

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL  
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ANDRIELLI MORAIS DE OLIVEIRA**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE CONCRETOS  
COM ADIÇÕES MINERAIS QUANTO À CORROSÃO  
DAS ARMADURAS INDUZIDA POR CLORETOS**

**Goiânia  
2007**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL  
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ANDRIELLI MORAIS DE OLIVEIRA**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE CONCRETOS  
COM ADIÇÕES MINERAIS QUANTO À CORROSÃO  
DAS ARMADURAS INDUZIDA POR CLORETOS**

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

**Área de Concentração:**  
Estruturas e Materiais

**Orientador:**  
Prof. Dr. Oswaldo Cascudo

**Goiânia  
2007**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
(GPT/BC/UFG)

Oliveira, Andrielli Morais de.

O48a Avaliação do desempenho de concretos com adições minerais quanto à corrosão nas armaduras induzida por cloretos [manuscrito] / Andrielli Morais de Oliveira – 2007.

xix,255 f. : il., color., figs., tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás.  
Escola de Engenharia Civil, 2007.

Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Cascudo.

Bibliografia: f. 245-255.

Inclui listas de figuras e de tabelas.

Anexos.

1. Concreto - Adição mineral – Avaliação 2. Corrosão de armaduras I. Cascudo, Oswaldo II. Universidade Federal de Goiás. Escola de Engenharia Civil III. Título.

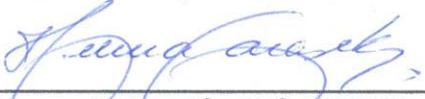
CDU: 693.54/.56

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE CONCRETOS COM  
ADIÇÕES MINERAIS QUANTO À CORROSÃO DAS  
ARMADURAS INDUZIDA POR CLORETOS**

**ANDRIELLI MORAIS DE OLIVEIRA**

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 29 de agosto de 2007, pela banca examinadora constituída pelos professores:

  
**Oswaldo Cascardo, Prof. Dr. (UFG)**  
**(ORIENTADOR)**

  
**Helena Carasek, Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. (UFG)**  
**(EXAMINADORA INTERNA)**

  
**Antônio Alberto Nepomuceno, Prof. Dr. (UNB)**  
**EXAMINADOR EXTERNO**

*A minha mãe, ao meu irmão, ao Victor e ao  
meu querido tio Orlando (in memoriam).*

## Agradecimentos

Ao meu Orientador Oswaldo Cascudo pelo incentivo, apoio, dedicação e contribuições ao longo da pesquisa. E também pela compreensão e atenção no conduzir do trabalho, muito obrigada.

A Helena Carasek, mulher a quem eu muito admiro, obrigada por todo carinho e amizade.

Ao Centro Tecnológico de Engenharia Civil de Furnas Centrais Elétricas S.A, a quem eu gostaria de agradecer nas pessoas dos Engenheiros Sr. Rubens Bittencourt, Moacir A. de Souza Andrade, Alexandre de Castro, Ricardo Ferreira, Anne Neiry Lopes, Eduardo Gambale, Maurice Antoniere e tantos outros, pela viabilização do trabalho experimental. Aos funcionários do DCT.T e em especial Zito, Gilberto, Flávia, Ademir, Brito, Wiliam, Marley, Josian, Edson, Pedro e tantos outros que contribuíram com dedicação e profissionalismo para realização deste estudo.

À CAPES pelo indispensável apoio financeiro.

À ANEEL pelo financiamento da pesquisa.

A minha mãezinha e ao meu estimado irmão por toda paciência e generosidade... Obrigada por tudo! A meu pai!

Ao Victor Alexandre que com carinho, paciência e compreensão esteve ao meu lado. Aos meus estimados familiares tia Marta, madrinhas Maria e Valdete, tia Dete, tia Wanda, João Paulo, Fernando, Tatiane e Lúcia. A Marilda, Jeremias e Diego que sempre me incentivaram e me confortaram.

As amigas Janaína Araújo, Eliane Betânia, Aline Luccas e Rosana Brandão.

A Deus, por tudo!

*Andrielli Morais de Oliveira*

# Sumário

**Lista de figuras**

**Lista de tabelas**

**Resumo**

**Abstract**

## **CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO**

<b>1.1 JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DO TEMA</b>	<b>2</b>
<b>1.2 OBJETIVOS</b>	<b>5</b>
<b>1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO</b>	<b>6</b>

## **CAPÍTULO 2 - CORROSÃO DAS ARMADURAS NO CONCRETO**

<b>2.1 ASPECTOS FUNDAMENTAIS DA CORROSÃO ELETROQUÍMICA</b>	<b>9</b>
2.1.1 Aspectos Termodinâmicos das Reações Eletroquímicas	9
2.1.1.1 Espontaneidade das Reações	10
2.1.1.2 Conceito de Eletrodo e Formação da Dupla Camada Elétrica	13
2.1.1.4 Equilíbrio e Equação de Nernst	16
2.1.2.1 Polarização de Eletrodo	19
<b>2.2 CORROSÃO DAS ARMADURAS NO CONCRETO</b>	<b>30</b>
2.2.1 Estado de Passivação do Aço	31
2.2.1.1 Considerações Sobre o pH e a Solução dos Poros do Concreto	31
2.2.1.2 Passivação do Aço	31
2.2.2 Início da Corrosão ou Estágio de Despassivação	33
2.2.2.1 Iniciação da Corrosão ou Efeito de Despassivação das Armaduras por Ação de Íons Cloreto	34
2.2.3 Propagação da Corrosão e Implicações à Estrutura de Concreto	38
<b>2.3 EFEITO DAS ADIÇÕES MINEIRAS NA CORROSÃO DAS ARMADURAS NO CONCRETO</b>	<b>41</b>
2.3.1 Sílica Ativa	42
2.3.2 Cinza Volante	46
2.3.3 Metacaulim	48

## **CAPÍTULO 3 – CONSIDERAÇÕES SOBRE TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS PARA AVALIAÇÃO DA CORROSÃO**

<b>3.1 ANÁLISES VISUAIS</b>	51
<b>3.2 RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO</b>	52
<b>3.3 TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS</b>	58
3.3.1 Potenciais de Corrosão	59
3.3.2 Resistência de Polarização	62
3.3.3 Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS)	74
<b>CAPÍTULO 4 – PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS</b>	
<b>4.1 VARIÁVEIS DO EXPERIMENTO</b>	82
4.1.1 Tipo/Teor de Adição Mineral	82
4.1.2 Composição do Concreto pela Variação da Relação Água/Aglomerante	83
4.1.3 Classe de Resistência	83
<b>4.2 APRESENTAÇÃO GERAL DO EXPERIMENTO</b>	84
<b>4.3 MATERIAIS</b>	85
4.3.1 Cimento	85
4.3.2 Adições minerais	87
4.3.3 Agregados	90
4.3.4 Aditivos Químicos	92
<b>4.4 CONCRETOS ESTUDADOS</b>	93
4.4.1 Caracterização do Concreto Fresco	97
4.4.2 Caracterização do Concreto Endurecido	100
<b>4.5 CORPOS-DE-PROVA</b>	103
4.5.1 Preparação das Barras de Aço	105
4.5.2 Preparação das Fôrmas	106
<b>4.6 MOLDAGEM, ADENSAMENTO, CURA E ARMAZENAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA</b>	111
<b>4.7 MÉTODOS DE INDUÇÃO, DESENVOLVIMENTO E MONITORAMENTO DA CORROSÃO DAS ARMADURAS SOB A AÇÃO DE CLORETOS</b>	113
4.7.1 Inspeções Visuais	117
4.7.2 Resistividade Elétrica Superficial Aparente do Concreto	117
<b>4.8 TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS</b>	118
4.8.1 Potencial de Corrosão Eletroquímico	122
4.8.2 Resistência de Polarização	123

4.8.3 Espectrometria de Impedância Eletroquímica	125
<b>4.9 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS</b>	<b>126</b>
<b>CAPÍTULO 5 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b>	
<b>5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b>	<b>128</b>
<b>5.1 RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO</b>	<b>129</b>
5.1.1 Influência da Relação Água/Aglomerante	130
5.1.2 Influência do Tipo de Adição Mineral	136
5.1.3 Influência da Classe de Resistência	138
5.1.4 Análise Estatística dos Valores de Resistividade Elétrica	140
5.1.4.1 Análise Estatística Global	140
5.1.4.2 Análise Estatística dos Teores de Metacaulim	146
5.1.5 Valores Médios e Análise Final dos Valores de Resistividade Elétrica	151
<b>5.2 AVALIAÇÃO DA CORROSÃO DA ARMADURA</b>	<b>153</b>
5.2.1 Resultados Relacionados à Termodinâmica do Processo Eletroquímico	153
5.2.2.1 Monitoramento do Potencial de Corrosão com o Tempo de Ataque	153
5.2.2 Resultados Relacionados à Cinética do Processo Eletroquímico	174
5.2.2.1 Resistência de Polarização e Taxa de Corrosão Eletroquímica	175
5.2.2.2 Impedância Eletroquímica	193
5.2.3 Análise Visual das Barras de Aço e dos Concretos ao Final do Experimento	209
<b>5.3 ANÁLISE GLOBAL DOS RESULTADOS</b>	<b>213</b>
5.3.1 Relação a/ag	214
5.3.2 Adição Mineral	215
<b>6 CONCLUSÕES</b>	<b>219</b>
<b>6.1 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS</b>	<b>221</b>
Anexo A	
Anexo B	
Anexo C	
<b>LISTA DE REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>266</b>

## Lista de Figuras

Figura 2.1 – Representação simplificada do sentido de espontaneidade das reações (PANOSSIAN, 1993).	10
Figura 2.2 – Estrutura da dupla camada elétrica (WEST, 1987 apud WOLYNEC, 2003).	14
Figura 2.3 – Polarização anódica e catódica de um eletrodo (WOLYNEC, 2003).	20
Figura 2.4 – Diagrama de Evans.	22
Figura 2.5 – Potencial em função da corrente, elucidando o controle anódico da corrosão (ROSENBERG <i>et al.</i> , 1989 apud CASCUDO, 2000).	23
Figura 2.6 – Potencial em função da corrente, elucidando o controle catódico da corrosão (ROSENBERG <i>et al.</i> , 1989 apud CASCUDO, 2000).	24
Figura 2.7 - Diagrama de Pourbaix de equilíbrio termodinâmico. Potencial x pH para o sistema Fe-H <sub>2</sub> O a 25°C, delimitando os domínios de corrosão, passivação e imunidade (CASCUDO, 1997).	32
Figura 2.8 - Pilha eletroquímica de corrosão no concreto armado (CASCUDO, 1997).	40
Figura 3.1 - (a) Aparentagem para medição da resistividade do concreto e (b) execução do ensaio de resistividade superficial do concreto (CASTRO, 2003).	53
Figura 3.2 - Configuração básica para aplicação da técnica de potenciais de corrosão (CASCUDO, 2005).	61
Figura 3.3 - Ensaio de potencial de corrosão: (a) equipamentos utilizados no ensaio e (b) realização do ensaio (FERREIRA, 2003).	61
Figura 3.4 - Arranjo utilizado por Montemor <i>et al.</i> , (2003).	69
Figura 3.5 - Típico diagrama de Nyquist (POUPARD <i>et al.</i> , 2004).	76
Figura 3.6 - Circuito equivalente com $R_s$ = resistência do eletrólito, $R_p$ = resistência a transferência de carga, CPE = elemento de fase constante e ZD= difusão de Warburg (FELIU <i>et al.</i> , 1998 apud MONTEMOR <i>et al.</i> , 2003).	78
Figura 4.1 – Fluxograma das variáveis do programa experimental.	85
Figura 4.2 – Difratoograma do cimento Portland CP II-F 32.	87
Figura 4.4 – Difratoograma da sílica ativa.	89
Figura 4.3 – Difratoograma da cinza volante.	89
Figura 4.5 – Difratoograma do metacaulim.	90
Figura 4.6 - Ensaio realizado no concreto fresco: (a) abatimento do tronco de cone, (b) massa específica e (c) teor de ar.	97
Figura 4.7 – Ensaio no concreto endurecido: (a) ensaio de resistência à compressão e (b) ensaio de absorção de água por capilaridade.	100
Figura 4.8 – Detalhamento do corpo-de-prova: (a) armaduras e (b) vista lateral.	104
Figura 4.9 – Detalhamento do corpo-de-prova: (a) vista em planta e (b) aspecto final do corpo-de-prova após a desmoldagem.	104

- Figura 4.10 – (a) Limpeza química das barras de aço e (b) aspecto final das barras após a limpeza química. 105
- Figura 4.11 – (a) Acabamento em pedra de esmeril da extremidade das barras de aço e (b) limpeza da superfície metálica ao longo da barra de aço por meio de escova de aço acoplada em aparelho rotacional. 106
- Figura 4.12 – Barra de aço antes e após a limpeza mecânica com escova de aço, tendo-se óxidos visíveis. 106
- Figura 4.13 – Identificação das barras de aço por meio de fita isolante enumerada. 107
- Figura 4.14 – (a) Extremidades da barra envolvidas com fita isolante (b) Detalhe “vão central” da barra (5 cm) exposto à ação corrosiva. 107
- Figura 4.15 – Detalhamento das fôrmas: (a) placa de base perfurada e (b) aspecto final da fôrma. 109
- Figura 4.16 – Detalhamento das fôrmas: (a) montagem da fôrma com a armadura e (b) corpo-de-prova após concretagem. 109
- Figura 4.17 – (a) Fôrma dos corpos-de-prova destinados a estudos de corrosão: (a) vista em planta e (b) vista em perspectiva. 109
- Figura 4.18 – Fôrma de madeira com as barras posicionadas, pronta para receber o concreto. 110
- Figura 4.19 - Colocação do concreto nas fôrmas e adensamento; (a) vibração dos corpos-de-prova cilíndricos com vibrador de imersão e (b) vibração dos corpos-de-prova cúbicos por meio de mesa vibratória. 112
- Figura 4.20 – Corpos-de-prova em local de armazenamento após período de cura úmida. 113
- Figura 4.21 – Fase de imersão em solução agressiva contendo cloretos com concentração de 5% de NaCl. 114
- Figura 4.22 – (a) Aparelho utilizado para medição da resistividade do concreto e (b) execução do ensaio de resistividade superficial do concreto. 117
- 4.23 – Potenciostato utilizado tipo Voltalab 40 PGZ 301 versão 1.6. 118
- Figura 4.24 – Interface do software Voltmaster 4, versão 6.02. 119
- Figura 4.25 – “Célula dummy” ou “rcb 200” do potenciostato Voltalab 40 PGZ 301, versão 1.6. 119
- Figura 4.26 – Gaiola de Faraday utilizada durante as medidas eletroquímicas. 120
- Figura 4.27 – (a) Célula de corrosão ligada ao potenciostato e ao computador. 121
- Figura 4.28 – (a) Configuração para medição dos parâmetros eletroquímicos (b) detalhe da célula eletroquímica. 121
- Figura 4.29 – Curva de voltametria cíclica obtida pelo software Voltmaster 4 versão 6.02. 124
- Figura 4.30 – Curva de voltametria cíclica obtida pelo software Voltmaster 4, versão 6.02 e determinação do valor de  $R_p$  por meio da 2ª equação de Stern. 125
- Figura 4.31 – Diagrama de Nyquist da técnica de impedância eletroquímica, obtida por meio do software Voltmaster 4, versão 6.02. 126

- Figura 5.1 - Resistividade elétrica superficial aparente variando com o tempo de ataque (número de ciclos) para os concretos de referência (sem adições) com relação água/aglomerante igual a 0,40 ou 0,55, de acordo com os critérios da CEB 19 2 (1989 *apud* Cascudo, 1997). 131
- Figura 5.2 - Resistividade elétrica superficial aparente variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com adição de sílica ativa com relação água/aglomerante igual a 0,40 ou 0,55, de acordo com os critérios da CEB 192 (1989 *apud* Cascudo, 1997). 131
- Figura 5.3 - Resistividade elétrica superficial aparente variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com adição de cinza volante ativa com relação água/aglomerante igual a 0,40 ou 0,55, de acordo com os critérios da CEB 192 (1989 *apud* Cascudo, 1997). 132
- Figura 5.4 - Resistividade elétrica superficial aparente variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com adição de metacaulim no teor de 10% em substituição ao cimento Portland (em massa) com relação água/aglomerante igual a 0,40 ou 0,55, de acordo com os critérios da CEB 192 (1989 *apud* Cascudo, 1997). 132
- Figura 5.5 - Resistividade elétrica superficial aparente variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com adição de metacaulim no teor de 20% em substituição ao cimento Portland (em massa) com relação água/aglomerante igual a 0,40 ou 0,55, de acordo com os critérios da CEB 192 (1989 *apud* Cascudo, 1997). 133
- Figura 5.6 - Resistividade elétrica superficial aparente variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com adição de metacaulim no teor de 30% em substituição ao cimento Portland (em massa) com relação água/aglomerante igual a 0,40 ou 0,55, de acordo com os critérios da CEB 192 (1989 *apud* Cascudo, 1997). 133
- Figura 5.7 - Resistividade elétrica superficial aparente variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com relação água/aglomerante igual a 0,40 ou 0,55, de acordo com os critérios da CEB 192 (1989 *apud* Cascudo, 1997). 135
- Figura 5.8 - Resistividade elétrica superficial aparente variando com o tempo de ataque (ciclos de imersão) para os concretos de relação água/aglomerante 0,40, considerando os seis tipos de concreto, de acordo com os critérios da CEB 192 (1989 *apud* Cascudo, 1997). 136
- Figura 5.9 - Resistividade elétrica superficial aparente variando com o tempo de ataque (ciclos de imersão) para os concretos de relação água/aglomerante 0,55, considerando os seis tipos de concreto, de acordo com os critérios da CEB 192 (1989 *apud* Cascudo, 1997). 137
- Figura 5.10 - Resistividade elétrica superficial aparente variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com classe de resistência C40, inclusive concreto de referência; de acordo com os critérios da CEB 192 (1989 *apud* Cascudo, 1997). 139
- Figura 5.11 - Resistividade elétrica superficial aparente variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos de diferentes classes de resistência, considerando apenas concretos com adições minerais; de acordo com os critérios da CEB 192 (1989 *apud* Cascudo, 1997). 140
- Figura 5.12 - Ordem decrescente de médias e disposição dos grupos definidos pela comparação múltipla de médias, por meio do teste de Duncan para os valores de resistividade elétrica. 142
- Figura 5.13 - Valores médios globais de resistividade elétrica para todos os concretos com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. A linha tracejada vertical define os grupos que diferem significativamente. 144

- Figura 5.14 – Valores médios globais de resistividade elétrica para todos os concretos com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. A linha tracejada vertical define os grupos que diferem significativamente. 145
- Figura 5.15 – Ordem decrescente de médias e disposição dos grupos definidos pela comparação múltipla de médias, por meio do teste de Duncan para os valores de resistividade elétrica. 147
- Figura 5.16 – Valores médios globais de resistividade elétrica para todos os concretos com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. A linha tracejada vertical define os grupos que diferem significativamente. 148
- Figura 5.17 – Valores médios globais de resistividade elétrica para todos os concretos com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. A linha tracejada vertical define os grupos que diferem significativamente. 150
- Figura 5.18 – Valores médios da resistividade elétrica para cada teor de adição em função da relação a/ag. 150
- Figura 5.19 – Valores médios de resistividade elétrica para os concretos estudados. 151
- Figura 5.20 – Potenciais de corrosão variando com o número de ciclos de ataque para os concretos de referência (sem adições); medidas em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS). 155
- Figura 5.21 – Potenciais de corrosão variando com o número de ciclos de ataque para os concretos com adição de sílica ativa; medidas em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS). 155
- Figura 5.22 – Potenciais de corrosão variando com o número de ciclos de ataque para os concretos com adição de cinza volante; medidas em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS). 156
- Figura 5.23 – Potenciais de corrosão variando com o número de ciclos de ataque para os concretos com adição de 10% de metacaulim; medidas em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS). 156
- Figura 5.24 – Potenciais de corrosão variando com o número de ciclos de ataque para os concretos com adição de 20% de metacaulim; medidas em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS). 157
- Figura 5.25 – Potenciais de corrosão variando com o número de ciclos de ataque para os concretos com adição de 30% de metacaulim; medidas em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS). 157
- Figura 5.26 – Potenciais de corrosão (valores médios globais) variando com o número de ciclos de ataque para os concretos com relação a/ag 0,40 e a/ag 0,55, medidas em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS). 159
- Figura 5.27 – Potenciais de corrosão variando com o número de ciclos de ataque para concretos com relação água/aglomerante igual a 0,40; medidas em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS). 160
- Figura 5.28 – Potenciais de corrosão variando com o número de ciclos de ataque para concretos com relação água/aglomerante igual a 0,55; medidas em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS). 161
- Figura 5.29 – Potenciais de corrosão variando com o número de ciclos de ataque para os concretos com adições e sem adições, considerando valores médios das classes ou grupos de

- resistência C20, C25, C30, C35 e C40; medidas em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS). 163
- Figura 5.30 – Potenciais de corrosão variando com o número de ciclos de ataque para concretos com adições minerais, considerando valores médios das classes ou grupos de resistência C20, C25, C30, C35 e C40; medidas em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS). 164
- Figura 5.31 – Magnitude dos valores médios de potencial de corrosão dos concretos estudados. 167
- Figura 5.32 – Ordem decrescente de médias e disposição dos grupos definidos pela comparação múltipla de médias, por meio do teste de Duncan para os valores médios de potencial de corrosão. 170
- Figura 5.33 – Estimativa da média global dos valores de potencial de corrosão, com seu erro padrão e desvio padrão. A linha tracejada vertical indica os grupos que se diferem significativamente. 171
- Figura 5.34 – Valores médios de potencial de corrosão para cada tipo de concreto em função da relação a/ag. 172
- Figura 5.35 – Valores médios globais de potencial de corrosão para todos os concretos com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. A linha tracejada vertical define os grupos que diferem significativamente. 173
- Figura 5.36 – Resistência de polarização ( $R_p$ ) variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos de referência. 176
- Figura 5.37 – Taxa de corrosão eletroquímica variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos de referência. 176
- Figura 5.38 – Resistência de polarização ( $R_p$ ) variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com sílica ativa. 177
- Figura 5.39 – Taxa de corrosão eletroquímica variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com sílica ativa. 178
- Figura 5.40 – Resistência de polarização ( $R_p$ ) variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com cinza volante. 179
- Figura 5.41 – Taxa de corrosão eletroquímica variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com cinza volante. 179
- Figura 5.42 – Resistência de polarização ( $R_p$ ) variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com metacaulim no teor de 10% de substituição. 180
- Figura 5.43 – Taxa de corrosão eletroquímica variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com metacaulim no teor de 10% de substituição. 181
- Figura 5.44 – Resistência de polarização ( $R_p$ ) variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com metacaulim no teor de 20% de substituição. 181
- Figura 5.45 – Taxa de corrosão eletroquímica variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com metacaulim no teor de 20% de substituição. 182
- Figura 5.46 – Resistência de polarização ( $R_p$ ) variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com metacaulim no teor de 30% de substituição. 182

- Figura 5.47 – Taxa de corrosão eletroquímica variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com metacaulim no teor de 30% de substituição. 183
- Figura 5.48 – Resistência de polarização ( $R_p$ ) variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com relação água/aglomerante 0,40. 185
- Figura 5.49 – Taxa de corrosão eletroquímica variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com relação água/aglomerante 0,40. 185
- Figura 5.50 – Resistência de polarização ( $R_p$ ) variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com relação água/aglomerante 0,55. 186
- Figura 5.51 – Taxa de corrosão eletroquímica variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com relação água/aglomerante 0,55. 187
- Figura 5.52 – Resistência de polarização ( $R_p$ ) variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com classe de resistência C20, C25, C30, C35 e C40, incluindo os concretos de referência. 188
- Figura 5.53 – Taxa de corrosão eletroquímica variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com classe de resistência C20, C25, C30, C35 e C40, incluindo os concretos de referência. 189
- Figura 5.54 – Resistência de polarização ( $R_p$ ) variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com classe de resistência C20, C30, C35 e C40, somente considerando os concretos com adições (sem referência). 190
- Figura 5.55 – Taxa de corrosão eletroquímica variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com classe de resistência C20, C30, C35 e C40, incluindo somente concretos com adições (sem referência). 191
- Figura 5.56 – Valores médios expressos graficamente de resistência de polarização para os concretos. 192
- Figura 5.57 – Circuito equivalente proposto para o caso do concreto armado: associação dos elementos do circuito com as partes do concreto e interface e diagrama de Nyquist correspondente (JOHN et al., 1983 apud CASCUDO, 2000). 194
- Figura 5.58 - Diagramas de Nyquist dos concretos de referência e relação a/ag 0,40 e 0,55, com as medidas realizadas anteriormente ao início do ataque por cloretos, com frequências de 100 kHz a 10 mHz. 194
- Figura 5.59 - Diagramas de Nyquist dos concretos de referência e relação a/ag 0,40 e 0,55, com as medidas realizadas após 154 dias do início do ataque por cloretos, com frequências de 100 kHz a 10 mHz: (a) concretos R4 e R5 (b) imagem ampliada para o concreto R5 (c) imagem ampliada para o concreto R4. 195
- Figura 5.60 - Diagramas de Nyquist dos concretos de referência e relação a/ag 0,40 e 0,55, com as medidas realizadas após 308 dias do início do ataque por cloretos, com frequências de 100 kHz a 10 mHz: (a) concretos R4 e R5 (b) imagem ampliada para o concreto R5 (c) imagem ampliada para o concreto R4. 195
- Figura 5.61 - Diagramas de Nyquist dos concretos com adição de sílica ativa e relação a/ag 0,40 e 0,55, com as medidas realizadas anteriormente ao início do ataque por cloretos, com frequências de 100 kHz a 10 mHz. 196
- Figura 5.62 - Diagramas de Nyquist dos concretos com adição de sílica ativa e relação a/ag 0,40 e 0,55, com as medidas realizadas após 154 dias do início do ataque por cloretos, com frequências de 100 kHz a 10 mHz. 196

