpos de prova cilíndricos 9,5x19 cm para os ensaios de resistência à compressão; dois corpos de prova 17x10x10 cm para os ensaios de medida de resistividade aparente e um corpo de prova cilíndrico 15x30 cm para o ensaio de resistividade elétrica volumétrica. Com o decorrer da cura, os corpos de prova para medida de resistividade elétrica aparente inicialmente propostos (ANEXO A), não permitiram medidas de resistividade elétrica para idades mais avançadas, tendo sido notado baixos valores de corrente ainda aos sete dias de idade. A alta resistência verificada na realização dos ensaios foi atribuída à superfície de contato eletrodo/ concreto insuficiente. Assim, alterou-se o projeto do corpo de prova e os corpos de prova da série 1 foram descartados.

Os cronogramas estabelecidos para os diversos ensaios, bem como a aleatorização dos corpos de prova destinados ao ensaio de resistência à compressão, encontram-se no ANEXO A.

### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

#### 4.3.1 Cimentos e adições

##### 4.3.1.1 Cimentos

Foi escolhido para utilização como referência o cimento CPV-ARI, primeiro pelo fato de ele ser um dos cimentos Portland que apresenta o menor teor de adições em sua composição e segundo pelo fato de, possuindo as características desejadas, ser o de mais fácil obtenção.

O cimento CP IV-32 é um cimento normalizado pela norma NBR 5736, e recebe adição de cinzas volante por ocasião de sua fabricação, em teores que podem variar de 15 a 50%. A escolha do cimento CP IV-32 deve-se ao fato deste corresponder a quase totalidade do cimento consumido na região.

As características químicas e físico-mecânicas dos cimentos utilizados são apresentadas na Tabelas 4.4 e Quadro 4.5, respectivamente.

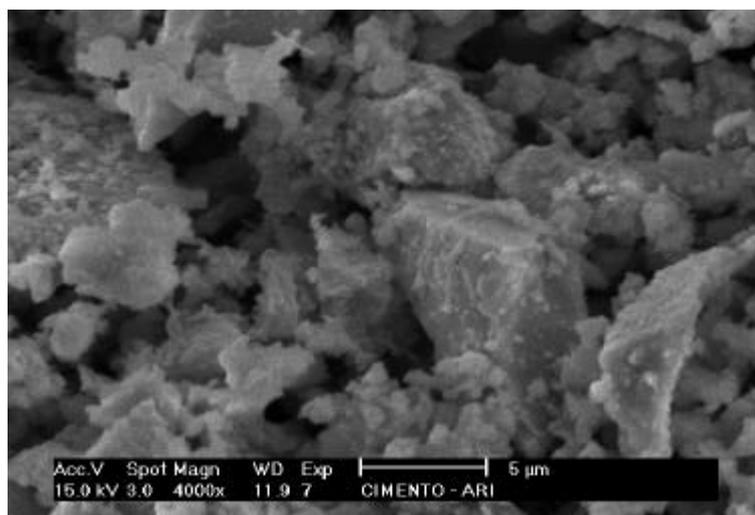
**TABELA 4.4** Características químicas dos cimentos.

	<b>C. ARI (%)</b>	<b>C. POZ</b>
SiO <sub>2</sub>	19,67	30,82
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,01	10,06
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,62	2,84
CaO	64,02	43,59
MgO	1,38	4,69
SO <sub>3</sub>	3,11	2,75
Na <sub>2</sub> O	0,03	0,13
K <sub>2</sub> O	0,84	0,89
Cal livre	1,48	1,77
Perda ao fogo	2,46	3,83
Resíduo insolúvel	0,56	31,52
Equivalente alcalino	0,58	0,71

**QUADRO 4.5** Características físico-mecânicas dos cimentos.

	<b>C. ARI</b>	<b>C. POZ</b>
Resíduo # 0,075 mm (%)	-	0,60
Resíduo # 0,045 mm (%)	1,90	5,40
<sup>2</sup> Teor de carbono (%)	3,27	4,84
<sup>3</sup> Peso específico (g.cm <sup>-3</sup> )	3,12	2,80
<sup>4</sup> Superfície específica (m <sup>2</sup> .g <sup>-1</sup> )	1,22	1,14
Resistência mecânica a 1 dia	24,7 MPa	-
Resistência mecânica a 3 dias	36,7 MPa	16,1 Mpa
Resistência mecânica a 7 dias	42,3 MPa	22,9 Mpa
Resistência mecânica a 28 dias	47,7 MPa	36,8 Mpa

As Figuras 4.1 e 4.2 bem como as demais micrografias apresentadas foram obtidas em microscópio eletrônico de varredura obtidas por elétrons secundários (MEV). Pode ser observado na Figura 4.1 o formato anguloso das partículas de clínquer. Os depósitos superficiais que aparecem sobre as partículas são cristais resultante do início do processo de hidratação decorrente da exposição da amostra à umidade ambiente.

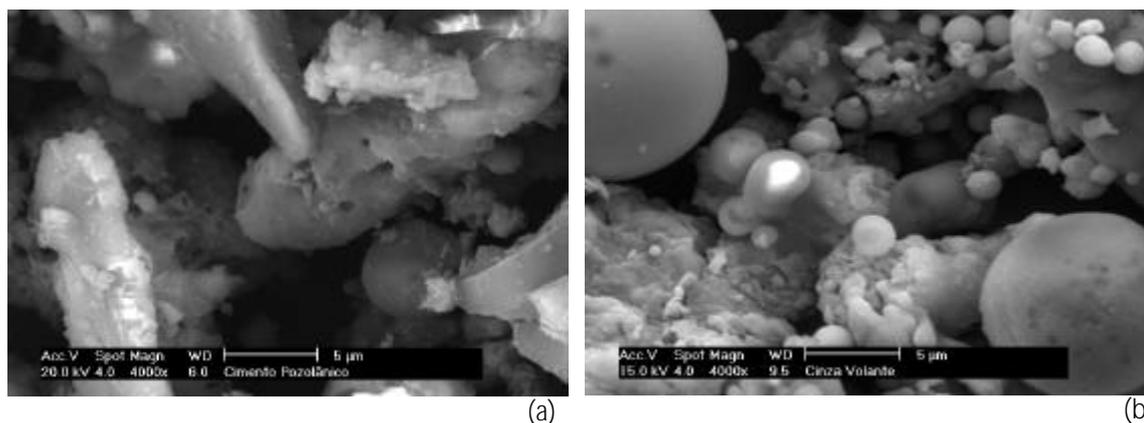
**FIGURA 4.1** Micrografia de cimento CP V-ARI aumento de 4000x.

Na Figura 4.2 podem ser observadas micrografias de cimento CP IV-32 e cinzas volantes. Da mesma forma que o cimento CP V-ARI, o cimento CP IV-32 também apresenta princípio de hidratação.

<sup>2</sup> Análise por Termogravimetria realizada no LASID - Laboratório de Siderurgia

<sup>3</sup> Análise por picnometria realizada no LACER - Laboratório de Cerâmica

<sup>4</sup> Análise por adsorção de nitrogênio realizada no LACER - Laboratório de Cerâmica



**FIGURA 4.2** Micrografias: (a) cimento CP IV-32; (b) cinzas volante aumento de 4000x.

#### 4.3.1.2 Adições

Uma das adições utilizada neste trabalho foi a **silica ativa** proveniente de uma fábrica de silício-metálico, localizada em Tucuruí (PA).

A outra adição utilizada nos ensaios foi a **cinza de casca de arroz**, fornecida por beneficiadora de arroz da cidade de Pelotas (RS). A cinza foi obtida por queima em forno do tipo leito fluidizado, com temperatura controlada à 700 °C.

A caracterização química e física da cinza da casca de arroz é apresentada na Tabela 4.6 e Quadro 4.7, respectivamente. A decisão pela utilização desta cinza foi tomada com base nos resultados obtidos em ensaios de difração de raios-X (DRX) (Figura 4.5).

A Tabela 4.6 e o Quadro 4.7 apresentam, respectivamente, a composição química e características físicas das adições utilizadas.

**TABELA 4.6** Composição química das adições<sup>5</sup>

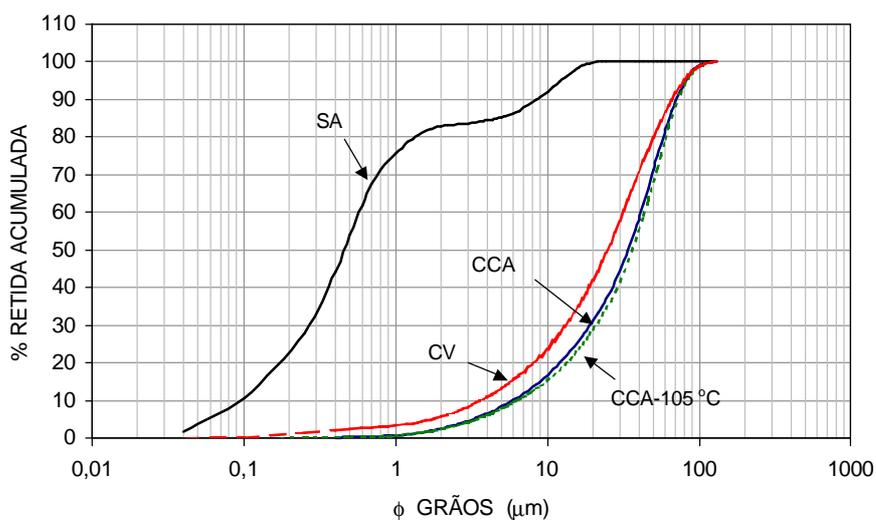
	<b>C C Arroz (%)</b>	<b>Silica Ativa (%)</b>
SiO <sub>2</sub>	90,00	91,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0,10
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,84	0,70
CaO	1,80	1,10
MgO	0,86	1,50
SO <sub>3</sub>	-	0,16
Na <sub>2</sub> O	-	0,39
K <sub>2</sub> O	4,10	4,40
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,49	0,097
Cl	0,15	0,29
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,21	0,22
MnO	1,10	0,19
ZnO	0,076	0,13
Rb <sub>2</sub> O	0,11	0,058
SrO	0,046	0,044

<sup>5</sup> Análise semi-quantitativa por espectroscopia de fluorescência de raios-X realizada no Instituto de Geociências

**QUADRO 4.7** Características físicas dos cimento e adições

	CCA	SA
Resíduo # 0,075 mm (%)	6,70	nd*
Resíduo # 0,045 mm (%)	9,20	7,0
<sup>6</sup> Teor de carbono (%)	4,88	5,04
<sup>7</sup> Peso específico (g.cm <sup>-3</sup> )	2,25	2,22
<sup>8</sup> Superfície específica (m <sup>2</sup> .g <sup>-1</sup> )	25,16	13,86
<sup>9</sup> Diâmetro médio part. (μm)	34,03	0,5

A Figura 4.3 apresenta as curvas granulométricas das adições.

**FIGURA 4.3** Curvas granulométricas das adições

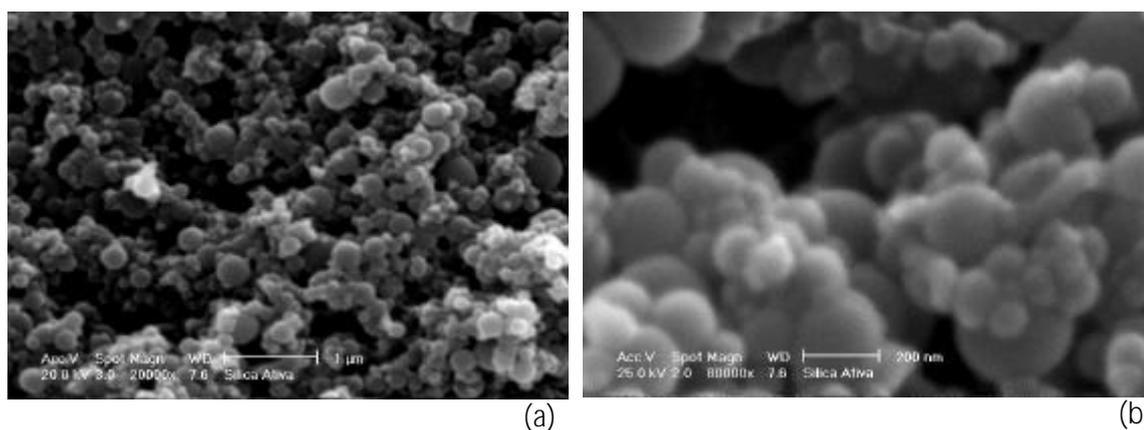
A Figura 4.4 é uma micrografia da sílica ativa obtida em MEV. Chama-se a atenção para o formato esférico das partículas bem como para suas dimensões extremamente reduzidas (tamanho médio aproximadamente 0,5 μm).

<sup>6</sup> Análise por Termogravimetria realizada no LASID - Laboratório de Siderurgia

<sup>7</sup> Análise realizada no LACER - Laboratório de Cerâmica

<sup>8</sup> Análise por adsorção de nitrogênio realizado ano LACER - Laboratório de Cerâmica

<sup>9</sup> Análise em analisador de partículas laser

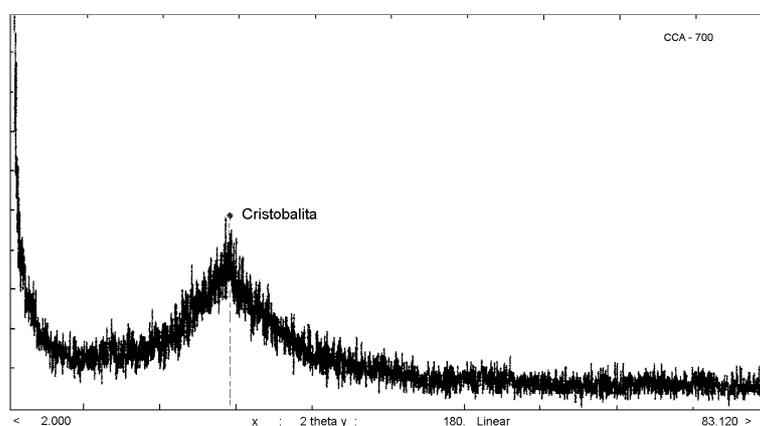


**FIGURA 4.4** Micrografia de sílica ativa: (a) aumento de 20000x; (b) aumento de 80000x.

Realizou-se ensaios de atividade pozolânica (NBR 5752) com as adições com o intuito de avaliar sua pozolanicidade. Os resultados obtidos são apresentados na Quadro 4.8.

**QUADRO 4.8** Atividade Pozolânica NBR 5752

	Cimento	CCA	CCA-105°C	Sílica ativa
% água consistência normal	100 %	127 %	127 %	133 %
pozolanicidade com cimento CPV-ARI	100 %	62 %	55 %	91 %

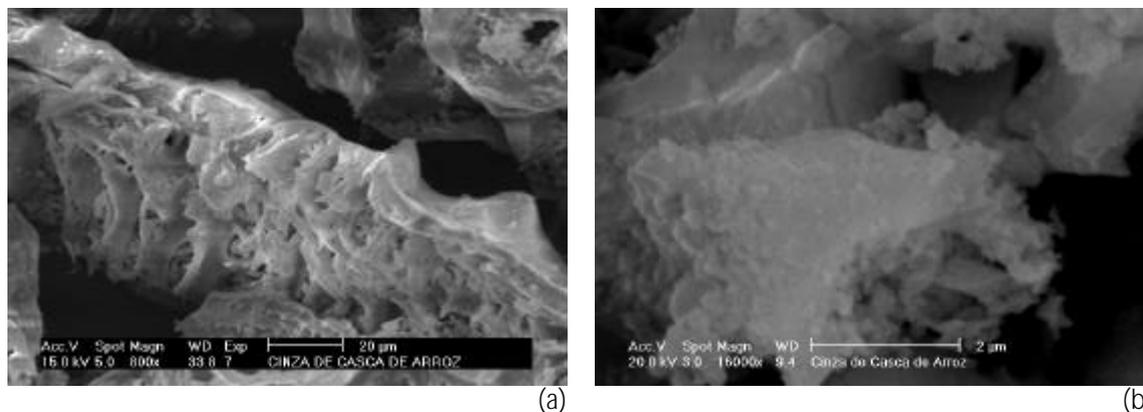


**FIGURA 4.5** Difratoograma de raios X dos compostos da cinza de casca de arroz queimada à 700 °C

Conforme pode ser observado na Figura 4.5, o resultado do ensaio de DRX, caracteriza a cinza como adequada para utilização como pozolana. De acordo com a bibliografia, a presença de picos cristalinos indica a presença compostos na forma cristalina, ou seja, parte do material apresenta-se em forma não reativa. Embora seja desejável que as cinzas apresentem sílica apenas na fase amorfa, a presença de eventuais picos cristalinos em uma

análise por DRX não inviabiliza seu emprego, conforme evidencia o trabalho realizado por Isaia (1995).

A Figura 4.6 apresenta micrografias da cinza de casca de arroz com aumentos de 800 vezes e 16000 vezes.



**FIGURA 4.6** Micrografia: (a) cinzas de casca de arroz não moídas aumento 800x; (b) cinzas de casca de arroz moídas aumento de 16000x

Na Figura 4.6 observa-se microscopias de cinzas de casca de arroz sem moer e após moagem. Constata-se o aspecto reticulado da casca antes da moagem e a forma poligonal e extremamente irregular e porosa após a moagem.

Para moagem foi utilizado um moinho de bolas (Figura 4.7) com 35 cm de diâmetro e 42 cm de altura -dimensões externas-, e capacidade de 25 litros. A moagem se deu com o moinho em rotação de 30 rpm. A otimização do moinho foi obtida com a utilização de 10 kg de esferas de alumina em tamanhos diversos e carga de 5 kg de CCA.



**FIGURA 4.7** Moinho de bolas utilizado para moagem das cinzas de casca de arroz

O grau de moagem das cinzas de casca de arroz está relacionado ao tipo de moinho e tempo de moagem. Com base nos resultados obtidos por autores como e Sugita et

al. (1993) e Silveira (1996), optou-se por moer as cinzas durante duas horas. A observação visual e posterior análise granulométrica (Figura 4.3) demonstraram que o tempo escolhido foi adequado para a obtenção de cinzas de casca de arroz com as características desejadas.

Com o objetivo de verificar se haveria ou não alguma diferença entre as cinzas moídas previamente secas em estufa ou não, moeu-se uma carga seca em estufa, dentro das mesmas condições definidas para as cinzas não secas. O diâmetro médio das cinzas que foram previamente secas, obtido em ensaio de granulometria por difração com raios laser foi 36,2  $\mu\text{m}$ , enquanto que o das cinzas não secas foi 34,03  $\mu\text{m}$  (Figura 4.3). Comparando os resultados obtidos no ensaio de granulometria e os índices de atividade pozolânica (Quadro 4.8) para a cinza de casca de arroz concluiu-se que a pré secagem da cinza antes de moer é desnecessária.

### 4.3.2 Aditivos

Utilizou-se aditivo superplastificante à base de naftaleno sulfonado com densidade 1,05  $\text{kg}/\text{dm}^3$ .

### 4.3.3 Água

Foi utilizada para execução do concreto água proveniente da rede pública de abastecimento.

### 4.3.4 Agregados

O quadro 4.9 relaciona os ensaios de caracterização realizados com os agregados.

**QUADRO 4.9** Ensaios de caracterização dos agregados

Ensaio	Areia	Brita
Massa específica absoluta	NBR 9776	NBR 9937
Composição granulométrica	-	NBR 7217
Dimensão máxima característica, módulo de finura	-	NBR 7217
Índice de forma	-	NBR 7809

A Tabela 4.10 apresenta a composição granulométrica dos agregados miúdos e graúdos.

**TABELA 4.10** Composição granulométrica dos agregados

Agregado miúdo			Agregado graúdo		
Peneira Abertura (mm)	% Média retida	% Média retida acumulada	Peneira Abertura (mm)	% Média retida	% Média retida acumulada
4,8	0,07	0,07	19,0	9,27	9,27
2,4	6,33	6,40	12,5	49,74	59,01
1,2	14,24	20,64	9,5	28,90	87,91
0,6	27,93	48,57	6,3	8,51	96,42
0,3	41,97	90,54	4,8	1,87	98,29
0,15	8,95	99,49	< 4,8	1,71	100
< 0,15	0,51	100,00			

O Quadro 4.11 apresenta as características físicas dos agregados.

**QUADRO 4.11** Características físicas dos agregados

	Agregado miúdo	Agregado graúdo
Módulo de finura	2,66	6,95
Dim. Máxima. Característica. (mm)	-	25
Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	2,61	2,77
Índice de forma	-	3,36

#### 4.4 TRAÇOS E PRODUÇÃO DO CONCRETO

Os traços utilizados Quadro 4.12 foram determinados à partir do traço de referência, ou seja, o traço com cimento ARI, sem adições. Com base na metodologia de dosagem do IPT/EPUSP (Helene e Terzian, 1992), foi adotado como um dos parâmetros o teor de argamassa, fixado em 46%. Outro parâmetro utilizado foi o abatimento do tronco de cone NBR 7223, fixado em 70 mm ( $\pm 10$ ). A perda de trabalhabilidade, verificada em apenas um dos traços (S52), foi corrigida com o uso de um aditivo. Os dados referentes ao ajuste do traço encontram-se no ANEXO A.

**QUADRO 4.12** Traços em massa dos concretos e abatimento do tronco de cone

Adição ou Tipo de cimento	Relação a/ agl	Teor de adição (%)	Cim.	Agr. Miúdo	Agr. graúdo	Abatimento (mm)	Consumo de cim. (kg/m <sup>3</sup> )
CCA ou SA	0,50	6	1	1,70	3,17	C56 (100) (65) (80) S56 (70) (65) (80)	367 367
	0,50*	12	1	1,70	3,17	C52 (83) (115) (90) S52 (80) (85) (70)	359 359
	0,65	6	1	2,52	4,13	C66 (125) (95) (140) S66 (95) (100) (100)	281 281
	0,65	12	1	2,52	4,13	C62 (120)(155) (120) S62 (75) (88) (80)	275 275
	0,80	6	1	3,33	5,08	C76 (150) (110) (80) S76 (110) (85) (120)	228 227
	0,80	12	1	3,33	5,08	C72 (75) (150) (125) S72 (110) (85) (80)	224 224
C POZ ou C ARI	0,50	-	1	1,70	3,17	PZ5 (77) (110) (70) T5 (69) (80) (85)	369 375
	0,65	-	1	2,52	4,13	PZ6- (110) (130) (65) T6 (140) (80) (95)	283 286
	0,80	-	1	3,33	5,08	PZ7 (105) (150) (70) T7 (80) (50) (120)	230 232

\* aditivo 0,40 % em relação ao aglomerante (cimento+adição)

A concretagem obedeceu os critérios de aleatorização exposto no item 4.2 na seqüência apresentada no Quadro 4.3. Para execução do concreto se fez uso de betoneira de eixo vertical. Após a mistura dos materiais foi medido o abatimento de tronco de cone (NBR 7223).

A moldagem dos corpos de prova cilíndricos (9,5x19cm e 15x30cm) seguiu os critérios estabelecidos pela NBR 5738.

Os corpos de prova prismáticos, destinados ao ensaio de resistividade, foram moldados em duas camadas, adensadas com bastão metálico com 15 golpes cada.

A colocação dos materiais na betoneira para execução do concreto obedeceu a seguinte ordem:

- 100% do agregado graúdo
- 30% de água
- 100% de cimento + 30% de água + 100% de adição
- 40% de água + 100% de aditivo
- 100% de agregado miúdo

## 4.5 CURA E ARMAZENAMENTO DOS CORPOS DE PROVA

Todos os corpos de prova ficaram durante as 24 primeiras horas fora da câmara úmida, devidamente protegidos para evitar perda de água da parte superficial. Após este período, foram colocados em câmara úmida, onde permaneceram pelo período de 27 dias.

Findo o período de cura (28 dias de idade), os corpos de prova foram transportados para uma câmara climatizada, anexa aos laboratórios do NORIE, onde foi dada continuidade aos ensaios.

A câmara climatizada foi construída visando ensaios relacionadas à corrosão da armadura, uma vez que a umidade e a temperatura são fatores muito importantes para as propriedades estudadas, conforme apresentado no Capítulo 2.

Tendo como temperatura de referência a normalmente especificada para trabalhos de laboratório ( $23 \pm 1$  °C), fixou-se em a umidade relativa do ar em 65 ( $\pm 5$ ) %. A escolha deste valor foi com base nos resultados apresentados por Lopez e Gonzalez (1991). Os autores obtiveram os valores máximos de taxa de corrosão ( $i_{corr}$ ) em corpos de prova de argamassa com grau de saturação dos poros entre 60 e 70%. De acordo com Helene (1986), para que ocorra o processo corrosivo é necessário umidade superior a 60%.

## 4.6 ENSAIOS

### 4.6.1 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado segundo as orientações da norma NBR 5739. Uma vez que de cada betonada (foram tres por traço) eram extraídos quatro corpos de prova para o ensaio de resistência à compressão, foi realizada nova aleatorização (ANEXO A) de tal forma que os corpos de provas a serem rompidos numa determinada idade não fossem todos de uma mesma betonada.

Antes de serem submetidos ao ensaio, os corpos de prova tiveram os seu topos capeados com enxofre.

A ruptura dos corpos de prova foi em prensa marca WPM, com capacidade para 120 toneladas.

#### 4.6.2 Índice de vazios

Para obtenção do índice de vazios e grau de saturação dos poros foram utilizados os mesmos corpos de prova do ensaio de resistividade volumétrica, após a conclusão dos ensaios de resistividade, aos 91 dias de idade. O procedimento utilizado foi o preconizado pela norma NBR 9778 - Argamassa e concreto endurecidos determinação da absorção de água por imersão índice de vazios e massa específica.

Embora o ensaio de índice de vazios possibilite que se tenha uma idéia da porosidade relativa do concreto, ele não permite inferir sobre a distribuição e tamanho dos poros. Por este motivo foram realizados os ensaios de grau de saturação dos poros e perda de massa pela evaporação da água. Busca-se assim, de forma indireta, obter mais informações sobre a porosidade e permeabilidade dos concretos pesquisados através comparação dos resultados, bem como uma justificativa mais completa para os comportamentos obtidos nos ensaios de resistividade.

#### 4.6.3 Grau de saturação dos poros

O grau de saturação dos poros é um índice que caracteriza o teor de umidade contida nos poros do concreto, numa determinada idade.

Para cálculo do grau de saturação dos poros foram utilizados os dados obtidos no ensaios feitos conforme a NBR 9778. Foi verificado o grau de saturação dos poros para as idades de 28, 63 e 91, em função das determinações de massa feitas por ocasião de cada medida de resistividade elétrica volumétrica. O grau de saturação dos poros foi calculado pela expressão:

$$P_s = \frac{W_t - W_o}{W_s - W_o} \quad (4.1)$$

onde:

$P_s$  - grau de saturação dos poros;

$W_t$  - peso no tempo  $t$ ;

$W_s$  - peso após completa saturação em água fervendo por 2 horas e

$W_o$  - peso obtido após secagem até constância de peso.

#### 4.6.4 Perda de água em função do tempo

O objetivo da realização deste ensaio foi investigar a rapidez com os concretos perdiam água para o meio. Este ensaio consistiu em monitorar, por um determinado período de tempo foi adotado aproximadamente 24 horas, as alterações de massa do corpo de prova que, inicialmente saturado, era exposto ao ambiente da câmara climatizada.

Para verificar a velocidade de perda de água dos concretos, foram utilizados os corpos de prova de dimensões 17x10x10 cm.

Devido à dificuldade em obter a massa dos corpos de prova dentro dos exatos tempos pré estabelecidos, optou-se por trabalhar com tempos aleatorizados.

As diferenças de massa, calculadas conforme 4.2, foram correlacionadas às diferenças de tempo. As diferenças de massa foram calculadas usando a expressão:

$$Pa_{(t)} = \frac{Mi - Mt}{Mi} \times 100 \quad (4.2)$$

onde:

$Pa_{(t)}$  perda de água em determinado instante (t), em %;

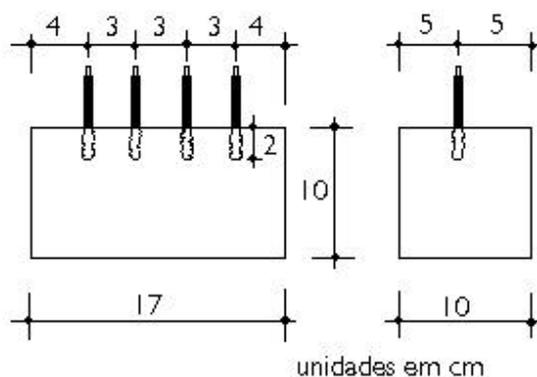
$Mi$  massa do corpo de prova saturado no instante inicial, em g;

$Mt$  massa do corpo de prova no instante (t), em g.

Para possibilitar a análise no programa estatístico (STATÍSTICA), aos dados perda de água verso tempo foram ajustados a curvas logarítmicas. A partir das equações das curvas, foram obtidas as variações de massa em tempos fixos para cada corpo de prova. Os resultados dos ensaios, bem como os gráficos de ajuste destes encontram-se no ANEXO B.