Figura 5.63 - Diagramas de Nyquist dos concretos com adição de sílica ativa e relação a/ag 0,40 e 0,55, com as medidas realizadas após 308 dias do início do ataque por cloretos, com freqüências de 100 kHz a 10 mHz. 197

Figura 5.64 - Diagramas de Nyquist dos concretos com adição de cinza volante e relação a/ag 0,40 e 0,55, com as medidas realizadas anteriormente ao início do ataque por cloretos, com freqüências de 100 kHz a 10 mHz: (a) concretos V5 e V4 (b) imagem ampliada para os referidos concretos. 197

Figura 5.65 - Diagramas de Nyquist dos concretos com adição de cinza volante e relação a/ag 0,40 e 0,55, com as medidas realizadas após 154 dias do início do ataque por cloretos, com freqüências de 100 kHz a 10 mHz. 198

Figura 5.66 - Diagramas de Nyquist dos concretos com adição de cinza volante e relação a/ag 0,40 e 0,55, com as medidas realizadas após 308 dias do início do ataque por cloretos, com freqüências de 100 kHz a 10 mHz. 198

Figura 5.67 - Diagramas de Nyquist dos concretos com adição de metacaulim em substituição parcial ao cimento Portland em massa no teor de 10% e relação a/ag 0,40 e 0,55, com as medidas realizadas anteriormente ao início do ataque por cloretos, com freqüências de 100 kHz a 10 mHz: (a) concretos M4\_10% e M5\_10% (b) imagem ampliada para os referidos concretos. 199

Figura 5.68 - Diagramas de Nyquist dos concretos com adição de metacaulim em substituição parcial ao cimento Portland em massa no teor de 10% e relação a/ag 0,40 e 0,55, com as medidas realizadas após 154 dias do início do ataque por cloretos, com freqüências de 100 kHz a 10 mHz: (a) concretos M4\_10% e M5\_10% (b) imagem ampliada para os referidos concretos. 199

Figura 5.69 - Diagramas de Nyquist dos concretos com adição de metacaulim em substituição parcial ao cimento Portland em massa no teor de 10% e relação a/ag 0,40 e 0,55, com as medidas realizadas após 308 dias do início do ataque por cloretos, com freqüências de 100 kHz a 10 mHz: (a) concretos M4\_10% e M5\_10% (b) imagem ampliada para os referidos concretos. 200

Figura 5.70 - Diagramas de Nyquist dos concretos com adição de metacaulim em substituição parcial ao cimento Portland em massa no teor de 20% e relação a/ag 0,40 e 0,55, com as medidas realizadas anteriormente ao início do ataque por cloretos, com freqüências de 100 kHz a 10 mHz. 200

Figura 5.71 - Diagramas de Nyquist dos concretos com adição de metacaulim em substituição parcial ao cimento Portland em massa no teor de 20% e relação a/ag 0,40 e 0,55, com as medidas realizadas após 154 dias do início do ataque por cloretos, com freqüências de 100 kHz a 10 mHz. 201

Figura 5.72 - Diagramas de Nyquist dos concretos com adição de metacaulim em substituição parcial ao cimento Portland em massa no teor de 20% e relação a/ag 0,40 e 0,55, com as medidas realizadas após 308 dias do início do ataque por cloretos, com freqüências de 100 kHz a 10 mHz. 201

Figura 5.73 - Diagramas de Nyquist dos concretos com adição de metacaulim em substituição parcial ao cimento Portland em massa no teor de 30% e relação a/ag 0,40 e 0,55, com as medidas realizadas anteriormente ao início do ataque por cloretos, com freqüências de 100 kHz a 10 mHz. 202

- Figura 5.74 - Diagramas de Nyquist dos concretos com adição de metacaulim em substituição parcial ao cimento Portland em massa no teor de 30% e relação a/ag 0,40 e 0,55, com as medidas realizadas após 154 dias do início do ataque por cloretos, com frequências de 100 kHz a 10 mHz. 202
- Figura 5.75 - Diagramas de Nyquist dos concretos com adição de metacaulim em substituição parcial ao cimento Portland em massa no teor de 30% e relação a/ag 0,40 e 0,55, com as medidas realizadas após 308 dias do início do ataque por cloretos, com frequências de 80 kHz a 10 mHz. 203
- Figura 5.76 - Diagramas de Nyquist dos concretos com relação a/ag 0,40, com as medidas realizadas anteriormente ao início do ataque por cloretos, com frequências de 100 kHz a 10 mHz. 205
- Figura 5.77 - Diagramas de Nyquist dos concretos com relação a/ag 0,40, com as medidas realizadas após 154 dias do início do ataque por cloretos, com frequências de 100 kHz a 10 mHz. 206
- Figura 5.78 - Diagramas de Nyquist dos concretos com relação a/ag 0,40, com as medidas realizadas após 308 dias do início do ataque por cloretos, com frequências de 100 kHz a 10 mHz. 206
- Figura 5.79 - Diagramas de Nyquist dos concretos com relação a/ag 0,55, com as medidas realizadas anteriormente ao início do ataque por cloretos, com frequências de 100 kHz a 10 mHz. 207
- Figura 5.80 - Diagramas de Nyquist dos concretos com relação a/ag 0,40, com as medidas realizadas após 154 dias do início do ataque por cloretos, com frequências de 100 kHz a 10 mHz. 207
- Figura 5.81 - Diagramas de Nyquist dos concretos com relação a/ag 0,40, com as medidas realizadas após 308 dias do início do ataque por cloretos, com frequências de 100 kHz a 10 mHz. 208
- Figura 5.82 – Aspecto superficial final de uma barra de aço inserida em um concreto de referência e relação a/ag 0,55, exposta à corrosão por 308 dias de ataque. 209
- Figura 5.83 – Aspecto superficial final de uma barra de aço inserida em um concreto de referência e relação a/ag 0,40, exposta à corrosão por 308 dias de ataque. 209
- Figura 5.84 – Concreto R4 próximo à armadura de aço exposta à corrosão por 308 dias. 210
- Figura 5.85 – Concreto R5 próximo à armadura de aço exposta à corrosão por 308 dias. 211
- Figura 5.86 – Aspecto superficial final de uma barra de aço inserida no concreto S5 exposto à corrosão por 308 dias de ataque. 212
- Figura 5.87 – Aspecto superficial final de uma barra de aço inserida no concreto M5\_305 exposto à corrosão por 308 dias de ataque. 212
- Figura 5.88 – Concreto S5 próximo à armadura de aço exposta à corrosão por 308 dias. 212

## Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Parâmetros de avaliação da resistividade elétrica do concreto - elaborada com base em Langford; Broomfield (1987 <i>apud</i> BROOMFIELD, 1997) e CEB 192 (1989 <i>apud</i> CASCUDO, 1997).	56
Tabela 3.2 – Faixas de resistividade do concreto associadas com o estado de corrosão do aço (BROOMFIELD, 1987).	57
Tabela 3.3 – Critérios propostos pela ASTM C876/91 (ASTM, 2003b) para avaliação qualitativa da atividade corrosiva.	60
Tabela 3.4 – Resumo de algumas células eletroquímicas encontradas na literatura.	70
Tabela 4.1 – Codificação adotada no programa experimental.	84
Tabela 4.2 – Características químicas, físicas e mecânicas do cimento Portland.	86
Tabela 4.3 – Principais características das adições minerais utilizadas.	88
Tabela 4.4 – Caracterização do agregado graúdo.	91
Tabela 4.5 – Caracterização do agregado miúdo.	91
Tabela 4.6 – Caracterização dos aditivos químicos.	92
Tabela 4.7 – Dosagem dos concretos de relação água/aglomerante 0,40.	95
Tabela 4.8 – Dosagem dos concretos de relação água/aglomerante 0,55.	96
Tabela 4.9 – Caracterização dos concretos de relação água/aglomerante 0,40 no estado fresco.	98
Tabela 4.10 – Caracterização dos concretos de relação água/aglomerante 0,55 no estado fresco.	98
Tabela 4.11 – Caracterização dos concretos no estado endurecido.	99
Tabela 4.12 – Resumo das Classes de Resistência.	102
Tabela 4.13 - Correlação entre densidade da corrente de corrosão, taxa de penetração da corrosão e a classificação.	124
Tabela 5.1 - Parâmetros de avaliação da medida de resistividade elétrica do concreto (elaborada com base em LANGFORD; BROOMFIELD, 1987 <i>apud</i> BROOMFIELD, 1997; CEB 192, 1989 <i>apud</i> CASCUDO, 1997).	129
Tabela 5.2 - Resultados da análise de variância (ANOVA) realizada com dados de resistividade elétrica, para os fatores ou variáveis independentes consideradas no modelo estatístico.	141
Tabela 5.3 - Resultados da análise de variância (ANOVA) realizada com dados de resistividade elétrica dos concretos com adição de metacaulim, para os fatores ou variáveis independentes consideradas no modelo estatístico.	146
Tabela 5.4 - Parâmetros de avaliação dos valores de potencial de corrosão, segundo a ASTM C 876/1991 (ASTM, 2000).	154
Tabela 5.5 - Tempo de ataque até a despassivação da armadura, caracterizada pelo potencial de corrosão mais eletronegativo que -276 mV.	166

Tabela 5.6 – Magnitude do potencial de corrosão ao longo dos 44 ciclos de imersão em solução agressiva contendo cloretos. 167

Tabela 5.7 - Resultados da análise de variância (ANOVA) realizada com dados de potencial de corrosão, para os fatores ou variáveis independentes consideradas no modelo estatístico.

169

Tabela 5.8 – Critérios de avaliação da velocidade de corrosão, segundo Alonso e Andrade (1990 *apud* CASCUDO, 1997). 175

Tabela 5.9 – Valores médios de resistência de polarização durante o tempo de ataque para os concretos estudados. 192

## Resumo

O presente trabalho tem como objetivo estudar o desempenho de concretos quanto à ação de íons cloreto, avaliando tanto a interveniência das adições minerais incorporadas ao concreto quanto da relação água/aglomerante (a/ag), considerando aspectos cinéticos e termodinâmicos do fenômeno corrosivo.

Para tanto, desenvolveu-se uma pesquisa experimental que contemplou as seguintes variáveis: a presença de adições minerais em substituição parcial à massa de cimento (10% de sílica ativa; 25% de cinza volante; 10%, 20% e 30% de metacaulim) e a relação água/aglomerante (0,40 e 0,55). Foram moldados corpos-de-prova cúbicos, além de corpos-de-prova cilíndricos para caracterização dos concretos quanto à resistência à compressão, massa específica, índice de vazios e absorção de água por capilaridade. Após 645 dias de moldagem, os corpos-de-prova cúbicos de concreto foram submetidos ao ataque por cloretos durante 308 dias, totalizando 44 ciclos semanais de imersão em solução agressiva e posterior secagem em ambiente de laboratório. Foram monitorados, ao longo deste período, a resistividade elétrica desses concretos, os potenciais de corrosão, a resistência de polarização e a impedância eletroquímica. Ao fim do experimento, inspeções visuais à armadura permitiram observar o seu aspecto superficial após o período de ataque.

Como resultado geral, obteve-se que a incorporação de adições minerais aos concretos promoveu ganhos significativos em todas as propriedades avaliadas, evidenciando o efeito benéfico dessas adições em concretos submetidos às condições agressivas, sobretudo contendo íons cloreto. Nesse sentido, a análise estatística evidenciou que os concretos com sílica ativa e com metacaulim obtiveram os melhores resultados de resistividade elétrica. Quanto aos potenciais de corrosão, os concretos de referência (sem adições minerais) apresentaram desempenho inferior, com a indicação da despassivação das armaduras e a queda acentuada nos valores de resistência de polarização com o tempo, comprovando a susceptibilidade desses sistemas à ação de cloretos. Os concretos com adições minerais não apresentaram despassivação das armaduras, denotando que esses sistemas possuem maior durabilidade e vida útil em comparação àqueles referentes aos concretos sem adição mineral, tendo em vista o ataque por cloretos.

**OLIVEIRA, A.M. Avaliação do desempenho de concretos contendo adições minerais quanto à corrosão das armaduras induzida por cloretos.** Goiânia, 2007. 280p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, 2007. Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Cascudo.

Palavras-chave: concreto, adições minerais, sílica ativa, metacaulim, armadura, corrosão, cloretos, técnicas eletroquímicas.

## Abstract

The present work aims to study the performance of concrete with regard to the action of chloride ions, evaluating the influence of both mineral additions and water/binder ratio (w/b), considering kinetic and thermodynamic aspects of the corrosive phenomenon.

A experimental research was carried out considering the following variables: the presence of mineral additions in partial substitution to the cement weight (10% of silica fume; 25% of fly ash; 10%, 20% and 30% of metakaolin) and the water/binder ratio (0,40 and 0,55). Thus, cubic concrete test specimens were produced, in addition to cylindrical test specimens for concrete characterization in relation to the compressive strength, specific mass, void ratio and capillary water absorption. After 645 days of casting, the cubic concrete test specimens were submitted to the chlorides attack during 308 days, totality 44 weekly cycles of immersion in chlorides aggressive solution. They were monitored, throughout this period, by means of techniques, such as: the concrete electric resistivity, the half-cell potential, the polarization resistance and the electrochemical impedance spectroscopy. At the end of the experiment, visual inspections of reinforcing steels allowed to observe their superficial aspects after attack.

As general result, it was gotten that the incorporation of mineral additions to the concretes promoted significant profits in all the evaluated properties, evidencing the beneficial effect of these additions in concretes exposed to aggressive conditions, specially in those in which there are chloride ions. In this direction, the statistical analysis has shown evidences that concretes with silica fume and metakaolin achieved the best results of electrical resistivity. In relation to the half-cell potentials, the reference concrete (without mineral additions) presented the worst performance, with an indication of depassivation in the reinforcing steels accentuated fall in the values of resistance of polarization with the time, proving the susceptibility of these systems to the action of chlorides. The concrete with mineral additions did not present depassivation of the reinforcing steels meaning that these systems possess great durability and service life in relation to those without mineral additions.

**OLIVEIRA, A.M. Performance evaluation of concretes content with mineral additions in relation to the reinforcing steels corrosion induced by chlorides.** Goiânia, 2007. 280 p. Dissertation (M.Sc.Degree ) – School of Civil Engineering, University Federal of Goiás, 2007. Supervision: Dr. Oswaldo Cascudo.

**Keywords:** concrete, mineral additions, silica fume, metakaolin, reinforcing steel, corrosion, chlorides, electrochemical techniques.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

O tema da presente pesquisa contextualiza-se na linha de materiais e componentes de construção civil, especificamente detendo-se na durabilidade do concreto armado, avaliando o desempenho de concretos no que tange à corrosão de armaduras.

A pesquisa como um todo corresponde à segunda parte de um projeto integrado que envolveu algumas instituições de ensino e pesquisa, a saber: Universidade Federal de Goiás, instituição proponente desta pesquisa; Furnas Centrais Elétricas e o *Institut National de Sciences Appliquées* – INSA, especificamente o *Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions* (em Toulouse - França). Como resultados da primeira etapa dessa pesquisa foram produzidas quatro dissertações de mestrado, as quais estudaram a influência das condições de moldagem na camada de cobrimento do concreto (BRAUN, 2003), a influência das condições de cura nas características do cobrimento do concreto (PAULA COUTO, 2003), a influência das adições minerais e seu efeito na corrosão de armaduras induzida por cloretos (FERREIRA, 2003) e a influência das adições minerais na carbonatação do concreto (CASTRO, 2003). A presente pesquisa contempla contribuições na linha específica do desempenho de concretos frente à corrosão da armadura, avaliando, dentre outros, parâmetros eletroquímicos do fenômeno corrosivo em sistemas contendo adições minerais.

## **1.1 JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DO TEMA**

Há uma preocupação constante no meio técnico-científico com a durabilidade do concreto armado e sua interação com o meio no qual a estrutura está inserida. Dentro deste contexto, a deterioração do concreto armado devido à corrosão das armaduras é um dos mais importantes problemas de durabilidade na indústria da construção.

A corrosão das armaduras é uma das manifestações patológicas de maior gravidade nas obras civis no cenário mundial, sendo sua importância justificada pelo comprometimento da segurança estrutural que o fenômeno envolve em estágios avançados, pelos altos custos de recuperação e perdas, além da incidência/reincidência do fenômeno que é relativamente alta (CASCUDO, 2000). A incidência da corrosão das armaduras pode ser atribuída à inobservância de características de durabilidade do concreto, como, por exemplo, a espessura e a qualidade da camada de cobrimento compatíveis ao meio no qual a peça estrutural está inserida.

Em nível macro, o fenômeno de corrosão das armaduras implica sérios efeitos de ordem estrutural, tais como: perda de seção das barras de aço e fissuração do concreto, prejuízos da aderência barra/concreto, flechas e deformações excessivas da estrutura, destacamento do concreto de cobrimento e, por fim, em estágios avançados, riscos de colapso parcial ou total da estrutura.

O problema de corrosão das armaduras em estruturas de concreto tem tido muita frequência no Brasil, inclusive acarretando perdas humanas, como os acidentes de desabamentos de marquises ocorridos em Porto Alegre (publicados em manchete no jornal “O Estado de São Paulo” de 7 de outubro de 1988) (HELENE, 1993) e a ruína da marquise do Hotel Canadá no Rio de Janeiro, em fevereiro de 2007, em que a causa do colapso, segundo o Instituto de Criminalística Carlos Éboli – ICCE e o Conselho Regional de Arquitetura,

Engenharia e Agronomia - CREA-RJ, foi atribuída, dentre outras razões, à corrosão das armaduras. Este último fato referido provocou, de acordo com o Corpo de Bombeiros, a morte de duas vítimas, além de nove pessoas feridas. A Defesa Civil do Rio de Janeiro relatou que, de 900 marquises vistoriadas no estado nos meses de janeiro e fevereiro de 2007, 270, isto é, 30% do total, apresentaram-se comprometidas, com problemas de infiltrações, umidade, fissuras e corrosão nas armaduras (Jornal A FOLHA, 2007a).

Outros transtornos à população também podem ser reportados, como as obras de recuperação dos pilares, afetados pela corrosão, na saída do Túnel Joá no Rio de Janeiro, em que o tráfego era interditado diariamente entre 23 h e 5 h (JORNAL DO BRASIL, 2001), além da queda da adutora principal da SABESP (publicado em manchete no “Jornal da Tarde” de 22 de junho de 1988) sobre o rio Pinheiros, na ponte do Socorro em São Paulo, que deixou perto de 3 milhões de paulistanos sem água potável durante cerca de 15 dias (HELENE, 1993). O colapso parcial da estrutura da Ponte dos Remédios em São Paulo, ocorrido em 3 de junho de 1997, decorrente da corrosão de cabos de protensão (HELENE, 1997) e a ruína do Edifício Areia Branca, ocorrido em 14 de outubro de 2004, em Recife (PE), que provocou a morte de quatro pessoas (Jornal A FOLHA, 2007b), são casos gravíssimos de manifestação de corrosão das armaduras (muito embora a queda do Edifício Areia Branca não tenha tido seu diagnóstico atribuído exclusivamente à corrosão, sabia-se de sua ocorrência em partes da estrutura de concreto).

Assim, a corrosão das armaduras no concreto implica danos financeiros, em razão dos altos custos de recuperação, perdas e reparos em estruturas, e danos sociais inestimáveis, em virtude das vítimas fatais dos acidentes.

Com relação aos custos da corrosão, cabe ressaltar um levantamento realizado no Brasil pela Associação Brasileira de Corrosão – ABRACO (1996 *apud* MANSUR, 1996) – em artigo publicado no dia 24 de novembro de 1996 no Jornal do Brasil, o qual revelava que o

país tinha, na época, um prejuízo anual de 9 bilhões de dólares com todos os tipos de corrosão, ou seja, com corrosão em todos os segmentos do setor produtivo, sendo que, deste total, 20% são estimados como sendo danos da corrosão nas obras civis.

Em âmbito internacional, Page *et al.* (1996) relataram que, no Reino Unido, eram gastos, anualmente, 750 bilhões de dólares para a realização de reparos em estruturas de concreto, provenientes de danos causados pela corrosão das armaduras. Callister Jr. (2002) estima, de uma forma geral, que cerca de 5% da receita de uma nação industrializada, são gastos na prevenção, na manutenção ou ainda na substituição de produtos perdidos ou contaminados, como resultado das reações de corrosão.

Dentro desse contexto, especial atenção deve ser dada à agressividade do macro e microclima do local onde será realizada a obra. A atmosfera marinha consiste em um dos ambientes de maior agressividade para o concreto armado, principalmente em virtude da ação da maresia ou da névoa salina, rica em íons cloreto. Estes íons, os cloretos, são capazes de despassivar a armadura embutida ao concreto e desencadear o processo de corrosão das armaduras (CARASEK; CASCUDO, 2001).

A corrosão induzida por cloretos é considerada perigosa, pois, neste caso, formam-se pites que reduzem a seção transversal da barra, reduzindo com isso sua capacidade portante e diminuindo significativamente a vida útil das estruturas. Têm-se, portanto, conseqüências negativas para a estabilidade, funcionalidade e estética das estruturas (CARASEK; CASCUDO, 2001).

Nesse cenário de corrosão e de deterioração das estruturas, abre-se, dentro do conceito de desenvolvimento sustentável, a perspectiva de combate à corrosão das armaduras mediante o emprego, no concreto, de resíduos potencialmente poluentes no meio ambiente, dando assim uma abordagem ecológica relevante à questão. Na tecnologia do concreto, sabe-se do efeito benéfico que as adições minerais promovem no sentido de refinar poros e

diminuir a sua interconexão na pasta de cimento, reduzindo com isso a permeabilidade e a entrada de agentes agressivos ao concreto (CARASEK; CASCUDO, 2001; BASHEER *et al.* 2002).

Assim sendo, são plenamente justificáveis os estudos que remetem ao desenvolvimento e ao aprimoramento dos materiais empregados em estruturas de concreto armado, com a finalidade de melhorar o desempenho e a durabilidade da edificação, especialmente em se tratando de um problema patológico tão grave e importante como a corrosão das armaduras em estruturas de concreto (CAMÕES *et al.*, 2002).

## 1.2 OBJETIVOS

Constitui objetivo geral da presente dissertação avaliar, ao nível da ciência dos materiais, o desempenho de concretos produzidos com adições minerais no tocante à corrosão da armadura sob à ação indutiva dos íons cloreto.

São objetivos específicos:

- avaliar, para concretos com 3 tipos de adições minerais e 2 relações água/aglomerante, o desempenho no tocante à resistividade elétrica de concretos sujeitos ao ataque por cloretos (ao longo do tempo);
- avaliar, no contexto termodinâmico do processo corrosivo, os potenciais de corrosão com o tempo de ataque por cloretos, para vários concretos com adições minerais, inferindo, entre outros, sobre questões como despassivação e período de iniciação da corrosão;
- avaliar, no contexto da cinética do processo corrosivo, parâmetros cinéticos obtidos de técnicas eletroquímicas, tais como: resistência de polarização e taxa de corrosão, além de dados da impedância na interface em corrosão, a partir de concretos com adições minerais sob à ação de cloretos;

- avaliar a capacidade de proteção de concretos, considerando três teores de metacaulim e duas relações água/aglomerante, tendo-se como parâmetro a resistividade elétrica, o potencial de corrosão, a resistência de polarização e a impedância eletroquímica.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente dissertação de mestrado encontra-se estruturada em seis capítulos, além dos anexos e referências bibliográficas. A seguir é apresentada uma breve descrição no que tange o conteúdo de cada capítulo.

No Capítulo 2, intitulado “Corrosão das Armaduras no Concreto”, são apresentados, com base na literatura, conceitos básicos à respeito da corrosão, aspectos cinéticos e termodinâmicos das reações eletroquímicas, considerações sobre o fenômeno de despassivação das armaduras e início da corrosão por ação de íons cloreto. São apresentadas também as graves implicações da corrosão às estruturas de concreto armado e, por fim, o efeito das adições minerais na capacidade de proteção das armaduras no concreto contra a corrosão.

No capítulo seguinte, Capítulo 3, também de revisão bibliográfica, são tecidas considerações sobre algumas técnicas de avaliação da corrosão no concreto armado.

O Capítulo 4 apresenta o programa experimental, onde estão descritas as variáveis, os materiais e os métodos empregados, os concretos e os corpos-de-prova adotados nesta pesquisa, visando atingir os objetivos propostos.

No capítulo 5, estão apresentados e discutidos os resultados obtidos no programa experimental. Inicialmente são abordados os resultados relativos à resistividade elétrica. Em seguida, é apresentado o desempenho dos concretos quanto às técnicas eletroquímicas. São mostrados e discutidos os resultados do monitoramento da indução da corrosão ao longo do

tempo. Por fim, apresenta-se uma análise visual da superfície das barras após o período de ataque, além da análise global dos resultados.

No sexto capítulo, são apresentadas as conclusões e as considerações a que se chegou ao fim da pesquisa, bem como sugestão de temas para futuras pesquisas.

# CAPÍTULO 2

## CORROSÃO DAS ARMADURAS NO CONCRETO

Este capítulo propõe uma breve revisão sobre os aspectos mais importantes da corrosão eletroquímica, uma vez que, é o tipo de fenômeno que ocorre na armadura no interior do concreto.

Este capítulo divide-se em quatro pontos principais, a saber: considerações termodinâmicas e cinéticas do fenômeno corrosivo, corrosão eletroquímica no concreto abordando-se aspectos do estado de passivação e de despassivação das armaduras, os efeitos da corrosão sobre as estruturas de concreto armado e, por fim, os efeitos das adições minerais na corrosão das armaduras no concreto.