#### 4.6.5 Medida de resistividade

O ensaio é realizado fazendo-se uso de uma fonte de alimentação de corrente alternada. É aplicada corrente entre os eletrodos externos. Entre os eletrodos internos é medida a diferença de potencial. Para este ensaio foram moldados corpos de prova conforme mostra a Figura 4.8.

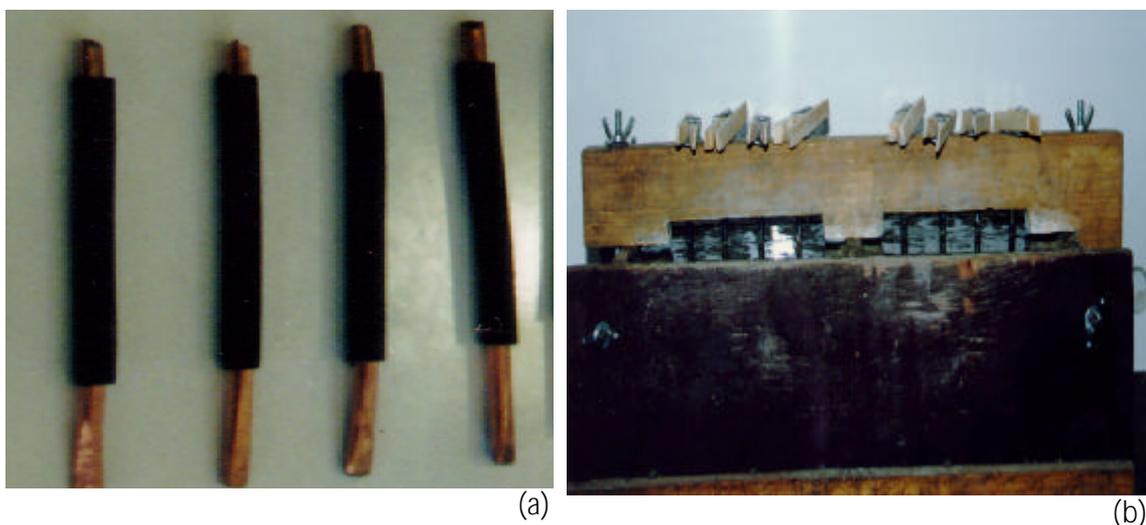


**FIGURA 4.8** Esquema dos corpos de prova utilizados no ensaio de medida resistividade pelo Método dos 4 eletrodos.

Como eletrodos foram utilizados fios de cobre de  $10 \text{ mm}^2$ . O preparo dos fios utilizados como eletrodos envolveu as seguintes etapas:

- corte do fio em pedaços de aproximadamente 8 cm;
- decapagem dos fios de forma a resultarem 5 cm de fio coberto, correspondentes à altura do gabarito;
- remoção do verniz (antioxidante e isolante) das extremidades;
- amassamento da extremidade do fio a ser imersa no concreto (2 cm), para aumentar a aderência entre o eletrodo e o concreto.

A Figura 4.9 apresenta duas das etapas do preparo dos corpos de prova.



**FIGURA 4.9** Detalhes: (a) eletrodos; (b) instante de moldagem dos corpos de prova.

Pode ser observado na Figura 4.9 (b) que existe uma folga entre a superfície do concreto e a parte inferior do gabarito. Esta solução foi necessária para que o gabarito não

ficasse aderido ao concreto na região dos eletrodos, o que provocaria o deslocamento dos eletrodos por ocasião da desmoldagem dos corpos de prova.

Para realização do experimento, o circuito foi montado conforme esquema apresentado no item 3.3. Por ocasião dos ensaios foram coletados a diferença de potencial e a corrente que circulava no circuito. Para cada corpo de prova eram feitas duas leituras não consecutivas, com o objetivo de confirmar os valores lidos. O critério de aceitação foi obter dois valores de resistência iguais ou muito próximos, (diferença em torno de 5V), sendo o resultado a média entre as duas resistências.

O valor da resistividade foi obtido considerando o espaçamento entre os eletrodos e a profundidade, de acordo com os critérios estabelecidos para a utilização da fórmula reduzida, ou seja, foi utilizado a fórmula completa de Frank Wenner (item 3.2).

A Figura 4.10 ilustra o instante de ensaio de medida de resistividade.



**FIGURA 4.10** Ensaio de medida de resistividade elétrica aparente

Para realização das medidas foi utilizado um gerador de função Function Generator 8102 TOPWARD. Para realização dos ensaios usou-se corrente alternada, onda senoidal, frequência de 10 Hz, com tensão aplicada de aproximadamente 5V. Para medida da corrente e diferença de potencial foram utilizados multímetros marca Minipa e Metex M 4650B, respectivamente, ambos com  $10^6$  ohm de impedância de entrada.

## 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Embora o objetivo principal seja a verificação do efeito das adições na resistividade elétrica aparente do concreto, analisa-se neste trabalho os ensaios de resistência à compressão, índice de vazios, grau de saturação dos poros, perda de massa pela evaporação da água, e por fim o ensaio de resistividade. Para cada ensaio é feita uma análise estatística de todos os traços trabalhados, com a finalidade de verificar o efeito das adições e cimentos, da relação água aglomerante, idade ou tempo e se as diferenças observadas são significativas para cada propriedade. Ao final da discussão de cada tipo de ensaio é apresentado um resumo dos fatores significativos, obtidos através das análises de variância por tipo de adição e tipo de cimento. A análise de acordo com o tipo de adição ou tipo de cimento deve-se ao fato de que, conforme identificado através da literatura e observado através da análise dos resultados, a ser apresentada, cada tipo de adição ou tipo de cimento caracteriza o concreto de forma diferenciada, influenciando em suas características físico-químicas.

A **análise de variância** testa a significância da diferença entre as médias dos grupos, baseando-se na relação da variabilidade das médias entre os grupos e da variabilidade das observações dentro dos grupos. A hipótese de nulidade é a de que as médias são todas iguais. Neste trabalho, todas as hipóteses são testadas com um nível de confiança de 95%, ou seja, existe uma probabilidade de erro de 5% (Spiegel, 1978; Ribeiro, 1995).

Para proceder a análise geral foi estabelecido o seguinte critério:

- **tipo e teor de adição ou tipo de cimento (t adição/ t cimento):** concreto com cimento ARI com adições de CCA e de SA em teores de 6 e 12% e 2 tipos de cimento (cimento Pozolânico (C POZ) e cimento ARI e C ARI), totalizando 6 níveis;
- **água/ aglomerante (a/agl):** 0,5, 0,65 e 0,8, para todos os ensaios e
- **idade ou tempo:** número de níveis variando de acordo com o tipo de ensaios analisado.

Na análise por tipo de adição foram adotados três níveis de teor de adição, que são 0%, 6% e 12%. Ao analisarem-se tipo de cimento, são considerados dois níveis, que são C ARI e C POZ.

## 5.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

A média dos resultados dos ensaios de resistência à compressão axial são apresentados na Tabela 5.1, onde também constam o desvio padrão e o coeficiente de variação. Os valores individuais obtidos no ensaio de compressão encontram-se no ANEXO B.

**TABELA 5.1** Resultados médios dos ensaios de compressão axial, desvio padrão e coeficiente de variação, obtidos a partir de três corpos-de-prova.

a/agl @ t adição t cimento	0,50				0,65				0,80				
	Idade (dias) @	3	7	28	91	3	7	28	91	3	7	28	91
<b>CCA 6%</b>	média (Mpa)	24,9	34,9	43,7	43,9	14,6	19,6	26,2	30,2	10,0	13,6	18,6	22,4
	d pad (MPa)	2,55	1,85	4,04	6,50	1,50	3,45	1,68	1,74	0,52	0,52	2,89	0,59
	c v (%)	10,26	5,31	9,24	14,80	10,31	17,65	6,42	5,75	5,20	3,82	15,52	2,62
<b>CCA 12%</b>	média (Mpa)	25,7	35,7	43,4	49,0	14,6	19,4	25,6	31,6	9,4	12,8	18,5	20,6
	d pad (MPa)	2,36	1,22	5,31	6,30	0,06	2,64	1,55	2,84	0,95	1,04	1,04	0,72
	c v (%)	9,19	3,41	12,24	12,85	0,40	13,56	6,06	8,99	10,15	8,15	5,64	3,50
<b>SA 6%</b>	média (Mpa)	30,3	39,9	51,2	54,3	22,0	28,4	35,1	40,7	14,3	18,8	27,7	28,4
	d pad (MPa)	3,32	1,27	3,57	1,89	1,76	3,16	4,52	3,08	1,04	0,64	0,68	1,04
	c v (%)	10,94	3,18	6,98	3,48	8,00	11,12	12,86	7,57	7,27	3,37	2,46	3,68
<b>SA 12%</b>	média (Mpa)	28,6	39,1	56,1	58,2	20,3	27,1	36,5	40,3	14,9	20,3	29,7	33,2
	d pad (MPa)	0,52	5,80	2,38	3,96	1,04	1,55	2,20	1,66	1,11	0,85	3,65	3,20
	c v (%)	1,82	14,83	4,24	6,79	5,12	5,73	6,03	4,13	7,44	4,18	12,28	9,63
<b>C POZ</b>	média (Mpa)	13,5	18,5	30,3	34,2	8,0	10,9	17,5	25,6	5,6	8,1	11,4	17,1
	d pad (MPa)	2,00	0,61	5,32	10,32	0,98	1,17	1,10	2,02	0,00	0,35	1,07	1,27
	c v (%)	14,88	3,29	17,56	30,14	12,22	10,78	6,28	7,90	0,00	4,28	9,35	7,41
<b>C ARI (ref)</b>	média (Mpa)	27,1	36,5	42,3	52,6	16,6	20,0	26,6	32,2	11,6	13,6	19,5	22,1
	d pad (MPa)	2,49	4,03	1,05	3,46	3,11	1,27	3,09	3,35	0,40	1,27	1,89	2,43
	c v (%)	9,18	11,04	2,49	6,57	18,76	6,32	11,61	10,42	3,47	9,39	9,71	11,01

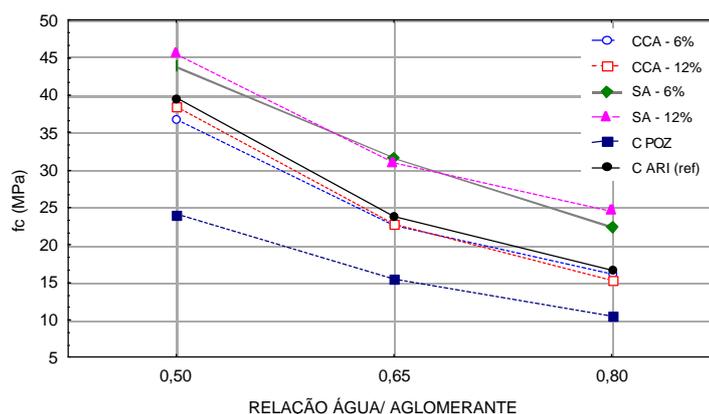
Ve-se na Tabela 5.1 que os valores médios diferem entre si, variando com o tipo de adição ou tipo de cimento, relação a/agl e idade. A análise estatística (Tabela 5.2), feita de acordo com os critérios estabelecidos no item 5.1, apresenta a significância destes fatores e de suas interações.

**TABELA 5.2** Análise de variância para o ensaio de resistência à compressão axial

Fonte	GDL	MQ	F <sub>calc</sub>	F <sub>0,05</sub> *	SIGN.
t adição / t cimento (A)	5	1343.02	164.24	2,26	S
a/agl (B)	2	7800.82	953.99	3,04	S
idade (C)	3	3510.67	429.33	2,65	S
AB	10	43.56	5.33	1,88	S
AC	15	22.60	2.76	1,72	S
BC	6	113.08	13.83	2,15	S
ABC	30	4.44	0.54	1,51	NS
Erro	144	8.18			

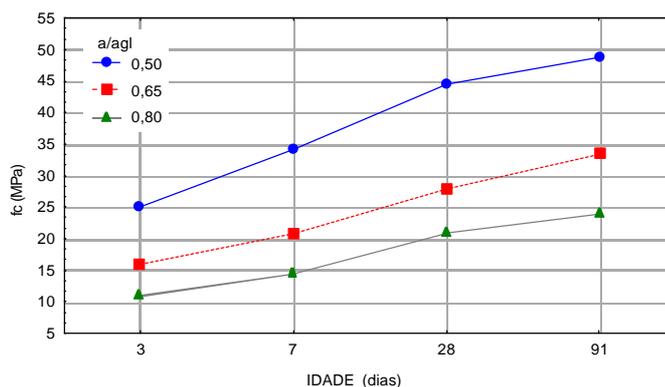
GDL grau de liberdade; MQ média calculada; F fator F, calculado ; F<sub>0,05</sub>\* valor de F tabelado, nível de significância de 5% (distribuição de Fisher); S efeito significativo e NS efeito não significativo.

Observa-se na análise estatística que a significância dos fatores obedecem a seguinte ordem de importância: relação a/agl, idade e t adição/ t cimento. O efeito das interações dos fatores relação a/agl x idade (BC), t adição/ t cimento x a/agl (AB) e t adição/ t cimento x idade (AC), mesmo sendo pouco significativos quando comparados aos efeitos dos fatores principais, são importantes, principalmente quando os resultados são analisados de acordo com o tipo de adição ou tipo de cimento em separado, conforme será visto na sequência. A Figura 5.1 ilustra o efeito do fator relação a/agl e t adição/t cimento na resistência à compressão dos concretos.



**FIGURA 5.1** Efeito da relação água/aglomerante e do tipo de adição ou tipo de cimento na resistência à compressão axial.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos concretos estão relacionados ao tipo de adição ou tipo de cimento e à relação água/ aglomerante (Figura 5.1). De acordo com o esperado, a resistência à compressão dos concretos diminuem com o incremento da relação da relação a/agl. Observa-se também, na Figura 5.1, que a resistência relativa entre os concretos são diferentes para cada t adição/t cimento e relação a/agl, caracterizando a interação entre estes fatores (interação AB) (Tabela 5.2). Os efeitos dos fatores relação a/agl e idade na resistência a compressão axial dos concretos são ilustrados na Figura 5.2.



**FIGURA 5.2** Efeito dos fatores idade versus relação a/ agl na resistência à compressão axial do concreto.

A interação entre os fatores relação a/agl e idade (BC), identificada na análise estatística (Tabela 5.2) é evidenciada na Figura 5.2, onde observa-se que a diferença de resistência à compressão é proporcionalmente maior entre os concretos com relação a/agl 0,5 e 0,65, que entre os com relação a/agl 0,65 e 0,8. Conforme esperado, para menores relações a/agl correspondem maiores valores de resistência à compressão. Os resultados observados são característicos da Lei de Abrams, na qual a resistência a compressão é representada por uma função exponencial, onde a relação água/ cimento é o expoente (Mehta e Monteiro, 1994). Quanto menor é a relação água/aglomerante, mais sensível às pequenas variações de água é o concreto.

A análise estatística (Tabela 5.2) e Figuras 5.1 e 5.2 demonstram que, embora relação a/agl seja o fator mais significativo para a resistência à compressão, o tipo de adição ou cimento e a idade também são muito importantes. Nota-se na Figura 5.1, por exemplo, que concretos com diferentes adições ou cimentos tem seu comportamento regido por características próprias. Entretanto, a análise estatística, da forma como foi feita, não permite que se verifique o efeito específico da CCA, SA ou do C POZ na resistência à compressão dos concretos. Assim, procedeu-se a análise estatística por tipo de adição e de tipo cimento. O

resumo dos resultados obtidos na análise de variância é apresentado na Tabela 5.3. A análise de variância completa encontra-se no ANEXO B.

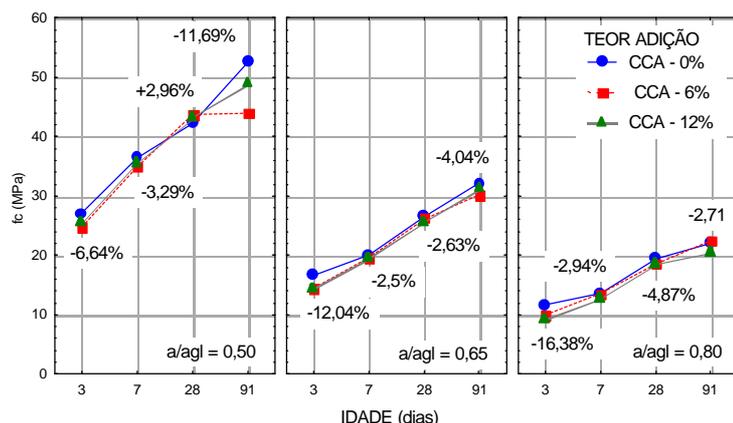
**TABELA 5.3** Resumo da análise de variância para resistência à compressão axial de concretos com CCA, SA e C POZ comparados aos concretos com C ARI (ref)

Fator	CCA	SA	C POZ
	$F_{calc}$	$F_{calc}$	$F_{cal}$
t adição / t cimento (A)	3,02	74,17*	188,95*
a/agl (B)	614,6*	647,05*	217,91*
idade (C)	191,2*	308,29*	104,83*
AB	0,75	1,79	15,08*
AC	0,73	4,64*	0,19
BC	7,27*	9,74*	4,51*
ABC	0,65	0,78	0,96

\* Fatores significativos, nível de significância de 5%

A análise estatística demonstra que importância dos fatores estudados para a resistência a compressão axial dos concretos está relacionada às características de cada aglomerante. Observa-se na Tabela 5.3 que a relação a/agl é sempre o fator mais importante, enquanto que a adição de CCA (Fator A), sequer é significativa para a propriedade analisada. Assim sendo, na seqüência é feita a discussão dos resultados por tipo de adição e tipo de cimento.

A Figura 5.3 ilustra o efeito do teor de adição de CCA, da relação a/agl e idade na resistência à compressão dos concretos. Os percentuais representam a diferença média entre os concretos com adição e os sem adição.



**FIGURA 5.3** Efeito das interações dos fatores teor de adição, relação a/agl e idade na resistência à compressão de concretos com adição de CCA.

Nota-se na Figura 5.3 que os concretos feitos com CCA apresentam resultados, embora inferiores, muito próximos aos dos concretos de referência. Esta diferença, de acordo

com a análise estatística (Tabela 5.3), não é significativa. O valores médios de incremento de resistência à compressão nos concretos com adição de CCA, em porcentagem, comparados aos de referência não evidenciam um padrão de comportamento bem definido. Verifica-se que para os concretos com relação a/agl 0,65 e 0,8, o incremento de resistência aos 3 dias é menor que para concretos com relação a/agl 0,5. Aos 91 dias de idade, os valores percentuais obtidos para as relações a/agl 0,5, 0,65 e 0,8 são -11,69, -4,04 e -2,07%, respectivamente. Isto parece indicar que para relações a/agl 0,5, o efeito da adição, que é pouco evidente nas primeiras idades, manifesta-se de forma mais acentuada aos 91 dias, em comparação aos concretos de relação a/agl 0,65 e 0,8.

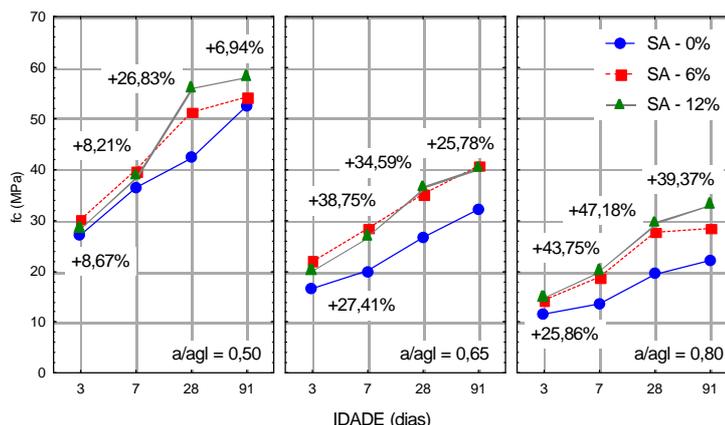
Os resultados obtidos não encontram coerência quando comparados com os obtidos por Silveira (1996). Esta pesquisadora, trabalhando com adição de CCA em teores de 5 e 10%, e relação a/agl de 0,42, 0,51 e 0,6, obteve os resultados ilustrados na Tabela 5.4.

**TABELA 5.4** Resultados obtidos em ensaios de resistência à compressão axial (MPa) de concretos com adição de CCA ( Silveira, 1996) curados em água

A/agl @		0,42		0,51		0,6	
		Idade @	28	148	28	148	28
<b>Teor de adição</b>	0%	51,68	65,28	35,79	40,94	33,64	35,07
	5%	46,24	58,55	42,94	43,66	33,93	34,07
	10%	54,54	63,13	44,38	50,67	38,94	40,37

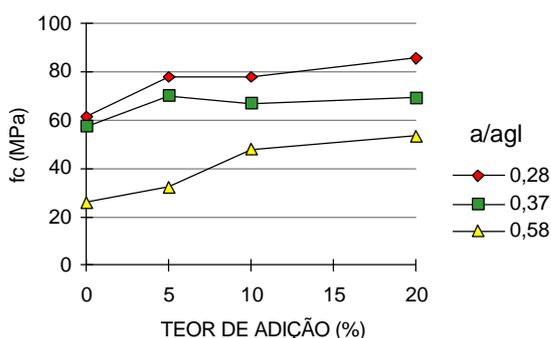
Constata-se que os resultados obtidos por Silveira (1996) foram, em média, maiores que os de referência, para os concretos com relação a/agl 0,51 e 0,60. Tendo em vista a similaridade entre as cinzas utilizadas pela pesquisadora e neste trabalho, bem como entre os critérios de execução dos concretos, a diferença entre os resultados poderia ser atribuída principalmente às condições de cura, uma vez que no referido trabalho realizou-se cura submersa. Da mesma forma, Prudêncio Jr e Santos (1996), utilizando CCA em teores variando entre 0 a 50% em substituição de parte do cimento, obtiveram, aos 28 dias, os melhores resultados nas argamassas com 15% de CCA, enquanto que argamassas com teores de 40% de CCA apresentaram o mesmo desempenho que as argamassas de referência. Observa-se que, neste caso, os autores utilizaram cimento CP 1-S-32. Sendo assim, questiona-se também o efeito do tipo de cimento no comportamento da resistência à compressão para concretos com adições de CCA.

A Figura 5.4 ilustra o efeito da adição de sílica ativa, da relação a/agl e idade na resistência à compressão dos concretos.



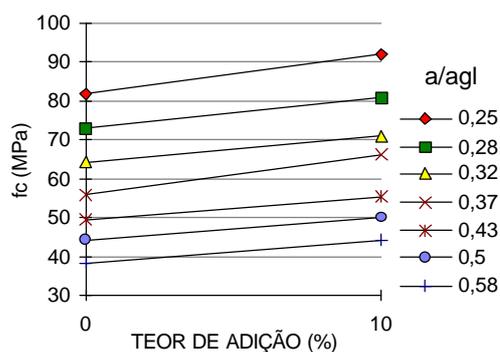
**FIGURA 5.4** Efeito das interações dos fatores teor de adição, relação a/agl e idade na resistência à compressão de concretos com adição de SA.

Nota-se na Figura 5.4 que o efeito da adição de SA na resistência à compressão se verifica logo nas primeiras idades, o que está de acordo com a literatura (Massazza, 1993). Constata-se também que concretos com relação a/agl 0,5 tem comportamento diferenciado quando comparados aos concretos com relação a/agl 0,65 e 0,8, evidenciando a interação dos fatores relação a/agl e idade (BC) e teor de adição e idade (AC), obtidas na análise estatística (Tabela 5.3). Aos 91 dias de idade, concretos com adições e relação a/agl 0,5, 0,65 e 0,8 tem incrementos de resistência à compressão de 6,94%, 25,78% e 39,37%, respectivamente, quando comparados aos de referência. Assim, verifica-se que para os concretos com adição de SA estudados, quanto maior a relação a/agl, mais eficaz é a adição para a resistência à compressão. Da mesma forma, Wolf (1991), pesquisando concretos com adição de 5, 10 e 20%, obteve os resultados ilustrados na Figura 5.5.



**FIGURA 5.5** Efeito do teor de adição de sílica ativa e da relação a/agl na resistência à compressão aos 28 dias (Wolf, 1991).

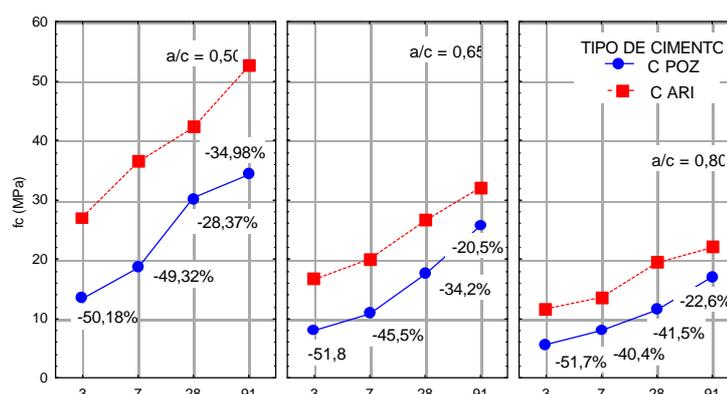
A Figura 5.6 ilustra os resultados obtidos Dal Molin(1995), para concreto curados em câmara úmida aos 28 dias de idade.



**FIGURA 5.6** Resistência à compressão de concretos com adição de SA aos 28 dias (Dal Molin, 1995).

Os valores obtidos por Dal Molin(1995) apresentam incrementos variando entre 10 e 18%, e de acordo com a autora, os resultados não evidenciam um padrão de comportamento bem definido. Observa-se que nos casos ilustrados, as relações  $a/agl$  pesquisadas são de no máximo 0,58, enquanto no presente trabalho, a análise estatística evidencia que concretos com relação  $a/agl$  0,65 e 0,8 apresentam comportamento diferente dos concretos com relação  $a/agl$  0,5. Assim, embora os casos apresentados sejam bastante informativos, não compreendem a mesma gama de relações  $a/agl$  pesquisadas neste trabalho, e portanto, não são suficientes para justificar todos os resultados obtidos.

Os resultados de resistência à compressão para os concretos com C POZ, comparado aos com C ARI, são apresentados na Figura 5.7.



**FIGURA 5.7** Efeito dos fatores tipo de cimento, relação  $a/c$  e idade na resistência à compressão de concretos com C POZ e C ARI.

Nota-se, na Figura 5.7, que os concretos com relação  $a/c$  0,5 são mais sensíveis ao tipo de cimento que os com relação  $a/c$  0,65 e 0,8. Este tipo de comportamento está coerente com o obtido por Babu e Rao (1993), sendo mais evidente em concretos com teores acima de

30% de substituição de cinzas volante. Verifica-se também que concretos feitos com C POZ tem, aos 3 dias de idade, resistência à compressão inferiores aos concretos de referência, sendo as diferenças aproximadamente iguais para todas as relações a/c. Aos 91 dias de idade tem-se, para as relações a/c 0,5, 0,65 e 0,8, os percentuais -34,98%, -20,5% e -22,6%, respectivamente, o que demonstra que a interação entre a relação a/agl e idade se mantém (BC).

A influência desfavorável do C POZ em relação ao C ARI na resistência à compressão pode ser explicada pelo teor de adição que o cimento recebe por ocasião de sua fabricação (15-50% de cinzas volantes NBR 5736). De acordo com pesquisadores como Tikalski et al. (1988) e Haque et al. (1988), teores ótimos de adição de cinzas volantes variam com as suas características físico-químicas, que normalmente apresentam muita variabilidade (Mehta e Monteiro, 1994). Utilizando duas cinzas volantes de procedências distintas e com diferentes graus de moagem, Alvarez et al. (1988) verificaram que teores em torno de 30% seriam ideais para obtenção de concretos com resistência à compressão superior aos do concreto de referência, em idades maiores que 28 dias.

Observa-se que os concretos pesquisados, além de terem sido executados com aglomerante com teor de adição de cinzas volantes provavelmente em torno de 50%, os cimentos utilizados também pertencem a classes diferentes, conforme comentado anteriormente.

### 5.3 ÍNDICE DE VAZIOS, GRAU DE SATURAÇÃO DOS POROS E PERDA DE MASSA PELA EVAPORAÇÃO DA ÁGUA

#### 5.3.1 Índice de vazios

O índice de vazios representa uma relação entre os volumes de poros permeáveis, ou seja, aqueles aos quais a água tem acesso, e o volume total do concreto. Para efeito deste estudo, os critérios para obtenção do índice de vazios são os descritos no item 4.6.2, sendo utilizados para a análise estatística os valores dos ensaios após saturação e fervura. A Tabela 5.5 apresenta os valores médios dos índices de vazios, desvio padrão e o coeficiente de variação.