## 2.1 ASPECTOS FUNDAMENTAIS DA CORROSÃO ELETROQUÍMICA

A corrosão das armaduras no concreto é um fenômeno de interação entre o material e o meio ambiente, como resultado de reações deletérias de natureza química ou eletroquímica, associadas ou não a ações físicas ou mecânicas de degradação (HELENE, 1993).

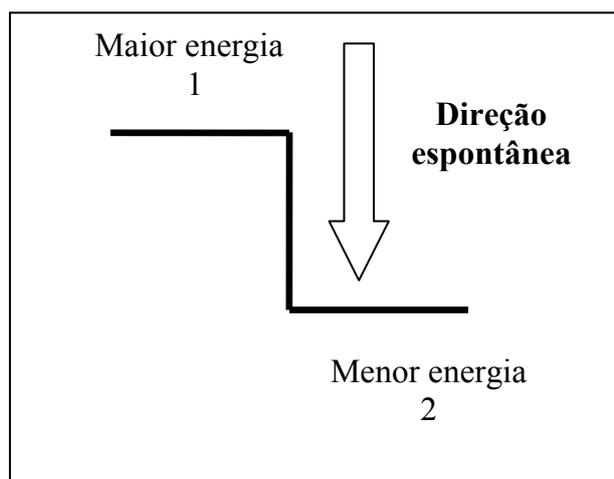
As reações de oxidação-redução eletroquímicas são as que envolvem a transferência de elétrons existindo espécies que perdem elétrons (oxidação), denominadas de agente redutor e espécies que ganham elétrons (redução), nomeadas de agente oxidante. As regiões onde ocorrem as reações de oxidação e redução, por convenção, designaram-se ânodo e cátodo, respectivamente.

Assim, as duas reações ocorrem, simultaneamente, devido à passagem, através do metal, de corrente elétrica da região em que ocorre a dissolução do metal (região anódica) para a região em que ocorre a redução do oxigênio (região catódica) (WOLYNEC, 2003).

### 2.1.1 Aspectos Termodinâmicos das Reações Eletroquímicas

A termodinâmica é por definição a ciência que estuda as transformações de energia associadas à ocorrência de eventos, tratando a respeito da possibilidade ou não da existência de fenômenos corrosivos (CASCUDO, 2000).

A natureza tende ao estado de menor energia, conforme mostra a Figura 2.1 e, conhecendo-se a energia do sistema antes e após a ocorrência de determinado evento, é possível verificar se a ocorrência será ou não espontânea. Desta forma, se a energia inicial for maior que a energia final, a reação será espontânea, caso contrário, ocorrerá somente com fornecimento de energia (PANOSSIAN, 1993).



**Figura 2.1 - Representação simplificada do sentido de espontaneidade das reações (PANOSSIAN, 1993).**

Dentro do aspecto termodinâmico proposto, serão tecidas algumas considerações sobre a espontaneidade das reações, tais como: eletrodo, dupla camada elétrica, potenciais de eletrodo, potenciais de equilíbrio e equação de Nernst.

### 2.1.1.1 Espontaneidade das Reações

Sabe-se que os processos espontâneos ocorrem no sentido da menor entalpia e no sentido da maior entropia, isto é, na natureza há uma evolução espontânea dos fenômenos para um estado energético de menor entalpia (energia) e no sentido da maior desordem, maior entropia (CASCUDO, 2000).

Uma reação é espontânea, segundo a termodinâmica, quando a variação de energia livre  $\Delta G$  é negativa, considerando condições de pressão e temperatura constantes. Sendo  $\Delta G$  calculado por meio da diferença de energia livre dos produtos e a energia livre dos reagentes (PANOSSIAN, 1993).

A equação 2.1 expressa a variação de energia de uma reação eletroquímica (PANOSSIAN, 1993; CASCUDO, 2000).

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad (2.1)$$

Onde:

$\Delta G$  é a variação de energia livre química de uma dada reação;

$\Delta H$  é a variação de entalpia;

T é a temperatura em graus Kelvin;

$\Delta S$  é a variação de entropia.

Para a reação química da Equação 2.2, a variação de energia livre também pode ser dada pela Equação 2.3 ou pela Equação 2.4.



$$\Delta G = c \Delta G_f (C) + d \Delta G_f (D) - a \Delta G_f (A) + b \Delta G_f (B) \quad (2.3)$$

$$\Delta G = \sum x_i \Delta G_{fi} (\text{produtos}) - \sum y_i \Delta G_{fi} (\text{reagentes}) \quad (2.4)$$

Onde:

$\Delta G$  é a variação da energia livre da reação;

$\Delta G_f$  é a energia livre de formação ou dos produtos ou dos reagentes;

$x_i$  é o número estequiométrico dos produtos;

$y_i$  é o número estequiométrico dos reagentes.

Faz-se a ressalva de que, normalmente, as energias livres de formação dos compostos  $\Delta G$  não são calculadas conforme a Equação 2.4. Essas energias livres são tabeladas em seus estados padrões, com a denominação de energia livre padrão de formação  $\Delta G^\circ_f$ , que é, por definição, a variação de energia livre envolvida quando um mol de um composto em seu estado padrão se forma, a partir de seus elementos nos seus estados padrões, sendo que, a energia livre padrão de formação de todos os elementos é zero. O estado padrão de um composto é a sua forma estável, considerando-se as condições fixas de pressão (1 atm) e temperatura (298,15 K) (PANOSSIAN, 1993).

Estimando-se que os reagentes e os produtos das equações não se encontram em seus estados padrões,  $\Delta G$  será calculado pela Equação 2.5, em que se relaciona a variação de energia livre com a constante de equilíbrio da reação (PANOSSIAN, 1993).

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln K \quad (2.5)$$

Onde:

$\Delta G$  é a variação de energia livre química de uma dada reação;

T é a temperatura absoluta em graus Kelvin;

K é a constante de equilíbrio da reação;

$\Delta G^\circ$  energia livre padrão de formação dos compostos;

R é a constante universal dos gases.

Nas reações eletroquímicas, em que há redistribuição ou transferência de cargas elétricas, há a necessidade de adicionar um termo a Equação 2.5 que considere a variação de cargas elétricas. Assim, surge a variação de energia livre eletroquímica ( $\Delta \check{G}$ ), determinada pela Equação 2.6 (CASCUDO, 2000; WOLYNEC, 2003).

$$\Delta\check{G} = \Delta G + q.\Delta\Phi \quad (2.6)$$

Onde:

$\Delta\check{G}$  é a variação de energia livre eletroquímica;

$\Delta G$  é a variação de energia livre química;

$q.\Delta\Phi$  é o trabalho elétrico;

$q$  é a carga elétrica;

$\Delta\Phi$  é a diferença de potencial elétrico.

Desde modo, se para as reações eletroquímicas,  $\Delta\check{G}$  for negativo, a reação será espontânea no sentido dos reagentes para os produtos; se for nulo, estará em equilíbrio e, se for positivo, a reação não ocorrerá de forma espontânea no sentido mencionado.

### 2.1.1.2 Conceito de Eletrodo e Formação da Dupla Camada Elétrica

Eletrodo é definido quando ao imergir um metal numa solução aquosa, verifica-se uma situação de equilíbrio ou estado estacionário, caracterizada pela formação da dupla camada elétrica (WOLYNEC, 2003).

A dupla camada elétrica foi discutida por Panossian (1993) e por Wolyneec (2003) como sendo o arranjo ordenado de partículas carregadas e/ou dipolos orientados, existentes em qualquer interface material/meio aquoso.

Na Figura 2.2 apresenta-se a estrutura mais aceita da dupla camada elétrica (WEST, 1987 *apud* WOLYNEC, 2003), em que se percebe a presença da dupla camada de Helmholtz, a qual se assemelha a um condensador elétrico, e de uma camada difusa, denominada de camada de Gouy-Chapman, no qual os íons se espalham por uma distância de aproximadamente 1 micron (1  $\mu\text{m}$ ). O plano P, saturado com íons metálicos, é chamado de

plano de Helmholtz externo, enquanto o plano Q constitui a região em que os íons não solvatados (sem a bainha de solvatação<sup>2.1</sup>) ou parcialmente solvatados podem ser especialmente adsorvidos formando o plano de Helmholtz interno. A estrutura interna da dupla camada elétrica depende de vários fatores, a saber: grau de agitação da solução, quais íons estão presentes e em que quantidade, dentre outros fatores (WOLYNEC, 2003).

O metal que forma uma dupla camada elétrica é chamado de eletrodo.

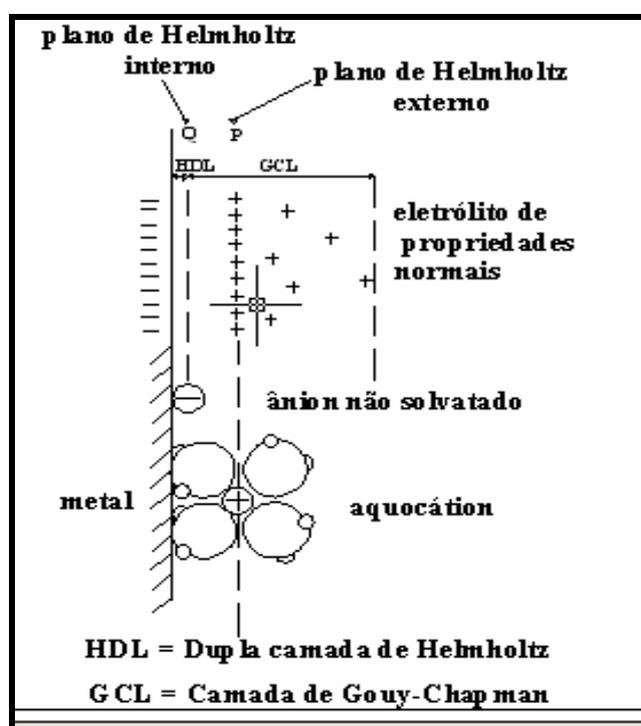


Figura 2.2 – Estrutura da dupla camada elétrica (WEST, 1987 *apud* WOLYNEC, 2003).

### 2.1.1.3 Potencial de Eletrodo e Potencial de Equilíbrio

A dupla camada elétrica apresenta na interface metal/solução uma distribuição de cargas elétricas tal que uma diferença de potencial (ddp) se forma entre o metal e a solução. Essa ddp estabelecida é conceitualmente tida como potencial de eletrodo. Sua magnitude

<sup>2.1</sup> Solvatação: fenômeno de fixação de uma molécula de solvente por um íon ou por uma partícula em solução.

depende do sistema em consideração, desse modo, das características de um dado metal imerso em determinado eletrólito (WOLYNEC, 2003).

O potencial de eletrodo pode ser definido como uma diferença de potencial entre o metal e o eletrólito (solução), por meio da dupla camada elétrica (PAGE, 1988 *apud* CASCUDO, 2000). Contudo, na prática, é inviável a medida direta da ddp entre um metal e uma solução qualquer, assim, faz-se necessário medir uma diferença de potencial relativa a um dado sistema com relação a um eletrodo de referência (CASCUDO, 2000; WOLYNEC, 2003).

Por convenção, o eletrodo de hidrogênio foi tomado como eletrodo de referência padrão, no qual o potencial é tido como “zero” e com relação a ele, todas as medidas de potencial seriam referidas, porém, não necessariamente medidas. No entanto, não é comum, devido à sua complexidade, utilizar o eletrodo padrão de hidrogênio. Utilizam-se, eletrodos de referência secundários, tais como: eletrodo de calomelano saturado, eletrodo de prata-cloreto de prata e ainda eletrodo de cobre-sulfato de cobre. Esses eletrodos secundários são tratados mais minuciosamente no Capítulo 3.

Admite-se que qualquer eletrodo, cuja medida tenha sido efetuada em relação a um eletrodo de referência, seja designado como potencial de eletrodo. Sendo comum, a indicação (entre parênteses) de qual eletrodo de referência foi tomado para execução da medida.

O potencial de equilíbrio ou reversível ( $E_e$ ) é o potencial que se estabelece em decorrência do equilíbrio entre duas tendências, a dos átomos metálicos de deixarem o metal e passarem à solução, ionizando-se e hidratando-se e, a dos cátions de depositarem-se sobre o metal. O potencial de equilíbrio é um potencial de eletrodo que apresenta uma situação estacionária, no qual não há corrosão (CASCUDO, 2000).

Ressalta-se que são poucos os eletrodos capazes de estarem em equilíbrio. Todavia, esta designação é estendida a qualquer reação eletroquímica como sendo, o potencial que o eletrodo assumiria se apenas essa reação fosse responsável pela formação da dupla camada elétrica. Evidencia-se também que, para as condições de eletrodo em equilíbrio, a variação de energia livre eletroquímica da reação será nula (WOLYNEC, 2003).

As estimativas das taxas de corrosão associam-se a desvios do potencial de equilíbrio (polarizações). Para condições de equilíbrio, pode-se considerar que a intensidade de corrente do processo anódico é igual à intensidade de corrente do processo catódico, porém em sentido contrário, como destacado por Bauer (1995).

Panossian (1993) destaca que as reações que ocorrem na interface metal/eletrolito em que, as espécies químicas envolvidas na reação de redução são parciais ou totalmente diferentes das espécies envolvidas na reação de oxidação, concebem para o potencial de eletrodo, a denominação de potencial misto e, especialmente, no caso de uma das reações ser a de oxidação do metal, será designado potencial de corrosão.

#### **2.1.1.4 Equilíbrio e Equação de Nernst**

Desta forma, quando um eletrodo metálico está em equilíbrio, configura-se na interface metal/eletrolito, a dupla camada elétrica, por meio da qual a reação da Equação 2.7 decorre tanto no sentido de oxidação como de redução com velocidades iguais (WOLYNEC, 2003), sem que haja, no entanto, variação de concentração dos íons metálicos no eletrólito, isto é, a concentração dos chamados aquo-íons<sup>2.2</sup> mantém-se constante no equilíbrio (PANOSSIAN, 1993).

---

<sup>2.2</sup> Aquo-íons: são íons acompanhados de moléculas polares de água. No caso específico do ferro, os íons metálicos oriundos de sua dissolução, no eletrólito, constituem aquo-íons (CASCUDO, 2000).



Onde:

Me é o metal;

z é o número de elétrons envolvidos na reação;

e são os elétrons.

Para a situação de equilíbrio, as velocidades de oxidação (dissolução anódica) e de redução (deposição catódica) são iguais entre si. Por meio da lei de Faraday<sup>2,3</sup>, estas velocidades podem ser estimadas em termos de densidade de corrente elétrica (em Ampères) por unidade de área do eletrodo, nomeadas respectivamente por  $i_a$  e  $i_c$ . Como em situação de equilíbrio,  $i_a$  é igual a  $i_c$ , uma nova grandeza é utilizada para designar de forma genérica a velocidade de uma reação eletroquímica em seu estado de equilíbrio: a densidade de corrente de troca  $i_o$ . Desse modo, para cada reação eletroquímica em estado estacionário ou equilíbrio, há uma densidade de corrente de troca equivalente à velocidade de dissolução anódica ou de deposição catódica, ambas equivalentes entre si, conforme Equação 2.8 (FERNANDEZ, 1984; FELIU, 1988 *apud* CASCUDO, 2000; WOLYNEC, 2003).

$$i_a = |i_c| = i_o \quad (2.8)$$

Nernst evidenciou que para a situação da Equação 2.8, o potencial é função da pureza do metal e da concentração do íon no meio aquoso, conforme Equação 2.9 (CASCUDO, 2000; WOLYNEC, 2003).

---

<sup>2,3</sup> A lei de Faraday estabelece que a passagem de 96493 Coulombs de carga elétrica provoca a dissolução ou deposição de 1 equivalente-grama de substância.

$$E_e = E_e^0 + (RT/zF) \cdot \ln ([aMe^{z+}]/[aMe]) \quad (2.9)$$

Onde:

$E_e$  é o potencial de equilíbrio em volts (V);

$E_e^0$  é o potencial de equilíbrio padrão em Volts (V);

R é a constante universal dos gases em [J/(K.mol)];

T é a temperatura absoluta em graus Kelvin (K);

z é o numero de elétrons envolvidos na reação;

F é a constante de Faraday em (C/mol);

$aMe^{z+}$  é a atividade do íon metálico na solução;

$aMe$  é a atividade do metal;

$[Me^{z+}]$  é a concentração do íon  $Me^{z+}$  na solução, em molaridade;

$[Me]$  é a concentração do metal.

Admitindo-se o valor de R na equação 2.9 como sendo igual a 8,314 J/(K.mol); o valor de F, como sendo igual a 96494 C e adotando-se a temperatura de 25°C o que corresponde a 298,2 K e, convertendo-se o logaritmo neperiano para logaritmo na base 10, tem-se que a equação de Nernst pode ser expressa, segundo Equação 2.10 (CASCUDO, 2000; WOLYNEC; 2003).

$$E_e = E_e^0 + (0,0592/z) \cdot \log [Me^{z+}] \quad (2.10)$$

A equação de Nernst permite a determinação de qualquer potencial de equilíbrio em condições não padronizadas, desde que sejam conhecidos os potenciais de eletrodo padrão ( $E_e^0$ ) (CASCUDO, 2000).

Gentil (1987) salienta que, o potencial real de um metal em uma dada solução, pode depender de vários fatores, a saber: magnitude das correntes para os possíveis equilíbrios, número de reações possíveis nos eletrodos, formação de película, formação de íons complexos, impurezas na solução, temperatura, dentre outros.

Os valores de potencial de equilíbrio padrão em relação ao hidrogênio, estimados a partir dos valores de variação de energia livre química, são tabelados e estabelecem a chamada série eletroquímica, apresentada por Gentil (1987), Panossian (1993), Shackelford (2000), Callister Jr. (2003), Wolyneć (2003) dentre outros autores.

No equilíbrio, o pressuposto fundamental é que a variação de energia livre eletroquímica ( $\Delta\check{G}$ ) de uma reação é nula e, por isso, não ocorre dissolução ou corrosão do metal (CASCUDO, 2000).

### **2.1.2 Aspectos Cinéticos das Reações Eletroquímicas**

A cinética é o conhecimento que se detém na análise do caminho de transição de um dado evento, informando inclusive sobre os mecanismos e a velocidade da transição desse evento (PANOSSIAN, 1993). A seguir, dentro do contexto cinético das reações eletroquímicas, são abordados aspectos de polarização de eletrodo.

#### **2.1.2.1 Polarização de Eletrodo**

Conforme apresentado anteriormente, em condições de equilíbrio constitui-se, por meio da dupla camada elétrica, um potencial de equilíbrio que caracteriza a reação que ocorre na interface metal/meio. No equilíbrio, a velocidade de reação de oxidação é igual a de redução, tendo denominação especial de densidade de corrente de troca (PANOSSIAN, 1993; CASCUDO, 2000; WOLYNEC, 2003).

No entanto, se por um processo qualquer esse potencial for alterado, tem-se que o eletrodo sofreu polarização. A medida dessa polarização é denominada de sobretensão ou sobrepotencial ( $\eta$ ), de forma que, se o potencial da polarização for “E” e o potencial de equilíbrio for “Ee”, obtém-se a Equação 2.11 (PANOSSIAN, 1993; CASCUDO, 2000; WOLYNEC, 2003).

$$\eta = E - E_e \quad (2.11)$$

Para  $\eta$  positivo, denomina-se polarização anódica ( $\eta_a$ ) e para  $\eta$  negativo, tem-se polarização catódica ( $\eta_c$ ). Na Figura 2.3, são indicados os dois tipos de polarização, uma representação do eixo dos potenciais de eletrodo E.

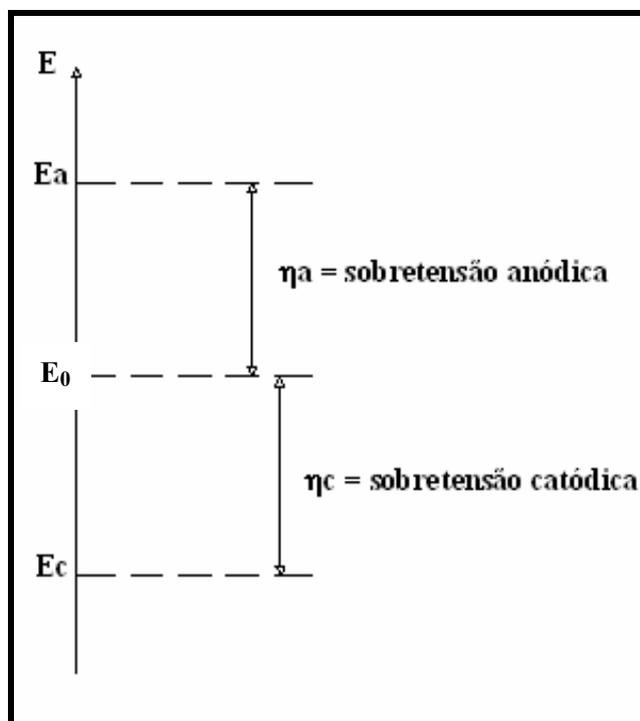


Figura 2.3 – Polarização anódica e catódica de um eletrodo (WOLYNEC, 2003).

Quando um metal apresenta corrosão eletroquímica, ele assume um potencial em que a taxa de oxidação é exatamente igual à taxa de redução, ou seja, todos os elétrons liberados nas reações anódicas são consumidos nas reações catódicas, caracterizando-se assim a pilha ou célula eletroquímica de corrosão. Na prática, este potencial é conhecido como potencial de corrosão ( $E_{\text{corr}}$ ) ou potencial de circuito aberto (CASCUDO, 2000).

Desse modo, pode-se verificar a polarização, considerando que o potencial inicial é o potencial de corrosão (GENTIL, 1987) e que, com relação a ele, são aplicados os potenciais externos e se faz uso de algumas técnicas eletroquímicas para estudo e avaliação do fenômeno corrosivo, podendo-se destacar alguns trabalhos na literatura, como Helene (1993), Bauer (1995), Selmo (1997), Cascudo (2000), dentre outros. Assim, a Equação 2.11 assume a configuração da Equação 2.12.

$$\eta = E - E_{\text{corr}} \quad (2.12)$$

O diagrama de Evans representa graficamente a ligação entre corrente (em  $\log I$ ) e o potencial, conforme se pode observar na Figura 2.4. A partir dos potenciais de equilíbrio dos eletrodos que irão atuar como ânodo e cátodo ( $E_a$  e  $E_c$ ) e estabelecendo a conexão elétrica entre essas duas semicélulas em equilíbrio, ocorrerão então, as respectivas polarizações anódica e catódica ( $\eta_a$  e  $\eta_c$ ) e os potenciais e as correntes nas duas semicélulas evoluem até se estabilizarem, configurando-se assim, um sistema de corrosão em seu estado estacionário. Obtém-se, então, o potencial e a corrente de corrosão do sistema ( $E_{\text{corr}}$  e  $I_{\text{corr}}$ ), observados no diagrama de Evans exatamente onde há a interseção das duas curvas (ROSENBERG *et al.*, 1989 *apud* CASCUDO, 2000).

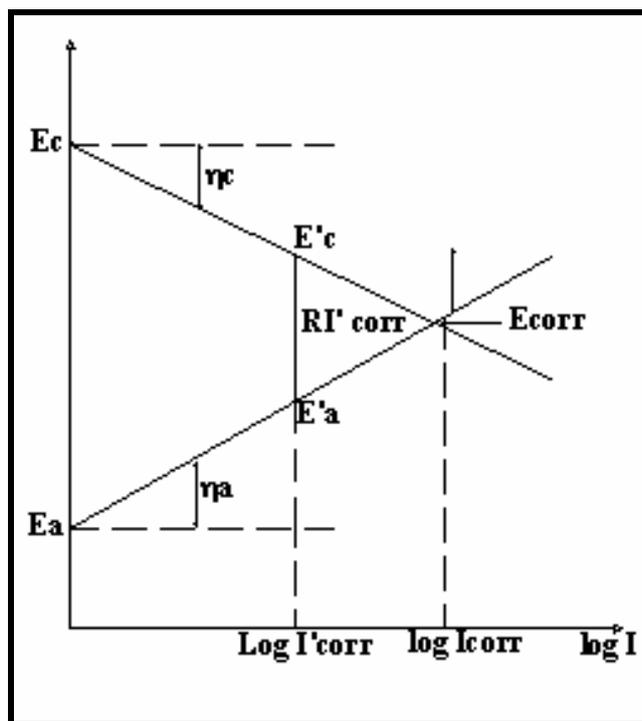


Figura 2.4 – Diagrama de Evans.

Na Figura 2.4, o Diagrama de Evans apresenta a variação de potencial em função do log da corrente, a partir dos potenciais de equilíbrio das reações catódicas (E<sub>c</sub>) e anódica (E<sub>a</sub>), destacando o potencial e a corrente de corrosão do sistema (E<sub>corr</sub> e Log I). Rosenberg *et al.* (1989) *apud* Cascudo, 2000) ressaltam que o produto RI'<sub>corr</sub> representa uma queda de potencial em consequência da resistência R do meio, de forma que, a corrente de corrosão para estas condições é igual a Log I'<sub>corr</sub>.

Deste modo, com base na Figura 2.4 e na Equação 2.12, as polarizações anódica e catódica, ocorridas inicialmente em equilíbrio, podem ser reescritas conforme as Equações 2.13 e 2.14, respectivamente.

$$\eta = E_{\text{corr}} - E_a \quad (2.13)$$

$$\eta = E_{\text{corr}} - E_c \quad (2.14)$$

Cascudo (2000) salienta que quando as reações anódicas forem expressivamente mais lentas do que as catódicas, haverá então um controle anódico do processo eletroquímico, isto porque a velocidade do processo macro será regida pelas reações de oxidação (reações anódicas). Do mesmo modo, quando as reações catódicas (de redução) forem mais lentas, o sistema será controlado catodicamente. As Figuras 2.5 e 2.6 elucidam os tipos de controle mencionados.

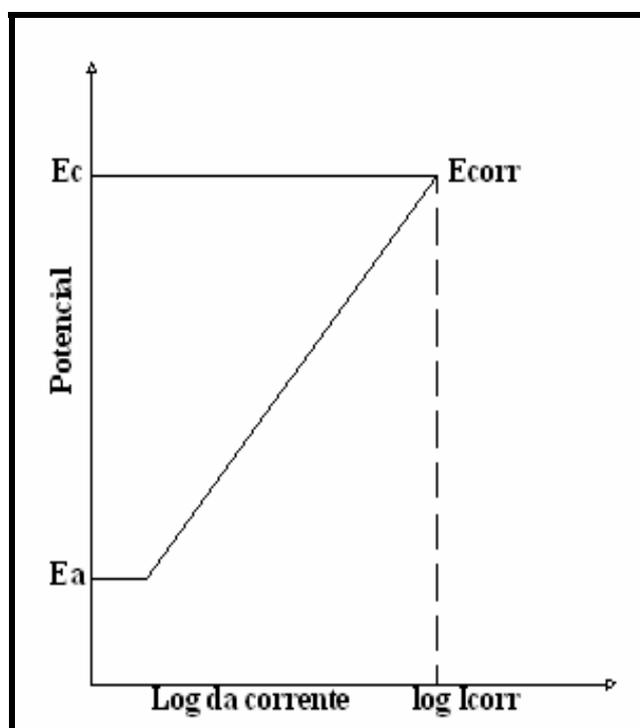


Figura 2.5 – Potencial em função da corrente, elucidando o controle anódico da corrosão (ROSENBERG *et al.*, 1989 *apud* CASCUDO, 2000).

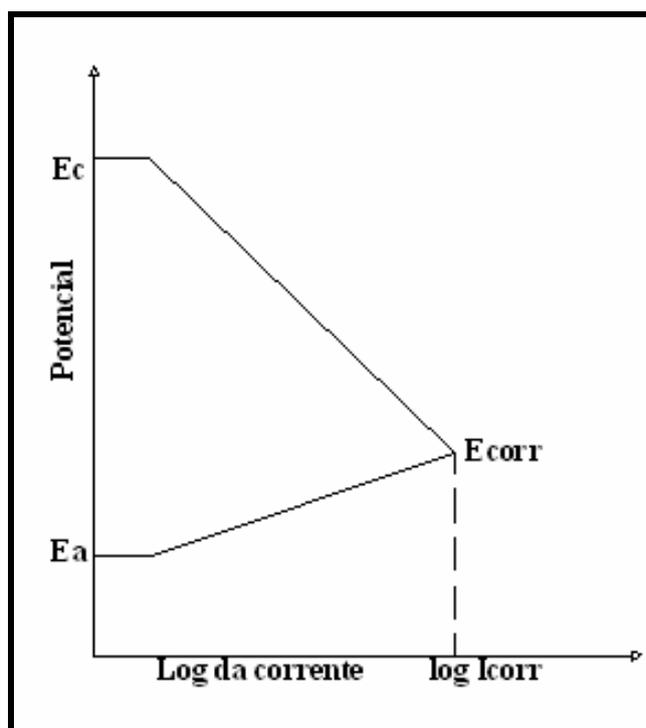


Figura 2.6 – Potencial em função da corrente, elucidando o controle catódico da corrosão (ROSENBERG *et al.*, 1989 *apud* CASCUDO, 2000).

Na Figura 2.6, ao contrário da Figura 2.5, o processo catódico é mais lento e registra-se uma polarização catódica mais elevada do que a anódica (ROSENBERG *et al.*, 1989 *apud* CASCUDO, 2000).

Basicamente, a polarização pode dar-se de três formas, a conhecer: polarização por ativação ( $\eta_a$ ), polarização por concentração ( $\eta_c$ ) e polarização de resistência ( $\eta_r$ ) (GENTIL, 1987; BAUER, 1995; CASCUDO, 2000). A seguir são comentadas cada uma das polarizações citadas.

#### a) Polarização por Ativação ( $\eta_a$ ), Equação de Butler-Volmer e Equação de Tafel

A polarização por ativação está relacionada à energia de ativação dos processos anódicos e catódicos, associada à maior ou à menor facilidade para ocorrência da reação anódica (passagem do metal a sua forma iônica) e ocorrência do processo catódico

(geralmente redução do H<sub>2</sub> ou O<sub>2</sub>). Deste modo, é o resultado imediato da barreira de energia na interface do eletrodo e está associada com a etapa lenta de transferência de carga química (CASCUDO, 2000; CALLISTER JR, 2002). Quando o sistema em corrosão apresentar essencialmente polarização por ativação, diz-se que ele é controlado por ativação.

Na verdade, quando um eletrodo é polarizado, a densidade de corrente resultante desse processo de polarização é dependente da sobretensão existente para o sistema. Logo, para o caso específico da polarização por ativação, a associação da sobretensão aplicada  $\eta$  ( $\eta_a$  ou  $\eta_c$ ) com a densidade de corrente resultante  $i$  ( $i_a$  ou  $i_c$ ), obtida de um processo de polarização anódico ou catódico, decorre na equação geral de Butler-Volmer (Equação 2.15) ou ainda equação geral da cinética de eletrodo.

$$i = i_0 \left\{ \exp \left( \frac{\alpha \eta z F}{RT} \right) - \exp \left[ - \left( 1 - \alpha \right) \frac{\eta z F}{RT} \right] \right\} \quad (2.15)$$

O fator  $\alpha$ , chamado coeficiente de transferência ou de simetria, é a relação entre a distância da interface metal/eletrólito até o topo da barreira energética e a espessura de toda a dupla camada, sendo a distância entre o plano externo de Helmholtz externo e o metal. Assim, o valor de  $\alpha$  varia de 0 a 1 e, nos casos em que a barreira é simétrica, é igual a 0,5; correspondendo à metade da distância por meio da dupla camada elétrica (PANOSSIAN, 1993; CASCUDO, 2000; WOLYNEC, 2003).

A equação de Butler-Volmer ou equação geral da cinética de eletrodo é bastante complexa e não permite que  $\eta$  seja expresso em função de  $i$ , contudo, ela pode ser simplificada para valores de sobretensão, em valor absoluto, superiores a 0,03 V; cenário em que um dos termos exponenciais da equação se torna desprezível com relação a outro (WOLYNEC, 2003).

De fato, quando  $\eta_a$  é maior que 0,03 V; o segundo termo da equação 2.15 torna-se desprezível com relação ao primeiro termo (o valor exponencial cresce com  $\eta_a$ , enquanto que o da segunda decresce). Assim, a Equação 2.15 pode ser reduzidamente apresentada na Equação 2.16, 2.17 ou ainda 2.18 (WOLYNEC, 2003).

$$i = i_0 \exp (\alpha \eta_a z F / RT) \quad (2.16)$$

$$\eta_a = b_a \log (i_a / i_0) \quad (2.17)$$

$$b_a = 2,303 RT / \alpha z F \quad (2.18)$$

Do mesmo modo, quando  $\eta_c$  é menor que 0,03 V; o primeiro termo da equação 2.15 torna-se insignificante com relação ao segundo e a equação 2.15 pode ser sucintamente apresentada na Equação 2.19, 2.20 ou ainda 2.21 (WOLYNEC, 2003).

$$i = i_0 \exp - [(1- \alpha) z \eta_c F / RT] \quad (2.19)$$

$$\eta_c = b_c \log (|i_c| / i_0) \quad (2.20)$$

$$b_c = - (2,303 RT / (1-\alpha) z F) \quad (2.21)$$

As Equações 2.19 e 2.21 são formalmente semelhantes e por isso podem ser expressas de maneira única por meio da Equação 2.22.

$$\eta = b \log (|i| / i_0) \quad (2.22)$$

A equação 2.22 é a equação de Tafel e os coeficientes  $b_a$  e  $b_c$  das equações 2.18 e 2.21 são conhecidos como declives de Tafel anódico e catódico, respectivamente.

Outra forma de representar a Equação 2.22 é a Equação 2.23 (CASCUDO, 2000; WOLYNEC, 2003).

$$\eta = a + b \log i \quad (2.23)$$

Onde:

$\eta$  é a sobretensão anódica ou catódica;

$a$  é uma constante igual a  $(-b \log i_0)$ ;

$i_0$  é a densidade de corrente de troca;

$b$  é a constante de Tafel igual a:

$2,303 RT / (1-\alpha)zF$  para polarização anódica; e

$- 2,303 RT / (1-\alpha)zF$  para polarização catódica.

$I$  é a densidade de corrente anódica e catódica.

Panossian (1993) e Wolyneec (2003) destacam que a equação de Butler-Volmer e, em decorrência, a própria equação de Tafel adotam a premissa de que a velocidade de reação que ocorre na interface é determinada por uma barreira energética de ativação situada dentro da dupla camada elétrica. Neste caso, a sobretensão considerada é a sobretensão de ativação e a correspondente polarização denominada polarização de ativação. Entretanto, para as outras formas de polarização, tratadas nas alíneas b e c seguintes, as equações de Butler-Volmer e Tafel não se aplicam.

Quando um sistema em corrosão eletroquímica apresentar basicamente polarização por ativação, diz-se então que ele é controlado por ativação.

**b) Polarização por Concentração ( $\eta_c$ )**

A polarização por concentração existe quando a taxa da reação está limitada pela transferência de massa no interior da solução e, geralmente, ocorre apenas nas reações de redução, pois no caso das reações de oxidação, espera-se um suprimento ilimitado de átomos dos metais na interface do eletrodo que está em processo de corrosão (CALLISTER JR, 2002).

Para a equação de Tafel, à medida que acresce a sobretensão ocorre um aumento na velocidade da reação. Contudo, esse aumento não pode ocorrer indefinidamente. Assim, em um processo de dissolução anódica muito rápido, o número de moléculas de água ou outros ligantes dentro da dupla camada elétrica pode tornar-se insuficiente para solvatar todos os íons metálicos à medida que eles saem do metal. Como resultado, atinge-se uma situação em que a concentração dos ligantes dentro da dupla camada elétrica é nula e o processo passa a ser controlado exclusivamente pelo transporte desses ligantes do seio da solução para a interface metal-eletrólito (WOLYNEC, 2003).

A polarização por concentração concebe a variação de potencial de um eletrodo como o resultado da variação de concentração da espécie eletroquimicamente ativa, produzida (oxidada) ou consumida (reduzida) face a passagem de corrente elétrica (TANAKA, 1979 *apud* CASCUDO, 2000).

Para um dado potencial, a velocidade do processo será determinada pela velocidade com que íons ou outras substâncias se difundem, migram ou são transportadas. Quando o fenômeno de corrosão apresentar basicamente polarização por concentração, diz-se que ele é controlado por difusão da espécie eletroquímica.

Para exemplificarmos a polarização por concentração da espécie eletroquímica na vizinhança imediata do eletrodo, pode-se citar a corrosão na armadura no concreto, mais

especificamente na reação do cátodo que é a redução de oxigênio e sendo o oxigênio a espécie eletroquímica consumida na reação catódica, tem-se que sua taxa de difusão por meio do concreto até atingir a armadura (na zona catódica) determina a velocidade da corrosão do sistema e desde modo, as reações catódicas são tidas como controladoras do processo eletroquímico (ROSENBERG *et al.*, 1989 *apud* CASCUDO, 2000).

### c) Polarização de Resistência ou Polarização Ôhmica ( $\eta_r$ )

Segundo Wolyneec (2003), quando uma superfície metálica possui uma película condutora de alguma espécie, como, por exemplo, uma monocamada de gás ou uma película substancial de óxido, ela não irá alterar o potencial de equilíbrio  $E_e$  do eletrodo, pois este não envolve qualquer mudança de corrente anódica ou catódica. Entretanto, se o eletrodo estiver polarizado de forma a se ter uma corrente resultante  $i_a$  ou  $i_c$ , então, inevitavelmente, ter-se-a uma queda de potencial por meio da película, pois nenhuma película tem resistividade elétrica nula. A sobretensão total fica, assim, acrescida desse valor, sendo designada por sobretensão de resistência.

Um exemplo, desse tipo de sobretensão, é a sobretensão devido à queda de potencial entre a superfície do eletrodo e a ponta do eletrodo de referência que se utiliza nas medidas de potenciais de corrosão. Cabe salientar-se que essa queda de potencial só existe quando o eletrodo estiver polarizado. Quando uma corrente circula por meio da solução nas vizinhanças do eletrodo, um erro  $iR$  é introduzido na medida e, esse erro, é maior quanto mais afastada estiver a ponta do eletrodo de referência da superfície do eletrodo (WOLYNEC, 2003).

Em resumo, refere-se à existência de uma queda ôhmica (produto  $IR^{2.4}$ ) no circuito correspondente à célula eletroquímica de corrosão, podendo ser causada pela formação ou depósito de produtos sólidos ou películas junto à superfície do metal. Quando o sistema de corrosão apresentar basicamente a polarização por resistência, diz-se que ele é controlado por resistência.

Assim, a sobretensão total num eletrólito no qual ocorre deposição pode ser dada pela Equação 2.24.

$$\eta = \eta_a + \eta_c + \eta_r \quad (2.24)$$

Segundo Wolynech (2003), em determinadas condições, apenas uma sobretensão pode ser mais expressiva e, em outras condições, as contribuições de dois ou mais tipos de sobretensões podem ser equivalentes e, nesse caso, é difícil a interpretação de qual delas é mais significativa.

Cabe evidenciar que um outro tipo de polarização, denominada de polarização de cristalização, pode ser acrescida na equação 2.24, sendo tratada por Wolynech (2003).

## 2.2 CORROSÃO DAS ARMADURAS NO CONCRETO

A corrosão das armaduras no concreto é um caso específico de corrosão eletroquímica, em que o eletrólito demonstra características de resistividade elétrica, consideravelmente mais elevada, do que os eletrólitos típicos, ressaltando-se que o concreto ainda apresenta um sistema com poros e vazios (CASCUDO, 2000).

Serão tratados a seguir, aspectos de passivação e despassivação das armaduras de aço no concreto.

---

<sup>2.4</sup> Produto  $IR$ : é dado pela lei de Ohm e representa uma queda no potencial oriunda do produto da corrente do circuito eletroquímico ( $I$ ) pela resistência do condutor ( $R$ ). No caso da corrosão na armadura de aço do concreto, o condutor é a própria barra e o eletrólito, sendo este último o maior controlador da resistência  $R$  (CASCUDO, 2000).

### 2.2.1 Estado de Passivação do Aço

O comportamento passivo de alguns metais e ligas (cromo, ferro, níquel e titânio) é resultante da formação de uma película de óxido muito fina e altamente aderente sobre a superfície do metal, que serve como uma barreira de proteção contra à corrosão. Entretanto, uma alteração na natureza do ambiente pode fazer com que o material passivado perca essa proteção natural e fique susceptível à corrosão (CALLISTER JR, 2002).

#### 2.2.1.1 Considerações Sobre o pH e a Solução dos Poros do Concreto

Sob o ponto de vista das armaduras do concreto, deve-se destacar a importância de um pH elevado na fase aquosa nos poros do concreto e sua manutenção ao longo do tempo. Sob tais condições de pH, forma-se e mantém-se uma película de óxidos passiva, aderente ao aço, invisível e envolvente à armadura, a qual tem natureza protetora, proporcionando valores muito pequenos (desprezíveis) de intensidade de corrosão (BAUER, 1995; BATIS *et al.*, 2003; CASCUDO, 2005).

Os índices de alcalinidade do concreto provindo da fase líquida é essencialmente composto por hidróxidos alcalinos (NaOH e KOH) que definem o pH e podem ter concentração de íons  $\text{OH}^-$  entre 0,3 N e 1,0 N, dependendo do tipo de cimento (CONSTANTINER; DIAMOND, 1995).

#### 2.2.1.2 Passivação do Aço

A passivação do aço pode ser compreendida observando o estudo de Pourbaix (1974), ilustrado na Figura 2.7.

Percebe-se na Figura 2.7, que as reações de eletrodo termodinamicamente possíveis de ocorrer no ferro são as reações de passivação, para pHs elevados e, de corrosão, quando se tem baixa alcalinidade.

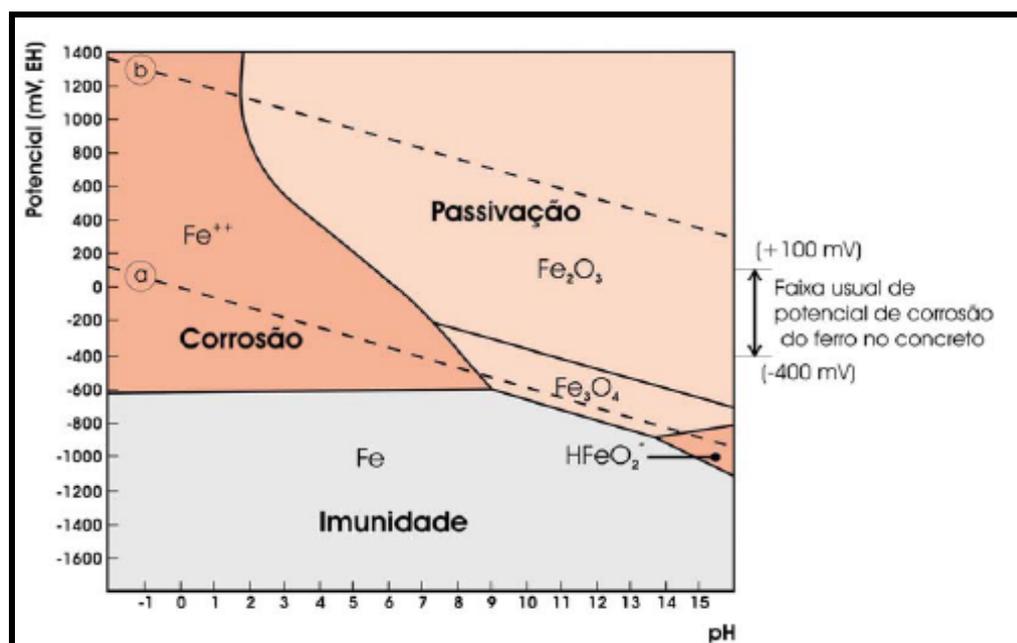


Figura 2.7 - Diagrama de Pourbaix de equilíbrio termodinâmico. Potencial x pH para o sistema Fe-H<sub>2</sub>O a 25°C, delimitando os domínios de corrosão, passivação e imunidade (CASCUDO, 1997).

Na Figura 2.7, a região de imunidade corresponde à região onde a corrosão é desfavorável sob a ótica da termodinâmica, isto é, o metal é estável. A região de passividade corresponde à região onde óxidos e hidróxidos do metal são fases estáveis e que o metal se recobre de um filme passivo de óxidos de ferro muito aderente, compacto, contínuo, insolúvel, interceptável a olho nú (espessura de  $10^{-1}$  a  $10^{-3}$  mm) e que atua por efeito barreira, impedindo oxidações posteriores (ANDRADE, 1992; TAYLOR, 1997; CASCUDO, 2005). Sua composição é variável podendo ser desde Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (magnetita) ao Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (maghemita) (SAGOE-CRENTSIL; GLASSER, 1990 *apud* CASCUDO, 2005).

Contudo, o diagrama de Pourbaix apresenta a limitação de não permitir concluir sobre a cinética (velocidade) das reações, fornecendo apenas informações claras sobre a termodinâmica do processo corrosivo (HELENE, 1993).

O concreto normalmente estabelece alto grau de proteção à armadura de aço contra a corrosão em virtude da alta alcalinidade ( $\text{pH} > 13,5$ ) da solução dos poros. Dentro desta alta alcalinidade, o aço permanece passivado. Assim, um concreto bem dosado, devidamente curado e com baixa relação a/c tem baixa permeabilidade, o qual minimiza a penetração de agentes que induzem a corrosão, tais como cloretos na superfície do aço (AHMAD, 2003).

Rosenberg *et al.* (1989) *apud* Cascudo (2000) ressaltaram que enquanto a armadura estiver passivada, não haverá corrosão, posto que a película impede o acesso de umidade, oxigênio e agentes agressivos à superfície do aço, dificultando a dissolução do ferro.

### **2.2.2 Início da Corrosão ou Estágio de Despassivação**

Várias condições podem desestabilizar o filme passivo e dar início à corrosão das armaduras, favoráveis na presença de umidade e oxigênio. Sob o ponto de vista da engenharia civil, a presença de íons cloretos em concentração suficiente e a redução do pH como resultado da carbonatação do concreto na superfície do aço são as mais significativas causas de corrosão das armaduras no concreto.

As substâncias agressivas, tanto para o concreto, quanto para as armaduras, penetram por meio da rede de poros no concreto e o tempo estabelecido para despassivar a armadura de aço e então iniciar a corrosão é dependente da proteção estabelecida pelo concreto. Assim, a zona de cobrimento da armadura do concreto estabelece proteção por barreira contra os agentes agressivos, por exemplo, o cobrimento controla a penetração de  $\text{Cl}^-$  e moléculas de  $\text{O}_2$  nas proximidades da barra de aço, desde que esse cobrimento tenha boa

qualidade e adequada espessura, de modo a reduzir a penetração dos íons cloreto, ao nível da armadura, reduzindo também a taxa de difusão do oxigênio (ING *et al.* 2005).

Para se descrever o processo de corrosão como um todo tem-se o modelo proposto por Tuutti (1982) *apud* Cascudo (2000) que subdivide o processo em iniciação e propagação. O estágio de iniciação consiste no período de tempo que vai desde a execução da estrutura até a ação de despassivação da armadura, causada pelo agente agressivo. O estágio de propagação, por sua vez, corresponde ao desenvolvimento da corrosão até que se alcance um grau inaceitável do processo.

Na fase de iniciação, nenhuma corrosão é observada, mas tanto o CO<sub>2</sub>, quanto os íons Cl<sup>-</sup> migram do ambiente para a armadura (BAUER, 1995). No final da fase de iniciação, a concentração de íons cloretos na armadura é maior do que a concentração limite crítica e o pH do concreto é reduzido em virtude da penetração de CO<sub>2</sub>, conduzindo a despassivação das armaduras e conseqüentemente ao início da corrosão (KATRI *et al.*, 2004).

Katri *et al.* (2004) conceituaram grau de corrosão tolerável como o estágio da fase de propagação correspondente à corrosão significativa e antes do aparecimento de manchas de óxidos na superfície do concreto e da ocorrência de fissuras.

A seguir são abordados aspectos dos fenômenos corrosivos induzidos por íons cloretos.

#### **2.2.2.1 Iniciação da Corrosão ou Efeito de Despassivação das Armaduras por Ação de Íons Cloreto**

Os íons cloretos se fazem presentes nas estruturas de concreto de duas formas, a saber: materiais contaminados empregados na produção do concreto, tais como aditivos, agregados, água contaminada e/ou provindos do meio externo (água do mar, névoa salina, sais

degelantes, atmosfera marinha etc.) penetrando na estrutura porosa do concreto e podendo atingir à armadura (ACI, 2003).

Uma vez que a armadura de aço foi atingida, os íons cloretos tendem a despassivá-la pela dissolução total ou parcial da camada de óxidos protetora e aderente ao aço.

Alguns dos constituintes do cimento Portland ( $C_3A$  e  $C_4AF$ ) têm a capacidade de reagir com os íons cloretos para formar um sal complexo insolúvel, os cloroaluminatos de cálcio hidratado ou sal de Friedel, sendo então um limite estável para a quantidade de cloretos no concreto em relação à corrosão (ACI, 2003).

Existe um valor limite de concentração no qual os íons cloreto podem romper a película passivante de óxidos da armadura e desencadear o fenômeno de corrosão das armaduras. Algumas normas, bem como pesquisadores propõem, em caráter qualitativo, valores para essa concentração de cloretos, tais valores podem ser encontrados em normas internacionais européias, japonesas, americanas, dentre outras. A norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2003) não se reporta ao teor de cloretos, mas proíbe em estruturas de concreto armado ou protendido a utilização de aditivos que contenham cloretos em sua composição. Não é de consenso no meio técnico-científico, os teores referentes à concentração máxima de cloretos suficiente para a despassivação das armaduras (CASCUDO, 2000). Todavia, parece razoável o limite de cloretos para manutenção da passividade das armaduras (em solução aquosa), calculado por meio da Equação 2.25 (HAUSSMANN, 1967).

$$[Cl^-]/[OH^-] \leq 0,61 \quad (2.25)$$

A concentração de  $\text{OH}^-$  tem fundamental importância em concretos com a presença de cloretos, visto que a relação  $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$  é responsável pela estabilidade da película passivante (HAUSSMANN, 1967).

A corrosão das armaduras induzida por íons cloretos ocorre por meio da formação de pites de corrosão, de forma que a mobilidade iônica dos cloretos na fase aquosa favorece a ocorrência desses pites. Essa mobilidade iônica dos cloretos está associada às características físicas da pasta, tais como distribuição do tamanho e grau de umidade dos poros e condições de continuidade na zona de transição armadura/pasta. Assim, uma estrutura de poros mais refinada irá restringir a mobilidade iônica destes cloretos (CASCUDO, 1997).

Os cloretos presentes no concreto podem apresentar-se na forma de cloretos fixos, isto é, quimicamente combinados com as fases alumino-ferríticas ou adsorvidos nas paredes dos poros e, ainda, sob a forma de cloretos livres, no qual os íons cloretos estão dispersos na fase aquosa do concreto, sendo este último associado ao risco de corrosão em estruturas contaminadas por cloretos (CASCUDO, 1997).

O relatório do Comitê 222 do ACI (1996) apresenta três teorias para explicar os efeitos dos cloretos sobre a corrosão das armaduras de aço.