**TABELA 5.5** Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação do ensaio de índice de vazios, após saturação e fervura, obtidos no ensaio de 3 corpos de prova aos 91 dias de idade

Adição (teor) – Cimento	Relação a/agl @	0,5	0,65	0,80
CCA 6%	média (%)	12,19	14,39	15,53
	d. padrão (%)	0,85	1,43	0,37
	c. v. (%)	7,00	9,95	2,39
CCA 12%	média (%)	11,91	15,21	15,59
	d. padrão (%)	1,44	0,87	0,26
	c. v. (%)	12,10	5,72	1,66
SA 6%	média (%)	11,20	13,96	14,33
	d. padrão (%)	1,88	1,08	0,92
	c. v. (%)	16,82	7,72	6,39
SA 12%	média (%)	12,40	12,38	14,39
	d. padrão (%)	1,05	1,80	1,48
	c. v. (%)	8,48	14,55	10,27
C POZ	média (%)	11,61	14,46	14,96
	d. padrão (%)	0,85	1,92	0,53
	c. v. (%)	7,28	13,29	3,53
C ARI	média (%)	11,93	14,04	14,32
	d. padrão (%)	1,24	0,59	0,62
	c. v. (%)	10,39	4,17	4,32

A observação preliminar das médias de índice de vazios (Tabela 5.5) permite verificar que os valores crescem com o aumento da relação a/agl. Entretanto não evidencia o comportamento dos concretos em relação ao tipo de adição ou tipo de cimento.

A análise estatística (Tabela 5.6) apresenta os fatores que são significativos nos resultados do índice de vazios.

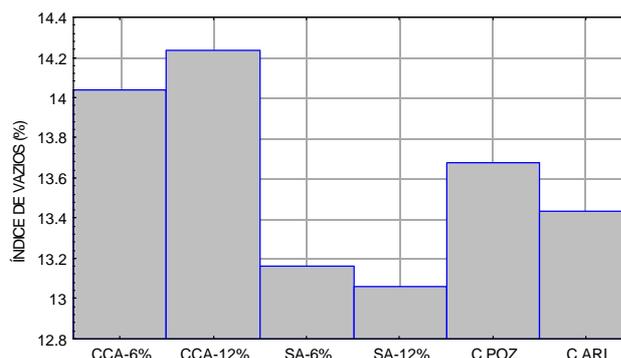
**TABELA 5.6** Análise de variância para os resultados de índice de vazios, obtidos após saturação e fervura, aos 91 dias de idade.

Fator	GDL	MQ	F <sub>calc.</sub>	F <sub>0,05</sub> *	SIGN.
t adição/ t cimento (A)	5	2,00	1,45	2,49	NS
água/ aglomerante (B)	2	42,91	31,12	3,28	S
AB	10	1,12	0,81	2,12	NS
Erro	36	1,38			

GDL grau de liberdade; MQ média calculada; F fator F, calculado ; F<sub>0,05</sub>\* valor de F tabelado, nível de significância de 5% (distribuição de Fisher); S efeito significativo e NS efeito não significativo.

Na Tabela 5.6 apresenta-se significativo apenas o fator relação a/agl.

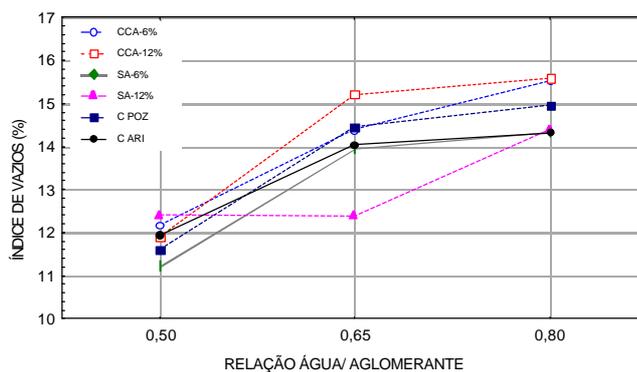
Embora estatisticamente não tenha sido comprovada a influência do tipo de adição e de cimento no índice de vazios (provavelmente devido a variabilidade dos resultados), a Figura 5.8 evidencia uma tendência de comportamento diferenciado em função do tipo de aglomerante.



**FIGURA 5.8** Efeito do tipo de adição e tipo de cimento no índice de vazios dos concretos – valores médios das três relações água/aglomerante.

Em ordem decrescente, observa-se na Figura 5.8 que o índice de vazios dos concretos ensaiados obedecem a seguinte seqüência: concretos com CCA, concretos com C POZ, concretos com C ARI e concretos com adição de SA.

A Figura 5.9 ilustra o efeito dos fatores  $t$  adição/  $t$  cimento e da relação  $a/agl$  nos índices de vazios.



**FIGURA 5.9** Efeito da interação dos fatores relação água/aglomerante e tipo de adição e tipo de cimento nos índices de vazios dos concretos.

Constata-se que os índices de vazios, conforme esperado, são maiores para maiores relações  $a/agl$ . A coerência entre estes resultados e os obtidos no ensaio de resistência à compressão evidencia-se quando observa-se que o comportamento dos concretos com relação  $a/agl$  0,5, diferenciam-se dos demais. Entretanto, não foi encontrado uma justificativa para o comportamento diferenciado dos concretos com relação  $a/agl$  0,65 e teor de adição de 12% de SA. É consenso que a resistência à compressão tem relação inversa com a porosidade (Moskvin 1983; Mehta e Monteiro, 1994), ou seja, quanto maior o índice de vazios, menor a resistência à compressão.

O resumo da análise de variância por tipo de adição é apresentado na Tabela 5.7.

**TABELA 5.7** Resumo da análise de variância (ANOVA) para índice de vazios após saturação e fervera por tipo de adição e tipo de cimento

Fator	CCA	SA	C POZ
	$F_{calc.}$	$F_{cal}$	$F_{cal}$
T adição/ t cimento (A)	1,75	0,21	0,24
Agua/ aglomerante (B)	27,80*	9,09*	12,54*
AB	0,61	1,06	0,32

\* Fatores significativos, nível de significância de 5%.

A relação a/agl, conforme demonstra a Tabela 5.7, é sempre o fator mais importante para o índice de vazios. Verifica-se que  $F_{calc.}$  para o fator relação a/agl dos concretos com CCA é aproximadamente três vezes superior ao dos com adição de SA, e o dobro ao dos concretos com C POZ, caracterizando assim a maior susceptibilidade dos concretos com CCA à variação da relação a/agl em relação aos demais.

### 5.3.2 Grau de saturação dos poros

A Tabela 5.8 apresenta os resultados médios dos ensaios de grau de saturação dos poros, obtidos conforme item 4.6.3.

**TABELA 5.8** Média dos ensaios de grau de saturação dos poros dos concretos

Relação a/agl ®		0,50			0,65			0,80		
t adição - t cimento	Idade (dias) ®	28	63	91	28	63	91	28	63	91
CCA 6%	média	0,96	0,83	0,78	0,93	0,76	0,70	0,91	0,67	0,61
	d. padrão	0,06	0,04	0,04	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
	c. v. (%)	6,71	5,37	4,89	2,64	4,34	4,13	3,77	4,47	3,67
CCA 12%	média	0,95	0,80	0,75	0,95	0,75	0,70	0,86	0,67	0,62
	d. padrão	0,02	0,02	0,00	0,05	0,03	0,03	0,06	0,07	0,06
	c. v. (%)	2,57	2,05	0,32	5,57	4,44	4,79	7,47	10,51	9,33
SA 6%	média	0,94	0,85	0,80	0,90	0,79	0,74	0,91	0,74	0,68
	d. padrão	0,02	0,03	0,03	0,05	0,02	0,01	0,02	0,05	0,04
	c. v. (%)	2,55	3,17	3,52	6,02	2,33	0,79	2,64	6,69	5,91
SA 12%	média	0,91	0,84	0,82	0,90	0,78	0,73	0,94	0,79	0,75
	d. padrão	0,02	0,01	0,01	0,06	0,07	0,07	0,05	0,07	0,07
	c. v. (%)	2,31	1,63	1,66	6,60	8,78	9,13	4,98	8,79	8,77
C POZ	média	0,89	0,68	0,62	0,84	0,65	0,60	0,91	0,60	0,54
	d. padrão	0,04	0,03	0,02	0,16	0,09	0,07	0,06	0,04	0,03
	c. v. (%)	4,48	4,05	2,79	19,09	13,09	11,00	7,04	6,57	6,23
C ARI (ref.)	média	0,97	0,84	0,78	0,88	0,71	0,66	0,89	0,66	0,60
	d. padrão	0,00	0,02	0,03	0,12	0,08	0,07	0,14	0,08	0,07
	c. v. (%)	0,48	2,33	3,86	13,10	11,58	11,19	15,35	12,29	10,87

Os resultados dos ensaios de grau de saturação dos poros caracterizam duas situações distintas: a primeira, por ocasião da troca de ambiente de armazenamento, aos 28 dias

de idade, quando os corpos de prova são transferidos da câmara úmida para a câmara climatizada; a segunda situação, após a permanência dos corpos de prova na câmara climatizada, nas idades de 63 e 91 dias. Conforme apresentado na revisão bibliográfica (item 2.4), a umidade relativa do ambiente tem grande influencia no grau de saturação dos poros. Assim, com o objetivo de evitar que o efeito da mudança de ambiente fosse confundido com o efeito do tempo de exposição num mesmo ambiente, (neste caso, na câmara climatizada), realizou-se a análise de variância em duas etapas. A Tabela 5.9 traz a análise de variância para os ensaios aos 28 dias de idade.

**TABELA 5.9** Análise de variância para o ensaio de grau de saturação dos poros aos 28 dias de idade

Fonte	GDL	MQ	F <sub>cal</sub>	F <sub>0,05</sub> *	SIGN.
t adição / t cimento (A)	5	26,59	0,54	2,49	NS
agua/ aglomerante (B)	2	83,53	1,70	3,27	NS
AB	10	33,08	0,67	2,12	NS
Erro	35	49,12			

GDL grau de liberdade; MQ média calculada; F fator F, calculado ; F<sub>0,05</sub>\* valor de F tabelado, nível de significância de 5% (distribuição de Fisher); S efeito significativo e NS efeito não significativo.

Observa-se na Tabela 5.9 que, aos 28 dias, nas condições ambientais de temperatura aproximadamente 23 °C e umidade relativa do ar maior que 95%, os fatores pesquisados não são estatisticamente significativos para o grau de saturação dos poros.

A Tabela 5.10 apresenta a análise estatística para o ensaio de grau de saturação dos poros aos 63 e 91 dias de idade.

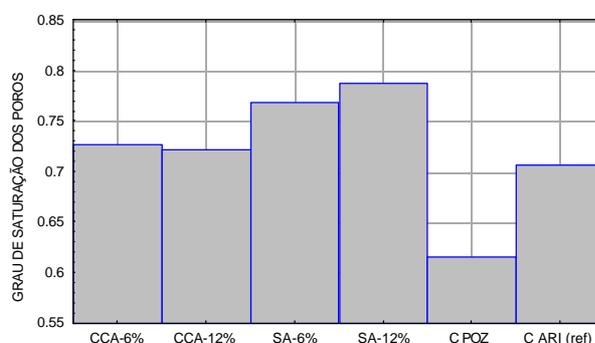
**TABELA 5.10** Análise de variância para o ensaio de grau de saturação dos poros aos 63 e 91 dias de idade.

Fatores	GDL	MQ	F <sub>cal</sub>	F <sub>0,05</sub>	SIGN.
t adição / t cimento (A)	5	0,0651	28,75	2,35	S
agua/ aglomerante (B)	2	0,1348	59,55	3,13	S
idade (C)	1	0,0665	29,38	3,98	S
AB	10	0,0050	2,21	1,97	S
AC	5	0,0004	0,17	2,35	NS
BC	2	0,0004	0,20	3,13	NS
ABC	10	0,0002	0,10	1,97	NS
Erro	72	0,0022			

GDL grau de liberdade; MQ média calculada; F fator F, calculado ; F<sub>0,05</sub>\* valor de F tabelado, nível de significância de 5% (distribuição de Fisher); S efeito significativo e NS efeito não significativo.

Com a mudança para um ambiente de umidade relativa menor que a umidade interna dos concretos, os corpos de prova passam a perder água para o ambiente, e os fatores pesquisados tornam-se significativos (Tabela 5.10). Assim, em ordem decrescente de importância, são significativos os fatores relação a/agl (B), idade (C) e t adição/ t cimento e as

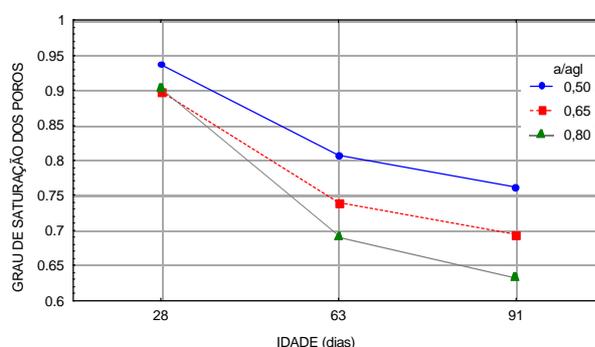
interação t adição/ t cimento x a/agl (interação AB). A exemplo do que foi constatado na análise estatística das propriedades anteriormente estudadas (resistência à compressão e índice de vazios), a relação a/agl é o fator mais significativo. A Figura 5.10 ilustra o efeito do fator t adição/ t cimento no grau de saturação dos poros.



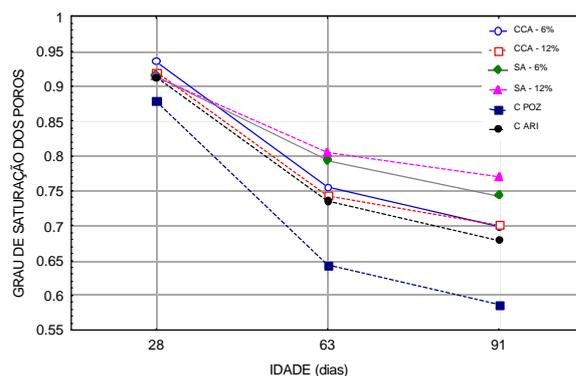
**FIGURA 5.10** Efeito do tipo de adição ou tipo de cimento no grau de saturação dos poros dos concretos aos 63 e 91 dias de idade.

Nota-se, na Figura 5.10, que os concretos que apresentam maior grau de saturação dos poros são concretos com adição de SA, sendo seguidos, em ordem decrescente, pelos concretos com adição de CCA, concretos com C ARI (ref) e, por último, concretos com C POZ. Isto significa dizer que entre os concretos pesquisados, os que contém adição de SA possuem maior capacidade de retenção de umidade, enquanto que os feitos com C POZ perdem água para o ambiente com maior facilidade, quando expostos às mesmas condições ambientais.

Na sequência, as Figura 5.11 e 5.12 ilustram os efeitos dos fatores relação a/agl e idade e dos fatores t adição/ t cimento e idade, respectivamente, no grau de saturação dos poros.



**FIGURA 5.11** Efeito dos fatores idade e relação a/agl no grau de saturação dos poros do concreto.



**FIGURA 5.12** Efeito dos fatores idade e t adição/ t cimento no grau de saturação dos poros do concreto.

Verifica-se na Figura 5.11 que o grau de saturação dos poros é maior para menores relações  $a/agl$ . Da mesma forma, observa-se que na medida em que o concreto fica exposto ao mesmo tipo de ambiente, diminui o grau de saturação dos poros. Na Figura 5.12 nota-se que, aos 28 dias, existe pouca diferença entre os graus de saturação dos poros dos concretos e, segundo a análise estatística (Tabela 5.9), a diferença existente entre eles não é significativa.

Os valores de grau de saturação obtidos aos 28 dias estão coerentes com os encontrados por Lopez et al. (1991), que realizando ensaios em corpos de prova de concreto observaram reduções entre 5 a 10 % da água contida nos poros quando estes foram transportados de uma câmara saturada (vapor d'água) para uma câmara com umidade maior que 90% UR.

Já aos 63 e 91 dias constata-se a interação entre os fatores t cimento/ t adição x relação  $a/agl$  para o grau de saturação dos poros (Tabela 5.10). Nota-se também que para cada tipo de adição e tipo de cimento existe um padrão de comportamento, evidenciado por seu efeito estatisticamente significativo (Tabela 5.10 e Figura 5.12). O resumo da análise de variância por tipo de adição e cimento é apresentada na Tabela 5.11.

**TABELA 5.11** Resumo da análise de variância para grau de saturação dos poros de concretos com cinzas de casca de arroz, sílica ativa e cimento pozolânico, aos 63 e 91 dias de idade.

Fator	CCA	SA	C POZ
	$F_{cal}$	$F_{cal}$	$F_{cal}$
t de adição/ t cimento (A)	0,75	11,78*	23,53*
água/ aglomerante (B)	48,58*	25,68*	15,36*
idade (C)	15,74*	11,18*	8,88*
AB	1,43	2,19	3,02
AC	0,11	0,22	0,00
BC	0,15	0,13	0,007
ABC	0,13	0,05	0,003

\* fatores significativos, nível de significância de 5%

Observa-se, na Tabela 5.11, que cada tipo de adição ou cimento tem comportamento diferenciado quando expostos às mesmas condições ambientais. Da mesma forma, a relação a/agl tem importância relativa para o grau de saturação dos poros, e depende do aglomerante com o qual está se tratando. Assim sendo, as análises estatísticas dos resultados evidenciam a influência direta do tipo de aglomerante e da relação água/aglomerante no grau de saturação dos poros.

### 5.3.3 Perda massa pela evaporação da água

Os resultados do ensaio de perda de água, obtidos de acordo com o item 4.6.4, encontram-se no ANEXO B. A Tabela 5.12 apresenta a análise de variância dos fatores pesquisados e a significância estatística para o ensaio de perda de massa pela evaporação da água.

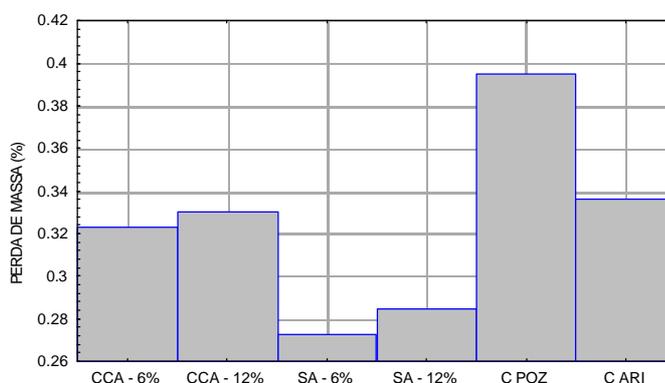
**TABELA 5.12** Análise de variância para ensaio de perda de massa pela evaporação da água

Fatores	GDL	MQ	$F_{cal}$	$F_{0,05}^*$	SIGN.
t. adição/ t cimento (A)	5	0,16	73,36	2,29	S
Água/ aglomerante (B)	2	0,79	371,33	3,07	S
Tempo (C)	6	4,29	2029,57	2,18	S
AB	10	0,01	5,61	1,91	S
AC	30	0,03	12,80	1,55	S
BC	12	0,13	62,66	1,83	S
ABC	60	0,002	0,85	1,43	NS
Erro	371	0,0021			

GDL grau de liberdade; MQ média calculada; F fator F, calculado ;  $F_{0,05}^*$  valor de F tabelado, nível de significância de 5% (distribuição de Fisher); S efeito significativo e NS efeito não significativo.

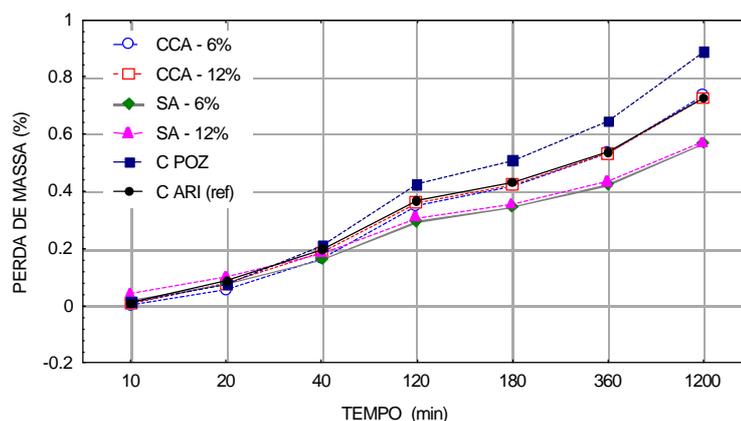
Na Tabela 5.12 observa-se que todos os fatores são significativos para a perda de massa pela evaporação da água, e obedecem a seguinte ordem de importância: tempo, relação a/agl e t adição/ t cimento. Também são estatisticamente significativas as interações entre os fatores t de adição/ t de cimento x a/agl (AB), a/agl x tempo (BC) e t adição/ t cimento x tempo

(AC). A Figura 5.13 ilustra o efeito do tipo de aglomerante na perda de massa pela evaporação da água.



**FIGURA 5.13** Efeito médio do fator tipo de adição e tipo de cimento na perda de massa pela evaporação da água.

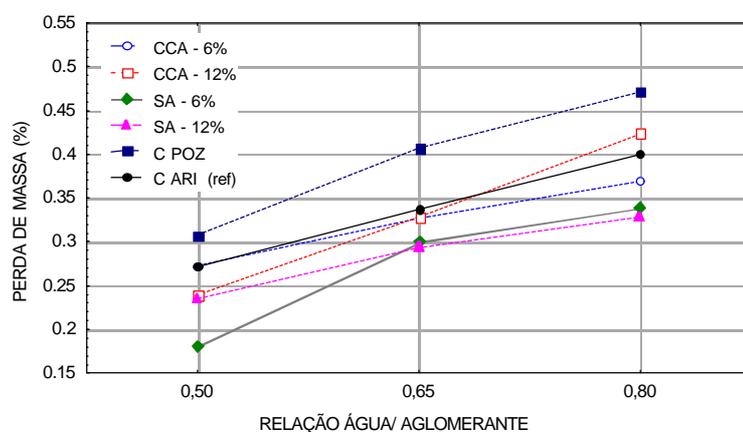
Na Figura 5.13 nota-se que, quanto à perda de massa pela evaporação da água, em ordem decrescente, os concretos classificam-se da seguinte forma: concretos com C POZ, concretos com C ARI, concretos com CCA e concretos com SA, e conforme mencionado anteriormente, esta diferença é estatisticamente significativa. O efeito dos fatores tempo e  $t$  de adição e  $t$  de cimento na perda de massa pela evaporação da água estão ilustrados na Figura 5.14.



**FIGURA 5.14** Efeito dos fatores tempo e tipo de adição e de cimento na perda de massa pela evaporação da água.

Observa-se na Figura 5.14, que inicialmente os concretos apresentam comportamento aproximadamente similares, e que com o decorrer do tempo comportam-se de acordo o tipo de adição ou tipo de cimento. Conforme demonstra a análise estatística, este

fator é significativo. A Figura 5.15 apresenta o efeito dos fatores relação a/agl e t adição/ t cimento na perda de massa pela evaporação da água.



**FIGURA 5.15** Efeito dos fatores relação água/ aglomerante versus tipo de adição e cimento na perda de massa pela evaporação da água do concreto.

Nota-se na Figura 5.15 que a relação a/agl tem relação direta com a perda de massa pela evaporação de água dos concretos, da mesma forma que identifica-se o comportamento padronizado dos concretos, conforme o tipo de adição ou tipo de cimento. A Tabela 5.13 apresenta o resumo da análise de variância das adições e tipo de cimento comparados aos concretos de referência.

**TABELA 5.13** Resumo da análise de variância para perda de massa pela evaporação da água concretos com adição de cinzas de casca de arroz, sílica ativa e cimento pozolânico

Fator	C. de casca de arroz	Sílica ativa	C. Pozolânico
	$F_{cal}$	$F_{cal}$	$F_{cal}$
t adição / t cimento (A)	2,18	53,78*	51,68*
água/ aglomerante (B)	224,06*	190,16*	106,72*
tempo (C)	1391,60*	897,59*	693,82*
AB	8,17*	6,40*	2,08
AC	0,46	8,76*	8,56*
BC	32,18*	33,35*	23,65*
ABC	0,69	0,31	0,85

\* fatores significativos, nível de significância de 5%

Observa-se na Tabela 5.13 que são significativos os fatores tempo, relação a/agl e para os concretos com adição de SA e C POZ, o t adição/ t cimento. O Quadro 5.14 resume, em ordem decrescente, o comportamento dos concretos em função dos aglomerantes nos ensaios relacionados à porosidade.

**QUADRO 5.14** Classificação dos concretos em ordem decrescente, por tipo de ensaio.

<b>Índice de vazios (91 dias)</b>	<b>Grau de saturação dos poros (91 dias)</b>	<b>Perda de massa pela evaporação da água (140 dias)</b>
CCA	SA	C POZ
C POZ	CCA	C ARI
C ARI	C ARI	CCA
SA	C POZ	AS

Observando-se as colunas um e dois do Quadro 5.14 verifica-se que, maior índice de vazios não corresponde, necessariamente, um menor grau de saturação dos poros. Entretanto, este fato parece coerente, uma vez que os concretos pesquisados receberam adições. Sabe-se da literatura que o produto da reação pozolânica que ocorre entre o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), resultante da hidratação do cimento, e a adição, precipita-se nos poros capilares, provocando um refinamento dos poros. O volume da massa que precipita é pequeno e insuficiente para preencher os poros maiores, porém é suficiente para obstruir as finas conexões que ocorrem entre os poros maiores, ou então reduzi-los (Massazza, 1993). No caso dos concretos feitos com C POZ, foi observado anteriormente que este tipo de cimento contém alto teor de adição, e portanto, os concretos que foram feitos com este tipo de cimento receberam aproximadamente a metade de clínquer que os demais.

Outro motivo para este comportamento diferenciado pode estar nas características físico-químicas das adições. Embora a sílica ativa e a cinza de casca de arroz apresentem altas superfícies específicas e altos teores de sílica na fase amorfa (item 4.3.1.2), a sílica ativa possui grãos muito menores que a cinza de casca de arroz. Por outro lado, a cinza de casca de arroz tem estrutura porosa, o que justifica sua alta superfície específica (Zhang et al., 1996).

Comparando-se os dados das colunas dois e três do Quadro 5.14 (grau de saturação dos poros e perda de massa pela evaporação da água), nota-se que a ordem dos concretos é inversa, ou seja, concretos que apresentam maiores grau de saturação dos poros tem menores taxas de perda de água por evaporação, evidenciando a coerência entre os resultados obtidos nestes ensaios.

Com base no que foi observado na análise dos itens 5.3.1, 5.3.2 e 5.3.3, pode-se inferir que o efeito das adições nas propriedades relacionadas à porosidade é significativa. Os resultados destes ensaios estão coerentes com os obtidos nos ensaios de resistência à compressão axial.

## 5.4 RESISTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE

## 5.4.1 Resultados e análise geral dos dados

Conforme apresentado no item 4.5, os corpos de prova destinados à medida ensaio de resistividade aparente foram submetidos à 3 condições de exposição. São elas: cura em câmara úmida até os 28 dias (T~ 23°C e UR > 95%); permanência em câmara climatizada (T ~ 23°C e UR ~65%) dos 28 aos 91 dias e partir dos 91 dias imersão em água potável.

Considerando que o meio a que são expostos os corpos são distintos, optou-se por proceder a análise estatística em separado, por ambiente de exposição, de forma a não confundir o efeito das mudanças das condições ambientais com as alterações que se processam no concreto em função da idade, bem como o efeito do ambiente nos concretos. As Tabelas 5.15 a 5.17 apresentam os valores médios dos ensaios de medida de resistividade.