**1ª) Teoria do Filme Óxido:** esta teoria comenta que os íons  $\text{Cl}^-$  penetram no filme de óxido passivante sobre o aço, através de seus poros ou defeitos, com mais facilidade do que outros íons, como os  $\text{SO}_4^{2-}$ . Alternativamente, os íons cloreto podem dispersar-se coloidamente no filme óxido, facilitando por isso a entrada deles.

**2ª) Teoria da Adsorção:** os íons  $\text{Cl}^-$  são adsorvidos na superfície do metal em competição com o oxigênio dissolvido ou com íons hidroxila. Os íons cloretos promovem a hidratação dos íons metálicos, promovendo sua dissolução.

**3ª) Teoria do Complexo Transitório:** os íons  $\text{Cl}^-$  concorrem com os íons hidroxila ( $\text{OH}^-$ ) para a produção de íons ferrosos pela corrosão. Forma-se um complexo

solúvel de cloreto de ferro. Este complexo pode difundir-se a partir do ânodo destruindo a camada protetora de  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  e permitindo a continuação do processo corrosivo. A uma distância do eletrodo, o complexo é rompido, precipita o hidróxido de ferro e os íons cloretos ficam livres para transportar mais íons ferro para o ânodo. Os produtos da reação semi-sólidos de coloração verde são freqüentemente encontrados próximo a superfície do aço, no qual, quando expostos ao ar, adquirem inicialmente coloração preta e em seguida coloração vermelha (manchas de corrosão). Se o processo de corrosão não for interrompido, mais íons ferro continuam a migrar dentro do concreto, a partir do ponto de corrosão, e reagem também com o oxigênio para formar óxidos mais altos que induzem em um volume da ordem de quatro vezes o volume inicial ocupado. A expansão desses óxidos de ferro produz tensões internas que causarão fissuras ao concreto.

Segundo o ACI (2003), a relação entre a taxa de corrosão do aço, a alcalinidade do concreto e a concentração dos íons cloretos não são completamente entendidas.

Quanto à execução de concretos submetidos à ambientes agressivos, o ACI (2003) recomenda a especificação e manutenção de baixa relação a/c, apropriado lançamento e adensamento do concreto, bem como adequados procedimentos de cura. Ressalta-se que películas e/ou pinturas de proteção superficial ao concreto também são interessantes.

É evidente que a ação extremamente deletéria dos íons cloretos vão desde a despassivação das armaduras até a participação em plenitude do fenômeno corrosivo, a conhecer: eles aumentam consideravelmente a condutividade elétrica do eletrólito, acelerando o processo; além de participarem das reações para a formação dos produtos de corrosão e de promoverem a ocorrência de pites, que apresenta grande gravidade sob a ótica das estruturas de concreto (CASCUDO, 2000).

Sobre o transporte de cloretos ao concreto, Cascudo (2000) afirma que basicamente, os mecanismos de transporte são a absorção capilar e a difusão iônica. Sendo

que a absorção capilar se dá numa camada mais superficial do concreto, onde ocorre a molhagem e a secagem do cobrimento pela ação das intempéries e, a difusão iônica ocorre numa região mais interna do concreto, onde a presença do eletrólito é mais constante.

Bauer (1995), Cascudo (2000) e Batis *et al.* (2003) ressaltam que a porosidade (volume de poros, relação poros maiores/poros menores, tortuosidade etc.) influenciam sobremaneira à ação dos mecanismos de transporte relativos à fase de iniciação da corrosão das armaduras no concreto.

### 2.2.3 Propagação da Corrosão e Implicações à Estrutura de Concreto

A taxa de corrosão na armadura de aço embutida ao concreto é significativamente influenciada pelo ambiente. Desta forma, o oxigênio e a umidade devem estar presentes para que o fenômeno de corrosão eletroquímica ocorra, além da presença dos agentes agressivos. Outros fatores podem afetar a taxa e o nível de corrosão, tais como heterogeneidades no concreto e no aço, pH da solução nos poros do concreto, carbonatação e fissuras no concreto, dentre outros (ACI, 1996).

Cascudo (1997) comenta que quando a passivação do aço deixa de existir, a estrutura torna-se vulnerável ao fenômeno da corrosão; a partir daí, a resistividade elétrica e a disponibilidade de oxigênio tornam-se os parâmetros decisivos no controle da velocidade da corrosão de armaduras.

De forma simplificada, a equação 2.26 representa, dentro do mecanismo eletroquímico de corrosão do aço no concreto, a reação de oxidação que implica na dissolução do ferro que ocorre nas zonas anódicas:



As principais reações nas zonas catódicas envolvidas na corrosão do aço carbono em meio aquoso em meios neutros ou alcalinos é de forma simplificada apresentada na Equação 2.27:



No sistema aço/concreto, os íons  $\text{Fe}^{2+}$  reagem com os íons  $\text{OH}^-$  para formar o hidróxido ferroso, conforme equação 2.28:



A transformação do aço metálico em “ferrugem” (produto da corrosão) é acompanhada por um aumento no volume o qual, dependendo do estado de oxidação, pode ser de até 600% do volume do metal original. Atribui-se a esse aumento de volume a expansão e fissuração do concreto em processo de corrosão das armaduras (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

A corrosão do aço embutido ao concreto é um processo eletroquímico, no qual o fenômeno de corrosão do aço se dá mediante a formação de pilhas eletroquímicas. A superfície do aço em corrosão caracteriza-se pela formação de ânodos e cátodos eletricamente conectados na barra da armadura. A água nos poros do concreto funciona como um meio aquoso (complexo eletrólito). A Figura 2.8 apresenta a célula de corrosão da armadura:

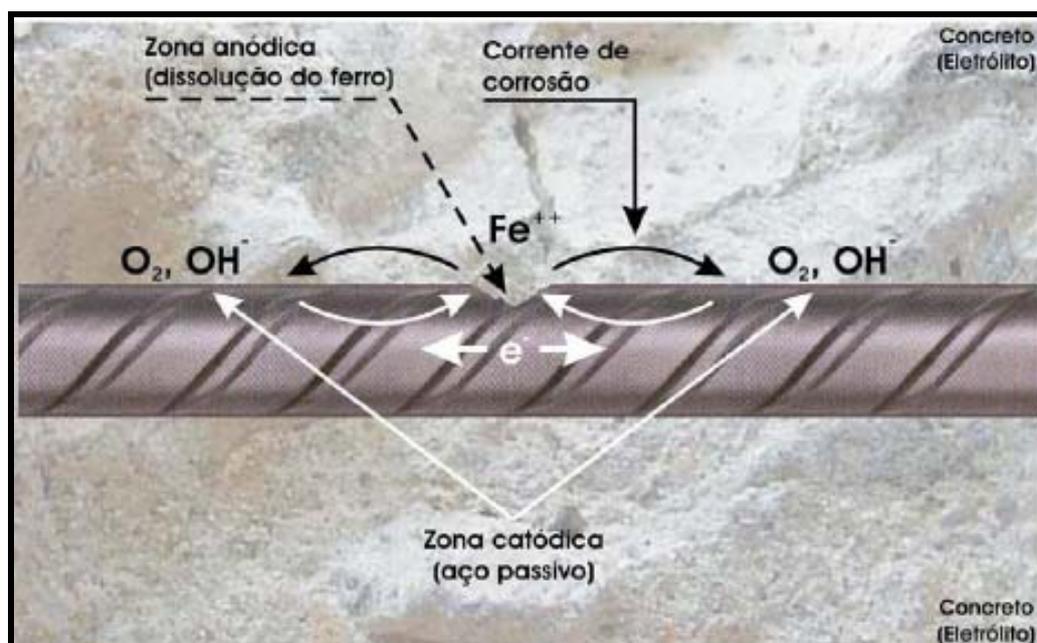


Figura 2.8 - Pilha eletroquímica de corrosão no concreto armado (CASCUDO, 1997).

Cascudo (2005) ressalta a importância de se ter ciência de que as áreas anódicas e catódicas podem estar muito próximas, caracterizando, desta forma, a corrosão por micropilhas. Por outro lado, áreas bastante afastadas com grandes heterogeneidades nas características do concreto ou do aço poderão culminar com a corrosão por macropilhas.

Os produtos de corrosão geram tensões internas no concreto, podendo causar fissuras e, em estágios avançados, produzir lascamento do concreto, com comprometimento do monolitismo estrutural (dados pela aderência aço/concreto) e destacamento da camada de cobertura deixando expostas as armaduras. Caso o concreto apresente-se muito úmido, os óxidos são gerados a uma velocidade constante e podem emigrar por meio da rede de poros, aparecendo na superfície sob a forma de manchas de aspecto ferruginoso (HELENE, 1993; ACI, 1996; CASCUDO, 2005).

A velocidade de corrosão do aço no concreto (também nomeada de taxa de corrosão ou densidade de corrente de corrosão -  $i_{corr}$ ) é um dos parâmetros diretamente

relacionado à durabilidade das estruturas e, por isso, de grande interesse para a engenharia civil.

As considerações de projeto para a proteção da estrutura contra a corrosão dependem do tipo de estrutura, de seu grau de exposição e ainda das condições do meio no qual ela se encontra. Condições mínimas de cobrimento e da qualidade do concreto devem ser adequadamente especificadas a fim de se obter um desempenho satisfatório dentro das condições planejadas de vida útil da estrutura.

Segundo recomendações do ACI (2003), é essencial ter concretos com baixas relações a/c e com suficiente cobrimento para proteger da corrosão a armadura de aço embutida ao concreto.

Geralmente, a corrosão induzida por carbonatação caracteriza-se por um ataque uniforme nas armaduras do concreto, isto é, ocorre com intensidade equivalente ao longo da superfície exposta ao ataque. Por outro lado, a corrosão induzida por cloretos ocorre sob a forma de pites, que é uma forma localizada de ataque.

### **2.3 EFEITO DAS ADIÇÕES MINEIRAIS NA CORROSÃO DAS ARMADURAS NO CONCRETO**

Quando a adição mineral é dita não - pozolânica, ocorre apenas o efeito filler ou físico que se dá pelo preenchimento dos espaços capilares do concreto, melhorando em geral, a sua resistência e a sua impermeabilidade. A escória de alto forno é considerada uma adição não – pozolânica que apresenta reatividade com a água, fenômeno conhecido por hidraulicidade (MEHTA; MONTEIRO, 1994). A adição mineral pozolânica é um material silicoso ou sílico-aluminoso, que em si mesmo possui pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas que, numa forma finamente moída e na presença de água, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio a temperaturas ambientes para formar compostos

com propriedades cimentantes. Este efeito é dito ação química das pozolanas e a reação é dita reação pozolânica. Os produtos das reações pozolânicas também são eficientes no preenchimento de poros no concreto, assim como, dependendo da finura do material pozolânico, ele também exerce uma ação física de filler (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

As adições minerais, de modo geral, são relevantes sob a óptica da corrosão das armaduras, especialmente quanto ao ataque por íons cloretos (CASCUDO 2005). Essas adições minerais alteram a estrutura física da pasta de cimento, refinando poros e reduzindo a interconexão entre eles, o que reflete em menor permeabilidade e difusão do oxigênio (SABIR *et al.*, 2001; NEPOMUCENO, 2005).

Nita (2006) ressalta que a utilização de pozolanas em pastas de cimento pode reduzir a alcalinidade quando utilizadas como materiais substitutos do cimento Portland devido ao consumo de hidróxido de cálcio pela reação pozolânica ou pela menor quantidade de clínquer presente. Contudo, Batis *et al.* (2005a) acreditam que apesar desses efeitos, o pH do concreto não é significativamente alterado.

Existe uma bibliografia extensa sobre as adições minerais disponíveis para utilização no concreto. Aborda-se, nos subitens a seguir, apenas algumas destas adições minerais e suas principais propriedades que podem influenciar no comportamento da corrosão das armaduras induzida por íons cloreto.

### 2.3.1 Sílica Ativa

A sílica ativa produz efeitos químicos e físicos na microestrutura do concreto e é altamente pozolânica, porque consiste essencialmente de sílica não cristalina, com elevada área de superfície específica (13.000 a 30.000 m<sup>2</sup>/kg) (DAL MOLIN, 1995).

Dotto *et al.* (2004) observou que a adição de 6% de sílica ativa (em relação ao teor de cimento em massa) aumentou a resistividade elétrica do concreto em 2,5 vezes e que a

adição de 12% de sílica ativa aumentou a resistividade em 5 vezes. Pesquisas de Sun *et al.* (2004), apresentaram que a adição de sílica ativa ao concreto de alto desempenho em mistura binária em substituição parcial ao cimento no teor de 10% aumentou a resistividade elétrica do concreto em 25%. Montemor *et al.*, (2000) também notaram acréscimos significativos na resistividade elétrica pelo uso de sílica ativa ao concreto. Assim, Dal Molin (1995) relata que a elevada resistividade elétrica dos concretos com adições pode prolongar o tempo de iniciação da corrosão das armaduras mesmo que o aço esteja despassivado.

Ferreira (2003) constatou que concretos com adições minerais reduziram a penetrabilidade de íons cloreto em relação a concretos de referência. Em termos de média global, essas reduções foram de 87%, 81% e 76% para os concretos com misturas binárias no teor de 10% de sílica ativa, 10% de metacaulim e 25% de cinza volante, respectivamente. O tempo médio de ataque até que a armadura despassivasse, com base nos valores de potencial de corrosão, foi superior para os concretos com sílica ativa, metacaulim e cinza volante e menor para concretos sem estas adições minerais.

Kayali e Zhu (2005) apresentaram que concretos com teor de 10% de sílica ativa em substituição parcial ao cimento expostos à ambiente agressivo contendo cloretos por dois anos não evidenciaram a presença desses íons na profundidade da armadura de aço. Isto é provavelmente justificado pelo efeito descontínuo do sistema de poros que é eficiente em bloquear a entrada de íons cloretos nas proximidades da superfície da armadura de aço. Estes resultados confirmam as conclusões de Bentz (2000) de que concretos com 10% de sílica ativa podem reduzir a difusividade do concreto a íons cloretos por mais de 15 vezes. Nawi (1996) constatou que a adição de 10% de sílica ativa em substituição ao cimento Portland no concreto (em torno de  $100 \text{ kg/m}^3$ ) reduziu o coeficiente de permeabilidade à água de  $1,6 \times 10^{-5}$  para  $4 \times 10^{-8} \text{ cm/seg}$ .

Análises de microscopia eletrônica de varredura de concretos com 16 anos de idade apresentaram que a sílica ativa torna a matriz mais homogênea e densa do que concretos sem esta adição. A alta porosidade da matriz em concretos sem esta adição explica a baixa resistência e alta permeabilidade a íons cloreto (LANCHEMI; TAGNIT; AITCHIN, 1998).

Inspeções visuais ao final dos ciclos de indução de corrosão confirmaram que a armadura de aço no concreto com alta relação a/c, sem adição de sílica ativa, corroeu-se facilmente tendo 90% de área exposta comprometida. Para concretos com mesma relação a/c e com adição de sílica ativa, a armadura apresentou apenas 25% da área de aço comprometida (DOTTO *et al.*, 2004).

A adição de sílica ativa ao concreto indica um decréscimo no pH da solução dos poros (NITA 2006; GOUWRIPALAN; MOHAMED, 1998; DOTTO *et al.*, 2004; NITA, 2006). Entretanto, esse efeito parece ser secundário, até mesmo porque o tempo de iniciação da corrosão em armaduras de concretos contaminados por cloretos e com sílica ativa tende a ser maior do que concretos de cimento Portland sem adição. Este tempo pode ser mais dependente das características físicas (porosidade e resistividade) do que das características químicas na solução dos poros (DAL MOLIN, 1995; DOTTO *et al.*, 2004).

Castro (2003) concluiu que sistemas com 10% de sílica ativa ou metacaulim aumentaram o desempenho de concretos frente à carbonatação, demonstrando que as alterações microestruturais proporcionadas por estas adições foram mais eficazes que as prováveis reduções na reserva alcalina.

Türkmen *et al.* (2003) mostrou que a taxa de corrosão é menor em concretos contendo adição de sílica ativa e que a densidade de corrente de corrosão aumenta com o acréscimo da relação a/ag.

Khatri *et al.* (2004) concluíram que para resistências à compressão similares (classe de resistência), o concreto com sílica ativa apresentou melhor desempenho que o

concreto de referência (sem adições). Para os concretos de mesma relação a/ag, o tempo em serviço para concretos com adição de cinza volante e sílica ativa foram iguais e melhores que o concreto de cimento Portland sem estas adições minerais.

Gutiérrez *et al.* (2005) notaram que o coeficiente de absorção capilar (k) foi menor quando materiais pozzolânicos foram adicionados à matriz cimentícia. Este efeito foi mais evidente nos casos em que a sílica ativa e o metacaulim foram adicionados. Eles concluíram que os materiais pozzolânicos foram eficazes na redução da permeabilidade a íons cloretos, em ordem decrescente de desempenho, a sílica ativa, o metacaulim e a cinza volante.

Resultados eletroquímicos de concretos de alto desempenho com adição de sílica ativa em misturas binárias, ternárias ou quaternárias submetidos à condições agressivas de ciclos de imersão e secagem em solução contendo cloretos, mostrou que esta adição influenciou sobremaneira no valor superior de resistência de polarização do aço (SUN *et al.* 2004).

Berke (1989) avaliou a influência da adição de sílica ativa em concretos submetidos a condições agressivas de ciclos de imersão em solução contendo 3,5% de NaCl e verificou que a sílica ativa reduz o ingresso de íons cloreto ao concreto e aumenta a resistividade elétrica, o que justifica o tempo elevado para despassivação das armaduras.

Hoffmann (2001) observou o efeito de diversos parâmetros na difusão de íons cloreto, verificou que a adição de 20% de sílica ativa ao concreto reduziu em até 60% o coeficiente de difusão de cloretos em relação a um concreto sem adição.

Asrar *et al.* (1999) verificou o desempenho de concretos contendo 10% de sílica ativa em ambientes contendo cloretos e notou que a sílica reduz em até 80% a carga passante em Coulombs. Os resultados dos referidos autores também indicaram que o potencial eletroquímico de corrosão do concreto com sílica ativa foi menos eletronegativo do que o

concreto de referência durante todo o período de condição agressiva (ciclos de imersão em 5% de NaCl).

Inúmeros estudos comprovam que a sílica ativa promove o refinamento da estrutura de poros da matriz cimentante, diminui a permeabilidade do concreto (WOLF, 1991; FORNASIER, 1995) aumenta significativamente a resistividade (DOTTO *et al.*, 2004; GJØRV, 1995; ABREU, 1998) e reduz a difusão de oxigênio (HASSAN, 2000; NEPOMUCENO, 2005). Isso denota que concretos com sílica ativa têm melhor desempenho quando comparado a concretos sem adição mineral, em ambientes agressivos, sobretudo contendo cloretos.

### 2.3.2 Cinza Volante

A cinza volante é a cinza obtida por precipitação mecânica ou eletrostática dos gases de exaustão de estações alimentadas por carvão, sendo a pozolana artificial mais comum (NEVILLE, 1997). Suas partículas têm finura menor ou a mesma das partículas de cimento (10  $\mu\text{m}$ ) e a quantidade de carbono é menor que 3%, sendo que as suas propriedades pozolânicas e seu efeito cimentício podem resultar em concretos de altas resistências mecânicas e com menor permeabilidade (NAWI, 1996).

Ha *et al.* (2007) concluíram que a cinza volante em substituição ao cimento Portland no teor de 30% melhoram as propriedades de durabilidade no concreto, sobretudo, a permeabilidade, promovendo um retardo no tempo para início da corrosão e, uma vez iniciada, promove baixas taxas de corrosão. Este retardo no início e no desenvolvimento da corrosão em concretos contendo cinza volante também foi verificado por Moon e Shin (2006); Polder e Peelen (2002) e por Montemor *et al.* (2000).

Camões *et al.* (2002) notaram o efeito benéfico da adição de cinza volante ao concreto no que tange à durabilidade, especificamente em pequenos coeficientes de difusão-

migração obtidos em estado não-estacionário de concretos com adição de cinza volante, comparados a concretos sem adição mineral e em paralelo com concretos com mesma relação a/ag.

Com o aumento da idade de cura, a distribuição da dimensão dos poros de argamassas com cinza volante, testadas por Blanco (2006), tendeu para poros de dimensões mais uniformes, o que denota sistemas mais impermeáveis e com melhor desempenho quanto à durabilidade.

Saraswathy *et al.* (2003), Montemor *et al.* (1993), Montemor *et al.* (2000), Sun *et al.* (2004) e Montemor *et al.* (2002) perceberam que a cinza volante no concreto tende a estabelecer proteção da armadura de aço contra a corrosão, devido principalmente ao aumento da resistividade elétrica, além de reduzir o coeficiente de difusividade de algumas espécies, como o oxigênio e os íons cloretos.

Resultados de perda de massa de concretos de alto desempenho com adição de cinza volante em misturas binárias nos teores de 10, 20 e 30% em substituição ao cimento Portland mostraram que a resistência à corrosão foi superior para concretos com cinza volante do que para concretos sem adição (SUN *et al.*, 2004).

A adição de cinza volante causa uma redução de 50% na permeabilidade a íons cloretos do concreto em relação a um concreto de cimento Portland - sem adições (NAIK, 1994). Thomas (1996) também notou que a profundidade de penetração de cloretos diminui com o aumento da quantidade de cinza volante ao concreto.

Saraswathy *et al.* (2003) observaram, por meio de medidas de perda de massa de barras de aço, observações visuais e testes de polarização anódicas que o nível crítico de substituição da cinza volante em relação ao cimento Portland é de 20 % a 30% para que esta adição promova um sistema menos poroso e com acréscimos na resistência à corrosão.

Entretanto, Jiang *et al.* (2004) constataram que a densidade de corrente de corrosão da armadura de aço de concretos incorporando 40% de cinza volante e 1,0% de aditivo redutor de água foi 20% superior em relação ao concreto referência (sem adição mineral) após ciclos de secagem e imersão em solução agressiva de 5% de NaCl.

Experimentos de Polder e Peelen (2002) apresentaram, dentro de condições de simulação de saís de degelo, que concretos com altas percentagens de cinza volante tiveram menor profundidade de penetração de íons cloretos, baixas probabilidades de corrosão e altas resistividades elétricas em relação a concretos de cimento Portland sem adições.

Pode-se dizer de uma forma geral, que sistemas com adição de cinza volante tendem a apresentar acréscimos na durabilidade do concreto, promovendo retardos no tempo para iniciar a corrosão e, uma vez iniciada, promove taxas de corrosão menores do que sistemas sem esta adição mineral.

### 2.3.3 Metacaulim

O metacaulim é obtido pela calcinação de argila caulinítica pura ou refinada a temperaturas entre 650°C e 850°C e moída até a finura de 0,7 m<sup>2</sup>/g ou 0,9 m<sup>2</sup>/g (NEVILLE, 1997; SABIR *et al.*, 2001). A temperatura de queima ou calcinação é extremamente importante e afeta diretamente a atividade pozolânica do produto resultante. Assim, a argila está no seu estado mais reativo quando a temperatura de calcinação conduz a hidrólise e resulta no colapso e desarranjo da estrutura da argila (SABIR *et al.*, 2001).

O comportamento dos minerais argilosos sob altas temperaturas depende muito da sua estrutura, da composição química, do tamanho dos cristais e do grau de cristalinidade (TAYLOR, 1997) e a sua reatividade pozolânica está diretamente associada à retirada de água

de sua estrutura cristalina resultando em um produto amorfo ou semi-amorfo de elevada área superficial e alta reatividade química (LACERDA; HELENE, 2002).

A elevada reatividade alcançada pelo metacaulim promoveu acréscimos na durabilidade do concreto, uma vez que reduz sua porosidade e sua permeabilidade quando no estado endurecido (LACERDA; HELENE, 2002).

Poon *et al.* (2006) e Nawi (1996) notaram desempenho similar entre o metacaulim e a sílica ativa no que se refere a resistência à penetração de cloretos no concreto.

Em relação à corrosão, o uso de metacaulim em substituição parcial ao cimento Portland no teor de 10% ou como substituição de parte do agregado miúdo no teor de 20% (em massa), melhorou o comportamento à corrosão de argamassas. Este fenômeno foi principalmente atribuído a reação pozolânica e ao consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$ . Entretanto, argamassas com 20% de substituição ao cimento e 30% de substituição da areia demandam o uso de grandes relações a/ag e isto provocou o aumento da porosidade total, no qual resultou na redução do efeito benéfico do metacaulim (BATIS *et al.*, 2005b).

Foi observado por Coleman e Page (1997) que houve um refinamento na estrutura dos poros do concreto com a adição de 15% de metacaulim e uma significativa redução na taxa de ingresso (coeficiente de difusão) de íons cloreto. De fato, há uma forte evidência de que o metacaulim influencia definitivamente na estrutura dos poros em pastas de cimento Portland e produz substancialmente o refinamento de poros, conduzindo a significantes mudanças nas propriedades de transporte de água e taxas de difusão de íons prejudiciais (SABIR *et al.*, 2001; KOSTUCH *et al.*, 1993; SABIR *et al.*, 2001; CABRERA; NWAUBANI, 1998).

Zhang e Malhotra (1995) notaram que pastas de cimento contendo metacaulim apresentaram maior capacidade de fixar íons cloretos comparadas a pastas de cimento sem esta adição mineral. Resultados semelhantes foram obtidos por Coleman e Page (1997).

Observa-se, em geral, que a adição de metacaulim ao concreto de cimento Portland, melhora sensivelmente suas características de permeabilidade, porosidade, difusão e absorção, sugerindo que sistemas à base de cimento Portland e metacaulim possuem bom desempenho em ambientes susceptíveis à corrosão das armaduras.