**TABELA 5.15** Resultado médios obtidos nos ensaios de resistividade elétrica aparente para concretos com relação a/agl 0,5

t cimento/ t adição	Idade ®	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias	63 dias	91 dias	98 dias	112 dias	217 dias
CCA-6%	média*	9239	9428	15169	15559	31859	42736	12703	14119	14733
	d. padrão*	1890,3	2110,5	3853,3	734,8	4000,1	7967,3	1907,8	1675,5	3583,6
	c. v.*	20,5	22,4	25,4	4,7	12,6	18,6	15,0	11,9	24,3
CCA-12%	Média	8529	11458	13818	14320	41401	52581	17059	18237	23409
	d. padrão	713,0	1133,5	1616,5	7709,9	2088,9	2706,7	2445,6	2684,3	1673,2
	c. v.	8,4	9,9	11,7	53,8	5,0	5,1	14,3	14,7	7,1
SA-6%	Média	7114	11463	16320	24578	87142	80609	30960	34448	37530
	d. padrão	461,8	2235,3	856,6	12679,5	6308,1	9541,4	4096,8	4562,6	4002,2
	c. v.	6,5	19,5	5,2	51,6	7,2	11,8	13,2	13,2	10,7
SA-12%	Média	6411	8838	30757	40057	101291	156669	64278	72186	66158
	d. padrão	1269,6	1146,4	5458,2	22822,8	5200,3	39954,4	2509,2	9985,1	10982,3
	c. v.	19,8	13,0	17,7	57,0	5,1	25,5	3,9	13,8	16,6
C POZ	Média	5044	9602	10994	15945	72223	94104	23969	32263	54499
	d. padrão	1761,0	3694,2	3197,1	3091,0	19833,6	24187,3	1590,8	2067,9	6741,1
	c. v.	34,9	38,5	29,1	19,4	27,5	2 5,7	6,6	6,4	12,4
C ARI	Média	7780	12057	13104	13932	25991	34030	12266	13927	13567
	d. padrão	898,4	730,7	1460,7	973,1	3029,8	2855,4	1303,3	2565,2	2036,1
	c. v.	11,5	6,1	11,1	7,0	11,7	8,4	10,6	18,4	15,0

\*média: ohm.cm; d padrão: ohm.cm; c.v.: %

**TABELA 5.16** Resultados médios obtidos nos ensaios de resistividade elétrica aparente para concretos com relação a/agl 0,65

t. adição/ t cimento	Idade ®	3 idas	7 dias	14 dias	28 dias	63 dias	91 dias	98 dias	112 dias	217 dias
CCA-6%	média*	8439	10787	14617	17225	40162	58781	10550	11669	12460
	d. padrão*	594,7	902,7	1212,6	1549,5	2663,7	6780,0	463,5	1590,3	1062,3
	c. v.*	7,0	8,4	8,3	9,0	6,6	11,5	4,4	13,6	8,5
CCA-12%	Média	6120	10540	11597	13060	37976	60796	13562	14531	18424
	d. padrão	586,6	589,9	2795,4	3359,9	12383,5	3813,5	1368,9	1360,4	2195,7
	c. v.	9,6	5,6	24,1	25,7	32,6	6,3	10,1	9,4	11,9
SA-6%	Média	5629	9368	13961	24915	48698	69749	19779	22307	23292
	d. padrão	634,4	1107,0	2688,7	2249,8	13869,0	9308,1	2833,2	1774,3	470,4
	c. v.	11,3	11,8	19,3	9,0	28,5	13,3	14,3	8,0	2,0
SA-12%	Média	6185	7634	25862	38790	117330	200325	36102	43915	43892
	d. padrão	1159,2	1599,2	4777,3	4868,9	19223,5	134605,7	4836,2	4260,2	6259,9
	c. v.	18,7	20,9	18,5	12,6	16,4	67,2	13,4	9,7	14,3
C POZ	Média	3483	10603	11896	16302	97566	118069	17326	22070	47982
	d. padrão	1308,0	3178,7	4276,3	4069,9	25297,2	14779,7	1215,1	2813,9	1478,2
	c. v.	37,6	30,0	35,9	25,0	25,9	12,5	7,0	12,7	3,1
C ARI	Média	6112	10368	10263	10726	27402	36690	9378	9910	10704
	d. padrão	945,4	420,6	843,9	459,0	2316,1	2822,2	612,0	1516,2	1247,5
	c. v.	15,5	4,1	8,2	4,3	8,5	7,7	6,5	15,3	11,7

\*média: ohm.cm; d padrão: ohm.cm; c.v.: %

**TABELA 5.17** Resultados médios obtidos nos ensaios de resistividade elétrica aparente para concretos com relação a/agl 0,8

t. adição/ t cimento	Idade ®	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias	63 dias	91 dias	98 dias	112 dias	217 dias
CCA-6%	média*	6206	9819	11335	12635	42614	63240	10568	10625	11091
	d. padrão*	1062,3	1303,3	1286,2	2523,8	3579,5	8456,6	931,6	994,6	1541,0
	c. v.*	17,1	13,3	11,3	20,0	8,4	13,4	8,8	9,4	13,9
CCA-12%	Média	4415	9962	11265	12587	49939	85058	11437	12109	16227
	d. padrão	480,6	739,2	2240,1	2210,2	5927,0	7426,1	1657,2	864,1	1398,4
	c. v.	10,9	7,4	19,9	17,6	11,9	8,7	14,5	7,1	8,6
SA-6%	Média	7342	8717	19765	26643	77752	111522	18071	19633	20250
	d. padrão	1490,8	989,6	3679,6	2922,2	12324,9	59211,4	1228,8	2661,2	2207,2
	c. v.	20,3	11,4	18,6	11,0	15,9	53,1	6,8	13,6	10,9
SA-12%	Média	4943	8688	15726	28162	91248	121120	23523	26633	30613
	d. padrão	1040,4	3605,3	2627,5	3215,0	6986,2	67815,2	2762,7	3213,4	6995,0
	c. v.	21,0	41,5	16,7	11,4	7,7	56,0	11,7	12,1	22,8
C POZ	Média	4387	10658	14067	21098	134235	165118	17175	18647	42589
	d. padrão	389,3	1275,4	1178,6	9334,9	59788,7	54659,4	1911,5	2330,2	2402,3
	c. v.	8,9	12,0	8,4	44,2	44,5	33,1	11,1	12,5	5,6
C ARI	Média	9150	13091	15756	16116	42501	70195	9592	10261	9122
	d. padrão	1884,1	2917,5	3951,8	2818,3	9623,1	20800,5	970,6	458,1	1378,7
	c. v.	20,6	22,3	25,1	17,5	22,6	29,6	10,1	4,5	15,1

\*média: ohm.cm; d padrão: ohm.cm; c.v.: %

As Tabelas 5.18 a 5.20 apresentam as análises estatística para as três condições de exposição dos corpos de prova.

**TABELA 5.18** Análise de variância para ensaio de resistividade medidos aos 3, 7, 14 e 28 dias

Fator	GDL	MQ	F <sub>cal</sub>	F <sub>0,05</sub> *	SIGN.
t adição/ t de cimento (A)	5	436674.10 <sup>3</sup>	26,18	2,21	S
Agua/ aglomerante (B)	2	445354.10 <sup>2</sup>	2,67	3,00	NS
Idade (C)	3	256469.10 <sup>4</sup>	153,77	2,60	S
AB	10	690504.10 <sup>2</sup>	4,14	1,83	S
AC	15	261209.10 <sup>3</sup>	15,66	1,67	S
BC	6	41361	0,25	2,10	NS
ABC	30	171967.10 <sup>2</sup>	1,03	1,46	NS
Erro	214	166783.10 <sup>2</sup>			

GDL grau de liberdade; MQ média calculada; F fator F, calculado ; F<sub>0,05</sub>\* valor de F tabelado, nível de significância de 5% (distribuição de Fisher); S efeito significativo e NS efeito não significativo.

**TABELA 5.19** Análise de variância para ensaio de resistividade medidos aos 63 e 91 dias

Fator	GDL	MQ	F <sub>cal</sub>	F <sub>0,05</sub> *	SIGN.
t adição/ t de cimento (A)	5	286576.10 <sup>5</sup>	28,80	2,24	S
Agua/ aglomerante (B)	2	381965.10 <sup>4</sup>	3,84	3,02	S
Idade (C)	1	199520.10 <sup>5</sup>	20,05	3,87	S
AB	10	268244.10 <sup>4</sup>	2,70	1,86	S
AC	5	124720.10 <sup>4</sup>	1,25	2,24	NS
BC	2	526317.10 <sup>3</sup>	0,52	3,02	NS
ABC	10	441372.10 <sup>3</sup>	0,44	1,86	NS
Erro	97	994900.10 <sup>3</sup>			

GDL grau de liberdade; MQ média calculada; F fator F, calculado ; F<sub>0,05</sub>\* valor de F tabelado, nível de significância de 5% (distribuição de Fisher); S efeito significativo e NS efeito não significativo.

**TABELA 5.20** Análise de variância para ensaio de resistividade medidos aos 98, 112 e 217 dias

Fator	GDL	MQ	F <sub>cal</sub>	F <sub>0,05</sub> *	SIGN.
t adição / t cimento / (A)	5	653788.10 <sup>4</sup>	394,28	2,21	S
Agua/ aglomerante (B)	2	356082.10 <sup>4</sup>	214,74	3,00	S
Idade (C)	2	980419.10 <sup>3</sup>	59,13	3,00	S
AB	10	713159.10 <sup>3</sup>	43,01	1,83	S
AC	10	416051.10 <sup>3</sup>	25,09	1,83	S
BC	4	9028392	0,54	2,37	NS
ABC	20	158660.10 <sup>2</sup>	0,96	1,57	NS
Erro	161	165817.10 <sup>2</sup>			

GDL grau de liberdade; MQ média calculada; F fator F, calculado ; F<sub>0,05</sub>\* valor de F tabelado, nível de significância de 5% (distribuição de Fisher); S efeito significativo e NS efeito não significativo.

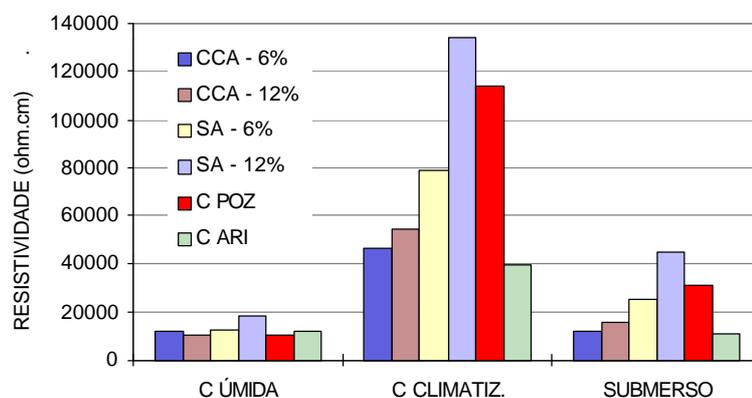
A Tabela 5.21 resume, por ordem de importância, os fatores, de acordo com a condição de exposição dos concretos.

**TABELA 5.21** Resumo dos fatores significativos para a resistividade por ordem de importância

Idade (dias) ®	Câmara úmida	Câmara climatizada	Submerso
	3, 7, 14, 28	63 e 91	98, 112 e 217
Fatores Significativos	Idade t cim t cim x idade t cim x a/ agl	t cim idade a/ agl t cim x a/agl	t cim a/ agl idade T cim x a/ agl T cim x idade

Observa-se, nas análises de variância, Tabelas 5.18 a 5.21, que o grau de importância dos fatores está ligado à idade e às condições ambientais a que foi exposto o concreto.

A Figura 5.16 apresenta o efeito do fator t adição/t cimento na resistividade do concreto para as 3 condições de exposição.



**FIGURA 5.16** Efeito fator tipo e teor de adição e tipo de cimento na resistividade elétrica média dos concretos.

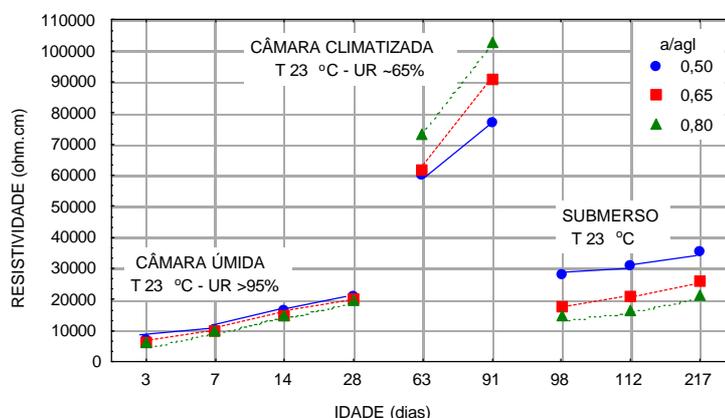
Quando o concreto está em processo de cura, sua resistividade reflete a evolução das reações de hidratação. Nestas circunstâncias, mesmo levando-se em conta que concretos com diferentes tipos de adições tenham as velocidades de reação de seus compostos diferenciadas, a quantidade de eletrólito disponível, proporcionado pelo ambiente de cura, é grande. Consequentemente, o efeito da relação água aglomerante não é significativo (Tabela 5.18). Além disto, a umidade relativa ambiente, geralmente >95%, possibilita um alto grau de saturação dos poros (entre 89 a 97% aos 28 dias), conforme pode ser constatado nas Figuras 5.11 e 5.12 e Tabela 5.8. Assim, o concreto, de uma forma geral, dispõe de eletrólito suficiente para possibilitar baixos valores de resistividade elétrica.

Nota-se, também, na Figura 5.16, que os concretos apresentam resistividade maior quando encontram-se na câmara climatizada e o efeito do tipo de cimento na resistividade do concreto é significativo (Tabelas 5.19 e 5.21). Entretanto, observa-se que nestas condições pode

haver maiores diferenças de resistividade decorrentes da resistência de contato entre o eletrodo e o concreto pelo fato deste estar mais seco. Outro fator que pode também ser responsável pelo acentuado incremento no valor da resistividade é o fato de que a ddp aplicada entre os eletrodos externos de 5 V gera no concreto parcialmente seco correntes muito baixas, chegando a valores da ordem de 4  $\mu\text{A}$ . Millard et al. (1989) demonstram que os valores de correntes ideais estão acima de 200 mA, pois correntes abaixo deste valor são responsáveis por consideráveis incrementos de resistividade (item 3.2.1.3).

Entretanto, este problema pode ter sido contornado, pelo menos em parte, devido à impedância de entrada do equipamento utilizado para medida, especificado pelo fabricante em  $10^6$  ohm. Outros fatores geradores de erros são descritos no Capítulo 3.

Quando submersos, todos os poros que são acessíveis à água são preenchidos, e desta forma os concretos tem uniformizada a disponibilidade de eletrólito. Assim, a resistividade do concreto é condicionada pelas características do eletrólito (íons), decorrentes do tipo de aglomerante, bem como por características físicas do concreto proporcionada pela relação a/ agl (Cao e Sirivivatnanon, 1991) e efeito pozolânico, conforme constatado pela análise de variância. A Figura 5.17 também ilustra o que foi discutido.



**FIGURA 5.17** Efeito médio da relação água/ aglomerante na resistividade elétrica dos concretos.

A diferença de resistividade entre concretos de diferentes relações a/agl é atribuída, no caso dos concretos expostos em câmara climatizada, à maior porosidade e ao conseqüente aumento na perda de umidade dos concretos de relação a/agl mais altas, conforme foi observado no item 5.3. Já quando os corpos de prova encontram-se imersos, a densificação da estrutura dos poros do concreto, proporcionada pela menor relação a/agl, torna-o mais resistivo.

## 5.4.2 Análise por tipo de adição e tipo de cimento

### 5.4.2.1 Cinza de casca de arroz

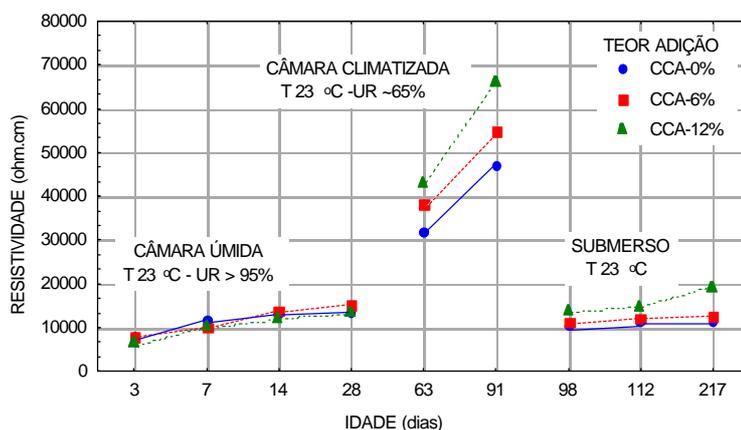
A Tabela 5.22 resume os fatores significativos, por ordem de importância, para a resistividade elétrica de concretos com adição de CCA.

**TABELA 5.22** Fatores significativos para a resistividade por ordem de importância

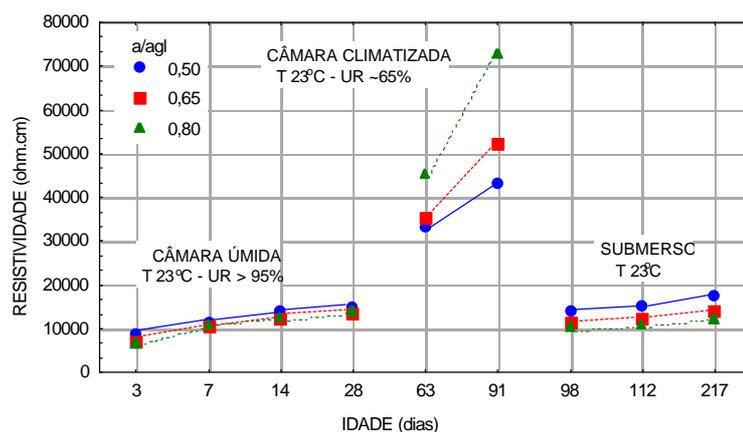
Idade (dias) ®	Câmara úmida	Câmara climatizada	Submerso
	3, 7, 14, 28	63 e 91	98, 112 e 217
Fatores	Idade (64,35)*	idade (103,51)*	T adição (92,87)*
Significativos	t. adição x a/agl (11,34)*	a/agl (48,21)*	a/agl (63,98)*
	A/agl (4,39)*	t adição ( 23,83)*	Idade (20,42)*
	t adição (3,38)*	a/agl x idade (8,33)*	t adição x idade (8,46)*
		t adição x a/agl (4,06)*	t adição x a/agl (3,29)*

\* Fatores significativos, nível de significância de 5%

Observa-se na Tabela 5.22 que a ordem de importância dos fatores está relacionada com o ambiente em que se encontra o corpo de prova. Também observa-se que, em nenhuma das condições pesquisadas, a relação a/agl mostrou-se ser o fator mais significativo. As Figuras 5.18 e 5.19 ilustram o efeito do teor da adição e da relação á/agl na resistividade elétrica dos concretos com adição de CCA.



**FIGURA 5.18** Efeito do teor de adição de CCA, da idade e do ambiente na resistividade elétrica do concreto.



**FIGURA 5.19** Efeito da relação água/aglomerante, idade e do ambiente na resistividade elétrica de concretos com CCA.

Verifica-se na Figura 5.18 que, após o período de cura, os concretos com adição sempre possuem resistividade maior que os sem adição de CCA, sendo que a resistividade aumenta com o teor de adição. O maior valor de resistividade, quando os corpos de prova encontram-se em câmara úmida, pode ser atribuído à maior porosidade dos concretos com adição de CCA, conforme identificado no ensaio de índice de vazios (item 5.3.1). Entretanto, isto não justifica o resultado superior dos concretos com adição quando os corpos de prova encontram-se submersos. Sendo assim, os resultados, neste caso, podem ser atribuídos às características de condutibilidade conferidas pela adição de CCA.

Observa-se na Figura 5.19 que, conforme esperado, os valores de resistividade obtidos encontram-se de acordo com o comportamento geral dos concretos no que se refere à relação a/agl, verificado no item anterior.

Os resultados obtidos demonstram que existe uma influência da adição da CCA na resistividade elétrica dos concretos feitos com esta adição. Observando os resultados da Figura 5.18 na condição submersa, nota-se que os resultados sugerem um gradual incremento na resistividade com o decorrer da idade. Os resultados também demonstram que não existe uma linearidade no comportamento da resistividade elétrica em relação à resistência à compressão, que no caso foi menor que a dos concretos de referência. Da mesma forma, o maior índice de vazios observado nos concretos com adição de CCA não é acompanhado por equivalente diminuição no grau de saturação dos poros ou perda de massa devida à evaporação da água. Enquanto o incremento na porosidade do concreto é atribuído à porosidade da CCA, a aparente dificuldade que o mesmo apresenta em perder água é atribuído ao refinamento dos poros causado pela adição.

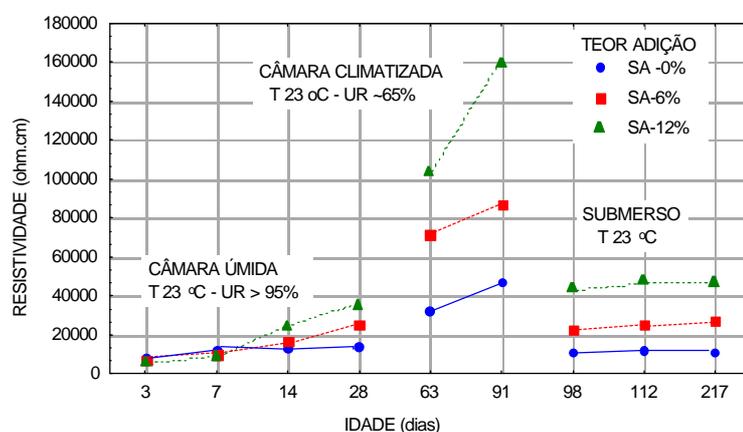
## 5.4.2.2 Sílica ativa

Os fatores significativos para os concretos com adição de SA são apresentados, por ordem de importância, na Tabela 5.23. As Figuras 5.20 e 5.21 ilustram o efeito dos fatores teor de adição relação a/agl, idade e ambiente de exposição na resistividade elétrica dos concretos.

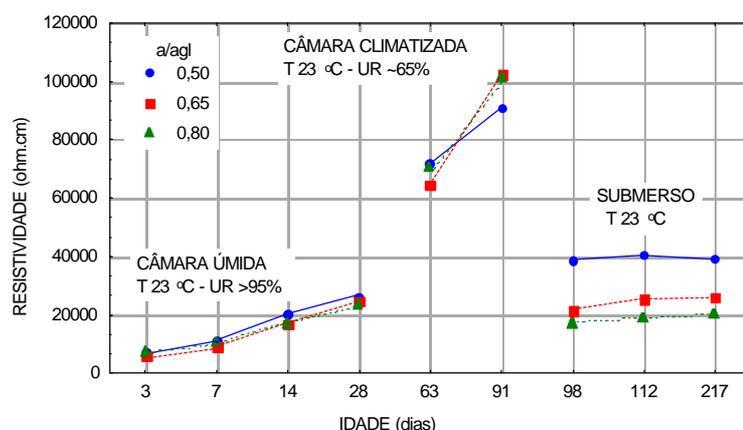
**TABELA 5.23** Fatores significativos para a resistividade por ordem de importância

Ambiente de exposição		
Câmara úmida	Câmara climatizada	Submerso
Idade (96,4)*	teor adição (27,4)*	Teor adição (397,8)*
Teor adição (23,6)*	Idade (8,5)*	a/ aglom. (143,4)*
t ad. x idade (17,6)*	t ad. x a/agl (2,94)*	t ad. x a/agl (45,0)*
t ad. x a/agl (5,22)*		

\* - valores de F calculados, significativos, nível de significância a 5%,



**FIGURA 5.20** Efeito do teor de adição de SA, da idade e do ambiente na resistividade elétrica do concreto.



**FIGURA 5.21** Efeito do teor de adição de sílica ativa, da idade do ambiente na resistividade elétrica do concreto.

Observa-se que durante a cura, o efeito da relação a/agl não é significativo para os concretos com adição de sílica ativa, mas o teor de adição (Tabela 5.23 e Figura 5.20), e principalmente a idade tem efeito significativo.

Quando os corpos de prova são expostos ao ambiente da câmara climatizada, a relação água/aglomerante não é significativa (Tabela 5.23), embora observe-se na Figura 5.21 que com o decorrer do tempo, nas condições analisadas, concretos com maior relação água/aglomerante atinjam maiores valores de resistividade elétrica. Comparando a Figura 5.21 com a Figura 5.19 nota-se que, aos 63 dias de idade, nos concretos com adição de CCA a resistividade dos concreto de relação a/agl mais altos é maior, ao contrário do que ocorre com os concretos com adição de SA. De acordo com o que foi observado nos ensaios de índice de vazios, grau de saturação dos poros e perda de massa pela evaporação da água, os concretos com adição de CCA são mais susceptíveis à umidade relativa de 65% que os com adição de SA, que perdem umidade de forma mais lenta. Este efeito parece manifestar-se também através da resistividade elétrica, que, conforme foi colocado na revisão bibliográfica, é muito sensível à umidade do corpo de prova.

Entretanto, ao serem imersos, a resistividade elétrica dos concretos com adição de SA comportam-se de acordo com o esperado, ou seja, concretos de menor relação a/agl tem maior valor de resistividade elétrica (Figura 5.21). Observa-se também que concretos com relação a/agl 0,5 tem comportamento diferenciado em relação aos com 0,65 e 0,8, à semelhança do que se verifica nos demais ensaios.

Os resultados obtidos estão coerentes com os observados por alguns pesquisadores, como por exemplo, os apresentados por Vennesland e Gjorv (1983), que observaram que concretos sem adição e consumos de cimento de 100, 250 e 450 kg/m<sup>3</sup> não tiveram valores diferenciados de resistividade elétrica. Entretanto, adições de 10 e 20% conferiram aos concretos incrementos de resistividade elétrica de até 18,5 vezes, sendo que a maior resistividade elétrica foi em concretos com maior teor de adição e cimento.

O desempenho de concretos com adição de sílica ativa em meio corrosivo foi observado por pesquisadores como Torii et al. (1994) e Rasheeduzzaffar et al. (1992). Rasheeduzzaffar et al.(1992), avaliando o tempo para início da corrosão em ensaio acelerado, verificaram que concretos com adição de sílica ativa em teores de 20% apresentaram resultados até 3,71 vezes superior a concretos sem adição.

A partir do que foi observado nos experimentos, pode-se dizer que a sílica ativa, além de proporcionar incremento de resistência mecânica, também confere ao concreto maior

resistividade elétrica, o que sugere que concretos com adição possam ter maior capacidade de proteger a armadura contra a corrosão.

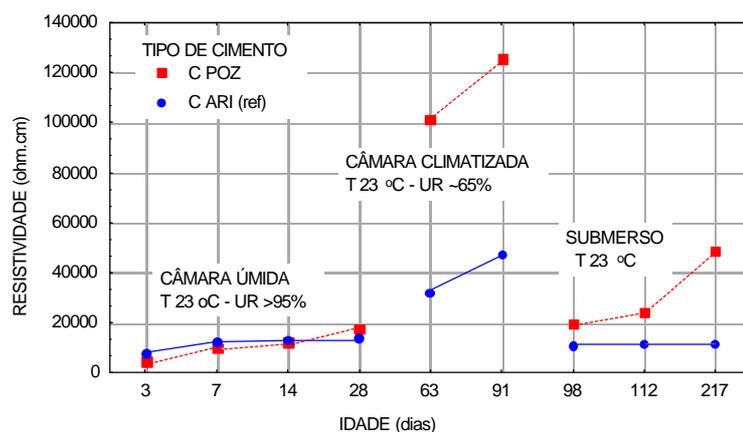
#### 5.4.2.3 Cimento pozolânico

A Tabela 5.24 resume os fatores significativos para a resistividade elétrica de concretos com C POZ e C ARI e as Figuras 5.22 e 5.23 ilustram o efeito do tipo de cimento, da relação a/c, idade e ambiente de exposição nesta propriedade.

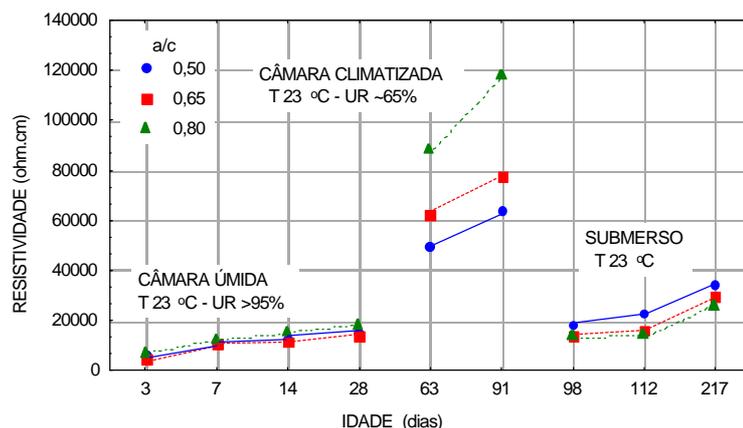
**TABELA 5.24** Resumo das análises de variância para o ensaio de resistividade elétrica.

	Ambiente de exposição		
	C. úmida	C. climatiz.	Submerso
Fatores	Idade (43,5)*	t cim (117,4)*	t cim (1285,9)*
Significativos	a/c (8,3)*	a/c (14,7)*	Idade (269,9)*
	t cim x id (6,9)*	Idade (8,3)*	t cim x id (254,8)*
			a/c (62,3)*
			t cim x a/c (14,3)*

\* - valores de F calculados, significativos, nível de significância a 5%.



**FIGURA 5.22** Efeito do tipo de cimento, da idade e do ambiente na resistividade elétrica do concreto.



**FIGURA 5.23** Efeito da relação água/ cimento, da idade e do ambiente na resistividade elétrica do concreto

Observa-se, na Tabela 5.24, que a influência do meio no valor da resistividade é grande. Pode ser observado também nas Figuras 5.22 e 5.23 que quando os corpos de prova encontram-se em ambiente de cura, o efeito do fator água/cimento é pouco significativo. Entretanto isto não acontece nas outras duas situações. O acentuado incremento na resistividade dos corpos de prova quando estes são transferidos da câmara úmida para a câmara climatizada pode ser explicado pelo fato de que, estando os corpos de prova em um ambiente onde a umidade relativa é baixa, ocorre uma perda de água para o ambiente, sendo que quanto maior a porosidade, mais rapidamente o concreto perde água. Isto pode ser visto na Figura 5.13, onde se verifica que concretos feitos com cimento CP IV-32 perdem muito mais água que concretos feitos com cimento CP V-ARI e através da Figura 5.23, onde quanto maior a relação água/cimento, maiores são os valores da resistividade. Conforme a análise dos resultados de índice de vazios (item 5.3.1), os concretos feitos com cimento CP IV-32 possuem maior porosidade total que os feitos com cimento CP V-ARI.