# **CAPÍTULO 3**

## **CONSIDERAÇÕES SOBRE TÉCNICAS PARA AVALIAÇÃO DA CORROSÃO**

As técnicas para monitoramento da corrosão fornecem subsídios voltados ao estudo e à avaliação qualitativa e quantitativa da atividade corrosiva em armaduras de concreto. Este capítulo aborda aspectos acerca das inspeções visuais, da técnica de medida da resistividade elétrica do concreto e das técnicas eletroquímicas, considerando o princípio das técnicas, o arranjo da célula eletroquímica, os equipamentos utilizados e os critérios para interpretação dos resultados.

### 3.1 ANÁLISES VISUAIS

A análise visual de uma edificação deteriorada é uma ferramenta importante para auxiliar no diagnóstico de uma estrutura em concreto armado que se apresenta com fenômeno de corrosão na armadura.

A análise visual deve ser realizada na etapa de inspeção preliminar da estrutura, utilizando-se de lupas, fissurômetros, máquinas fotográficas, trenas etc. Entretanto, informações sobre os agentes iniciadores da corrosão, a natureza e a morfologia do ataque, os parâmetros de interface aço/concreto e a cinética do processo eletroquímico não são possíveis de serem obtidas mediante avaliações visuais na estrutura.

Cabe ressaltar-se que estruturas de concreto armado em estágios avançados de corrosão nas barras de aço podem apresentar características sintomatológicas típicas como fissuração no sentido longitudinal às armaduras que estão em processo de corrosão, presença de manchas “ferruginosas” oriundas dos produtos de corrosão na superfície do concreto, fragmentação e destacamento do revestimento, lascamento do concreto em estágios avançados, perda de seção das barras de aço, exposição das armaduras corroídas, comprometimento da aderência aço-concreto, flambagem de armaduras longitudinais de pilares em função do decréscimo na seção de concreto, dentre outras (CASCUDO, 1997; CASCUDO, 2005).

O exame visual consiste em caracterizar todos os sintomas envolvendo a manifestação patológica, bem como preparar um plano de trabalho mais detalhado para desenvolver uma inspeção minuciosa (CASCUDO, 2005).

### 3.2 RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO

O fenômeno de corrosão na armadura do concreto é dependente da resistividade elétrica do concreto (condutividade iônica do eletrólito) e do acesso de oxigênio às barras.

A resistividade é dependente do teor de umidade e da permeabilidade do concreto, além do grau de ionização do eletrólito (VARELA; GONZÁLEZ, 1990 *apud* CASCUDO, 1997). Sendo, portanto, um dos agentes controladores da atividade eletroquímica, podendo inclusive ser considerado um parâmetro semiquantitativo para avaliação da corrosão, já que velocidades de corrosão máximas ocorrem em concretos com altos teores de umidade (baixos valores de resistividades) sem que haja saturação dos poros, o que dificulta o acesso do oxigênio (FELIU; ANDRADE, 1988).

A resistividade de meios porosos depende fundamentalmente de sua composição, microestrutura e teor de umidade e, conjuntamente com a disposição de oxigênio, essa resistividade pode controlar a corrosão do aço, quando não passivado. O controle da corrosão pela alta resistividade do meio que envolve o material metálico é, então, dito resistivo (SELMO, 1997).

A medida de resistividade elétrica do concreto pode ser efetuada pelo método de Wenner (dos quatro eletrodos ou quatro pontos) ou ainda pelo método dos três eletrodos, normalizado no Brasil. O método de Wenner é normalizado pela ASTM G57 (ASTM, 2003a), sendo inicialmente desenvolvido para medição da resistividade de solos. Por medir a resistividade de uma camada superficial do concreto, a esse método são agregados os termos “aparente superficial”. A NBR 9204 (ABNT, 1985) prescreve a determinação da resistividade elétrica volumétrica de corpos-de-prova moldados ou de testemunhos extraídos do concreto (CASCUDO, 1997).

A principal vantagem da técnica de resistividade elétrica superficial é a possibilidade de uso *in situ* em estruturas de concreto, permitindo uma avaliação indireta da ocorrência de atividade corrosiva no aço.

A técnica de resistividade elétrica aparente superficial do concreto baseia-se na aplicação de uma corrente elétrica entre os eletrodos externos e a diferença de potencial gerada entre os eletrodos internos propicia a medida de resistividade, por meio da Equação 3.1 (FELIU; ANDRADE, 1988; CASCUO, 1997; BROOMFIELD, 1997):

$$\rho = 2 \pi a (V/I) \quad (3.1)$$

Onde:

$\rho$  é a resistividade elétrica do concreto em  $\Omega \cdot \text{cm}$ ;

$a$  é o espaçamento entre os eletrodos em cm;

$V$  é o potencial medido entre os eletrodos internos em Volts; e

$I$  é a corrente aplicada aos eletrodos externos em Ampère.

A Figura 3.1 apresenta a aparelhagem para execução da medida de resistividade elétrica superficial aparente e a execução do ensaio.

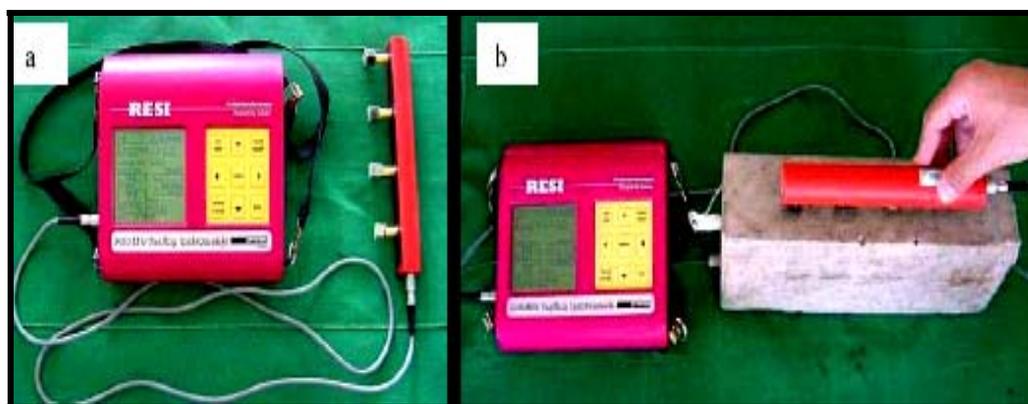


Figura 3.1 - (a) Aparelhagem para medição da resistividade do concreto e (b) execução do ensaio de resistividade superficial do concreto (CASTRO, 2003).

Segundo a CNS FARNELL COMPANY (s.n.t.), um dos maiores problemas na medida da resistividade superficial do concreto são as altas resistências elétricas no contato entre os eletrodos e o concreto. Pesquisadores afirmam que valores altos ou relativamente diferentes de resistência de contato entre eletrodos podem causar sérios erros na medida de resistividade. Ainda, conforme CNS FARNELL COMPANY (s.n.t.) apesar da praticidade da realização desses ensaios, diversos são os cuidados a serem tomados na utilização do aparelho, como o espaçamento entre os eletrodos e as condições da superfície de contato. As distâncias entre eletrodos devem ser as mesmas, e deve-se respeitar os espaçamentos máximos e mínimos, de acordo com as dimensões do agregado e com a área de contato dos eletrodos. Com relação à superfície de contato, os eletrodos devem estar saturados no momento da realização do ensaio e, para tanto, são empregadas esponjas ou espumas saturadas de água nas extremidades de cada eletrodo. A superfície de concreto deve apresentar-se livre de sujeiras e gorduras.

Segundo Helene (1993), o concreto saturado de água comporta-se como um semicondutor, com resistividade elétrica da ordem de  $10^2 \Omega.m$ , enquanto que seco em estufa ventilada pode ser considerado isolante elétrico com resistividade da ordem de  $10^6 \Omega.m$ . Um concretos de boa qualidade, em equilíbrio e em ambientes de baixa umidade relativa, a resistividade é a da ordem de  $10^4 \Omega.m$  a  $10^5 \Omega.m$ .

Ainda segundo esse autor, a resistividade do concreto é atribuída à comunicabilidade da rede de poros e à alta concentração dos íons  $Na^+, K^+, Ca^{2+}, OH^-$  e  $Cl^-$  na solução dos poros, ou seja, a movimentação dos íons no concreto está intimamente relacionada à umidade contida nos poros dele.

A resistividade do concreto pode variar de 10 k $\Omega.cm$  a 100 k $\Omega.cm$ , dependendo da umidade interna e da composição do concreto. Para uma umidade constante, a resistividade aumenta com o tempo de hidratação do cimento e quando adições minerais (cinza volante,

escória de alto forno e sílica ativa) estão presentes ao concreto. A resistividade também aumenta quando o concreto está seco ou carbonatado (POLDER; PEELLEN, 2002; Portland Cement Association - PCA, 2003).

Segundo Broomfield (1997), a resistividade elétrica é uma indicação da quantidade, da dimensão e da tortuosidade da rede de poros do concreto, sendo definitivamente afetada por uma série de fatores, a saber: qualidade do concreto, quantidade e tipo de cimento, relação água/cimento, cura e aditivos utilizados na mistura.

Quanto ao efeito das adições minerais, Ferreira (2003) também notou o efeito benéfico da utilização de adições minerais em relação à resistividade elétrica em concretos sob à ação de cloretos. Dentre as adições, destacou-se a sílica ativa e o metacaulim.

Nos estudos de Abreu (1998), a adição de sílica ativa também possibilitou a obtenção de concretos significativamente mais resistentes.

A resistividade elétrica também é influenciada pela relação água/cimento ( $a/c$ ) do concreto. À medida que a relação  $a/c$  diminui, a resistividade aumenta. Segundo informações da Portland Cement Association - PCA (2003), a resistividade pode ter seu valor numérico duplicado com a redução da relação  $a/c$  de 0,60 para 0,40.

Em geral, a resistividade elétrica do concreto aumenta com o tempo. Esse acréscimo é observado tanto para concretos em cura úmida quanto em cura ao ar. Para cura úmida, o aumento da resistividade ocorre principalmente devido ao aumento da hidratação do cimento, enquanto que na cura ao ar a resistividade aumenta devida à diminuição da umidade do concreto (LIMA, 2006).

Ferreira (2003), com relação ao ataque por íons cloreto, observou que para todas as situações estudadas (concretos de referência e concretos com adições minerais) houve uma queda abrupta da resistividade elétrica tão logo se iniciou o ataque por íons cloreto.

Cascudo (1997) relata que o processo de corrosão de um metal embebido no concreto é, prioritariamente, dependente da fração da superfície metálica efetivamente em contato com a fase líquida do concreto (superfície molhada). Esta superfície molhada está associada à presença da fase líquida que preenche parcialmente os poros e capilares do concreto. A resistividade elétrica, por sua vez, apresenta-se intimamente relacionada à presença dessa fase líquida ou eletrólito.

O que se depreende da discussão anterior é que todos os fatores que levam ao aumento da compacidade interna do concreto contribuem para o aumento da resistividade. Seja, portanto, pelo refinamento de poros e densificação da pasta em virtude da ação das adições minerais, seja pelo aumento da compacidade decorrente da redução da relação a/c, pela maior idade ou maior eficiência do procedimento de cura, seja, enfim, por um processo de carbonatação de camadas superficiais do concreto; em todos os casos a resistividade tende a aumentar. Em contrapartida, o aumento da umidade do concreto, assim como maior quantidade de íons na solução do poro, especialmente os cloretos, reduzem a resistividade.

Os critérios de avaliação indicados por Langford e Broomfield (1987 *apud* BROOMFIELD, 1997) deduzem qualitativamente a taxa de corrosão e estão em conformidade com os parâmetros de avaliação (probabilidade de corrosão) do Comitê Eurointernacional do Béton – CEB 192 (CEB, 1989 *apud* CASCUDO, 1997), que são comumente utilizados para avaliação de estruturas de concreto, como segue na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1 - Parâmetros de avaliação da resistividade elétrica do concreto - elaborada com base em Langford; Broomfield (1987 *apud* BROOMFIELD, 1997) e CEB 192 (1989 *apud* CASCUDO, 1997).**

Resistividade do concreto	Taxa de corrosão	Probabilidade de corrosão
> 20 kΩ.cm	Baixa	Desprezível
10 a 20 kΩ.cm	Baixa a moderada	Baixa
5 a 10 kΩ.cm	Alta	Alta
< 5 kΩ.cm	Muito alta	Muito alta

Broomfield (1997) apontam uma associação da resistividade em relação à taxa de corrosão, a partir de medidas de polarização linear ou resistência de polarização, conforme a Tabela 3.2. Os autores ressaltam que a medida da resistividade deve ser efetuada conjuntamente com as técnicas eletroquímicas para se obter um diagnóstico mais completo das estruturas de concreto armado quanto à corrosão das armaduras.

**Tabela 3.2 – Faixas de resistividade do concreto associadas ao estado de corrosão do aço (BROOMFIELD, 1987).**

Resistividade do concreto	Taxa de corrosão
> 100 kΩ.cm	Não é possível distinguir entre passividade e atividade corrosiva.
50 a 100 kΩ.cm	Baixa.
10 a 50 kΩ.cm	Moderada a alta quando o aço está despassivado.
10 kΩ.cm	A resistividade não é um parâmetro de controle da corrosão.

Morris *et al.* (2004) comentam que a resistividade elétrica do concreto foi proposta para ser um eficaz parâmetro para avaliar a probabilidade de corrosão na armadura de aço, particularmente quando a corrosão é induzida por ataque de cloretos.

Morris *et al.* (2004) concluíram que provavelmente as barras de aço estão próximas de encontrar o estado ativo de corrosão quando a resistividade está abaixo de 10 kΩ.cm e tem comportamento passivo quando a resistividade do concreto está acima de 30 kΩ.cm.

De acordo com esta correlação, quando a resistividade elétrica do concreto aumenta de 2 para 100 kΩ.cm, a quantidade limite de cloretos suficiente para despassivar a armadura de aço e induzir o processo corrosivo aumenta de 0,44% para 2,32% em relação à massa de cimento (MORRIS *et al.*, 2004).

### 3.3 TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS

As técnicas eletroquímicas permitem obter informações sobre os parâmetros termodinâmicos e cinéticos do processo corrosivo e podem ser associadas com outros métodos de avaliação. As técnicas a serem aqui descritas são os potenciais de corrosão, resistência de polarização ( $R_p$ ) e impedância eletroquímica.

As técnicas eletroquímicas de potenciais de corrosão, resistência de polarização e impedância eletroquímica obtém uma boa correlação em estudos relativos à corrosão induzidas por cloretos em estruturas de concreto armado expostas à ambientes marinhos (CANUL; CASTRO, 2002).

Por meio das técnicas eletroquímicas em sistemas com condições de ensaio padronizadas, é possível estimar a taxa de corrosão instantânea ( $I_{corr}$ ) da barra de aço no concreto em dado eletrólito por procedimentos que variam conforme a técnica empregada (SELMO, 1997).

Da mesma forma, Bauer (1995) estudando concretos com adição de escória de alto forno submetidos ao processo de indução da corrosão sob à ação de íons cloreto, salientou o bom desempenho das técnicas eletroquímicas de potenciais de corrosão e resistência de polarização como instrumentos de monitorização da corrosão das armaduras.

As técnicas eletroquímicas são muito atrativas, pois buscam explicar as variáveis intervenientes no processo eletroquímico de corrosão no momento em que se desenvolve o fenômeno e não de forma global como as técnicas gravimétricas (NEPOMUCENO, 1992 *apud* BAUER, 1995).

### 3.3.1 Potenciais de Corrosão

A técnica de potenciais de corrosão é o procedimento de campo mais utilizado para monitorar estruturas em concreto armado com vistas à corrosão de armaduras (CASCUDO, 2005; MONTEMOR *et al.*, 2003).

O potencial de corrosão de um eletrodo metálico versa o potencial eletroquímico medido em relação a um determinado eletrodo de referência que possui potencial estável (CASCUDO, 2005).

O eletrodo de referência é fabricado com um material de comportamento que não depende do ambiente. Os mais comuns eletrodos de referência usados para o concreto armado são cobre/sulfato de cobre, eletrodo de calomelano saturado e prata/cloreto de prata (Ag/AgCl) (BENTUR; DIAMOND; BERKE, 1997).

O eletrodo de calomelano saturado (ECS) foi utilizado como eletrodo de referência das pesquisas experimentais de Bauer (1995), Selmo (1997), Masfeld *et al.*, (2000), Poupard *et al.*, (2004), Katri *et al.*, (2004), Batis *et al.*, (2005a) e Miranda *et al.*, (2005), além de ser proposto pela ASTM C 876/91 (ASTM, 2003b).

A literatura relata o uso de eletrodo de prata/cloreto de prata como eletrodo de referência em pesquisas com aditivos inibidores de corrosão e em pesquisas com concreto contendo adições minerais (SUN *et al.*, 2004).

Os eletrodos de referência utilizados por Polder e Peelen (2002) foram barras de metal de óxido de titânio, sendo o potencial base próximo ao eletrodo de Ag/AgCl.

Basicamente, o eletrodo de calomelano saturado consiste em mercúrio ( $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ ) imerso num eletrólito com íons cloreto (KCl), sendo o potencial igual a +0,242 V a 25°C em relação ao eletrodo padrão de hidrogênio (CASCUDO, 1997; WOLYNEC, 2003).

A magnitude do potencial elétrico (medido em relação ao eletrodo de referência) indica a passividade ou a desp passividade das barras de aço em peças estruturais de concreto,

sugerindo que potenciais mais eletronegativos direcionam a conclusões de maior probabilidade de corrosão e menos negativos, a menor probabilidade.

A ASTM C876/91 (ASTM, 2003b) propõe metodologia de ensaio para obtenção dos potenciais de corrosão de estruturas de concreto, bem como os critérios para avaliação qualitativa da atividade corrosiva. A Tabela 3.3 apresenta os critérios e os parâmetros da referida norma.

**Tabela 3.3 – Critérios propostos pela ASTM C876/91 (ASTM, 2003b) para avaliação qualitativa da atividade corrosiva.**

Potencial de corrosão (mV)		Probabilidade de corrosão
Eletrodo de referência cobre sulfato de cobre – ESC	Eletrodo de referência calomelano saturado - ECS	
< - 350	< - 276	> 90%
- 200 a - 350	-126 a – 276	incerta
> - 200	> - 126	< 10%

Dos critérios expostos anteriormente, cabe uma observação: a de que tais faixas de potenciais associadas à probabilidade de corrosão foram estabelecidas com base em experiências norte-americanas em pontes, cujos agentes iniciadores de processo corrosivo foram os íons cloretos (CASCUDO, 1997).

A Figura 3.2 apresenta um esquema convencional para medição dos potenciais eletroquímicos de corrosão das armaduras.

Na Figura 3.2, nota-se que a configuração básica para aplicação da técnica de potenciais de corrosão consiste basicamente em um voltímetro de alta impedância, eletrodo de referência e uma esponja de alta condutividade para promover o contato elétrico entre este último e a armadura de aço.

É importante salientar que o pólo negativo do voltímetro de alta impedância deve ser conectado ao eletrodo de referência e o pólo positivo do voltímetro ao eletrodo de trabalho.

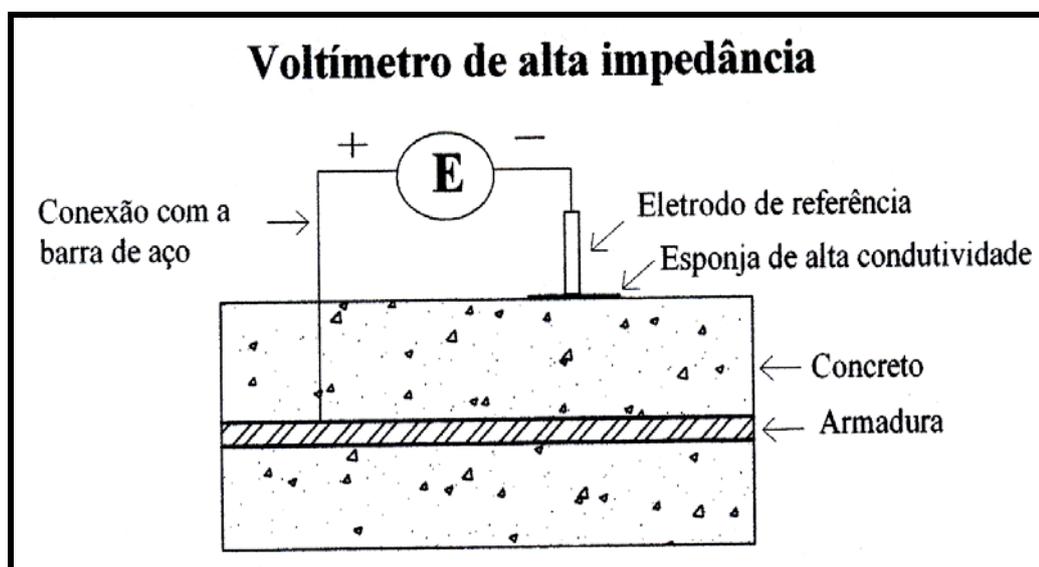


Figura 3.2 - Configuração básica para aplicação da técnica de potenciais de corrosão (CASCUDO, 2005).

A Figura 3.3 apresenta os equipamentos utilizados e a execução do ensaio de potencial de corrosão.



Figura 3.3 - Ensaio de potencial de corrosão: (a) equipamentos utilizados no ensaio e (b) realização do ensaio (FERREIRA, 2003).

Os potenciais eletroquímicos constituem uma ferramenta importante para mapear e detectar áreas da estrutura com corrosão de armaduras, permitindo detectar áreas anódicas de corrosão mesmo sem a manifestação visível do dano. Para obtenção dos mapas de potenciais, desenha-se um quadriculado na superfície do concreto a ser analisado e mede-se os potenciais em pontos equidistantes dessa malha demarcada. Com os potenciais medidos no quadriculado, são traçadas curvas equipotenciais (potenciais iguais) e identifica-se áreas onde a presença de corrosão seja provável (CASCUDO, 2005).

A técnica de potenciais de corrosão foi utilizada por Erdoğdu *et al.* (2004) para determinar o coeficiente de difusão aparente de íons cloretos no concreto armado. Os resultados encontrados apresentaram boa correspondência com os valores encontrados na literatura.

A medida real do potencial do eletrodo de trabalho pode ser alterada pela posição do eletrodo de referência, pelo tipo de cimento e pela presença de fissuras, obtendo-se, nestes casos, uma medida de potencial aparente (MONTEMOR *et al.*, 2003). A bibliografia relata que outros fatores, tais como elevados teores de umidade, grandes concentrações de cloretos, camadas superficiais do concreto com altas resistividades, elevada compactidade e espessura de concreto de cobertura e frente de carbonatação podem alterar as medidas de potencial (SOLEYMANI; ISMAIL, 2004; MONTEMOR *et al.*, 2003); CASCUDO, 2005).

### **3.3.2 Resistência de Polarização**

A técnica de resistência de polarização ( $R_p$ ) foi inicialmente desenvolvida por Stern, Andrade e González (1978), Andrade (1985) e Stratfull (1973) *apud* Cascudo (1997) entre os anos de 1957 e 1959, a partir de estudos descritos por Wagner e Traud (ANDRADE; GONZÁLEZ, 1978a; ANDRADE; GONZÁLEZ 1978b *apud* CASCUDO, 1997). Entretanto, medidas de resistência de polarização com compensação de queda ôhmica somente têm sido

aplicadas no início dos anos 1970, por Andrade e González na Espanha e fornecem informações sobre a taxa de corrosão do aço (ANDRADE; GONZÁLEZ, 1978a.; SIMON, 1989 *apud* CASCUDO, 1997).

A determinação de resistência de polarização ( $R_p$ ) é a mais importante técnica eletroquímica utilizada para determinação da taxa de corrosão do aço no concreto armado (SONG, 2000).

A técnica de RP emite resultados rápidos e possui caráter não-destrutivo, exigindo somente danos localizados no concreto de cobrimento para permitir a conexão elétrica com a armadura de aço (LAW *et al.*, 2004).

A resistência de polarização é uma técnica eletroquímica não-destrutiva capaz de estimar instantaneamente a taxa de corrosão de um metal. Entretanto, o método pode apresentar restrições para aplicação *in situ*, dentre os quais: resistência ôhmica do concreto, área desconhecida da armadura a ser polarizada e corrosão não-uniforme (KOURIL *et al.*, 2006).

Assim, a resistência de polarização ( $R_p$ ) ou polarização linear concebe a inércia que um sistema qualquer possui em permitir um processo eletroquímico de corrosão, isto é, a transferência de carga elétrica, por meio do eletrodo, possibilitando inferir quantitativamente na velocidade ou taxa de corrosão (CASCUDO, 2005).

A técnica de medição é descrita na ASTM G59/57 (ASTM, 2003c) e exige potenciostato e itens auxiliares. Nesta técnica, a polarização potenciodinâmica é baseada na contínua troca do potencial de eletrodo nas “vizinhanças” do potencial de corrosão. Antes de cada medida, o potencial de corrosão deve ser identificado em relação a um eletrodo de referência (KOURIL *et al.*, 2006).

Para o cálculo de  $R_p$ , a armadura de aço deve ser polarizada em relação ao potencial de equilíbrio com uma pequena sobretensão que pode variar de 10 a 30 mV e a

corrente resultante é monitorada. A  $R_p$  é, então, dada pelo quociente da sobretensão aplicada em relação à corrente induzida (LAW *et al.*, 2004).

No arranjo do experimento para determinação de  $R_p$ , o contra-eletródo é o responsável pelo “salto” no potencial do eletródo de trabalho na direção anódica ou catódica com uma taxa de varredura constante (KOURIL *et al.*, 2006).

A ASTM G59/91 (ASTM, 2003c) define  $R_p$  pela relação da Equação 3.2.

$$R_p = (\partial \Delta E) / (\partial i)_{i=0}, \quad dE/dt \rightarrow 0 \quad (3.2)$$

A Equação 3.2 expressa que a resistência de polarização de um eletródo em corrosão é definida como a inclinação da linha do potencial em relação à densidade de corrente no ponto onde  $i=0$  (KOURIL *et al.*, 2006).