Entretanto isto não justifica o resultado de resistividade significativamente favorável aos concretos feitos com cimento CP IV-32 (Figura 5.22), quando os corpos de prova se encontram submersos. Nestas condições, os corpos de prova apresentam resultados de resistividade conforme esperado, ou seja, concretos com maior relação a/c tem menores valores de resistividade. Este fato pode ser explicado pelo efeito físico causado pelas cinzas volante, que mudam a microestrutura do concreto, bem como por sua ação química, que torna o eletrólito mais resistivo em relação aos concretos feitos com cimento sem adição cinzas.

Os resultados de resistividade obtidos estão coerentes com os encontrados por pesquisadores como Rasheeduzzaffar et al. (1987) e Hussain e Rasheeduzzaffar (1994), que

também verificaram o efeito favorável da cinza volante à resistividade elétrica, quando comparado a concretos feitos com cimento sem a adição.

Os melhores resultados observados nos valores de resistividade elétrica dos concretos devidos às cinzas volantes presentes no cimento CP IV-32, mesmo para traços com alta relação água/ cimento, não implicam em que estes concretos tenham desempenho satisfatório frente à corrosão das armaduras, conforme atestam pesquisas feitas por Rasheeduzzaffar et al.(1987) e Dhir et al. (1994). Por meio de ensaios acelerados de corrosão em presença de cloretos, Rasheeduzzaffar et al. (1987) verificaram que a substituição de cinzas volante por parte do cimento proporciona ao concreto melhor desempenho, e que esta melhoria no desempenho decresce com o incremento da relação água/ cimento, quando comparado a concretos feitos com cimento sem a adição de cinzas. Os autores investigaram concretos com relação água/ aglomerante variando entre 0,34 e 0,65 e observaram que para um mesmo teor de adição, o efeito favorável da adição é progressivamente menor com o incremento da relação água/ aglomerante.

Observa-se que da mesma forma que ocorreu para os concretos com adição de CCA, os resultados das propriedades analisadas para os concretos com CPOZ não apresentam-se de maneira linear em relação à resistividade, ao contrário do que foi obtido para os concretos com adição de sílica ativa. Isto sugere que as adições, mesmo as que possuem características químicas bastante parecidas, como é o caso da SA e da CCA, podem apresentar resultados muito diferentes, dependendo da propriedade pesquisada e das condições em que se realiza o ensaio.

## 5.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS ENSAIOS FEITOS PELO MÉTODO NBR 9204/1985

Embora os resultados obtidos com o uso deste método não sejam objeto de discussão neste trabalho, pelos motivos citados anteriormente ( item 4.1), parece-nos oportuno tecer alguns comentários sobre o que foi observado por ocasião da realização dos ensaios:

- verificou-se que havendo polarização, a queda da corrente foi diferenciada para os diversos tipos de concreto. Uma vez que foram utilizadas diferentes adições na composição dos concretos, esta diferença de comportamento provavelmente se deve às diferença de eletrólito conferidas pelas adições. Entretanto, a forma de coleta dos dados impossibilitou a obtenção de maiores informações sobre este comportamento;

- o ensaio é de difícil execução, porque utiliza-se mercúrio para contato elétrico. Sabe-se que o mercúrio é material tóxico, que volatiliza mesmo à temperatura ambiente contaminando a atmosfera mais próxima, podendo assim ser inalado ou absorvido pela pele (Sax, 1951).
- à exemplo do que foi observado por Palermo (1982) e Cascudo (1991), os resultados obtidos neste ensaio apresentam grande variabilidade, o que dificulta qualquer conclusão. Os resultados dos ensaios podem ser encontrados no ANEXO B.

## 6 CONCLUSÕES

### 6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Da revisão bibliográfica constatou-se que a resistividade elétrica dos concretos são susceptíveis aos mais variados fatores, tantos os relacionados com o ambiente quanto à grande variabilidade existente nas características dos concretos.

Assim sendo, dentro das metas e limites estabelecidos para esta investigação, observou-se de uma forma mais ampla, que *o efeito das adições na resistividade elétrica aparente dos concretos é significativo, da mesma forma que são significativos os fatores relação água/aglomerante e a idade.*

A identificação do efeito estatisticamente significativo das adições, observado principalmente para os ensaios de resistividade elétrica e resistência à compressão, induziu ao desdobramento das análises estatística por tipo de adição e tipo de cimento para todos os ensaios. Isto possibilitou obter as seguintes conclusões:

- O uso de cinzas de casca de arroz como adição no concreto mostrou-se ser favoravelmente significativo para a resistividade elétrica, principalmente quando este encontra-se submerso e em idades mais avançadas. Da mesma forma, a adição desta pozolana é benéfica para a melhoria de propriedades de permeabilidade, embora de forma não significativa do ponto de vista estatístico;

- A adição de sílica ativa no concreto possibilita obter concretos significativamente mais resistentes e com maior resistência mecânica, tendo-se evidenciado seu efeito favoravelmente significativo em propriedades de permeabilidade;
- A utilização de cimento pozolânico (CP IV-32 cinzas volantes) possibilitou a obtenção de concretos com resistividade elétrica significativamente superior aos com cimento CP V-ARI. Entretanto, o incremento de resistividade não é acompanhado por um correspondente incremento de resistência à compressão ou por menor porosidade;
- O comportamento dos concretos no que se refere aos fatores relação água/aglomerante ou relação água/cimento e condições ambientais estudadas é significativo para a resistividade elétrica. Independentemente do tipo de adição, observou-se que o comportamento da resistividade elétrica nos concretos ocorre de forma lógica, ou seja: concretos com maior relação água/aglomerante ou água/cimento tem maior resistividade em ambientes não saturados, enquanto que quando submersos, tem menores valores resistividade. Este comportamento é atribuído ao caráter eletroquímico da resistividade elétrica, bem como às características físicas conferidas pela relação água/aglomerante ou água/cimento; Este fato também evidencia a importância do controle ambiental na realização dos ensaios eletroquímicos;
- Em decorrência da idade, em função da hidratação e densificação existe um incremento na resistividade elétrica dos concretos, em maior ou menor intensidade. O incremento no valor da resistividade está relacionado ao tipo de adição ou de cimento;
- A resistência à compressão não é parâmetro adequado para estimar a durabilidade de concretos frente ao fenômeno da corrosão. Para um mesmo patamar de resistência à compressão, concretos com diferentes constituições químicas podem ter valores de resistividade significativamente diferentes quando submetidos às mesmas condições de exposição. Desta forma, pode-se concluir que propriedades químicas ou físicas do concreto como resultados isoladas não são atributos suficientes para qualificar o desempenho do concreto, porque embora o fenômeno da corrosão seja determinado por

características químicas, propriedades físicas como a porosidade do concreto, por exemplo, são prejudiciais às estruturas por permitir o ingresso de agentes agressivos que levam à despassivação da armadura;

- Em estruturas acabadas, a utilização de medidas de resistividade em conjunto com a técnica de potencial de eletrodo é uma forma de se obter informações sobre o risco de corrosão de forma não destrutiva. Entretanto, as condições ambientais são fatores muito importantes para a resistividade elétrica, de forma que os resultados obtidos em estruturas reais necessitam ser analisados de forma criteriosa;
- Foi observado que a resistividade elétrica dos concretos está intimamente relacionada ao tipo de adição ou tipo de cimento. Assim, o conhecimento prévio de características desta natureza constitui-se em dados necessários quando se trabalha em estruturas, podendo vir a ser importante quando por ocasião da análise dos resultados e diagnóstico.

## 6.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

A resistividade elétrica do concreto é uma propriedade que, dentro de determinadas condições, possibilita inferir sobre outras propriedades do concreto. Entretanto a pesquisa da resistividade elétrica em concretos, mesmo que em conjunto com outras propriedades, sempre abre espaço a novas questões, que, devido às limitações de tempo, espaço físico, e disponibilidade tanto de recursos humanos quanto financeiro, entre outros, não são possíveis de serem respondidas num único trabalho. Assim, tendo como referência os resultados obtidos, e em vista da necessidade de um maior conhecimento do comportamento da resistividade elétrica do concreto, sugere-se:

- Dentro do contexto deste trabalho, que sejam investigadas resistividades elétrica de concretos com as mesmas adições e cimentos que os aqui pesquisados, porém com relações água/aglomerante inferiores a 0,5;
- Investigações de resistividade elétrica em ambientes naturais, que poderiam ser ambientes industrial, urbano ou marinho. Nestes seriam monitorados fatores como umidade relativa ambiente, temperatura, e, dentro de limitações condicionadas pela tecnologia, as características do microclima, tais como a

presença de determinados gases como o  $\text{CO}_2$ , íons cloretos e substâncias agressivas, bem como determinadas as suas concentrações. Dentro deste delineamento, sugere-se estudar no concreto o efeito de fatores tais como relação água/aglomerante ou relação água/cimento, adições e/ou aditivos, presença de diferentes íons no concreto, entre outros, que, através da revisão bibliográfica e/ou da pesquisa foram identificados como importantes. Estes fatores poderiam ser pesquisados em conjunto ou de forma isolada;

- Paralelamente às investigações de resistividade, sugere-se pesquisas de propriedades do concreto como permeabilidade aos cloretos, porosidade (porosímetro de mercúrio e nitrogênio), identificação de íons presentes na solução dos poros, entre outros, além de, evidentemente, ensaios mais diretamente relacionados com corrosão

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI 201.2R . Proposed revision of: Guide to durable concrete reported by ACI Committee 201. **ACI Materials Journal**, p. 544-582, sept-oct. 1991.

AL. KALAF, M. N. e YOUSIFT, H. A Use of rice husk ash in concrete. **The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**, v. 6, n. 4, p. ?, 1984.

ALVAREZ, M.; SALAS, J. e VERAS, J. Properties of concrete made with fly ash. **The International Journal of Cement of Cement Composites and Lightweight Concrete**, v. 10, n. 2, p. 109-120, may 1988.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Annual Book of ASTM Standards**. ASTM C 618: Standard Specification for Fly ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use as a Minerall Admixture in Portland Cement Concrete. Philadelphia, 1978.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Annual Book of ASTM Standards**. Standard Method for field measurement of soil resistivity using the Wenner four-electrode method. ASTM G57, Philadelphia, 1984.

ANDRADE, J. J. O. **Durabilidade das estruturas de concreto armado**: análise das manifestações patológicas nas estruturas no estado de Pernambuco. Porto alegre. 1997. 148 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ANDRADE, M. C. 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.

ANDRADE, M. C. e GONZALEZ, J. A. Tendências actuales en la investigacion sobre corrosion de armaduras. **Informes de la Construccion**, v. 40, n. 398, p. 7-14, nov./dec.. 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653: **materiais pozolânicos – especificação**. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12821: **preparação de concreto em laboratório – procedimento**. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5736: **cimento portland pozolânico**. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: **moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto – procedimento**. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: **ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto**. Rio de Janeiro, 1974.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5752: **materiais pozolânicos Determinação da atividade pozolânica com cimento portland Índice de atividade pozolância com cimento**. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7214: **areia normal para ensaio de cimento**. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: **ensaio de cimento portland - método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7217: **agregados - determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7223: **concreto determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7809: **agregado graúdo Determinação do índice de forma pelo método de paquímetro**. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9202: **cimento portland e outros materiais em pó - determinação da finura por meio da peneira 0,044 mm (número 325)**. Rio de Janeiro, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9204: **concreto endurecido - determinação da resistividade elétrica volumétrica concreto**. Rio de Janeiro, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9479: **câmara úmidas para cura de corpos de prova de cimento e concreto**. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9776: **agregados - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman**. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: **argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água por imersão índice de vazios e masa específica**. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: **argamassa e concreto endurecidos Determinação da absorção de água por imersão índice de vazios e masa específica**. Rio de Janeiro, 1986.

BABU, K. G. e RAO, S. N. Efficiency of fly ash in concrete. **Cement and Concrete Composites**. v. 15, p. 223-229, 1993.

BAKKER, R. F. M. Initiation period. **Corrosion of Steel in Concrete**: State of the Art Report. Cap3, RILEM TC 60-CSC, Peter Schiessl (Ed.), Ed Chapman & Hall, p. 22-54,1988.

BARROW, G. M. **Química Física**. Barcelona: Reverté, 1964

BERKE, N. S. e HICKS, M. C. Predicting chloride profiles in concrete. **Corrosion**, v. 50, n. 3, p. 234-239, march 1994.

BICZOCK, I. **Corrosion y protection del hormigon**. Bilbao: Ediciones Urmo, 1972.

BULLETIN D 'INFORMATION. Paris, n. 192, 1989

CALLEJA, J. Adiciones y cementos con adiciones. **Materiales de Construcción**, n. 190-191, p. 25-52, 1983.

CANOVAS M. F. e BALÁN, N. E. B. Incidencia patológica del empleo de hormigón de cemento de aluminato de calcio en la construcción de edificios en España durante los años 1950 y 1970. In: IV CONGRESSO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES e VI CONGRESSO DE CONTROLE DE QUALIDADE. **Anais** ... Porto Alegre: UFRGS. CPGEC, 1997 , 2 v., v. 2, p. 507-514.

CAO, H. T. e SIRIVIVATNANON, V. Corrosion os steel in concrete with and without silica fume. **Cement and Concrete Research**, v 21, p 316-324, 1991.

CASCUDO, O. **Contribuição ao estudo e emprego de técnicas eletroquímicas no controle da corrosão de armaduras em concreto armado**. São Paulo, 1991. Dissertação ( Mestrado em Engenharia Civil) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

CASCUDO, O. Potenciais de corrosão e resistividade elétrica do concreto: como controlar a corrosão das armaduras. **Revista IBRACON**. Ano III, n. 8 p. ?, abril/ maio/jun. 1993.

CIGNA, R; PROVERBIO, E and ROCCHINI. A study of reinforcement behaviour in concrete structures using electrochemical techniques. **Corrosion Science**, v. 35, n. 5-8 , p. 1579-1584, 1993.

DAL MOLIN, D. C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de sílica ativa**. 1995. 286 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. Departamento de Construção Civil, São Paulo.

DAL MOLIN, D. C. **Fissuras em estruturas de concreto armado: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no Estado do Rio Grande do Sul**. 1988. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil da Uiversiade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ENEVOLDSEN, J. N.; HANSSON, C. M. e HOPE, B. B. The influence of internal relative humidity on the rate of corrosion of steel embedded in concrete and mortar. **Cement and Concrete Research**, v. 24, n. 7. p. 1373-1382, 1994.

EWINS, A. J. Resistivity measurements in concrete. **British Journal of NDT**, v. 32, n.3, p. 120-126, March 1990.

FELIU, S.; GONZÁLEZ, J. A ; FELIU Jr., S. e ANDRADE, C. Relationship between conductivity of concrete and corrosion of reinforcing bars. **British Corrosion Journal**, v. 24, n. 3, p. 195-198, 1989.

FIGUEIREDO, E. J. P. **Avaliação do desempenho de revestimentos para proteção da armadura contra corrosão através de técnicas eletroquímicas** Contribuição ao estudo de reparo de estruturas de concreto armado 1994. 423 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

FIGUEIREDO, E. J. P.; ANDRADE, C. e FRANCINETE Jr., P. Influência dos revestimentos aplicados sobre a armadura no coeficiente de difusão de oxigênio e na corrosão. In: IV CONGRESSO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES e VI CONGRESSO DE CONTROLE DE QUALIDADE, 1997, Porto Alegre. **Anais ...**2 v., v. 2, p. 1-8.

FU, X. e CHUNG, D. D. L. Linear correlation of bond strength and contact electrical resistivity between steel rebar and concrete, **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 7, p. 1397-1402, 1995.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3 ed. Rio de Janeiro: LTC , 1996.

GJORV, O. E. Concrete performance criteria based on migration testing . In: INTERNATIONAL CONGRESS ON HIGH PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES. 07<sup>th</sup> June, 1996, Florianópolis, **Proceedings ...** Florianópolis , 1996. 05-1996. p. 425-432.

GLASS, G. K.; PAGE, C. L. e SHORT, N. R. Factors affecting the corrosion rate of steel in carbonated mortars. **Corrosion Science**, v. 32, n. 12, p. 1283-1294, 1991.

GOÑI, S.; MORAGUES, A. e ANDRADE, C. Influencia de la conductividad y fuerza iônica de soluciones sintéticas que simulam la fase acuosa de hormigón en el fenómeno de la corrosión de armaduras. **Materiales de Construccion**, v. 39, n. 215, p. 19-28, julio/agosto/sep. 1989.

GOÑI; ALONSO & ANDRADE. Relationship between resistivity, porosity and corrosion rate of rebars in concrete. In: EUROPEAN SYMPOSIUM CORROSION DETERIORATION OF BUILDINGS CSTB CEFRACOR, 1990.

GONZALEZ, J. A. **Control de la corrosion**: estudio y medidaa por tecnicas electroquimicas. Madrid: CSCI, 1989. 523 p.

GONZALEZ, J. A; LOPEZ, W. E RODRÍGUEZ, P. Mecanismos de corrossión en el hormigón armado y fatores que controlan su cinética. **Rev. Metal. Madrid**, v. 28 n. 5, 1992.

GOPALAN, M. K. e HAQUE, M. N. Effect of curing regime on the properties of fly ash concrete. **ACI Materials Journal**, p ?, jan.- feb 1987.

GOPALAN, M. K. Sorptivity of fly ash concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 8, p. 1190-1197, 1996.

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

HAQUE, M. N.; DAY, R. L. e LANGAN, B. W. Realistic strength of air-entrained concretes with and whithout fly ash. **ACI Materials Journal**, p. 241-247, july-aug. 1988.

HELENE, P. ; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto.**, São Paulo: Pini, 1992, 149 p.

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

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

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

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

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

ISAIA, G. C. **Metodologia de avaliação técnico-econômica de concreto de alta resistência com elevados teores de cinzas volantes**. 1991. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

JAMES, J. e RAO, M. S. Reactivity of rice husk ash. **Cement and Concrete Research**, v.16, p. 296-302, 1986.

KAYYALI, O. A. e HAQUE, M. N. The Cl-/OH- ratio chloride-contaminated concrete a most important criterion. **Magazine of Concrete Research**, v.47, n. 172, p. 235-242, sep. 1995.

KRANC, S. C. e SAGÜÉS, A. A. Computation of reinforcing steel corrosion distribution in concrete marine bridge substructures. **Corrosion**, v. 50, n. 1, p. 50-61, jan. 1994

KULAKOWSKI, M. P. **Argamassa com adição de microssilica para reparos estruturais: estudo de penetração de cloretos**. 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LAKSHMINARAYANAN, V.; RAMESH, P.S. e RAJAGOPALAN, S. R. A new technique for the measurement of the electrical resistivity of concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 44 n. 158, p. 47-52, mar, 1992.

LOPEZ, W. e GONZÁLEZ, J. A. Influence of the degree of pore saturation on the resistivity of concrete and the corrosion rate of steel reinforcement. **Cement and Concrete Research**, v. 23, p. 368-376, 1993.

LOPEZ, W.; FELIU, S.; GONZÁLEZ, J. A. e ANDRADE, C. La importancia del curado en el comportamiento posterior frente a la corrosión de las estructuras de hormigón armado. **Materiales de Construcción**, v. 41, n. 223, p. 5-17, julio/agosto/sep. 1991.

LUDIRDJA, D.; BERGER, R. L. e YOUNG, J. F. Simple method for measuring water permeability of concrete. **ACI Materials Journal**, p. 433-439, sep.-oct. 1989.

MALHOTRA, V. M. e CARETTE, G. G. Silica fume concrete properties, applications, and limitations. **Concrete International**, p. 40-46, may 1983

MALHOTRA, V. M. e MEHTA, P. K. Pozzolan and cementitious materials. **ADVANCES IN CONCRETE TECHNOLOGY**, Ottawa: Gordon and Breach Publishers, 1996. 191p. v. 1.

MALHOTRA, V. M. Fly ash, slag, silica fume and rice-husk ash in concrete: a review. **Concrete International**, p. 23-28, abril, 1993.

MASLEHUDDIN; RASHEEDUZZAFAR; AL-AMOUDI, O. S. B, e AL-MANA, A. L. Concrete durability in a very aggressive environment . In: V. MOHAN MALHOTRA SYMPOSIUM CONCRETE TECHNOLOGY PAST, PRESENT NA FUTUTRE. BERKELEY, 1994. **Proceedings**. Detroit: American Concrete Institute, 1994, p. 447-483. (SP 144)

MASSAZZA, F. Pozzolan cements. **Magazine of Concrete Research**, v. 15, p 185-214, 1993

MEDEIROS FILHO, S. **Fundamentos de medidas elétrica**. Recife: Editora Universitária. Universidade Federal de Pernambuco. 1979

MEHTA, P. K. Durability of concrete Fifty yerar of progress? In: SEMINÁRIO SOBRE QUALIDADE E DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO. **Anais ...** P. Alegre, 1993. Anexo.

MEHTA, P. K. e GERWICK JÚNIOR, B. C. Craking-corrosion interation in concret exposed to marine environmet. **Concrete International**, p 45-51, oct. 1982.

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

MEHTA, P. K. Rice husk ash A unique supplementary cementing material. **Advances in Concrete Technology**. 1992. CANMET

MILLARD, S. G.; HARRISON, J. A e 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.

MILLARD, S.G. e GOWERS, K. R. The influence of surface layers upon the measurement of concrete resistivity. In: **DURABILITY OF CONCRETE. SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE**. Montreal, Canadá, 1991. v. 2 ?, p. 1197-1219 (SP 126)

MILLARD, S.G.; HARRISSON, J. A. e GOWERS, K. R. Pratical measurement of concrete resistivity. **British Journal of NDT**, v.33, n.2, p. 59-63, feb. 1991.

MONFORE G. E. The electrical resistivity of concrete. **Journal of the PCA Research and development Laboratories**, p. 35-49, may 1968.

MOSKVIN, V.; IVANOV, F.; ALEKSEYEV, S.E. GUZEYEV, E. **Concrete and reinforced concrete deterioration and protection**. Moscou: Mir Publishers, 1983.

NAGAO, T.; SUDJONO, A. S.; SEKI, H. e FUJII, K. Experimental studies on test methods for permeability of cementitious material. In: CORROSION NA CORROSION PROTECTION OF STEEL IN CONCRETE. Proceedings of International Conference Held at the University of Sheffield, 24-28, July, 1994. Edited by R. N. Swamy, 2v, v1, p. 561-570.

PALERMO, G. Contribuição ao estudo da resistividade elétrica da argamassa e do concreto endurecidos. In: COLÓQUIO SOBRE CONCRETO EM FUNDAÇÕES E OBRAS SUBTERRÂNEAS. IBRACON São Paulo, 26 a 30/07/1982.

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G. e FARDIS, M. N. Physical and chemical characteristics affectin the durability of concrete. **ACI Materials Journal**, p. 186-196, march/april 1991.

PAPAYIANNI, J. Use of high-calcium fly ash in blended type cement production. **Cement e Concrete Composites**, v.15, p. 231-235, 1993.

POLDER, R. B.; BAMFORTH, P. B.; BASHEER, M.; CHAPMAN-ANDREWS, J.; CIGNA, R.; JAFAR, M. I.; MAZZONI, A.; NOLAN, E. e WOJTAS, H. Reinforcement corrosion and concrete resistivity. In: CORROSION NA CORROSION PROTECTION OF STEEL IN CONCRETE. Proceedings of International Conference Held at the University of Sheffield, 24-28, July, 1994. Edited by R. N. Swamy, 2v, v1, p. 571-580.

POURBAIX, M. **Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions**. Houston: Nace, 1974, p. 270-283.

PREECE, C. M.; ARUP, H e FRØLUND, T. Electrochemical behaviour of steel in dense silica-cement mortar. In: MALHOTRA, V. (ed.) International Conference on use of Fly Ash, Slag and other Mineral By-products in Concrete, 1st, Montebello, 1983. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1983, 2v., v.2, p. 785-796. (SP-79)

PRUDÊNCIO Jr., L. R e SANTOS, S. Influência do grau de moagem na pozolanicidade da cinza de casca de arroz. In: WORKSHOP RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL. **Anais...** 25 e 26 de novembro de 1996. Departamento de Engenharia Civil PCC USP, São Paulo, 1996. p. 53-62.

RASHEEDUZZAFAR; AL.-SAADOUN, S. S. e AL.-GAHTANI, A. S. Reinforcement corrosion-resisting characteristics of silica-fume blended-cement concrete. **ACI Materials Journal**, v. 89, n. 4, p. 337-344, july-aug. 1992.

RASHEEDUZZAFAR; DAKHIL, F. e MUKARRAM, K. Influence of cement composition and content on the corrosion behavior of reinforcing steel in concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE DURABILITY, 1987, Atlanta, USA. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1987. 2v., v.?, p.1476-1502. (SP100)

RIBEIRO, J. L. D. **Projeto de experimentos na otimização de produtos e processos**. Porto Alegre: CPGEC/UFRGS, 1995 [Notas de aula da disciplina Projeto e avaliação de experimentos]

SAX, N. I. **Handbook of dangerous materials**. N Y, 1951. 848 p.

SCHIESSL, P. Influence of the composition of concrete on the corrosion protection on the reinforcement. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE DURABILITY, 1987, Atlanta, USA. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1987. 2v., v? (SP-100) p. 1633-1650.

SEHGAL, A.; KHO, Y. T.; OSSEO-ASARE, K e PICKERING, H. W. Comparison of corrosion rate-measuring devices for determining corrosion rate of steel-in-concrete systems. **Corrosion**, v. 48, n. 10, p. 871-880, oct. 1992.

SHREIR, L. L. (Ed.) **Corrosion control**. New York: John Willey e Sons, Inc., v. 2, p. 11:55-11:71, 1963.

SILVEIRA, A. A.: **A utilização de cinza de casca de arroz com vistas a durabilidade de concretos: estudo do ataque por sulfatos**. 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SILVEIRA, A. A.; FERREIRA, A. A. e DAL MOLIN. A cinza de casca de arroz como adição mineral. In; **WORKSHOP RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL**. **Anais...** 25 e 26 de novembro de 1996. Departamento de Engenharia Civil PCC USP, São Paulo, 1996. p. 39-45.

STERN, M. Fundamentals of electrode processes in corrosion. **Corrosion**, v.13, p. 97-104, nov. 1957.

SUGITA, S.; SHOYA, M. E TOKUDA, H. Evaluation of pozzolanic activity of rice husk ash. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME SLAG AND NATURAL

POZZOLANS IN CONCRETE, 4th, Istanbul, 1992. **Proceedings**. Detroit: American Concrete Institute, 1993, 2 v, v. 2, p. 495-511. (SP-132)

TIKALSKI, P. J.; CARRASQUILLO, P. M. e CARRASQUILLO, R. L. Strength and durability considerations affecting mix proportioning of concrete containing fly ash. **ACI Materials Journal**, p 505-511, nov.-dec. 1988

TORII, K.; SASATANI, T. e KAWAMURA, M. Carbonation and steel corrosion in concretes containing mineral admixtures under different environments. In: CORROSION AND CORROSION PROTECTION OF STEEL IN CONCRETE. Proceedings of International Conference held at Sheffield 24-48 July 1994. Edited by R. N. Swamy. 2v., v. 2 p. 658-667.

TUUTTI, K. Corrosion of steel in concrete. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982. Tese de Doutorado. 469 p.

VENNESLAND, Ø e GJØRV, O. E. Silica concrete protection against corrosion of embedded steel. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON USE OF FLY ASH, SLAG AND OTHER MINERAL BY-PRODUCTS IN CONCRETE, 1st, Montebello, 1983. **Proceedings**. Detroit: American Concrete Institute, 1983, 2v., v2, p. 719-729. (SP-79)

VIEIRA, F. **Estudo do comportamento da aderência das barras de aço no concreto de alta resistência com adição de microssilica**. 1994, 108p. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

WEST, J. M. **Eletrodeposition and corrosion processes**. 2 ed. London: VNR, 1970. 206 p.

WOLF, J. **Estudo sobre a durabilidade de concretos de alta resistência com adição de microssilica**. 1991. 145p. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

WOLSIEFER, Sr. J. T. Silica fume in concrete: a solution to steel reinforcement corrosion in concrete. In: DURABILITY OF CONCRETE. SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE. Montreal, 1991. v1, SP 126 p. 527-558

ZHANG, M. H.; LASTRA, R. e MALHOTRA, V. M. Rice-husk ash paste and concrete: some aspects of hydration and the microstructure of the interfacial zone between the aggregate and paste. **Cement and Concrete Research**, v.26 n.6, p. 936-977, 1996.

**ANEXO A**

**QUADRO A-1** Aleatorização dos corpos de prova e cronograma de concretagem

<b>GRUPO</b>	<b>CORPOS DE PROVA</b>	<b>MOLDAGEM</b>
<b>1</b>	C56/1 T7/1 S52/1 S76/1 S62/1 C66/1	26/08
<b>2</b>	S56/1 S72/1 C52/1 C76/1 PZ7/1 PZ5/1	27/08
<b>3</b>	PZ6/1 C72/1 T5/1 S66/1 C62/1 T6/1	30/08
<b>4</b>	C56/2 T7/2 S52/2 S76/2 S62/2 C66/2	02/09
<b>5</b>	S56/2 S72/2 C52/2 C76/2 PZ7/2 PZ5/2	03/09
<b>6</b>	PZ6/2 C72/2 T5/2 S66/2 C62/2 -T6/2	06/09
<b>7</b>	C56/3 T7/3 S52/3 S76/3 S62/3 C66/3	09/09
<b>8</b>	S56/3 S72/3 C52/3 C76/3 PZ7/3 PZ5/3	10/09
<b>9</b>	PZ6/3 C72/3 T5/3 S66/3 C62/3 T6/3	13/09

**QUADRO A-2** Aleatorização dos corpos de prova para ensaio de compressão axial

<b>MOLDAGE M</b>	<b>GRUPO</b>	<b>DATA</b>
26/08	1	29/08 (2X) 23/09 (1X) 25/11 (1X)
27/08	2	30/08 (2X) 24/09 (1X) 26/11 (1X)
30/08	3	02/09 (2X) 27/09 (1X) 29/11 (1X)
02/09	4	05/09 (1X) 09/09 (1X) 02/12 (2X)
03/09	5	06/09 (1X) 10/09 (1X) 03/12 (2X)
06/09	6	09/09(1X) 13/09(1X) 07/12 (2X)
09/09	7	16/09(2X) 07/10(2X)
10/09	8	17/09(2X) 08/10(2X)
13/09	9	20/09(2X) 11/10(2X)

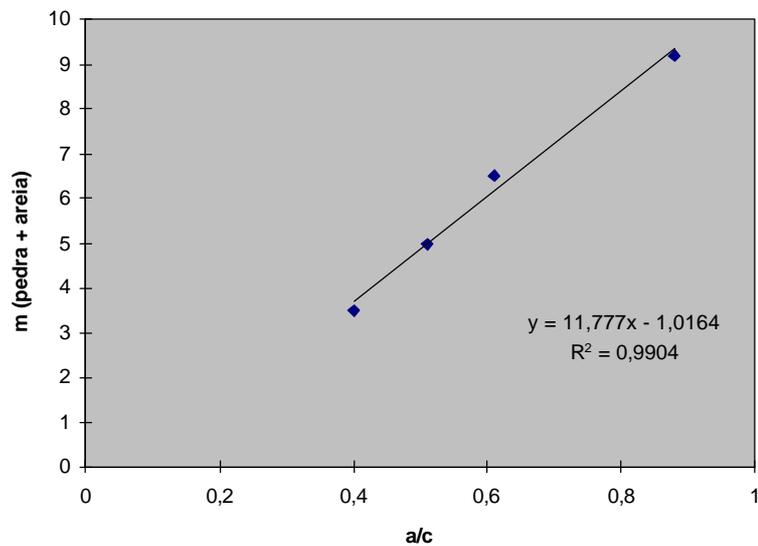
## AJUSTE DO TRAÇO

1 : 5  $\alpha = 46\%$ ,  $m = 5$   
 1 : 1,76 : 3,24  $a/c = 0,51$  abatim. = 60 mm

1 : 3,5  $\alpha = 46\%$ ,  $m = 3,5$   
 1 : 1,07 : 2,43  $a/c = 0,40$  abatim. = 60 mm

1 : 6,5  $\alpha = 46\%$ ,  $m = 3,5$   
 1 : 2,45 : 4,05  $a/c = 0,61$  abatim. = 65 mm

1 : 9,2  $\alpha = 46\%$ ,  $m = 9,2$   
 1 : 3,69 : 5,5  $a/c = 0,88$  abatim. = 53 mm



**FIGURA A-1** Curva de ajuste do traço

**ANEXO B**

**TABELA B-1** Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial, concretos com relação a/agl 0,5

TRAÇO	IDADE			
	3 DIAS	7 DIAS	28 DIAS	91 DIAS
C 56	24,9	33,9	44,9	49,9
	27,4	33,7	39,2	44,9
	22,3	37	47	37
MÉDIA	24,9	34,9	43,7	43,9
D PAD	2,55	1,85	4,04	6,50
C. V.	10,26	5,31	9,24	14,80
C52	23,2	36,3	49,5	55,7
	27,9	36,5	39,6	48,1
	25,9	34,3	41,2	43,2
MÉDIA	25,7	35,7	43,4	49,0
D PAD	2,36	1,22	5,31	6,30
C. V.	9,19	3,41	12,24	12,85
S56	33	40,1	54,5	53,6
	31,3	38,5	47,4	56,4
	26,6	41	51,6	52,8
MÉDIA	30,3	39,9	51,2	54,3
D PAD	3,32	1,27	3,57	1,89
C. V.	10,94	3,18	6,98	3,48
S52	29,2	32,4	54,5	62,8
	28,3	41,9	58,8	56
	28,3	42,9	54,9	55,9
MÉDIA	28,6	39,1	56,1	58,2
D PAD	0,52	5,80	2,38	3,96
C. V.	1,82	14,83	4,24	6,79
PZ5	15	17,8	36,4	45,9
	14,2	18,8	27	26,3
	11,2	18,9	27,4	30,5
MÉDIA	13,5	18,5	30,3	34,2
D PAD	2,00	0,61	5,32	10,32
C. V.	14,88	3,29	17,56	30,14
T5	24,9	41,1	41,2	49
	26,6	34,8	43,3	52,8
	29,8	33,6	42,3	55,9
MÉDIA	27,1	36,5	42,3	52,6
D PAD	2,49	4,03	1,05	3,46
C. V.	9,18	11,04	2,49	6,57

**TABELA B-2** Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial, concretos com relação a/agl 0,65

TRAÇO	IDADE			
	3 DIAS	7 DIAS	28 DIAS	91 DIAS
C66	13,7	15,6	24,3	32,2
	13,7	21,2	27,5	28,9
	16,3	21,9	26,8	29,6
MÉDIA	14,6	19,6	26,2	30,2
D PAD	1,50	3,45	1,68	1,74
C. V.	10,31	17,65	6,42	5,75
C62	14,6	21,6	27,1	30,8
	14,6	20,2	24	29,3
	14,5	16,5	25,7	34,8
MÉDIA	14,6	19,4	25,6	31,6
D PAD	0,06	2,64	1,55	2,84
C. V.	0,40	13,56	6,06	8,99
S66	21,5	32	30	37,4
	24	26,1	36,9	41,2
	20,6	27,1	38,5	43,5
MÉDIA	22,0	28,4	35,1	40,7
D PAD	1,76	3,16	4,52	3,08
C. V.	8,00	11,12	12,86	7,57
S62	19,7	25,3	36,4	40,5
	19,7	28,2	38,8	41,8
	21,5	27,7	34,4	38,5
MÉDIA	20,3	27,1	36,5	40,3
D PAD	1,04	1,55	2,20	1,66
C. V.	5,12	5,73	6,03	4,13
PZ6	8,6	12,2	17,6	27,1
	8,6	10	16,4	23,3
	6,9	10,4	18,6	26,4
MÉDIA	8,0	10,9	17,5	25,6
D PAD	0,98	1,17	1,10	2,02
C. V.	12,22	10,78	6,28	7,90
T6	16,3	21	30,2	35,6
	19,8	20,5	25	32
	13,6	18,6	24,7	28,9
MÉDIA	16,6	20,0	26,6	32,2
D PAD	3,11	1,27	3,09	3,35
C. V.	18,76	6,32	11,61	10,42

**TABELA B-3** Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial, concretos com relação a/agl 0,8

TRAÇO	IDADE			
	3 DIAS	7 DIAS	28 DIAS	91 DIAS
C76	9,4	13,3	21,9	21,7
	10,3	14,2	16,4	22,6
	10,3	13,3	17,6	22,8
MÉDIA	10,0	13,6	18,6	22,4
D PAD	0,52	0,52	2,89	0,59
C. V.	5,20	3,82	15,52	2,62
C72	9,4	13,6	19	21,16
	10,3	13,1	19,2	19,8
	8,4	11,6	17,3	20,9
MÉDIA	9,4	12,8	18,5	20,6
D PAD	0,95	1,04	1,04	0,72
C. V.	10,15	8,15	5,64	3,50
S76	13,7	19,2	28,2	27,7
	13,7	19,2	26,9	27,9
	15,5	18,1	27,9	29,6
MÉDIA	14,3	18,8	27,7	28,4
D PAD	1,04	0,64	0,68	1,04
C. V.	7,27	3,37	2,46	3,68
S72	15	21,2	33,9	36,4
	15,9	20,3	27,1	33,3
	13,7	19,5	28,2	30
MÉDIA	14,9	20,3	29,7	33,2
D PAD	1,11	0,85	3,65	3,20
C. V.	7,44	4,18	12,28	9,63
PZ7	5,6	8,3	12,1	16,4
	5,6	8,3	10,2	16,4
	5,6	7,7	12	18,6
MÉDIA	5,6	8,1	11,4	17,1
D PAD	0,00	0,35	1,07	1,27
C. V.	0,00	4,28	9,35	7,41
T7	12	12,1	21,6	23,3
	11,2	14,2	18,8	19,3
	11,7	14,4	18	23,7
MÉDIA	11,6	13,6	19,5	22,1
D PAD	0,40	1,27	1,89	2,43
C. V.	3,47	9,39	9,71	11,01

**TABELA B-4** Análise de variância (ANOVA) para resistência à compressão de concretos com CCA

Fonte	GDL	MQ	F <sub>calc</sub>	SIGN.
Teor de adição (A)	2	22,9	3,02	NS
Água/aglomerante (B)	2	4653,4	614,6	S
Idade (C)	3	1448,1	191,2	S
AB	4	5,7	0,75	NS
AC	6	5,6	0,73	NS
BC	6	55,0	7,27	S
ABC	12	4,9	0,65	NS
Erro	72	7,6		
Total	107			

**TABELA B-5** Análise de variância (ANOVA) para resistência à compressão de concretos com SA

Fonte	GDL	MQ	F	SIGN.
Teor de adição (A)	2	505,83	74,17	S
Água/aglomerante (B)	2	4412,95	647,05	S
Idade (C)	3	2102,53	308,29	S
AB	4	12,21	1,79	NS
AC	6	31,68	4,64	S
BC	6	66,46	9,74	S
ABC	12	5,29	0,78	NS
Erro	72	6,82		
Total	107			

**TABELA B-6** Análise de variância (ANOVA) para resistência à compressão de concretos com cimentos Pozolânico e ARI.

Fonte	GDL	MQ	F <sub>cal</sub>	SIGN.
Tipo de cim. (A)	1	1795,00	188,95	S
Água/aglomerante (B)	2	2070,17	217,91	S
Idade (C)	3	995,84	104,83	S
AB	2	143,30	15,08	S
AC	3	1,82	0,19	NS
BC	6	422,85	4,51	S
ABC	6	9,15	0,96	NS
Erro	48	9,5		
Total	71			

**TABELA B-7** Resultados dos ensaios de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica (NBR 9778)

C. P.	28 dias	63 dias	91 dias	A	B	C	D	E	ABS 1	ABS 2	I. VAZ 1	I. VAZ.2	M. E. S.	M. E. SAT	M. E. FER	M E REAL
C56/1	6419	6382	6363	6078	6412	6424	3751,45	3795,65	5,50	5,69	12,55	13,16	2,27	2,40	2,40	2,61
C56/2	6654	6595	6582	6328	6637	6652	3904,65	3911,65	4,88	5,12	11,31	11,82	2,30	2,42	2,42	2,61
C56/3	6765	6734	6720	6478	6789	6802	3988,65	4004,33	4,80	5,00	11,11	11,58	2,30	2,41	2,42	2,60
C52/1	6611	6562	6542	6315	6609	6617		3868,65	4,66	4,78		10,99				
C52/2	6507	6458	6442	6165	6521	6532	3810,65	3827,92	5,77	5,95	13,13	13,57	2,27	2,40	2,40	2,62
C52/3	6713	6662	6651	6417	6729	6729	3936,65	3936,65	4,86	4,86	11,17	11,17	2,30	2,41	2,41	2,59
S56/1	6629	6605	6590	6372		6638	3881,65	3877,65		4,17		9,64	2,31		2,41	2,56
S56/2	6542	6512	6504	6207	6551	6570	3820,65	3839,65	5,54	5,85	12,60	13,29	2,26	2,38	2,39	2,60
S56/3	6724	6693	6677	6446	6741	6746	3933,85	3937,87	4,58	4,65	10,51	10,68	2,29	2,40	2,40	2,57
S52/1	6586	6566	6558	6256	6604	6617	4120,65	3846,85	5,56	5,77	14,01	13,03	2,51	2,65	2,65	2,93
S52/2	6563	6535	6530	6279	6572	6587	3825,65	3833,65	4,67	4,91	10,67	11,19	2,27	2,38	2,39	2,56
S52/3	6684	6670	6658	6361	6718	6727	3897,35	3908,02	5,61	5,75	12,66	12,98	2,25	2,37	2,38	2,58
PZ5/1	6494	6434	6413	6227	6495	6518	3784,01	3817,65	4,30	4,67	9,89	10,78	2,28	2,38	2,38	2,55
PZ5/2	6685	6626	6609	6414	6714	6735	3931,65	3967,65	4,68	5,00	10,78	11,60	2,29	2,39	2,40	2,58
PZ5/3	6498	6417	6398	6192	6512	6529	3808,85	3825,94	5,17	5,44	11,84	12,47	2,28	2,39	2,40	2,60
T5/1	6734	6692	6675	6396	6733	6743	3966,65	4043,65	5,27	5,43	12,18	12,85	2,30	2,43	2,43	2,63
T5/2	6533	6491	6474	6209	6524	6544	3828,60	3847,65	5,07	5,40	11,69	12,42	2,29	2,40	2,41	2,61
T5/3	6765	6718	6698	6480	6766	6772	3995,65	3997,65	4,41	4,51	10,32	10,52	2,33	2,44	2,44	2,61
C66/1	6517	6459	6434	6187	6520	6533	4121,65	3851,95	5,38	5,59	13,88	12,91	2,57	2,70	2,71	3,00
C66/2	6557	6478	6455	6166	6567	6598	3830,65	3858,02	6,50	7,01	14,65	15,77	2,23	2,37	2,38	2,64
C66/3	6674	6607	6589	6299	6690	6700	3923,95	3934,95	6,21	6,37	14,14	14,50	2,27	2,41	2,41	2,65
C62/1	6609	6531	6508	6182	6606	6623	3886,65	3781,65	6,86	7,13	15,59	15,52	2,26	2,41	2,42	2,69
C62/2	6636	6537	6516	6250	6633	6643	3869,15	3879,95	6,13	6,29	13,86	14,22	2,25	2,39	2,39	2,63
C62/3	6506	6442	6420	6122	6540	6556	3807,65	3821,95	6,83	7,09	15,30	15,87	2,23	2,38	2,39	2,65
S66/1	6634	6586	6566	6309	6634	6652	3878,27	3961,65	5,15	5,44	11,79	12,75	2,27	2,39	2,40	2,60
S66/2	6531	6503	6492	6190	6570	6596	3832,85	3856,53	6,14	6,56	13,88	14,82	2,24	2,38	2,39	2,63
S66/3	6701	6656	6636	6341	6711	6741	3926,65	3944,65	5,84	6,31	13,29	14,30	2,25	2,38	2,40	2,63
S62/1	6361	6332	6313	6002	6382	6390	3942,65	3702,65	6,33	6,46	15,58	14,44	2,45	2,61	2,61	2,91
S62/2	6518	6465	6456	6233	6530	6538	3778,97	3787,00	4,76	4,89	10,80	11,09	2,26	2,37	2,37	2,54
S62/3	6609	6573	6557	6340	6639	6665	3741,35	3868,45	4,72	5,13	10,32	11,62	2,17	2,27	2,28	2,44
PZ6/1	6596	6498	6472	6201	6602	6609	3891,65	3877,65	6,47	6,58	14,80	14,94	2,28	2,43	2,43	2,69
PZ6/2	6549	6504	6492	6254	6671	6701	3891,65	3924,70	6,67	7,15	15,00	16,10	2,23	2,37	2,39	2,65
PZ6/3	6723	6645	6623	6416	6754	6761	3961,35	3966,65	5,27	5,38	12,10	12,35	2,29	2,41	2,41	2,61

**TABELA B-8** Resultados dos ensaios de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica (NBR 9778)

C. P.	28 dias	63 dias	91 dias	A	B	C	D	E	ABS 1	ABS 2	I. VAZ 1	I. VAZ.2	M. E. S.	M. E. SAT	M. E. FER	M E REAL
T6/1	6791	6722	6697	6435	6794	6801	4008,65	4066,65	5,58	5,69	12,89	13,39	2,30	2,43	2,44	2,65
T6/2	6387	6338	6320	6101	6446	6482	3791,65	3802,00	5,65	6,24	13,00	14,22	2,27	2,40	2,41	2,64
T6/3	6648	6573	6554	6280	6669	6682	3897,95	3912,65	6,19	6,40	14,04	14,52	2,26	2,40	2,40	2,64
C76/1	6647	6547	6512	6259	6642	6673		3933,65	6,12	6,61		15,11				
C76/2	6684	6576	6552	6275	6685	6715	3901,65	3934,02	6,53	7,01	14,73	15,82	2,23	2,38	2,39	2,64
C76/3	6553	6452	6429	6178	6583	6607	3841,85	3867,65	6,56	6,94	14,77	15,66	2,23	2,38	2,39	2,64
C72/1	6604	6571	6541	6256	6678	6693	3910,95	3929,28	6,75	6,99	15,25	15,81	2,25	2,40	2,41	2,67
C72/2	6549	6432	6414	6185	6576	6602	3855,65	3936,65	6,32	6,74	14,37	15,65	2,25	2,39	2,40	2,66
C72/3	6675	6583	6556	6282	6686	6707	3914,95	3929,95	6,43	6,77	14,58	15,30	2,25	2,39	2,40	2,65
S76/1	6371	6315	6293	6045	6394	6414		3746,28	5,77	6,10		13,83				
S76/2	6654	6574	6555	6304	6664	6689	3857,65	3891,65	5,71	6,11	12,83	13,76	2,23	2,35	2,36	2,58
S76/3	6497	6441	6412	6104	6518	6526	3771,65	3782,74	6,78	6,91	15,07	15,38	2,22	2,37	2,37	2,62
S72/1	6516	6463	6441	6113	6509	6518	3774,28	3793,28	6,48	6,63	14,48	14,86	2,23	2,37	2,38	2,61
S72/2	6588	6532	6516	6192	6601	6625	3816,65	3844,65	6,61	6,99	14,69	15,57	2,20	2,35	2,36	2,61
S72/3	6399	6334	6318	6083	6420	6429	3704,35	3711,65	5,54	5,69	12,41	12,73	2,23	2,36	2,36	2,56
PZ7/1	6432	6311	6286	6082	6446	6466	3799,65	3790,65	5,98	6,31	13,75	14,35	2,28	2,42	2,43	2,66
PZ7/2	6555	6437	6418	6199	6604	6621	3849,95	3867,35	6,53	6,81	14,71	15,33	2,24	2,38	2,39	2,64
PZ7/3	6144	6017	5994	5769	6142	6155	3599,85	3615,45	6,47	6,69	14,67	15,20	2,26	2,40	2,41	2,66
T7/1	6333	6242	6212	5972	6317	6330	3916,94	3702,45	5,78	5,99	14,37	13,62	2,47	2,62	2,62	2,91
T7/2	6527	6414	6393	6160	6540	6563	3834,65	3839,65	6,17	6,54	14,05	14,80	2,26	2,40	2,41	2,65
T7/3	6741	6684	6661	6437	6816	6848	3991,65	4023,65	5,89	6,38	13,42	14,55	2,25	2,39	2,40	2,63

A massa, em gramas, da amostra seca em estufa

B massa, em gramas, da amostra saturada em água à temperatura ambiente (23 +- 2) oC , com superfície seca;

D massa, em gramas, da amostra submersa, após saturação em água à temperatura ambiente (23 +- 2) oC;

E massa, em gramas, da amostra submersa, após saturação em água à temperatura ambiente (23 +- 2) oC, e fervura em em em água em ebulição.

#### RESULTADOS

ABS 1 absorção após imersão em água à temperatura ambiente ( 23+-2)oC, em porcentagem = [(B-A)/A]x100;

ABS 2 absorção após imersão e fervura, em porcentagem = [(C-A)/A]x100;

II. VAZ 1 índice de vazios após saturação em água, em porcentagem = [(B-A)/(B-D)]x100

I. VAZ 2 índice de vazios após saturação e fervura, em porcentagem = [(C-A)/(C-E)]x100

M. E. S. massa específica da amostra seca = [A/(C-D)];

M. E. SAT massa específica da amostra após saturação = [B/(C-D)];

M. E. FER massa específica da amostra após saturação e fervura = [C/(C-D)];

M E REAL massa específica real = [A/(A-D)]

**TABELA B-9** Análise de variância para índice de vazios de concretos com adição de CCA

Fonte	GDL	MQ	F	SIGN.
Teor de adição (A)	2	1,57	1,75	NS
Água/aglomerante (B)	2	24,97	27,80	S
AB	4	0,55	0,61	NS
Erro	18	0,90		

**TABELA B-10** Análise de variância para índice de vazios de concretos com adição de SA

Fonte	GDL	MQ	F	SIGN.
Teor de adição (A)	2	0,34	0,21	NS
Água/aglomerante (B)	2	14,47	9,09	S
AB	4	1,69	1,06	NS
Erro	18	1,59		

**TABELA B-11** Análise de variância para índice de vazios de concretos com C POZ

Fonte	GDL	MQ	F	SIGN.
Teor de adição (A)	2	1,99	2,63	NS
Água/aglomerante (B)	2	26,14	34,55	S
AB	4	0,40	0,54	NS
Erro	177	0,76		

**TABELA B-12** Grau de saturação dos poros

C. P.	Wt (28 d)	Wt (63 d)	Wt (91d)	Wo	Ws	PS-28	PS-63	PS-91
C56/1	6419	6382	6363	6078	6424	0,99	0,88	0,82
C56/2	6654	6595	6582	6328	6652	1,01	0,82	0,78
C56/3	6765	6734	6720	6478	6802	0,89	0,79	0,75
média	6613	6570	6555	6295	6626	0,96	0,83	0,78
d. padr.	176,7	177,3	180,0	202,1	190,3	0,06	0,04	0,04
c. v.	2,67	2,70	2,75	3,21	2,87	6,71	5,37	4,89

C52/1	6611	6562	6542	6315	6617	0,98	0,82	0,75
C52/2	6507	6458	6442	6165	6532	0,93	0,80	0,75
C52/3	6713	6662	6651	6417	6729	0,95	0,79	0,75
média	6610	6561	6545	6299	6626	0,95	0,80	0,75
d. padr.	103,0	102,0	104,5	126,8	98,8	0,02	0,02	0,00
c. v.	1,56	1,55	1,60	2,01	1,49	2,57	2,05	0,32

S56/1	6629	6605	6590	6372	6638	0,97	0,88	0,82
S56/2	6542	6512	6504	6207	6570	0,92	0,84	0,82
S56/3	6724	6693	6677	6446	6746	0,93	0,82	0,77
média	6632	6603	6590	6342	6651	0,94	0,85	0,80
d. padr.	91,0	90,5	86,5	122,4	88,8	0,02	0,03	0,03
c. v.	1,37	1,37	1,31	1,93	1,33	2,55	3,17	3,52

S52/1	6586	6566	6558	6256	6617	0,91	0,86	0,84
S52/2	6563	6535	6530	6279	6587	0,92	0,83	0,81
S52/3	6684	6670	6658	6361	6727	0,88	0,84	0,81
média	6611	6590	6582	6299	6644	0,91	0,84	0,82
d. padr.	64,3	70,7	67,3	55,2	73,7	0,02	0,01	0,01
c. v.	0,97	1,07	1,02	0,88	1,11	2,31	1,63	1,66

PZ5/1	6494	6434	6413	6227	6518	0,92	0,71	0,64
PZ5/2	6685	6626	6609	6414	6735	0,84	0,66	0,61
PZ5/3	6498	6417	6398	6192	6529	0,91	0,67	0,61
média	6559	6492	6473	6278	6594	0,89	0,68	0,62
d. padr.	109,1	116,1	117,7	119,4	122,2	0,04	0,03	0,02
c. v.	1,66	1,79	1,82	1,90	1,85	4,48	4,05	2,79

T5/1	6734	6692	6675	6396	6743	0,97	0,85	0,80
T5/2	6533	6491	6474	6209	6544	0,97	0,84	0,79
T5/3	6765	6718	6698	6480	6772	0,98	0,82	0,75
média	6677	6634	6616	6362	6686	0,97	0,84	0,78
d. padr.	126,0	124,2	123,2	138,7	124,1	0,00	0,02	0,03
c. v.	1,89	1,87	1,86	2,18	1,86	0,48	2,33	3,86

Wt massa, em gramas, na idade indicada

Wo massa, em gramas da amostra seca em estufa (NBR 9778/87);

Ws massa, em gramas da amostra após saturação e fervura (NBR 9778/87);

Ps (t) grau de saturação dos poros, nas idades indicadas

CÁLCULO:  $Ps(t) = (Wt - Wo) / (Ws - Wo)$

**TABELA B-13** Grau de saturação dos poros

C. P.	Wt (28 dias)	Wt (63 dias)	Wt (91 dias)	Wo	Ws	PS-28	PS-63	PS-91
C66/1	6517	6459	6434	6187	6533	0,95	0,79	0,71
C66/2	6557	6478	6455	6166	6598	0,91	0,72	0,67
C66/3	6674	6607	6589	6299	6700	0,94	0,77	0,72
média	6583	6515	6493	6217	6610	0,93	0,76	0,70
d. padr.	81,6	80,5	84,1	71,5	84,2	0,02	0,03	0,03
c. v.	1,24	1,24	1,30	1,15	1,27	2,64	4,34	4,13

C62/1	6609	6531	6508	6182	6623	0,97	0,79	0,74
C62/2	6636	6537	6516	6250	6643	0,98	0,73	0,68
C62/3	6506	6442	6420	6122	6556	0,88	0,74	0,69
média	6584	6503	6481	6185	6607	0,95	0,75	0,70
d. padr.	68,6	53,2	53,3	64,0	45,6	0,05	0,03	0,03
c. v.	1,04	0,82	0,82	1,04	0,69	5,57	4,44	4,79

S66/1	6634	6586	6566	6309	6652	0,95	0,81	0,75
S66/2	6531	6503	6492	6190	6596	0,84	0,77	0,74
S66/3	6701	6656	6636	6341	6741	0,90	0,79	0,74
média	6622	6582	6565	6280	6663	0,90	0,79	0,74
d. padr.	85,6	76,6	72,0	79,6	73,1	0,05	0,02	0,01
c. v.	1,29	1,16	1,10	1,27	1,10	6,02	2,33	0,79

S62/1	6361	6332	6313	6002	6390	0,93	0,85	0,80
S62/2	6518	6465	6456	6233	6538	0,93	0,76	0,73
S62/3	6609	6573	6557	6340	6665	0,83	0,72	0,67
média	6496	6457	6442	6192	6531	0,90	0,78	0,73
d. padr.	125,5	120,7	122,6	172,7	137,6	0,06	0,07	0,07
c. v.	1,93	1,87	1,90	2,79	2,11	6,60	8,78	9,13

PZ6/1	6596	6498	6472	6201	6609	0,97	0,73	0,66
PZ6/2	6549	6504	6492	6254	6701	0,66	0,56	0,53
PZ6/3	6723	6645	6623	6416	6761	0,89	0,66	0,60
média	6623	6549	6529	6290	6690	0,84	0,65	0,60
d. padr.	90,0	83,2	82,0	112,0	76,6	0,16	0,09	0,07
c. v.	1,36	1,27	1,26	1,78	1,14	19,09	13,09	11,00

T6/1	6791	6722	6697	6435	6801	0,97	0,78	0,72
T6/2	6387	6338	6320	6101	6482	0,75	0,62	0,57
T6/3	6648	6573	6554	6280	6682	0,92	0,73	0,68
média	6609	6544	6524	6272	6655	0,88	0,71	0,66
d. padr.	204,9	193,6	190,3	167,1	161,2	0,12	0,08	0,07
c. v.	3,10	2,96	2,92	2,66	2,42	13,10	11,58	11,19

**TABELA B-14** Grau de saturação dos poros

C. P.	Wt (28 dias)	Wt (63 dias)	Wt (91 dias)	Wo	Ws	PS-28	PS-63	PS-91
C76/1	6647	6547	6512	6259	6673	0,94	0,70	0,61
C76/2	6684	6576	6552	6275	6715	0,93	0,68	0,63
C76/3	6553	6452	6429	6178	6607	0,87	0,64	0,59
média	6628	6525	6498	6237	6665	0,91	0,67	0,61
d. padr.	67,5	64,9	62,7	52,0	54,4	0,03	0,03	0,02
c. v.	1,02	0,99	0,97	0,83	0,82	3,77	4,47	3,67

C72/1	6604	6571	6541	6256	6693	0,80	0,72	0,65
C72/2	6549	6432	6414	6185	6602	0,87	0,59	0,55
C72/3	6675	6583	6556	6282	6707	0,92	0,71	0,64
média	6609	6529	6504	6241	6667	0,86	0,67	0,62
d. padr.	63,2	83,9	78,0	50,2	57,0	0,06	0,07	0,06
c. v.	0,96	1,29	1,20	0,80	0,86	7,47	10,51	9,33