O valor de  $R_p$  pode ser usado para calcular a taxa de corrosão na forma de densidade de corrente ( $i_{corr}$ ), por meio da equação de Stern – Geary, considerando o processo controlado por ativação, expressa pela Equação 3.3 (SONG, 2000; CASCUDO, 2005; KOURIL *et al.*, 2006).

$$I_{corr} = B/R_p \quad (3.3)$$

O coeficiente B, denominado de coeficiente de Stern-Geary pode ser obtido por meio da Equação 3.4, onde os valores das inclinações de Tafel ( $b_a$  e  $b_c$ ) devem ser conhecidos.

$$B = (b_a \cdot b_c) / 2,3 (b_a + b_c) \quad (3.4)$$

As inclinações de Tafel são definidas por (SONG, 2000):

$$|ba| = dE / d \ln I_a \quad (3.5)$$

$$|bc| = - dE / d \ln I_c \quad (3.6)$$

$I_a$  e  $I_c$  são taxas de reação anódica e catódica, respectivamente.

Segundo Bauer (1995) para que a Equação 3.3 e Equação 3.4 sejam aplicáveis, a variação de potencial ( $\Delta E$ ) deve ser no máximo de  $\pm 20$  mV em torno do potencial de Corrosão ( $E_{corr}$ ).

A equação original de Stern-Geary foi derivada de um eletrodo em corrosão, sem considerar a influência da distribuição não - uniforme das reações catódicas e anódicas. Assim, essa equação pode ser aplicável em sistemas não polarizados com corrosão uniforme. Entretanto, no concreto armado também é comum corrosão não - uniforme, dentro de polarização por efeito de macro-célula ou por corrente imposta (SONG, 2000).

Na literatura, a equação de Stern-Geary é normalmente usada sem questionamento das formas de corrosão (uniforme ou não-uniforme) ou das condições de polarização (no potencial de corrosão ou não) e resultados incoerentes podem ser obtidos (SONG, 2000).

O valor do parâmetro B (26 e 52 mV) foi sugerido pela equação original de Stern – Geary. Entretanto, Song (2000) relata que o valor do parâmetro B (não determinado experimentalmente), pode conduzir a erros relativos de dois na determinação da taxa de corrosão. Esse valor de B, normalmente utilizado, é principalmente baseado nas condições da amostra (armadura de aço passiva ou ativa em torno do potencial de corrosão). Porém, na prática, as situações de corrosão são mais complexas e a armadura de aço pode corroer-se localizadamente ou podem ser polarizadas por correntes macro-galvânicas ou correntes de fuga etc.; também, a redução catódica do oxigênio pode estar dentro do controle difusional ou ativar a reação de controle. Portanto, segundo Song (2000), o valor proposto de B (não determinado experimentalmente) deve ser cuidadosamente discutido para que não implique

em erros na taxa de corrosão (SONG, 2000). Por fim, Andrade e Feliu (1991 *apud* BAUER, 1995) comentam que os erros no parâmetro B são pequenos em comparação com as diferenças nos valores de  $i_{\text{corr}}$  que ocorrem nos processos reais.

A bibliografia (BENTUR; DIAMOND; BERKE, 1997; CASCUDO, 1997; BROOMFIELD, 1997) tem normalmente sugerido para B, o valor de B igual a 26 mV para o aço em estado ativo de corrosão e 52 mV para a condição de passividade da armadura. Law *et al.* (2004) adotou os referidos valores de para B acima e tomou valores de  $R_p$  menores que  $10 \text{ k}\Omega\text{.cm}^2$  como sendo de aços passivos e maiores de  $10 \text{ k}\Omega\text{cm}^2$  como sendo de aços em condição ativa.

Law *et al.* (2004) comentam que a técnica de  $R_p$  pode ser usada para estimar a perda de massa do aço quando a corrosão é induzida por cloretos. Para os seus experimentos essa estimativa foi da ordem de 86%, sendo que a confiabilidade dos resultados foi maior para a corrosão induzida por carbonatação do que a corrosão induzida por cloretos.

Em meios pouco condutores, como é o caso do concreto armado, a técnica de resistência de polarização somente deve ser utilizada com procedimentos que descontem a resistência do meio entre o eletrodo de referência e eletrodo de trabalho, dita queda ôhmica, da resistência total do sistema (SELMO, 1997).

A resistência de polarização linear possui, segundo Broomfield (1997), a limitação de que se detecta a taxa de corrosão instantânea, esta pode ser alterada em função da temperatura e outros fatores. Faz-se necessário conhecer a taxa de corrosão integrada, resultante de taxas médias de corrosão em um determinado período.

Mansfeld (1976) *apud* Kouril *et al.* (2006) comprovou que a linearidade das curvas pode ser atendida unicamente em casos excepcionais, onde  $b_a$  é igual a  $b_c$  e que a determinação de  $R_p$  por procedimentos de direta linearização podem conduzir a valores incorretos por que nenhuma curva pode ser exatamente linear.

Muitos erros nos resultados de  $R_p$  originam-se da hipótese de que a curva de polarização é linear, inclusive para especificar a sobretensão, normalmente de 10 mV. Esses artifícios determinam a corrente a um dado potencial e calcula a inclinação entre este ponto, a curva de polarização e a origem (E-E<sub>corr</sub>) (KOURIL *et al.*, 2006).

As limitações e as considerações assumidas pela técnica de resistência de polarização para quantificar a taxa de corrosão da armadura de aço no concreto é de conhecimento no meio técnico-científico. Por isso, Holloway *et al.* (2004) sugerem adotar o parâmetro de resistência de polarização apenas para medidas qualitativas em relação a um concreto de referência e não sugerir correlações diretas com a taxa de corrosão eletroquímica.

Para medição correta da resistência de polarização, o potencial de corrosão deve estar praticamente estacionário, antes da polarização imposta e altas taxas de polarização contribuem para o estado não-estacionário do sistema pelo efeito da troca de capacitância da dupla camada elétrica (KOURIL *et al.*, 2006).

Rocchini (1999) comprovou experimentalmente que, do ponto de vista matemático, não há nenhuma necessidade de estabelecer o intervalo de amplitude onde a teoria de Stern-Geary é válida e que o aparecimento da tendência linear não é uma condição necessária para obter resultados confiáveis e corretos das curvas de  $R_p$ , visto que a sua melhor curva de polarização experimental obtida foi modelada por polinômios, sendo o polinômio de grau quatro o mais apropriado.

Montemor *et al.* (2003) salientam que a principal dificuldade para aplicação da técnica de  $R_p$  em estruturas de concreto refere-se à distribuição não uniforme do sinal elétrico aplicado ao contra-eletródo de dimensão muito pequena em relação à estrutura em concreto armado. Esse sinal então tende a dissipar-se com o aumento da distância do contra-eletródo ao longo do sistema metálico. Feliu *et al.* (1998) e González *et al.* (1991) *apud* Montemor *et al.* (2003) desenvolveram pesquisas baseando no modelo de “linhas de transmissão”, sendo

proposto uma solução analítica para estimar a resistência de polarização e conferir a validade do resultado por comparação da solução analítica com medidas diretas de  $R_p$ , obtidas por condições padronizadas para realizar a distribuição uniforme do sinal aplicado à armadura.

Esse modelo demonstra que a resposta da armadura de grandes estruturas de concreto ao sinal elétrico aplicado por meio do contra-eletródo de dimensão muito pequena pode ser modelado baseando-se na resposta da linha de transmissão. Duas abordagens são possíveis, a saber: a primeira, usa a resposta de corrente resultante da aplicação da medida do potencial na armadura com o auxílio de um pequeno contra-eletródo, localizado na viga de concreto. O segundo é baseado numa redução do potencial aplicado proporcional à distância tendo como referencial o contra-eletródo.

A técnica de  $R_p$  pelo anel de guarda permite a aplicação da técnica de  $R_p$  em grandes estruturas de concreto, permitindo confinar um sinal elétrico em uma região definida da estrutura sem que se conheça toda a área de distribuição uniforme do sinal elétrico (FELIU, 1989).

Estudos de Bauer (1995) em concretos com adição de escória de alto forno submetidos à ação de íons cloretos ou de carbonatação permitiram concluir que o emprego da técnica de resistência de polarização para determinação da intensidade de corrosão possibilitou avaliar de forma apreciável as diversas relações entre os fenômenos corrosivos envolvidos. Por sua vez, as avaliações realizadas pelo mesmo autor, comparando-se perdas de massa eletroquímicas e gravimétricas, confirmaram a adaptabilidade da técnica.

Feliu *et al.* (1998;1989) e González *et al.* (1991) *apud* Montemor *et al.* (2003) distinguiram, portanto, o comportamento do aço no estado passivo ( $R_p$  entre 100 e 1000  $K\Omega.cm^2$  para um concreto sem cloretos) e estado ativo de corrosão ( $R_p$  entre 1 e 10  $K\Omega.cm^2$  para concretos com 3% de  $CaCl_2$ ).

A Figura 3.4 representa a técnica de anel de guarda. Os contra-eletrodos permanecem com o mesmo potencial elétrico em relação ao eletrodo de trabalho (armadura de aço) no qual é medida a corrente que flui do contra-eletrodo central. Por isso, enquanto o contra-eletrodo auxiliar polariza localizadamente as barras, outro polariza as demais barras ao redor da área central. A partir do instante em que a corrente do eletrodo central é conhecida, a área da armadura é afetada e por isso a determinação de  $R_p$  pode ser executada (MONTEMOR *et al.*, 2003).

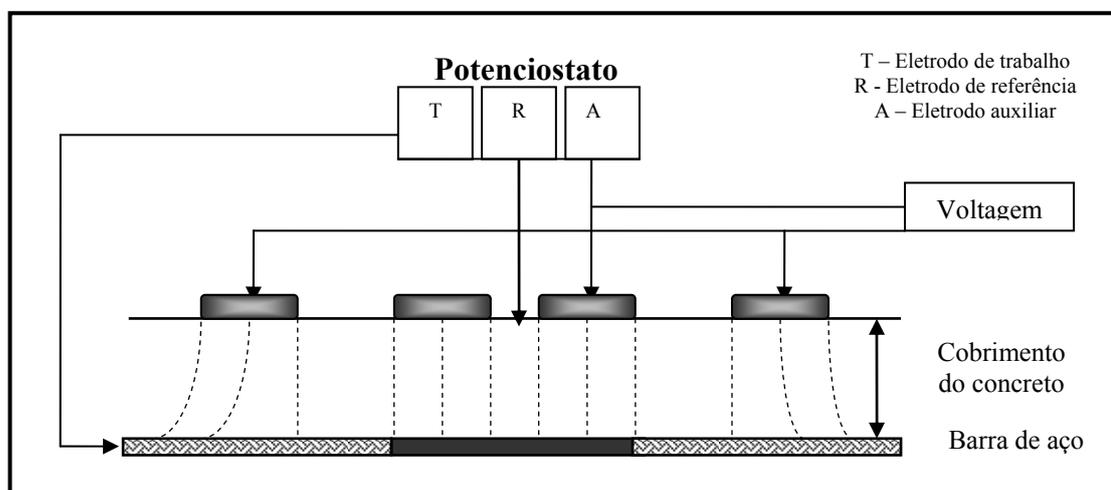


Figura 3.4 - Arranjo utilizado por Feliu (1989) e Montemor *et al.* (2003).

O desenvolvimento de sistemas de monitoramento portáteis e de fácil operação fazem da resistência de polarização uma técnica adequada para determinação da taxa de corrosão *in situ* em estruturas de concreto armado.

Rocchini *et al.* (1984) *apud* Rocchini (1996) demonstraram que a avaliação precisa da taxa de corrosão depende da taxa de varredura do potencial. Observações comprovaram que uma taxa de varredura de até 10 mV/s são satisfatórias.

Na Tabela 3.4, resumiu-se alguns aspectos de células - eletroquímicas encontradas na literatura.

**Tabela 3.4 – Resumo de algumas células eletroquímicas encontradas na literatura.**

Literatura	Equipamento utilizado	Eletrodo de referência	Contra-eletrodo	Taxa de varredura (mV/s)	Polarização (mV)	OBS
Kkuş e Mansfeld (2005)	-	-	-	0,167	± 10	-
Batis <i>et al.</i> (2005b)	potenciostato/galvanostato modelo 263AE G&G.	ECS	grafite	0,100		-
Holloway <i>et al.</i> (2004)	equipamento Solartron 1208.	ECS	-	0,167	± 20	capilar de <i>Lugging</i> .
Katri <i>et al.</i> (2004)	potenciostato da Princeton Applied Research (PAR) modelo 173 conectado a um <i>scanner</i> PAR modelo 175 (analisador de frequência).	-	-	0,500	± 50	-
Soleymani <i>et al.</i> (2004)	potenciostato/galvanostato do fabricante da Autolab General Purpose Electrochemical System (GPES).	prata/cloreto de prata	aço inoxidável	-	± 25	-
Malik <i>et al.</i> 2004	potenciostato EG&G modelo 273.	ECS	aço inoxidável	-	± 20	Sentido de varredura anódico
Dotto <i>et al.</i> (2004)	Wenking Potentiost Modelo St 72 e aparelho Tektronix Oscilloscope Modelo TDS 320.		grafite	-		-
Batis <i>et al.</i> (2003)	-	ECS	grafite	-	-	-
Jung <i>et al.</i> (2003)	potenciostato modelo M273 do fabricante EG&G.	carbono	aço inoxidável	0,167	± 30	-

Literatura	Equipamento utilizado	Eletrodo de referência	Contra-eletrodo	Taxa de varredura (mV/s)	Polarização (mV)	OBS
Andrade <i>et al.</i> (2002)	potenciostato SVC-2.	ECS	platina	-	-	-
Joiret <i>et al.</i> (2002)	potenciostato PGZTAT 20 do fabricante Ecochimie e Solartron (ECI 1286 junto com analisador de frequência modelo FRA 1255 para as medidas de impedância).	ECS	-	-	-	Usou um filtro analógico (KEMO VBF 8) para melhorar o sinal dos ruídos.
Polder e Peelen (2002),	-	óxido de titânio	-	-	-	-
Cascudo (2000)	potenciostato Princeton Applied Research – PAR do fabricante EG&G, modelo 273 A e potenciostato desenvolvido pela Universidade de Brasília - UNB (BAUER, 1995).	ECS	aço inoxidável	0,167	± 10	Sentido de varredura anódico
Selmo (1997)	potenciostato da EG&G - Princeton Applied Research – PAR	-	-	0,167	± 10	Sentido de varredura anódico
Canul e Castro (2002)	-	-	-	0,060	± 10	Sentido de varredura anódico
Bauer (1995)	potenciostato desenvolvido pela Universidade de Brasília - UNB.	-	-	0,167	± 10	Sentido de varredura anódico

Na Tabela 3.4, pode-se notar que o eletrodo de referência de calomelano saturado é bastante utilizado no arranjo da célula eletroquímica da literatura considerada, bem como a polarização de  $\pm 10$  mV e a taxa de varredura de 0,167 mV/s.

A compensação da queda ôhmica na determinação de  $R_p$  não pode ser negligenciada até mesmo quando a intensidade de corrosão é baixa dentro de um determinado intervalo do potencial de polarização, porque sem tal condição, a interpretação dos resultados experimentais pode ser completamente distorcida (ROCCHINI, 1996).

Estudos de Holloway *et al.* (2004) evidenciaram que não houve correlação entre os resultados obtidos pela técnica de  $R_p$  e as inspeções visuais das barras de aço, onde o sistema de proteção contra a corrosão, sugerido por meio da resistência de polarização, não apresentou visualmente o melhor aspecto. Esta aparente incoerência nos resultados foi justificada pelas dificuldades no uso da técnica de  $R_p$  para monitorar a corrosão no concreto armado, já que é de conhecimento no meio técnico-científico que o valor da constante de Stern-Geary (B) varia dependendo do estado da armadura (ANDRADE; GONZÁLEZ, 1978 *apud* HOLLOWAY *et al.*, 2004), além das influências por transporte de massa (HOLLOWAY *et al.*, 2004).

Miranda *et al.* (2005) em estudos de corrosão nos sistemas aço/concreto obteve boa correlação de valores de intensidade de corrosão deduzidos por meio da técnica de resistência de polarização e por meio da técnica de pulsos galvanostáticos.

Experimentalmente,  $R_p$  pode ser obtida pela técnica de voltametria cíclica, dependendo da amplitude do sinal de potencial imposto frente à polarização (BEAUDOIN; RAMACHANDRAN, 2001).

A técnica de voltametria cíclica é uma das mais versáteis técnicas eletroquímicas para estudos de espécies eletroativas.

A resistência de polarização ( $R_p$ ) pode ser calculadas usando a Equações 3.7 (BEAUDOIN; RAMACHANDRAN, 2001).

$$R_p = \Delta\Phi / \Delta I \quad (3.7)$$

Onde

$\Delta\Phi$  é a amplitude do potencial;

$\Delta I$  é a corrente diferencial na varredura anódica.

A influência da temperatura na taxa de corrosão refere-se à reação de oxidação que é afetada pela soma da energia de aquecimento que conduz a reação. A resistividade do concreto também reduz com o aumento da temperatura e os íons tornam-se mais móveis e os sais mais solúveis (BROOMFIELD, 1997).

Pesquisas de Law *et al.* (2004) confirmaram que o ambiente, onde as medidas são tomadas, pode influenciar nos valores e na exatidão das medidas de  $R_p$ .

O aumento da saturação pode reduzir a velocidade de corrosão até a total demanda de oxigênio, uma vez que os poros estão totalmente preenchidos com água, o oxigênio não se difunde. De modo inverso, o concreto totalmente seco não tem eletrólito e não tem reações de corrosão. Isto é devido à quantidade limite de oxigênio disponível para que os íons ( $Fe^{2+}$ ) permaneçam em solução sem formar sólidos (óxidos) que se expandem e provocam a fissuração do concreto. Estruturas com poros totalmente saturados podem ter potenciais altamente eletronegativos com corrosão.

### 3.3.3 Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS)

A técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica foi usada inicialmente em estudos de mecanismos de eletrocristalização de reações de oxi-redução e caracterização

de microestruturas heterogêneas, como a cerâmica. Porém, na última década, esta técnica não-destrutiva atraiu muitos pesquisadores para investigar respostas elétricas de sistemas de base cimentícia (LOCHE *et al.*, 2005).

A impedância eletroquímica possibilita o acesso a informações sobre os mecanismos que ocorrem dentro dos sistemas pela aplicação de uma perturbação de potencial senoidal na armadura de aço e medição da corrente que flui pela alteração da fase resultante desta corrente. Várias medidas podem ser tomadas em frequências normalmente de 1 kHz a 10 mHz, entretanto, esta técnica consome tempo para as medições e as informações podem ser de difícil interpretação quando se refere ao desempenho de sistemas à base de cimento Portland, além de ser inapropriada para aplicações de campo (LAW *et al.*, 2004).

A EIS é a técnica que trabalha nos domínios da frequência e sua concepção básica envolve a combinação dos elementos do circuito elétrico passivo, tais como resistência, capacitância e indutância. Quando um potencial alternado é aplicado a esses elementos, a corrente resultante é obtida pela lei de Ohm, sendo uma ferramenta importante em estudos de corrosão, pois permite informações sobre os mecanismos de reações de corrosão e filmes superficiais do aço, podendo, inclusive ser usada em meios de baixa condutividade, como o concreto, sem perturbar o sistema (MONTEMOR *et al.*, 2003; SEKINE, 1997)

A impedância eletroquímica, ao contrário de técnicas estacionárias (curvas de polarização anódica, por exemplo), permite a caracterização de forma não-destrutiva e não-perturbativa ao concreto armado, da difusão da espécie agressiva dentro de materiais de base cimentícia e da cinética das reações eletroquímicas que ocorrem na superfície do eletrodo de aço (POUPARD *et al.*, 2004).

A apresentação dos resultados da técnica de Impedância Eletroquímica pode ser expressa em diagrama de Nyquist ou diagrama de Bode. O diagrama de Nyquist é um plano real imaginário de coordenadas cartesianas, onde tem se nas abscissas o eixo real (em temos

resistivos) e nas ordenadas a parte imaginária (em termos capacitivos ou indutivos) (CASCUDO, 1997).

A figura 3.5 apresenta um típico diagrama de Nyquist de uma célula eletroquímica.

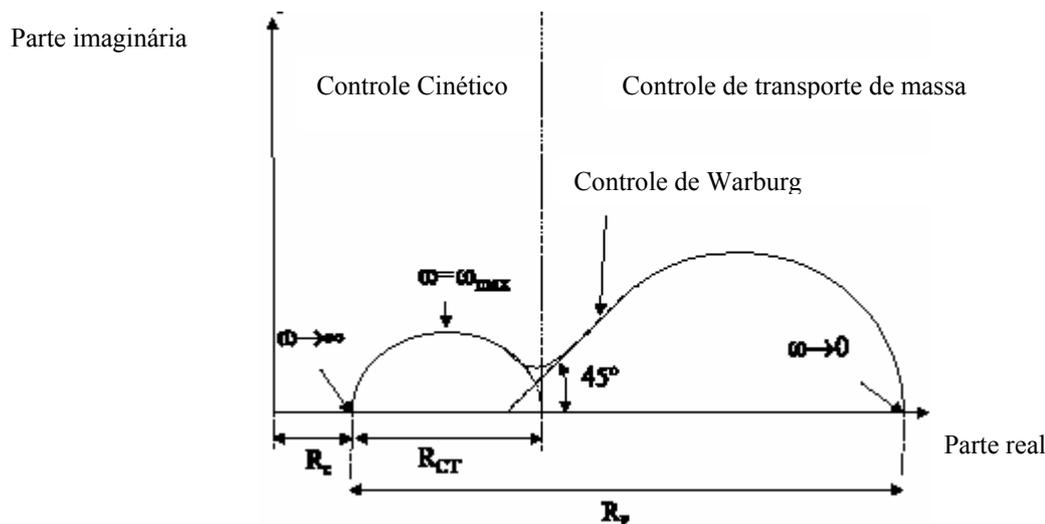


Figura 3.5 - Típico diagrama de Nyquist (POUPARD *et al.*, 2004).

A Figura 3.5 expressa comportamentos característicos a seguir descritos (POUPARD *et al.*, 2004):

- A resistência do eletrólito  $R_c$  é dada pelas regiões de alta frequência limitada pelo diagrama;
- A resistência à troca de carga  $R_{ct}$  é dada pelo diâmetro do arco da baixa frequência;
- A resistência de polarização  $R_p$  é dada pelo limite da baixa frequência (1 mHz-10 kHz).

Loche *et al.*, (2005) também descreveram características comuns de espectros de impedância, a conhecer:

- Em praticamente todos os casos, o gráfico complexo apresenta arcos capacitivos. O primeiro arco (diâmetro  $R_1$ ) é atribuído a todos os materiais composto por uma fase sólida

(poros contínuos e descontínuos), fase líquida e região de interface entre essas duas fases. Esta fase provavelmente tem significativa influência no comportamento elétrico do material. Este arco é definido pela capacitância (C1) que pode ser acrescida em até 50% de seu valor quando íons cloreto são adicionados a solução básica de  $\text{Na}^+\text{OH}^-$  e  $\text{K}^+\text{OH}^-$  dependendo de sua concentração;

- O segundo arco é definido pela resistência R2 e pela capacitância C2. Este arco é traçado somente quando duas condições são atendidas: a primeira, quando a amostra é submetida a um campo elétrico e a segunda, quando íons cloreto são adicionados à solução.

Loche *et al.* (2005) comentaram que a resposta de impedância de um material depende do alcance da frequência, sendo que a separação dos domínios de frequência em dois grupos permitiram considerar que as frequências de:

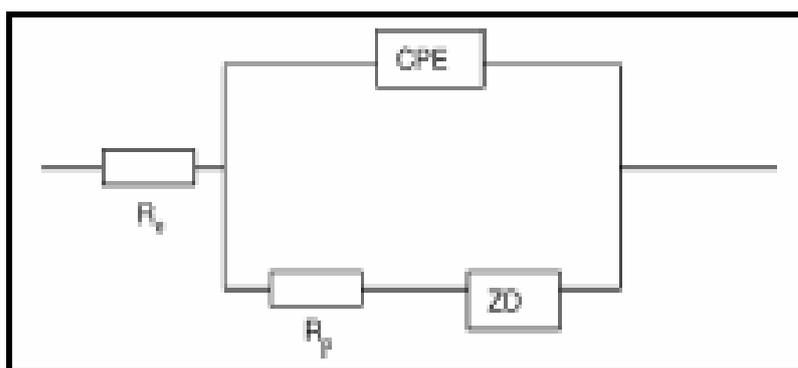
- $2 \text{ KHz} < f < 5 \text{ MHz}$  – onde o arco da alta impedância é obtido. É atribuída a resistência do material e pode ser representado pelo circuito equivalente R1C1, onde os elementos R<sub>c</sub> estão em paralelo;

- $5 \text{ MHz} < f < 2 \text{ KHz}$  – onde o pequeno arco é obtido. É a tradução do fenômeno de interface anódica e catódica. Outro circuito equivalente R2C2 pode traduzir este comportamento. C é um elemento de fase constante com ambos componente capacitivo e fator de depressão do arco.

A capacitância elétrica de um material é preferivelmente governada pela troca da taxa superficial entre a fase sólida e o eletrólito dentro dos poros e não pela seção da amostra testada (LOCHE *et al.*, 2005).

Contudo, a interpretação do espectro de impedância é algumas vezes difícil, especialmente na presença de corrosão localizada, como é o caso de corrosão induzida por íons cloreto (MANSFELD, 1988; MANSFELD *et al.*, 1982 *apud* MONTEMOR *et al.*, 2000).