S76/1	6371	6315	6293	6045	6414	0,88	0,73	0,67
S76/2	6654	6574	6555	6304	6689	0,91	0,70	0,65
S76/3	6497	6441	6412	6104	6526	0,93	0,80	0,73
média	6507	6443	6420	6151	6543	0,91	0,74	0,68
d. padr.	141,8	129,5	131,2	135,7	138,3	0,02	0,05	0,04
c. v.	2,18	2,01	2,04	2,21	2,11	2,64	6,69	5,91

S72/1	6516	6463	6441	6113	6518	1,00	0,86	0,81
S72/2	6588	6532	6516	6192	6625	0,91	0,79	0,75
S72/3	6399	6334	6318	6083	6429	0,91	0,73	0,68
média	6501	6443	6425	6129	6524	0,94	0,79	0,75
d. padr.	95,4	100,5	100,0	56,3	98,1	0,05	0,07	0,07
c. v.	1,47	1,56	1,56	0,92	1,50	4,98	8,79	8,77

PZ7/1	6432	6311	6286	6082	6466	0,91	0,60	0,53
PZ7/2	6555	6437	6418	6199	6621	0,84	0,56	0,52
PZ7/3	6144	6017	5994	5769	6155	0,97	0,64	0,58
média	6377	6255	6233	6017	6414	0,91	0,60	0,54
d. padr.	210,9	215,5	217,0	222,3	237,3	0,06	0,04	0,03
c. v.	3,31	3,45	3,48	3,70	3,70	7,04	6,57	6,23

T7/1	6333	6242	6212	5972	6330	1,01	0,75	0,67
T7/2	6527	6414	6393	6160	6563	0,91	0,63	0,58
T7/3	6741	6684	6661	6437	6848	0,74	0,60	0,55
média	6534	6447	6422	6190	6580	0,886	0,662	0,598
d. padr.	204,1	222,8	225,9	233,9	259,4	0,136	0,081	0,065
c. v.	3,12	3,46	3,52	3,78	3,94	15,35	12,29	10,87

**TABELA B-15** Análise de variância (ANOVA) para grau de saturação dos poros para concretos com cinzas de casca de arroz

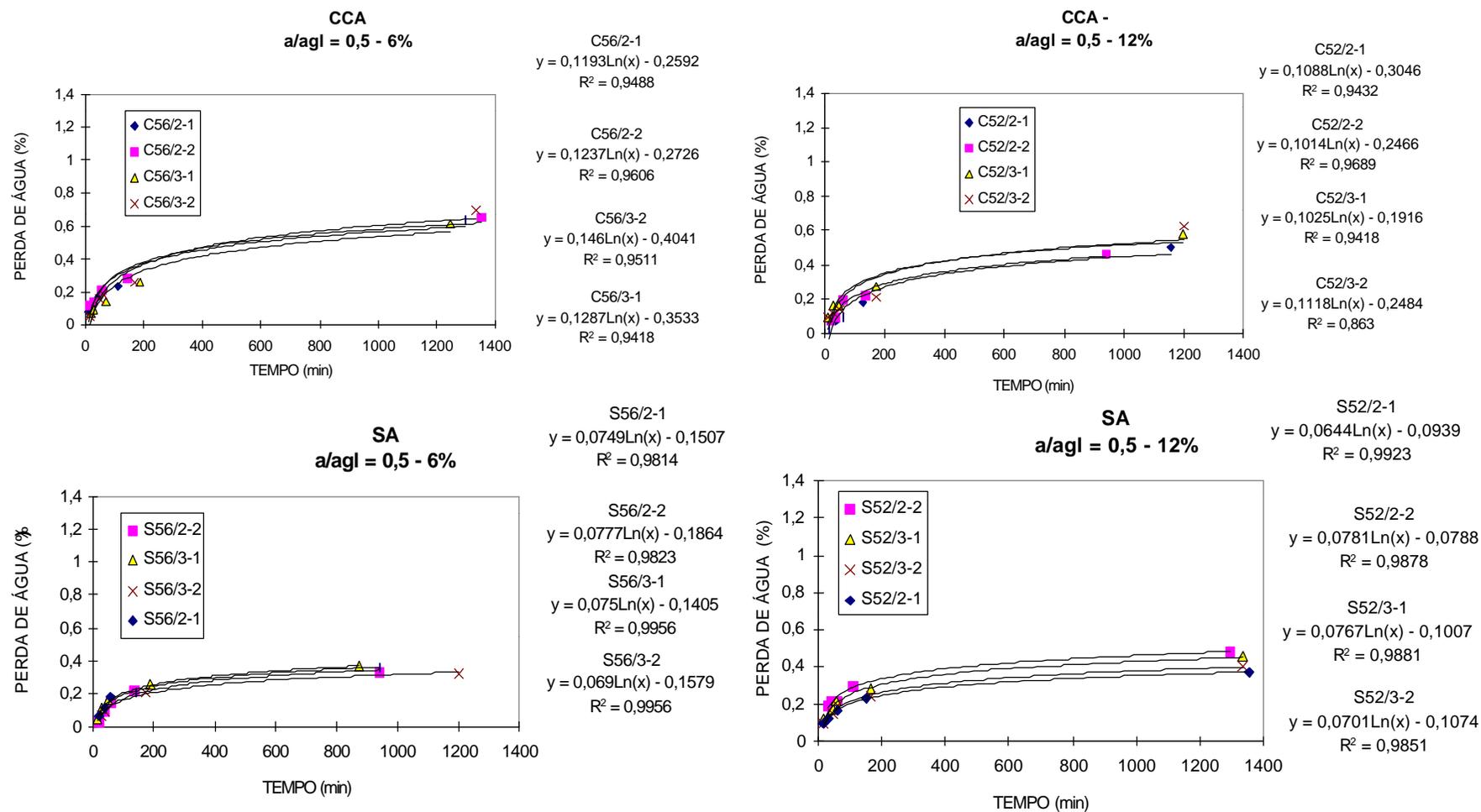
Fonte	GDL	MQ	F <sub>cal</sub>	SIGN.
Teor de adição (A)	2	28,26	0,90	NS
Água/ aglomerante (B)	2	1162,11	37,03	S
Idade (C)	2	4034,48	128,56	S
AB	4	37,37	1,19	NS
AC	4	0,30	0,00	NS
BC	4	52,60	1,67	NS
ABC	8	4,60	0,15	NS
Erro	54	31,38		
Total	80			

**TABELA B 16** - Análise de variância para grau de saturação dos poros de concretos com sílica ativa

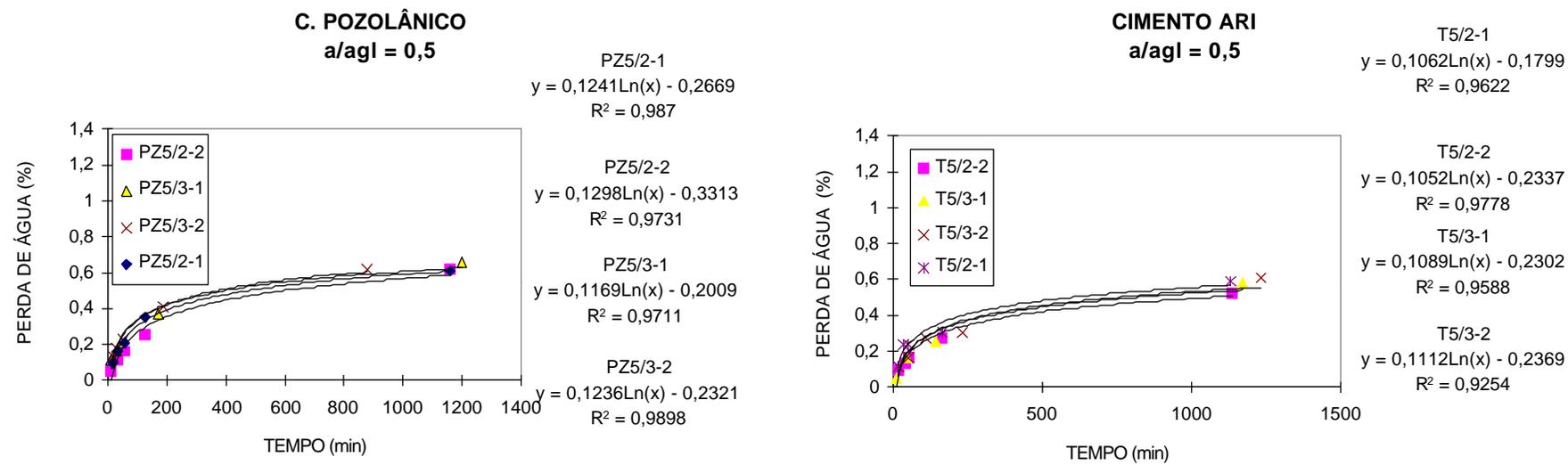
Fonte	GDL	MQ	F <sub>cal</sub>	SIGN.
Teor de adição (A)	2	213,94	6,44	S
Água/ aglomerante (B)	2	616,35	18,55	S
Idade (C)	2	2426,75	73,04	S
AB	4	85,59	2,58	S
AC	4	53,38	1,61	NS
BC	4	62,74	1,88	NS
ABC	8	3,14	0,09	NS
Erro	54	33,22		
Total	80			

**TABELA B-17** Análise de variância para grau de saturação dos poros de concretos com cimento pozolânico

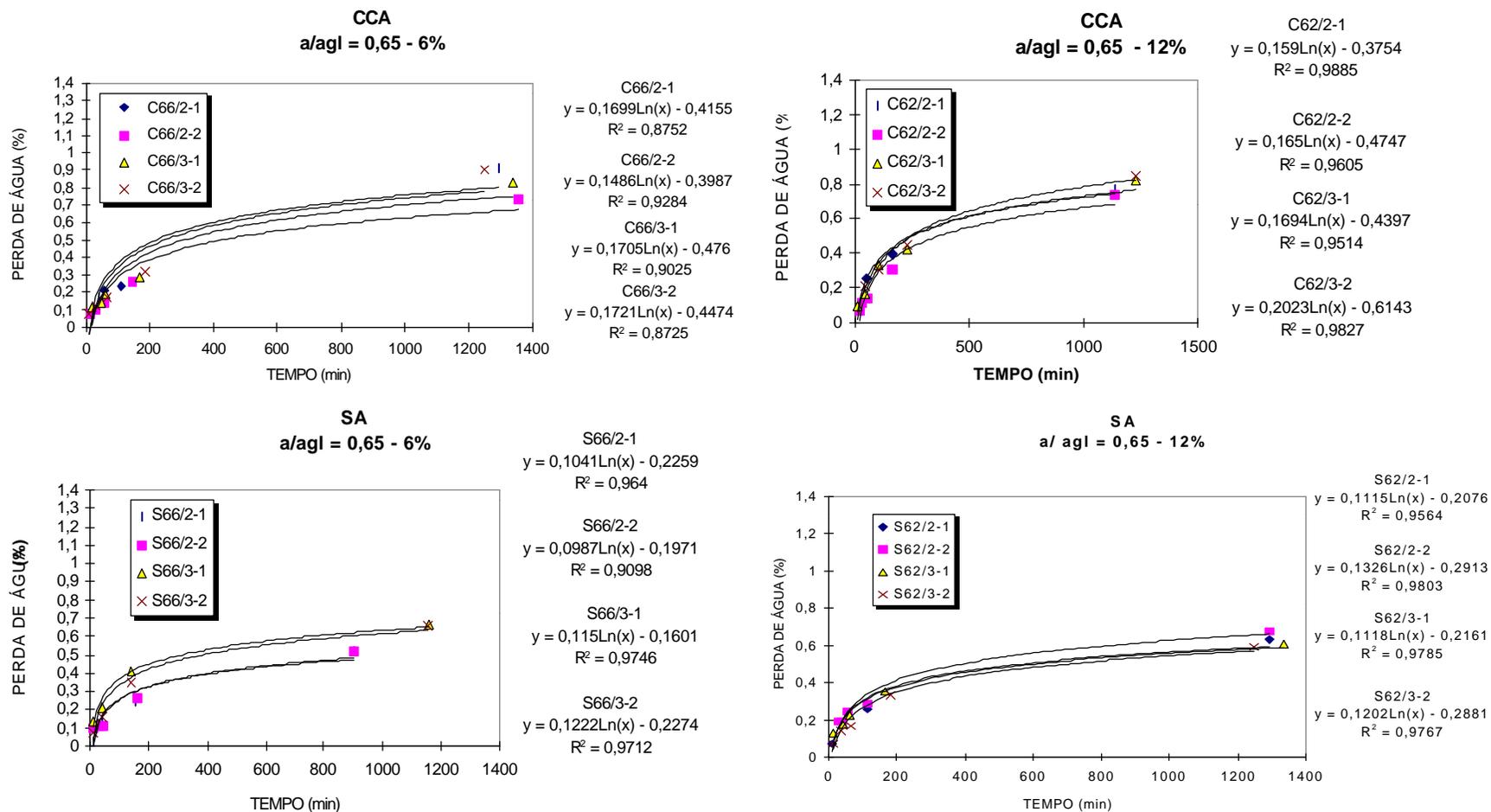
Fonte	GDL	MQ	F <sub>cal</sub>	SIGN.
Tipo de cim. (A)	1	711,41	12,57	S
Água/aglomerante (B)	2	469,41	8,29	S
Idade (C)	2	3442,35	60,85	S
AB	2	130,07	2,30	NS
AC	2	52,02	0,92	NS
BC	4	53,71	0,95	NS
ABC	4	5,77	0,10	NS
Erro	36	56,57		
Total	53			



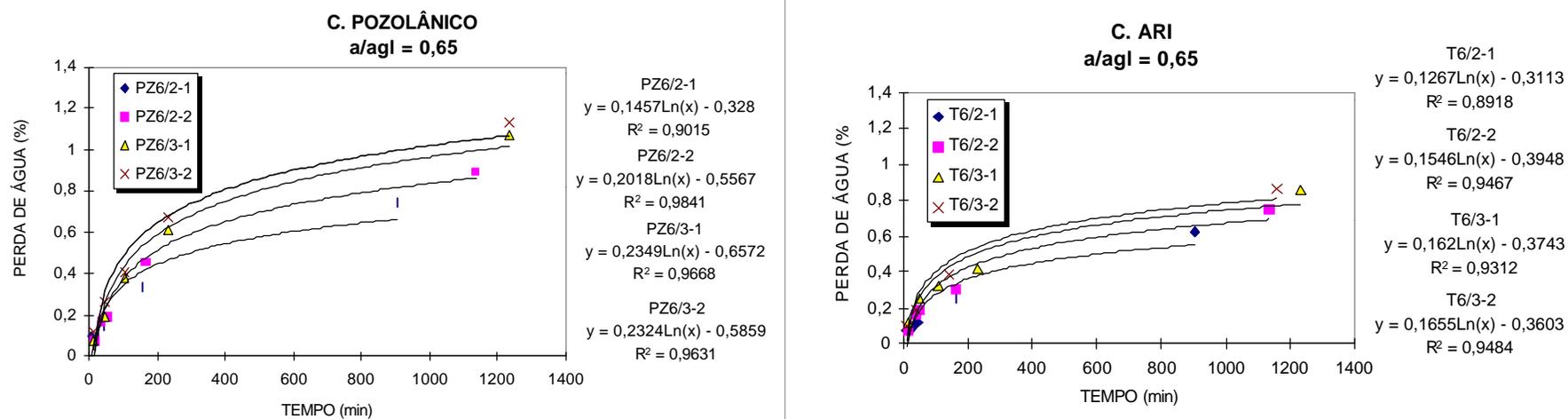
**FIGURA B-1** Gráficos de ajuste do ensaio de perda de massa pela evaporação da água de concretos com relação a/agl 0,5 e adição de CCA e SA em teores de 6 e 12%.



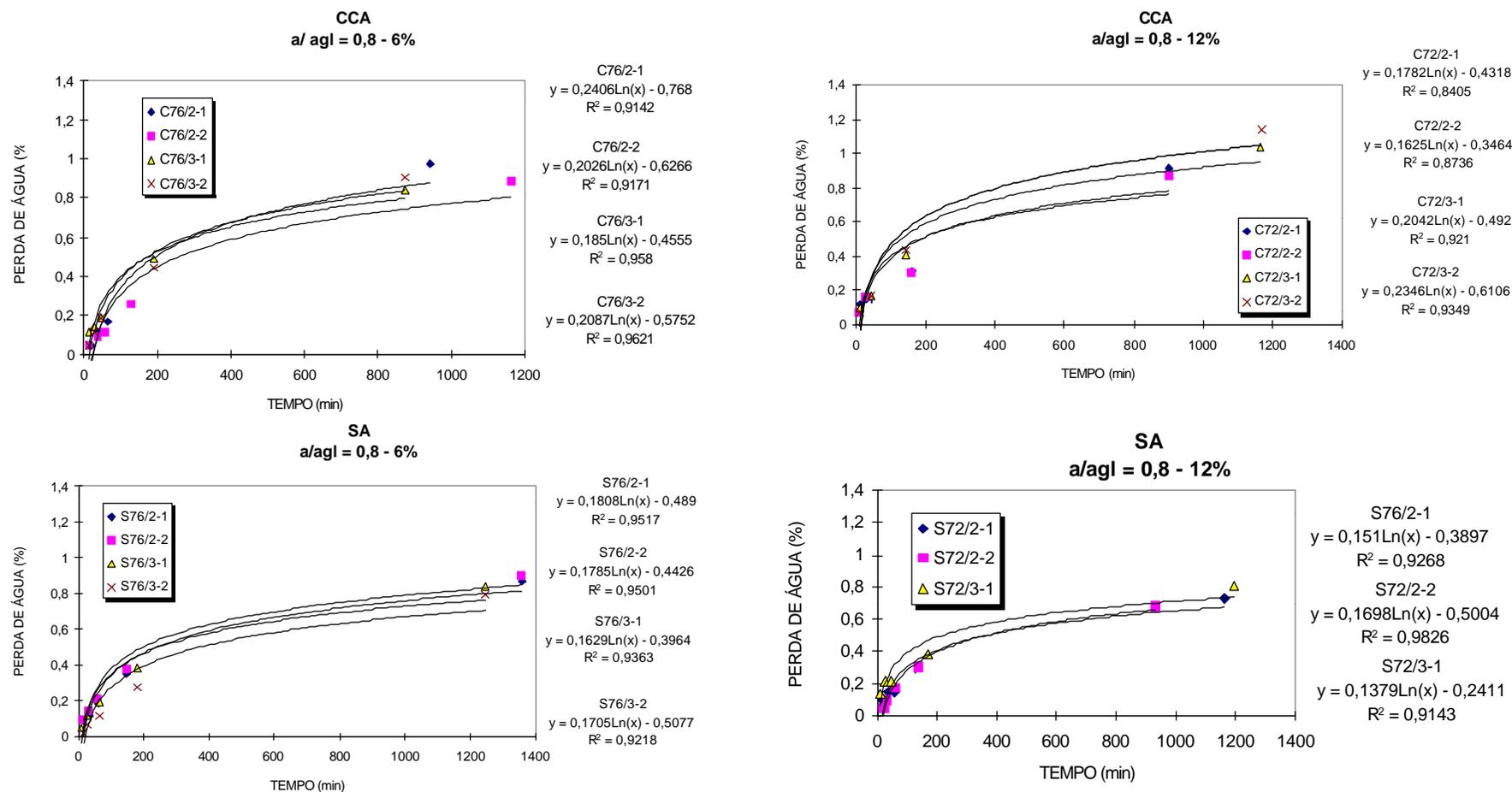
**FIGURA B-2** Gráficos de ajuste do ensaio de perda de massa pela evaporação da água de concretos com relação a/agl 0,5 de com cimentos CPV-ARI e CPIV-32 POZ.



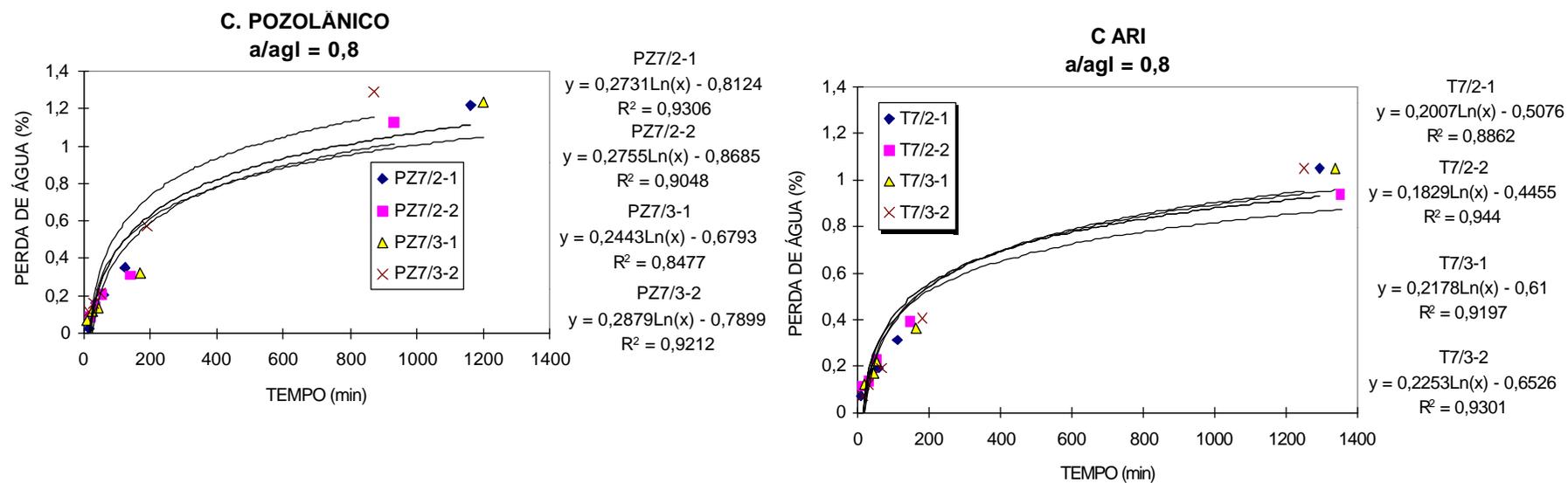
**FIGURA B-3** Gráficos de ajuste do ensaio de perda de massa pela evaporação da água de concretos com relação a/agl 0,65 e adição de CCA e SA em teores de 6 e 12%.



**FIGURA B-4** Gráficos de ajuste do ensaio de perda de massa pela evaporação da água de concretos com relação a/agl 0,65 e cimentos CPV-ARI e C-32 POZ.



**FIGURA B-5** Gráficos de ajuste do ensaio de perda de massa pela evaporação da água de concretos com relação a/agl 0,80 e adição de CCA e SA em teores de 6 e 12%.



**FIGURA B-6** Gráficos de ajuste do ensaio de perda de massa pela evaporação da água de concretos com relação a/agl 0,80 e com cimentos CPV-ARI e CPIV-32 POZ.

**TABELA B-19** Perda de água em função do tempo

Tempo (min)	10	20	40	120	180	360	1200
C56/2-1	0,0155	0,0982	0,1809	0,3119	0,3603	0,4430	0,5866
C56/2-2	0,0122	0,0980	0,1837	0,3196	0,3698	0,4555	0,6044
C56/3-1	-0,0679	0,0333	0,1345	0,2949	0,3541	0,4553	0,6311
C56/3-2	-0,0570	0,0323	0,1215	0,2629	0,3150	0,4042	0,5592
C52/2-1	-0,0541	0,0213	0,0968	0,2163	0,2604	0,3358	0,4668
C52/2-2	-0,0131	0,0572	0,1275	0,2389	0,2800	0,3503	0,4723
C52/3-1	0,0444	0,1155	0,1865	0,2991	0,3407	0,4117	0,5351
C52/3-2	0,0090	0,0865	0,1640	0,2868	0,3322	0,4097	0,5443
S56/2-1	0,0218	0,0737	0,1256	0,2079	0,2383	0,2902	0,3803
S56/2-2	-0,0075	0,0464	0,1002	0,1856	0,2171	0,2710	0,3645
S56/3-1	0,0322	0,0842	0,1362	0,2186	0,2490	0,3010	0,3913
S56/3-2	0,0010	0,0488	0,0966	0,1724	0,2004	0,2482	0,3313
S52/2-1	0,0544	0,0990	0,1437	0,2144	0,2405	0,2852	0,3627
S52/2-2	0,1010	0,1552	0,2093	0,2951	0,3268	0,3809	0,4749
S52/3-1	0,0759	0,1291	0,1822	0,2665	0,2976	0,3508	0,4431
S52/3-2	0,0540	0,1026	0,1512	0,2282	0,2566	0,3052	0,3896
PZ5/2-1	0,0189	0,1049	0,1909	0,3272	0,3775	0,4636	0,6130
PZ5/2-2	-0,0324	0,0575	0,1475	0,2901	0,3427	0,4327	0,5890
PZ5/3-1	0,0683	0,1493	0,2303	0,3588	0,4062	0,4872	0,6279
PZ5/3-2	0,0525	0,1382	0,2238	0,3596	0,4097	0,4954	0,6442
T5/2-1	0,0646	0,1382	0,2119	0,3285	0,3716	0,4452	0,5731
T5/2-2	0,0085	0,0815	0,1544	0,2699	0,3126	0,3855	0,5122
T5/3-1	0,0206	0,0960	0,1715	0,2912	0,3353	0,4108	0,5419
T5/3-2	0,0191	0,0962	0,1733	0,2955	0,3406	0,4176	0,5515
C66/2-1	-0,0243	0,0935	0,2112	0,3979	0,4668	0,5845	0,7891
C66/2-2	-0,0565	0,0465	0,1495	0,3127	0,3730	0,4760	0,6549
C66/3-1	-0,0834	0,0348	0,1530	0,3403	0,4094	0,5276	0,7329
C66/3-2	-0,0511	0,0682	0,1875	0,3765	0,4463	0,5656	0,7728
C62/2-1	-0,0093	0,1009	0,2111	0,3858	0,4503	0,5605	0,7519
C62/2-2	-0,0948	0,0196	0,1340	0,3152	0,3821	0,4965	0,6952
C62/3-1	-0,0496	0,0678	0,1852	0,3713	0,4400	0,5574	0,7614
C62/3-2	-0,1485	-0,0083	0,1320	0,3542	0,4362	0,5765	0,8200
S66/2-1	0,0138	0,0860	0,1581	0,2725	0,3147	0,3868	0,5122
S66/2-2	0,0302	0,0986	0,1670	0,2754	0,3154	0,3839	0,5027
S66/3-1	0,1047	0,1844	0,2641	0,3905	0,4371	0,5168	0,6553
S66/3-2	0,0540	0,1387	0,2234	0,3576	0,4072	0,4919	0,6390
S62/2-1	0,0491	0,1264	0,2037	0,3262	0,3714	0,4487	0,5829
S62/2-2	0,0140	0,1059	0,1978	0,3435	0,3973	0,4892	0,6488
S62/3-1	0,0413	0,1188	0,1963	0,3191	0,3645	0,4420	0,5766
S62/3-2	-0,0113	0,0720	0,1553	0,2874	0,3361	0,4194	0,5641
PZ6/2-1	0,0075	0,1085	0,2095	0,3695	0,4286	0,5296	0,7050
PZ6/2-2	-0,0920	0,0478	0,1877	0,4094	0,4912	0,6311	0,8741
PZ6/3-1	-0,1163	0,0465	0,2093	0,4674	0,5626	0,7254	1,0083
PZ6/3-2	-0,0508	0,1103	0,2714	0,5267	0,6209	0,7820	1,0618

**TABELA B-20** Perda de água em função do tempo

Tempo (min)	10	20	40	120	180	360	1200
T6/2-1	-0,0196	0,0683	0,1561	0,2953	0,3466	0,4345	0,5870
T6/2-2	-0,0388	0,0683	0,1755	0,3453	0,4080	0,5152	0,7013
T6/3-1	-0,0011	0,1113	0,2237	0,4018	0,4675	0,5798	0,7750
T6/3-2	0,0208	0,1355	0,2502	0,4320	0,4991	0,6139	0,8131
C76/2-1	-0,2140	-0,0472	0,1195	0,3839	0,4814	0,6482	0,9379
C76/2-2	-0,1601	-0,0197	0,1208	0,3433	0,4255	0,5659	0,8098
C76/3-1	-0,0295	0,0987	0,2269	0,4302	0,5052	0,6334	0,8562
C76/3-2	-0,0947	0,0500	0,1947	0,4239	0,5086	0,6532	0,9045
C72/2-1	-0,0215	0,1020	0,2256	0,4213	0,4936	0,6171	0,8317
C72/2-2	0,0278	0,1404	0,2530	0,4316	0,4975	0,6101	0,8057
C72/3-1	-0,0218	0,1197	0,2613	0,4856	0,5684	0,7099	0,9558
C72/3-2	-0,0704	0,0922	0,2548	0,5125	0,6077	0,7703	1,0527
S76/2-1	-0,0727	0,0526	0,1779	0,3766	0,4499	0,5752	0,7929
S76/2-2	-0,0316	0,0921	0,2159	0,4120	0,4843	0,6081	0,8230
S76/3-1	-0,0213	0,0916	0,2045	0,3835	0,4495	0,5624	0,7586
S76/3-2	-0,1151	0,0031	0,1213	0,3086	0,3777	0,4959	0,7012
S72/2-1	-0,0420	0,0627	0,1673	0,3332	0,3944	0,4991	0,6809
S72/2-2	-0,1094	0,0083	0,1260	0,3125	0,3814	0,4991	0,7035
S72/3-1	0,0764	0,1720	0,2676	0,4191	0,4750	0,5706	0,7366
PZ7/2-1	-0,1836	0,0057	0,1950	0,4951	0,6058	0,7951	1,1239
PZ7/2-2	-0,2280	-0,0371	0,1539	0,4566	0,5683	0,7592	1,0909
PZ7/3-1	-0,1168	0,0526	0,2219	0,4903	0,5893	0,7587	1,0528
PZ7/3-2	-0,1270	0,0726	0,2721	0,5884	0,7052	0,9047	1,2513
T7/2-1	-0,0455	0,0936	0,2328	0,4532	0,5346	0,6737	0,9154
T7/2-2	-0,0244	0,1024	0,2292	0,4301	0,5043	0,6311	0,8513
T7/3-1	-0,1083	0,0428	0,1938	0,4332	0,5215	0,6726	0,9349
T7/3-2	-0,1338	0,0223	0,1785	0,4260	0,5174	0,6735	0,9448

**TABELA B-21** Análise de variância para perda de água em função do tempo de concretos com cinzas de casca de arroz

Fonte	GDL	MQ	F <sub>cal</sub>	SIGN.
Teor de adição (A)	2	0,004	2,18	NS
Água/ aglomerante (B)	2	0,389	224,06	S
Idade (C)	6	2,418	1391,60	S
AB	4	0,142	8,17	S
AC	12	0,001	0,46	NS
BC	12	0,056	32,18	S
ABC	24	0,001	0,69	NS
Erro	189	0,002		
Total	251			

**TABELA B-22** Análise de variância para perda de água em função do tempo de concretos com sílica ativa

Fonte	GDL	MQ	F <sub>cal</sub>	SIGN.
Teor de adição (A)	2	0,094	53,78	S
água/aglomerante (B)	2	0,333	190,16	S
idade (C)	6	1,573	897,59	S
AB	4	0,011	6,40	S
AC	12	0,015	8,76	S
BC	12	0,058	33,35	S
ABC	24	0,001	0,31	NS
Erro	182	0,002		
Total	244			

**TABELA B-23** Análise de variância para perda de água em função do tempo de concretos com cimento pozolânico

Fonte	GDL	MQ	F <sub>cal</sub>	SIGN.
Tipo de cim. (A)	1	0,146	51,68	S
Água/aglomerante (B)	2	0,301	106,72	S
Idade (C)	6	1,959	693,82	S
AB	2	0,006	2,08	NS
AC	6	0,024	8,56	S
BC	12	0,067	23,65	S
ABC	12	0,002	0,85	NS
Erro	126	0,003		
Total	167			

**TABELA B-24** Resistividade elétrica pelo método de Wenner relação a/aql 0,5

TRAÇO	3 DIAS	7 DIAS	14 DIAS	28 DIAS	63 DIAS	91 DIAS	98 DIAS	112 DIAS	217 dias
C56/2-1	11734	7433	19693	15950	37094	53624	15452	15860	19696
C56/2-2	9661	12557	16845	16394	32876	43747	11767	11869	13181
C56/3-1	7947	9990	11057	15034	28633	36938	12443	14689	14711
C56/3-2	7612	9434	13081	14856	28833	36633	11148	14058	11344
MÉDIA	9239	9428	15169	15559	31859	42736	12703	14119	14733
D. PAD	1890,3	2110,5	3853,3	734,8	4000,1	7967,3	1907,8	1675,5	3583,6
C.V.	20,5	22,4	25,4	4,7	12,6	18,6	15,0	11,9	24,3
C52/2-1	9446	12074	16138	18373	44320	55445	20570	22176	25902
C52/2-2	7710	9800	13544	2772	40461	49003	16870	17291	22651
C52/3-1	8546	12282	12414	18546	39482	53538	15568	17343	22770
C52/3-2	8414	11675	13177	17589	41339	52339	15227	16138	22313
MÉDIA	8529	11458	13818	14320	41401	52581	17059	18237	23409
D. PAD	713,0	1133,5	1616,5	7709,9	2088,9	2706,7	2445,6	2684,3	1673,2
C.V.	8,4	9,9	11,7	53,8	5,0	5,1	14,3	14,7	7,1
S56/2-1	7570	10219		6350	95636	92149	37086	41176	41311
S56/2-2	6719	8980	16404	30424	87374	80709	29338	33299	33610
S56/3-1	7453	13737	17132	35197	80646	80795	28544	32043	40630
S56/3-2	6713	12914	15425	26342	84911	68781	28873	31273	34567
MÉDIA	7114	11463	16320	24578	87142	80609	30960	34448	37530
D. PAD	461,8	2235,3	856,6	12679,5	6308,1	9541,4	4096,8	4562,6	4002,2
C.V.	6,5	19,5	5,2	51,6	7,2	11,8	13,2	13,2	10,7
S52/2-1	6883	8818	34174	45786	106793	184921	65256	58581	66985
S52/2-2	7982	10188	35869	8200	100622		67110	71117	80624
S52/3-1	5560	8959	29249	62438			63525	81134	62693
S52/3-2	5219	7387	23736	43804	96457	128417	61221	77913	54331
MÉDIA	6411	8838	30757	40057	101291	156669	64278	72186	66158
D. PAD	1269,6	1146,4	5458,2	22822,8	5200,3	39954,4	2509,2	9985,1	10982,3
C.V.	19,8	13,0	17,7	57,0	5,1	25,5	3,9	13,8	16,6
PZ5/2-1	3541	5756	9755	17273			23131	31135	48358
PZ5/2-2	3675	7242	11225	12167			22342	31355	49658
PZ5/3-1	5754	13520	15277	14977	86247	111207	25978	35362	62717
PZ5/3-2	7204	11889	7718	19364	58198	77001	24423	31201	57264
MÉDIA	5044	9602	10994	15945	72223	94104	23969	32263	54499
D. PAD	1761,0	3694,2	3197,1	3091,0	19833,6	24187,3	1590,8	2067,9	6741,1
C.V.	34,9	38,5	29,1	19,4	27,5	25,7	6,6	6,4	12,4
T5/2-1	7792	11264	13973	14662	25746	30789	11804	14655	12197
T5/2-2	8898	12704	14681	13824	30028	35085	13493	16758	14457
T5/3-1	6699	11608	11593	12596	25509	32836	10641	10588	11609
T5/3-2	7730	12651	12168	14647	22682	37409	13124	13708	16003
MÉDIA	7780	12057	13104	13932	25991	34030	12266	13927	13567
D. PAD	898,4	730,7	1460,7	973,1	3029,8	2855,4	1303,3	2565,2	2036,1
C.V.	11,5	6,1	11,1	7,0	11,7	8,4	10,6	18,4	15,0

**TABELA B-25** Resistividade elétrica pelo método de Wenner relação a/agl 0,65

TRAÇO	3 DIAS	7 DIAS	14 DIAS	28 DIAS	63 DIAS	91 DIAS	98 DIAS	112 DIAS	217 DIAS
C66/2-1	8984	11735	16140	16713	39782	63846	9934	10069	14027
C66/2-2	8539	11338	14303	15352	41906	64676	10823	10614	11945
C66/3-1	8639	10281	14806	18960	42410	56251	10978	13438	11698
C66/3-2	7594	9794	13218	17875	36550	50349	10464	12555	12170
MÉDIA	8439	10787	14617	17225	40162	58781	10550	11669	12460
D. PAD	594,7	902,7	1212,6	1549,5	2663,7	6780,0	463,5	1590,3	1062,3
C.V.	7,0	8,4	8,3	9,0	6,6	11,5	4,4	13,6	8,5

C62/2-1	6137	10114	8615	13191	41830	57041	12745	15037	17030
C62/2-2	6944	11360	15346	17760	51265	65139	12692	14881	16822
C62/3-1	5711	10106	10897	10443	21605	58211	13226	12553	18268
C62/3-2	5689	10580	11528	10844	37205	62792	15583	15654	21575
MÉDIA	6120	10540	11597	13060	37976	60796	13562	14531	18424
D. PAD	586,6	589,9	2795,4	3359,9	12383,5	3813,5	1368,9	1360,4	2195,7
C.V.	9,6	5,6	24,1	25,7	32,6	6,3	10,1	9,4	11,9

S66/2-1	5528	7954	12712	24283	54291	58325	16159	20701	23785
S66/2-2	6544	10083	17851	27885	64559	73644	21469	24457	23244
S66/3-1	5342	9038	11772	22475	32312	66959	22513	23059	22848
S66/3-2	5102	10396	13510	25018	43629	80067	18975	21012	
MÉDIA	5629	9368	13961	24915	48698	69749	19779	22307	23292
D. PAD	634,4	1107,0	2688,7	2249,8	13869,0	9308,1	2833,2	1774,3	470,4
C.V.	11,3	11,8	19,3	9,0	28,5	13,3	14,3	8,0	2,0

S62/2-1	6839	5639	31236	36179	132093	396248	31222	37884	44623
S62/2-2	7465	9554	28074	37936	134867	128785	42622	44314	51963
S62/3-1	5433	7636	20349	35158	106727	98658	34165	47745	36927
S62/3-2	5002	7708	23788	45888	95634	177607	36400	45717	42056
MÉDIA	6185	7634	25862	38790	117330	200325	36102	43915	43892
D. PAD	1159,2	1599,2	4777,3	4868,9	19223,5	134605,7	4836,2	4260,2	6259,9
C.V.	18,7	20,9	18,5	12,6	16,4	67,2	13,4	9,7	14,3

PZ6/2-1	4816	13402	18153	10825	77585	114156	17395	24317	46396
PZ6/2-2	4358	12922	9934	20476	97133	139915	16087	24648	49970
PZ6/3-1	2655	9456	10894	17797	133386	110089	18961	19198	47840
PZ6/3-2	2103	6630	8601	16110	82160	108115	16861	20118	47722
MÉDIA	3483	10603	11896	16302	97566	118069	17326	22070	47982
D. PAD	1308,0	3178,7	4276,3	4069,9	25297,2	14779,7	1215,1	2813,9	1478,2
C.V.	37,6	30,0	35,9	25,0	25,9	12,5	7,0	12,7	3,1

T6/2-1	7349	10063	9422	10785	26911	33107	9080	10506	12479
T6/2-2	6344	10498	11350	11112	30805	39936	10288	11768	10669
T6/3-1	5473	10004	9810	10939	26072	36377	8976	8488	9785
T6/3-2	5282	10905	10469	10067	25820	37340	9166	8877	9884
MÉDIA	6112	10368	10263	10726	27402	36690	9378	9910	10704
D. PAD	945,4	420,6	843,9	459,0	2316,1	2822,2	612,0	1516,2	1247,5
C.V.	15,5	4,1	8,2	4,3	8,5	7,7	6,5	15,3	11,7

**TABELA B-26** Resistividade elétrica pelo método de Wenner relação a/ aql 0,80

TRAÇO	3 DIAS	7 DIAS	14 DIAS	28 DIAS	63 DIAS	91 DIAS	98 DIAS	112 DIAS	217 DIAS
C76/2-1	6653	10587	13062	15310	47557	71591	11107	11334	11001
C76/2-2	4763	7897	9978	9469	41405	56903	9538	9939	9397
C76/3-1	6152	10667	10962	11929	42416	69396	11565	11612	13135
C76/3-2	7255	10123	11339	13831	39078	55070	10060	9615	10830
MÉDIA	6206	9819	11335	12635	42614	63240	10568	10625	11091
D. PAD	1062,3	1303,3	1286,2	2523,8	3579,5	8456,6	931,6	994,6	1541,0
C.V.	17,1	13,3	11,3	20,0	8,4	13,4	8,8	9,4	13,9

C72/2-1	4820	9551	10142	13483	53868	79135	10585	12347	14626
C72/2-2	4841	11024	14588	12127	55985	85105	9632	11413	16654
C72/3-1	3972	9381	9759	9767	46297	80477	13369	13230	17917
C72/2-2	4026	9891	10570	14972	43604	95516	12160	11444	15712
MÉDIA	4415	9962	11265	12587	49939	85058	11437	12109	16227
D. PAD	480,6	739,2	2240,1	2210,2	5927,0	7426,1	1657,2	864,1	1398,4
C.V.	10,9	7,4	19,9	17,6	11,9	8,7	14,5	7,1	8,6

S76/2-1	9049	8765	23349	28178	93221	198425	19680	19295	21967
S76/2-2	8072	10045	22092	24242	80052	97861	16927	17266	19536
S76/3-1	6476	8366	18373	30001	74028	81863	18349	23422	22056
S76/3-2	5770	7693	15246	24149	63707	67938	17326	18550	17440
MÉDIA	7342	8717	19765	26643	77752	111522	18071	19633	20250
D. PAD	1490,8	989,6	3679,6	2922,2	12324,9	59211,4	1228,8	2661,2	2207,2
C.V.	20,3	11,4	18,6	11,0	15,9	53,1	6,8	13,6	10,9

S72/2-1	3928	5243	13359	26598	95079	222769	21083	23988	23180
S72/2-2	4304	6014	13585	27530	80783	83647	21794	24255	27200
S72/3-1	5299	10953	17554	32848	94225	88477	23985	27452	32790
S72/3-2	6240	12541	18406	25671	94904	89586	27230	30835	39282
MÉDIA	4943	8688	15726	28162	91248	121120	23523	26633	30613
D. PAD	1040,4	3605,3	2627,5	3215,0	6986,2	67815,2	2762,7	3213,4	6995,0
C.V.	21,0	41,5	16,7	11,4	7,7	56,0	11,7	12,1	22,8

PZ7/2-1	4117	9719		32113			18438	20582	43827
PZ7/2-2	4300	9404	15363	18474			18636	20638	39724
PZ7/3-1	4170	11646	13059	23901	91958	126468	14486	16023	41635
PZ7/3-2	4959	11862	13780	9902	176512	203768	17139	17345	45170
MÉDIA	4387	10658	14067	21098	134235	165118	17175	18647	42589
D. PAD	389,3	1275,4	1178,6	9334,9	59788,7	54659,4	1911,5	2330,2	2402,3
C.V.	8,9	12,0	8,4	44,2	44,5	33,1	11,1	12,5	5,6

T7/2-1	11465	16533	20569	20047	51986	90721	10850	10691	10797
T7/2-2	9766	14458	17411	13873	49434	85506	9854	9637	9703
T7/3-1	7128	10329	12657	14292	32708	52174	8739	10221	7916
T7/3-2	8243	11044	12388	16252	35877	52377	8923	10493	8071
MÉDIA	9150,5	13091	15756	16116	42501	70195	9592	10261	9122
D. PAD	1884,1	2917,5	3951,8	2818,3	9623,1	20800,5	970,6	458,1	1378,7
C.V.	20,6	22,3	25,1	17,5	22,6	29,6	10,1	4,5	15,1

**TABELA B-27** Resultados dos ensaios de resistividade elétrica volumétrica de concretos com a/aql 0,5

C. P.	altura			Altura (cm)	data	Massa (g)	ddp (V)	I (mA)	Resistividade (ohm.cm)
	a1	a2	a3						
C56/1	14,69	14,66	14,66	14,67	23/set	6419	50,28	8,17	23805,1
C56/2	14,98	15	14,98	14,99	04/out	6654	49,52	8,5	22058,9
C56/3	15,3	15,31	15,3	15,30	11/out	6765	50,07	4,46	41627,9
C52/1	15,13	15,2	15,2	15,18	24/set	6611	50,36	2,18	86373,5
C52/2	14,98	14,99	15,06	15,01	07/out	6507	49,78	6,66	28257,1
C52/3	15,43	15,44	15,42	15,43	14/out	6713	50,25	5,8	31861,8
S56/1	15,4	15,07	15,14	15,20	24/set	6629	50,2	1,82	102948,8
S56/2	15,16	15,16	15,12	15,15	07/out	6542	50,12	3	62589,3
S56/3	15,3	15,29	15,33	15,31	14/out	6724	50,52	5,64	33207,12
S52/1	15,22	15,19	15,11	15,17	23/set	6586	50,04	2,67	70089,4
S52/2	15,2	15,13	15,13	15,15	04/out	6563	50,15	2,5	75119,1
S52/3	15,57	15,52	15,53	15,54	11/out	6684	50,41	2,77	66452,8
PZ5/1	14,69	14,67	14,79	14,72	24/set	6494	50,32	3,48	55754,4
PZ5/2	15,23	15,25	15,23	15,24	07/out	6685	50,62	1,85	101903,2
PZ5/3	14,97	14,93	14,93	14,94	14/out	6498	50,28	7,87	24260,5
T5/1	15,24	15,21	15,26	15,24	27/set	6734	49,87	6,28	29574,5
T5/2	14,88	14,89	14,92	14,90	08/out	6533	49,88	8,82	21542,5
T5/3	15,25	15,3	15,29	15,28	16/out	6765	50,22	1,52	122697,9
C66/1	14,84	14,93	14,85	14,87	23/set	6517	49,85	4,39	43323,1
C66/2	15,09	15,1	15,12	15,10	04/out	6557	50,09	4,6	40911,7
C66/3	15,15	15,02	15,02	15,06	11/out	6674	49,99	3,83	49168,9
C62/1	15,2	15,16	15,27	15,21	27/set	6609	50,03	17,7	10545,2
C62/2	15,18	15,14	15,14	15,15	08/out	6636	50,6	9,97	19005,3
C62/3	15,04	15,06	15,05	15,05	16/out	6506	50,28	5,2	36457,2
S66/1	15,15	15,16	15,23	15,18	27/set	6634	50,16	8,08	23206,1
S66/2	15,29	15,06	15,05	15,13	08/out	6531	49,88	3,68	50824,3
S66/3	15,37	15,38	15,37	15,37	16/out	6701	50,57	2,09	89311,3
S62/1	14,85	14,92	14,8	14,86	24/set	6361	50,1	2,96	64647,6
S62/2	14,97	14,93	14,95	14,95	04/out	6518	49,86	6,34	29850,4
S62/3	15,36	15,4	15,36	15,37	11/out	6609	50,38	11,33	16412,9
PZ6/1	15,19	15,15	15,18	15,17	27/set	6596	50,22	5,86	32049,8
PZ6/2	15,43	15,33	15,39	15,38	08/out	6549	50,28	2,75	67443,4
PZ6/3	15,44	15,42	15,45	15,44	16/out	6723	50,34	3,6	51402,6
T6/1	15,4	15,31	15,38	15,36	27/set	6791	50,1	8,63	21442,2
T6/2	14,92	14,95	14,93	14,93	08/out	6387	50,28	5,02	38059,4
T6/3	15,04	15,06	15,09	15,06	16/out	6648	50,08	1,31	144012,3
C76/1	15,19	15,28	15,26	15,24	24/set	6647	49,91	6,74	27566,1
C76/2	15,21	15,24	15,22	15,22	07/out	6684	50,23	8,42	22236,6
C76/3	15,15	15,16	15,17	15,16	14/out	6553	50,04	18,8	9962,9
C72/1	15,32	15,39	15,36	15,36	27/set	6604	50,14	13,63	13593,1
C72/2	15,08	15,05	15,05	15,06	08/out	6549	50,24	17,6	10755,7
C72/3	15,23	15,22	15,21	15,22	16/out	6675	50,18	11,64	16072,8
S76/1	14,78	15,08	14,92	14,93	23/set	6371	49,88	8,14	23295,2
S76/2	15,54	15,52	15,49	15,52	04/out	6654	49,8	4,56	39938,7
S76/3	15,19	15,18	15,18	15,18	11/out	6497	50,37	5,74	32796,0
S72/1	14,91	15,03	14,91	14,95	24/set	6516	50,13	2,19	86884,0
S72/2	15,19	15,17	15,19	15,18	07/out	6588	49,78	2,61	71281,2
S72/3	15,04	15,1	15,07	15,07	14/out	6399	50,46	3,38	56214,0
PZ7/1	14,98	15	15,02	15	24/set	6432	49,9	3,71	50881,9
PZ7/2	15,24	15,29	15,28	15,27	07/out	6555	50,4	5,12	36580,4
PZ7/3	14,18	14,18	14,18	14,18	14/out	6144	49,91	11,8	16926,1
T7/1	14,47	14,47	14,5	14,48	23/set	6333	50,16	9,1	21601,1
T7/2	14,97	15,05	15,03	15,02	04/out	6527	50,19	8,4	22578,3
T7/3	15,58	15,57	15,56	15,57	11/out	6741	50,53	1,68	109617,3

**TABELA B-28** Resistividade elétrica volumétrica (NBR 9204) 62 dias de idade

C. P.	Altura (cm)	data	Massa (g)	dcp (V)	I (mA)	Resistividade (ohm.cm)
C56/1	14,67	28/out	6382	50,25	4,2	46279,0
C56/2	14,99	11/nov	6595	50,56	3,68	52021,4
C56/3	15,30	15/nov	6734	50,06	1,3	142787,2
C52/1	15,18	29/out	6562	50,04	3,68	50841,8
C52/2	15,01	11/nov	6458	50,14	1,16	163408,0
C52/3	15,43	18/nov	6662	50,31	1,71	108198,2
S56/1	15,20	29/out	6605	50,28	1,9	98771,2
S56/2	15,15	11/nov	6512	50,12	1,87	100410,7
S56/3	15,31	18/nov	6693	49,97	1,83	101229,0
S52/1	15,17	28/out	6566	50,15	1,63	115061,5
S52/2	15,15	11/nov	6535	50,01	0,652	287229,3
S52/3	15,54	15/nov	6670	50,19	2,72	67379,0
PZ5/1	14,717	29/out	6434	50,25	2,55	75982,6
PZ5/2	15,24	11/nov	6626	50,15	0,677	275879,7
PZ5/3	14,94	18/nov	6417	50,22	1,6	119189,2
T5/1	15,24	01/nov	6692	49,87	3,5	53065,1
T5/2	14,91	12/nov	6491	49,98	2,1	90659,9
T5/3	15,28	19/nov	6718	50,18	1,12	166386,0
C66/1	14,87	28/out	6459	49,94	3,23	58988,2
C66/2	15,10	11/nov	6478	50,14	1,95	96606,1
C66/3	15,06	15/nov	6607	49,98	1,46	128958,5
C62/1	15,21	01/nov	6531	50,36	2,85	65923,3
C62/2	15,15	12/nov	6537	49,83	4,07	45847,5
C62/3	15,05	19/nov	6442	49,77	1,72	109101,4
S66/1	15,18	01/nov	6586	50,48	1,28	147422,9
S66/2	15,13	12/nov	6503	49,77	1,09	171212,0
S66/3	15,37	19/nov	6656	50,35	1,27	146337,4
S62/1	14,86	29/out	6332	50,21	2,14	89615,4
S62/2	14,95	11/nov	6465	50,45	1,21	158256,7
S62/3	15,37	15/nov	6573	50,21	6,16	30086,3
PZ6/1	15,17	01/nov	6498	50,07	2,18	85895,0
PZ6/2	15,38	12/nov	6504	50,31	1,33	139534,0
PZ6/3	15,44	19/nov	6645	49,82	2	91568,8
T6/1	15,36	01/nov	6722	49,98	3,03	60925,0
T6/2	14,93	12/nov	6338	49,85	1,36	139282,7
T6/3	15,06	19/nov	6573	50,29	0,532	356103,8
C76/1	15,24	29/out	6547	50,47	2,99	62836,2
C76/2	15,22	11/nov	6576	50,11	1,62	115299,5
C76/3	15,16	18/nov	6452	50,34	1,67	112830,1
C72/1	15,36	01/nov	6571	50,59	1,53	122181,0
C72/2	15,06	12/nov	6432	50,24	0,799	236922,0
C72/3	15,22	19/nov	6583	49,98	2,72	68507,8
S76/1	14,93	28/out	6315	49,9	1,62	117098,2
S76/2	15,52	11/nov	6574	50,1	1,08	169645,8
S76/3	15,18	15/nov	6441	50,18	2,33	80488,8
S72/1	14,95	29/out	6463	49,87	1,74	108786,9
S72/2	15,18	11/nov	6532	50,29	2,78	67607,9
S72/3	15,07	18/nov	6334	50,31	0,998	189818,3
PZ7/1	15,00	29/out	6311	50,34	0,933	204111,7
PZ7/2	15,28	11/nov	6437	50,28	0,807	231380,1
PZ7/3	14,18	18/nov	6017	50,1	1,054	190216,6
T7/1	14,48	28/out	6242	50,1	2,14	91745,1
T7/2	15,01	11/nov	6414	50,25	3,58	53040,4
T7/3	15,57	15/nov	6684	50,22	1,62	112979,8

**TABELA B-29** Resistividade elétrica volumétrica (NBR 9204) de concretos com 91 dias de idade

C. P.	altura (cm)	data	Massa (g)	ddp (V)	I (mA)	Resistividade (ohm.cm)
C56/1	14,67	25/nov	6363	50,07	1,74	111307,9
C56/2	14,99	06/dez	6582	50,06	4,28	44286,3
C56/3	15,30	13/dez	6720	50,14	2,01	92497,5
C52/1	15,18	26/nov	6542	50,09	2,04	91806,2
C52/2	15,01	09/dez	6442	50,16	0,643	294912,7
C52/3	15,43	16/dez	6651	50,19	1,244	148374,2
S56/1	15,20	26/nov	6590	50,08	1,96	95366,8
S56/2	15,15	09/dez	6504	49,77	1,49	125138,8
S56/3	15,31	16/dez	6677	50,38	1,35	138347,5
S52/1	15,17	25/nov	6558	50,13	1,06	176863,6
S52/2	15,15	06/dez	6530	50,12	1,285	146058,7
S52/3	15,54	13/dez	6658	49,99	0,535	341197,6
PZ5/1	14,72	26/nov	6413	50,04	0,945	204175,5
PZ5/2	15,24	09/dez	6609	50,34	0,414	452845,9
PZ5/3	14,94	16/dez	6398	49,73	1,028	183698,5
T5/1	15,24	29/nov	6675	50,6	3,56	52934,4
T5/2	14,90	10/dez	6474	50,47	2,66	72275,3
T5/3	15,28	17/dez	6698	50,28	0,898	207932,9
C66/1	14,87	25/nov	6434	50,09	0,718	266161,9
C66/2	15,10	06/dez	6455	49,93	0,718	261271,5
C66/3	15,06	13/dez	6589	49,68	0,819	228509,5
C62/1	15,21	29/nov	6508	49,79	1,52	122207,2
C62/2	15,15	10/dez	6516	49,82	1,6	116601,3
C62/3	15,05	17/dez	6420	49,47	1,84	101371,3
S66/1	15,18	29/nov	6566	49,82	0,817	227948,9
S66/2	15,13	10/dez	6492	49,99	1,68	111575,0
S66/3	15,37	17/dez	6636	50,27	1,86	99759,8
S62/1	14,86	25/nov	6313	49,94	1,353	140979,8
S62/2	14,95	06/dez	6456	49,86	1,43	132343,5
S62/3	15,37	13/dez	6557	49,9	4,28	43034,5
PZ6/1	15,17	29/nov	6472	50,02	1,325	141180,4
PZ6/2	15,38	10/dez	6492	49,91	1,27	144964,31
PZ6/3	15,44	17/dez	6623	50,44	0,722	256810,0
T6/1	15,36	29/nov	6697	49,61	1,352	135529,8
T6/2	14,93	10/dez	6320	49,97	0,958	198205,1
T6/3	15,06	17/dez	6554	50,1	0,754	250307,0
C76/1	15,24	26/nov	6512	49,66	1,76	105036,9
C76/2	15,22	09/dez	6552	50,01	2,13	87517,5
C76/3	15,16	16/dez	6429	49,95	0,864	216396,5
C72/1	15,36	29/nov	6541	49,94	0,562	328354,3
C72/2	15,06	10/dez	6414	49,93	1,323	142201,6
C72/3	15,22	17/dez	6556	49,97	1,283	145209,7
S76/1	14,93	25/nov	6293	49,98	1,771	107285,8
S76/2	15,52	06/dez	6555	49,97	1	182742,0
S76/3	15,18	13/dez	6412	50,24	0,991	189468,3
S72/1	14,95	26/nov	6441	50,02	1,34	141685,5
S72/2	15,18	09/dez	6516	49,86	2,15	86671,1
S72/3	15,07	16/dez	6318	49,76	0,978	191582,5
PZ7/1	15	26/nov	6286	49,5	0,965	194050,3
PZ7/2	15,27	09/dez	6418	49,98	0,776	239187,7
PZ7/3	14,18	16/dez	5994	50,29	1,703	118173,0
T7/1	14,48	25/nov	6212	50,37	0,218	905470,9
T7/2	15,02	06/dez	6393	50,11	2,04	92821,4
T7/3	15,57	13/dez	6661	49,62	3,25	55643,2