Apesar de muitos estudos na interpretação do espectro de impedância, comportamentos atípicos são possíveis, incluindo presença de seguimentos a baixas frequências conduzidos pela introdução do elemento de Wasburg em série com a resistência a transferência de carga para calcular a resposta do processo faradaico que ocorre na interface; efeitos na alta frequência que revelam a presença de filmes superficiais no aço e por fim, a presença de semicírculos depressivos que sugerem um comportamento imperfeito dos capacitores governado pela introdução de um elemento de fase constante no circuito equivalente, como na Figura 3.6 proposta por Feliu *et al.* (1998) *apud* Montemor *et al.* (2003).



**Figura 3.6 - Circuito equivalente com  $R_s$  = resistência do eletrólito,  $R_p$  = resistência a transferência de carga, CPE = elemento de fase constante e ZD = difusão de Wasburg (FELIU *et al.*, 1998 *apud* MONTEMOR *et al.*, 2003).**

Do ponto de vista matemático, Costa (1991) *apud* Selmo (1997) ressalta que os diagramas de impedância precisam ser validados pelas condições, denominadas de Kramers-Kronig, a saber:

- a) causalidade, isto é, a resposta do sistema deve ser devida à perturbação aplicada;
- b) linearidade, a impedância deve ser independente da amplitude da perturbação;

c) estabilidade, o sistema deve retornar à sua condição inicial após cessada a perturbação;

d) a impedância deve ser finita a  $\omega \rightarrow 0$  e a  $\omega \rightarrow \infty$  e de valor contínuo e finito entre as frequências intermediárias.

Ford *et al.* (1998) *apud* Montemor *et al.* (2003) pela manipulação de alguns parâmetros do sistema, como geometria do corpo-de-prova, microestrutura da química local e esquema do eletrodo, concluiu que propriedades como os filmes passivos formados pelo ferro, as reações na interface ( $R_p$  e capacitância da dupla camada elétrica), o volume de concreto e as imperfeições do eletrodo adquiridas durante os ciclos de molhagem e secagem interferem no tempo de ensaio.

Os diagramas de Bode e Nyquist são resultantes do somatório de processos em ocorrência simultânea, numa dada célula eletroquímica, e podem ainda sofrer interferências de ruídos de aparelhagem de ensaio, principalmente na região de alta frequência, onde arcos capacitivos também podem ser afetados por variações da distância do eletrodo de referência ao eletrodo de trabalho, em meios de baixa condutividade (CHECHIRLIAN, 1993 *apud* SELMO, 1997).

Cabe salientar-se que pesquisas de Sekine (1997) tratando de revestimentos orgânicos de proteção à armadura contra a corrosão no concreto armado obtiveram boa correspondência entre os resultados obtidos por meio da técnica de impedância e as observações visuais à armadura e ao filme ou revestimento de proteção das barras de aço. Os parâmetros eletroquímicos obtidos pela técnica de impedância obtiveram correlação com os parâmetros obtidos por outras técnicas como interrupção de corrente e curvas de polarização.

O uso da espectroscopia de impedância eletroquímica baseia-se em princípios análogos aos que justificam os métodos utilizados no equilíbrio em cinética química: tirando o sistema ligeiramente do estado estacionário pela aplicação de uma perturbação ao sistema

eletroquímico, obriga-se o sistema a retornar a um novo estado estacionário. Como os vários processos envolvidos mudam a taxas diferentes, a resposta pode ser analisada para examinar cada parte do processo eletroquímico global (KEDDAM; GABRIELLI, 1992 *apud* SILVA, 2002).

As medidas de impedância de Kuş e Mansfeld (2005) foram obtidas com frequências entre 100 kHz e 3 mHz.

Selmo (1997) concluiu que a técnica de impedância eletroquímica foi apropriada para monitorar o processo de corrosão do aço em pastas de gesso no estado seco ou saturado, mas apenas na ausência de processos expansivos característicos do material.

# CAPÍTULO 4

## PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental foi realizado nos laboratórios do Centro Tecnológico de Engenharia Civil de Furnas Centrais Elétricas S.A. e foi elaborado com o intuito de verificar o comportamento de concretos contendo adições minerais quanto à durabilidade, mais especificamente avaliando o seu desempenho quanto à corrosão de armaduras.

A escolha das variáveis para o programa experimental teve origem nos resultados da primeira etapa de um projeto integrado sobre as características do concreto de cobrimento e o seu papel na durabilidade das estruturas de concreto (CARASEK; CASCUDO, 2001). Este projeto integrado foi desenvolvido pela Universidade Federal de Goiás em parceria com Furnas Centrais Elétricas e com o *Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions* do *Institut National de Sciences Appliquées* – INSA em Toulouse (França). As variáveis desta primeira etapa foram às adições minerais (utilizadas em substituição parcial ao cimento e em massa), os procedimentos de cura e de moldagem para os concretos e a relação água/aglomerante. A presente pesquisa contempla a segunda etapa desse projeto integrado e tem como tema a avaliação do desempenho de concretos quanto à corrosão de armaduras induzida por íons cloreto.

Desta forma, este capítulo apresenta os materiais, as variáveis, os corpos-de-prova, os concretos estudados, os procedimentos de indução da corrosão e os ensaios para monitoramento dos parâmetros eletroquímicos.

## **4.1 VARIÁVEIS DO EXPERIMENTO**

Com a finalidade de atingir os objetivos do trabalho, as variáveis estudadas neste programa experimental foram subdivididas e descritas nos subitens a seguir:

### **4.1.1 Tipo/Teor de Adição Mineral**

O tipo de adição mineral, empregada no concreto em misturas binárias e utilizada em substituição parcial ao cimento Portland, com teores em massa, foi uma variável ao que se propõe estudar. Assim, foram pesquisados, além da situação de referência (sem adições), nomeada de (R), os sistemas com cinza volante (V) no teor de 25%, sílica ativa (S) no teor de 10% e metacaulim (M) nos teores de 10%, 20% e 30%, totalizando seis situações.

A definição do teor de substituição parcial de adição ao cimento (em massa) foi efetuada com base em pesquisa bibliográfica e também com base nos estudos experimentais efetuadas na primeira etapa da pesquisa por Castro (2003) e Ferreira (2003).

Optou-se por duas adições de alta reatividade (sílica ativa e metacaulim) que apresentaram os melhores desempenhos e, por uma adição com baixo desempenho (cinza volante), conforme resultados obtidos na primeira etapa da pesquisa. Salienta-se que os estudos de caracterização desses concretos (resistência à compressão, módulo de deformação, absorção de água por imersão e por capilaridade, ensaios de profundidade de carbonatação e penetrabilidade de cloretos) foram efetuados por Ferreira (2003), Braun (2003), Castro (2003) e Couto (2003).

### **4.1.2 Composição do Concreto pela Variação da Relação Água/Aglomerante**

Foram confeccionados concretos com relação água/aglomerante ( $a/ag$ ) 0,40 e 0,55, observando as recomendações da Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 6118 (ABNT, 2003) que estabelece correspondência entre a qualidade do concreto pela variação da relação  $a/ag$ , em massa e o grau de agressividade do ambiente e a espessura mínima de cobrimento.

Assim como as adições minerais, a variação da relação  $a/ag$  propicia concretos com diferentes propriedades relacionadas à sua durabilidade, tais como: permeabilidade a líquidos e gases, resistividade elétrica, absorção de água, dentre outras.

Esta variável não sofreu alteração quando comparada com a primeira etapa da pesquisa, permitindo desta forma, um melhor entendimento do desempenho dos concretos frente à corrosão das armaduras.

#### **4.1.3 Classe de Resistência**

A classe de resistência dos concretos não foi uma variável pré-definida no planejamento do programa experimental e sim concebida e calculada com os resultados obtidos de resistência à compressão aos 91 dias de idade dos concretos. Optou-se por apresentá-la posto à importância de estudar o desempenho de concretos de diferentes classes de resistência no que tange à corrosão nas armaduras. Assim, com a escolha do desvio padrão ( $S_d$ ) de valor igual a 4 MPa e, a partir do  $f_{ck}$ , classificou-se os concretos estudados de acordo com a NBR 8953 (ABNT, 1992). Os grupos ou classes de resistência foram 20 MPa, 25MPa, 30 MPa, 35 MPa e 40 MPa, designados na presente dissertação de C20, C25, C30, C35 e C40 respectivamente.

Os concretos foram submetidos à ação agressiva dos íons cloreto, o qual foi responsável pela indução da corrosão eletroquímica.

Foram geradas 12 situações de estudo na presente dissertação. Com o intuito de tornar simples e objetiva a identificação dessas situações, criou-se uma codificação que informasse ao leitor, de forma abreviada, as principais características dos concretos. Esta codificação é apresentada na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1 – Codificação adotada no programa experimental.**

<b>Concreto</b>	<b>Relação a/ag</b>	<b>Código</b>
Referência	0,40	R4
	0,55	R5
Cinza Volante no teor de 25% (em massa)	0,40	V4
	0,55	V5
Sílica no teor de 10% (em massa)	0,40	S4
	0,55	S5
Metacaulim no teor de 10% (em massa)	0,40	M4_10%
	0,55	M5_10%
Metacaulim no teor de 20% (em massa)	0,40	M4_20%
	0,55	M5_20%
Metacaulim no teor de 30% (em massa)	0,40	M4_30%
	0,55	M5_30%

## 4.2 APRESENTAÇÃO GERAL DO EXPERIMENTO

A Figura 4.1 apresenta o fluxograma das variáveis contempladas no programa experimental.

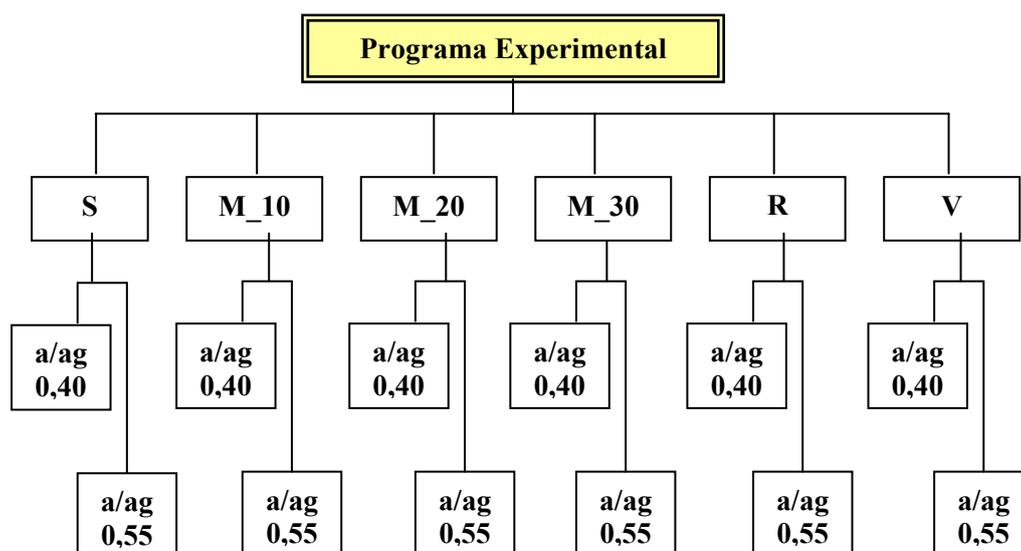


Figura 4.1 – Fluxograma das variáveis do programa experimental.

### 4.3 MATERIAIS

Os ensaios de caracterização de todos os materiais utilizados na pesquisa foram realizados no Departamento de Apoio e Controle Técnico – Furnas Centrais Elétricas S.A.

Os concretos utilizados neste trabalho foram confeccionados com cimento, agregado miúdo e graúdo, adições minerais, aditivos e aço. A descrição desses materiais, bem como suas principais características é apresentada nos subitens a seguir.

#### 4.3.1 Cimento

O cimento empregado na produção dos concretos foi o cimento Portland composto CP II-F 32, cuja caracterização química, física e mecânica está apresentada na Tabela 4.2. A Figura 4.2 exibe o espectro da difração de raios X do cimento Portland.

Tabela 4.2 – Características químicas, físicas e mecânicas do cimento Portland.

Característica ou propriedade determinada	Método de ensaio	Resultado	Exigência segundo NBR 11578 (ABNT, 1991)	
Massa Específica (kg/dm <sup>3</sup> )	NBR NM 23/1998	3,04	N.E*	
Finura	resíduo na peneira 200 (%)	NBR 11579/1991	1,7	≤ 12
	resíduo na peneira 325 (%)	NBR 12826/1993	12,1	N.E
	área específica Blaine (m <sup>2</sup> /Kg)	NBR NM 76/1998	386	≥ 260
	Tempos de Pega			
	início de pega (h)		2h	≥ 1 h
	fim de pega (h)	NBR 11581/1991	3h	≤ 10 h
Água de Consistência - Pasta (%)	NBR 11580/1991	27,0	N.E	
Resistência à compressão	3 dias		21,2	≥ 10
	7 dias		29,5	≥ 20
	28 dias	NBR 7215/1996	35,8	≥ 32 e ≤ 49
Componentes químicos (%)	perda ao fogo	NBR 5743/1989	6,57	≤ 6,5
	resíduo insolúvel	NBR 5744/1989	1,76	≤ 2,5
	dióxido de silício (SiO <sub>2</sub> )		18,74	N.E
	óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		5,07	N.E
	óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		3,25	N.E
	óxido de cálcio (CaO)		60,72	N.E
	óxido de cálcio livre (CaO)		1,70	N.E
	óxido de magnésio (MgO)		0,72	≤ 6,5
	anidrido sulfúrico (SO <sub>3</sub> )	Procedimento FURNAS n. 1.02.135 <sup>(2)</sup>	3,06	≤ 4,0
	sulfato de cálcio (CaSO <sub>4</sub> )		5,20	N.E
Álcalis totais (%)	óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)	Procedimento FURNAS n. 1.02.31 <sup>(2)</sup>	0,32	N.E
	óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)		0,51	N.E
	equivalente alcalino em Na <sub>2</sub> O		0,65	N.E

\* N.E. = Não especificado.

(1) Fluorescência por raios X.

(2) Espectrofotometria de absorção atômica.

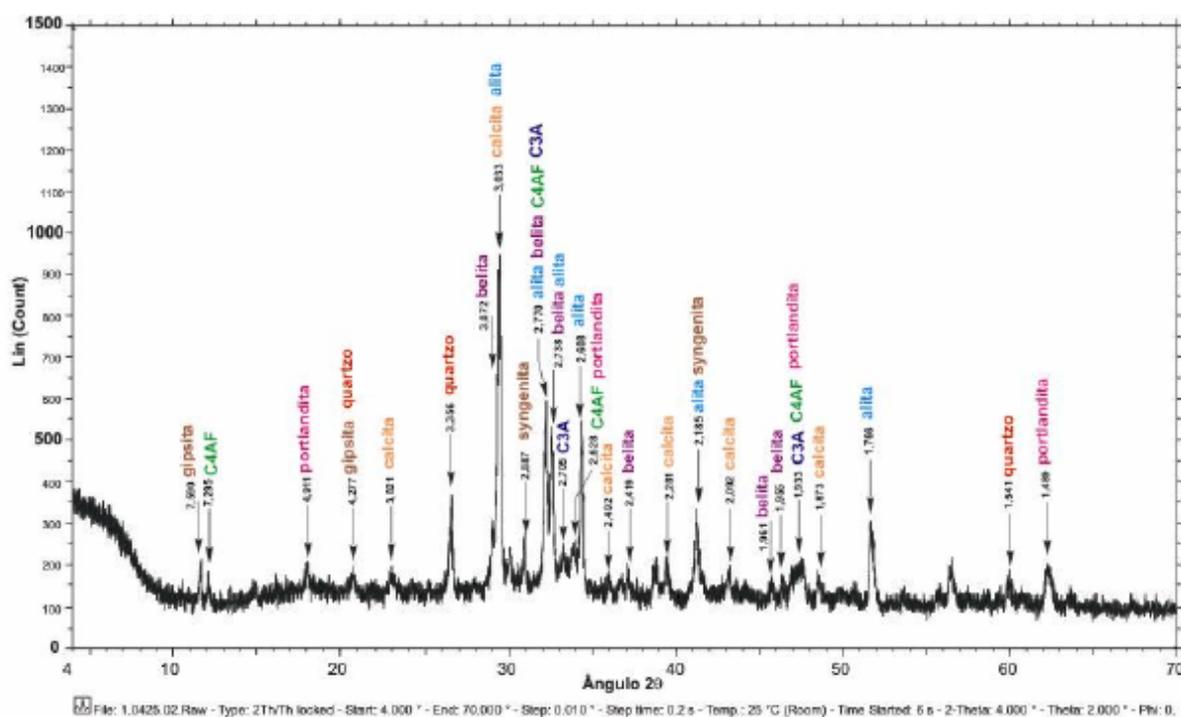


Figura 4.2 – Difratograma do cimento Portland CP II-F 32.

### 4.3.2 Adições minerais

Nesta pesquisa experimental, as adições minerais empregadas foram: a cinza volante (V), a sílica ativa (S) e o metacaulim (M). Cabe salientar, que as adições minerais empregadas foram fornecidas por empresas que comercializam esses materiais, as quais não forneceram informações adicionais sobre a sua forma de obtenção ou processamento, tais como, tempo e temperatura de calcinação, tempo de moagem, etc.

A Tabela 4.3 exhibe as principais características químicas e físicas destes materiais. Os espectros da difração de raios X estão apresentados nas Figuras 4.3, 4.4 e 4.5.

**Tabela 4.3 – Principais características das adições minerais utilizadas.**

Característica ou propriedade determinada	Método de ensaio	Cinza volante	Sílica ativa	Metacaulim	Exigência segundo a NBR 13956 (ABNT, 1997) <sup>(4)</sup>	Exigência segundo a NBR 12653 (ABNT, 1992) <sup>(5)</sup>	
Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	NBR NM 23/1998	2,33	2,20	2,54	N.E*	N.E*	
Área específica BET (m <sup>2</sup> /kg)	-	1500	15 990	21 250	≥ 15 000 e ≤ 30 000	N.E*	
Componentes Químicos (%)	perda ao fogo	NBR 5743/1989	1,23	4,12	4,29	≤ 6,00	≤ 6,00 <sup>(6)</sup>
	dióxido de silício (SiO <sub>2</sub> )	Procedimento FURNAS n. 1.02.135 <sup>(1)</sup>	61,99	91,05	46,7	≥ 85,00	N.E
	óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		23,30	0,17	41,41	N.E	N.E
	óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		5,40	0,30	3,49	N.E	N.E
	óxido de cálcio total (CaO)		2,03	0,77	0,53	N.E	N.E
	óxido de magnésio (MgO)		1,91	0,75	0,53	N.E	N.E
	anidrido sulfúrico (SO <sub>3</sub> )		-	0,52	0,61	N.E	≤ 5,00 <sup>(7)</sup>
	óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)	Procedimento FURNAS n. 1.02.31 <sup>(2)</sup>	0,43	0,21	0,00	N.E	N.E
	óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)		3,01	0,27	0,25	N.E	N.E
	equivalente alcalino em Na <sub>2</sub> O		2,41	0,39	0,16	≤ 1,50	N.E
SiO <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	-	90,69	91,52	91,60	N.E*	≥ 70,00	
Índice de atividade pozzolânica <sup>(3)</sup> com o cimento (%)	NBR 5752/1992	126	110	118	N.E*	N.E*	

\* N.E. = Não especificado.

Obs.: Essas adições minerais são tratadas como produtos comerciais, portanto não possuem informações sobre os processos de queima e moagem.

(1) Fluorescência por raios X.

(2) Espectrofotometria de absorção atômica.

(3) Para misturas contendo as adições minerais nos mesmos teores utilizados na produção dos concretos.

(4) NBR 13956 (ABNT, 1997) - Sílica ativa para uso em cimento Portland, concreto, argamassa e pasta de cimento Portland - Especificação.

(5) NBR 12653 (ABNT, 1992) - Materiais pozzolânicos: Especificações. Essa norma é utilizada para as demais adições minerais.

(6) Para materiais de classe N (no caso, metacaulim), a exigência do parâmetro perda ao fogo passa para valores ≤ 10,00%.

(7) Para materiais de classe N (no caso, metacaulim), a exigência do parâmetro anidrido sulfúrico passa para valores ≤ 4,00%.

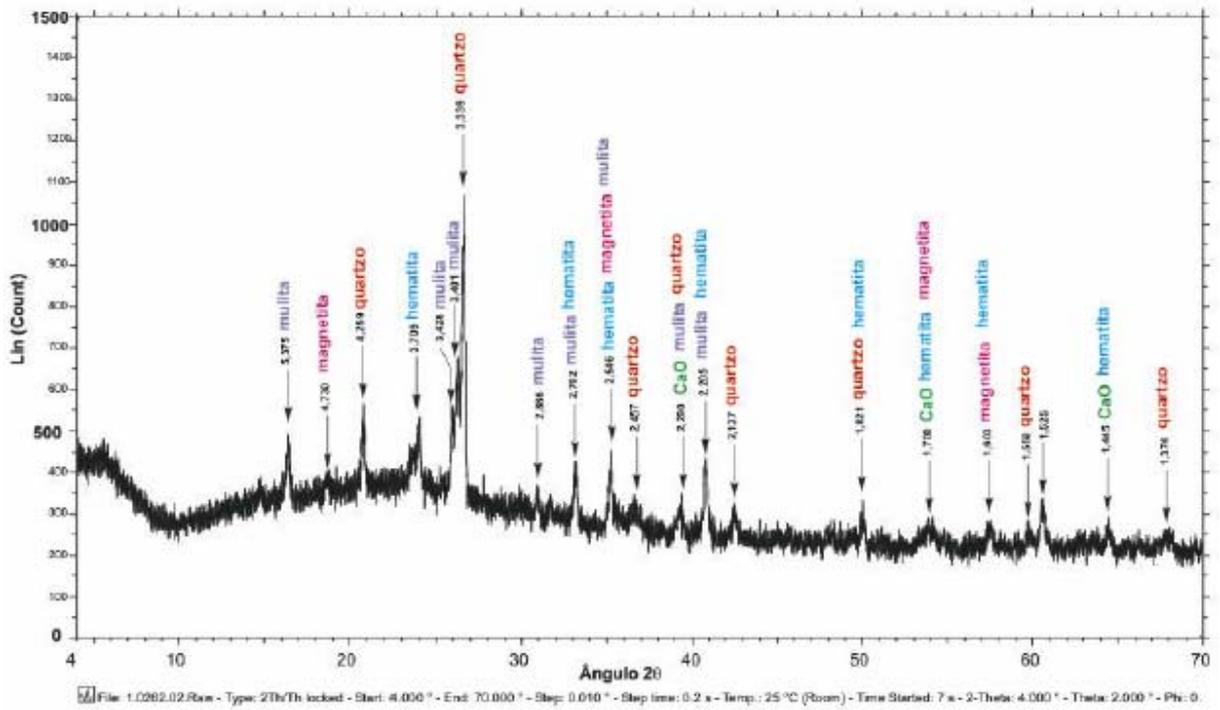


Figura 4.3 – Difratoograma da cinza volante.

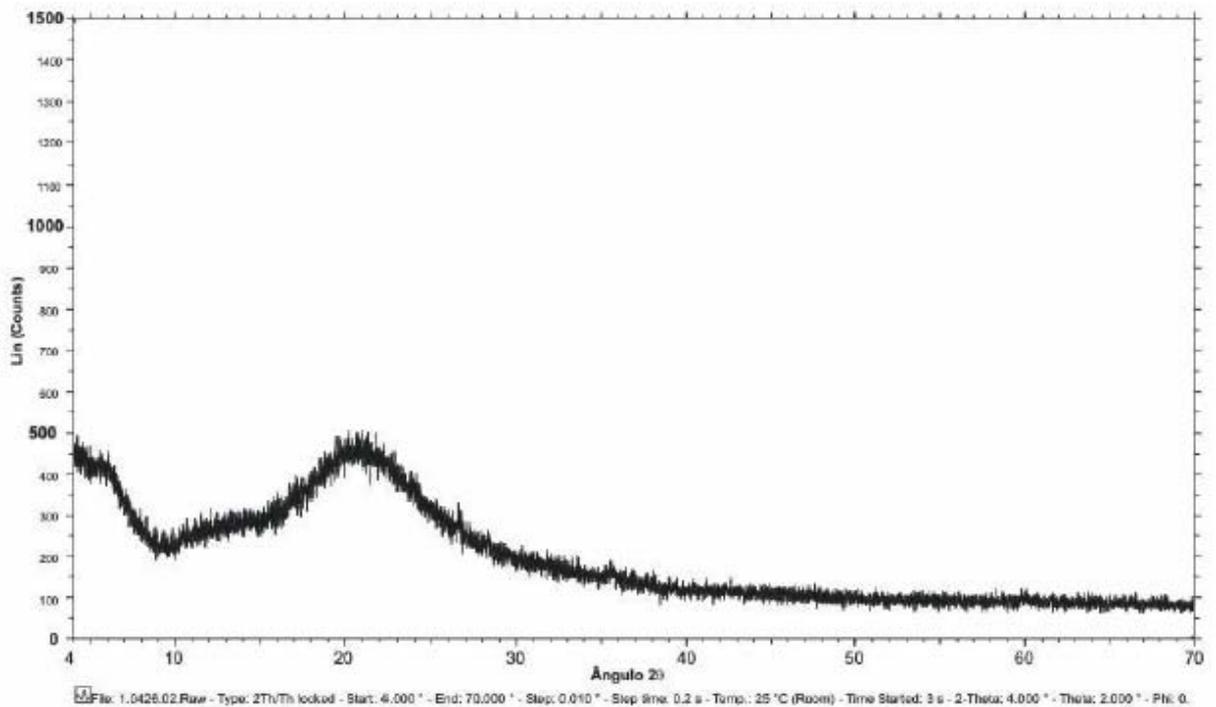


Figura 4.4 – Difratoograma da sílica ativa.

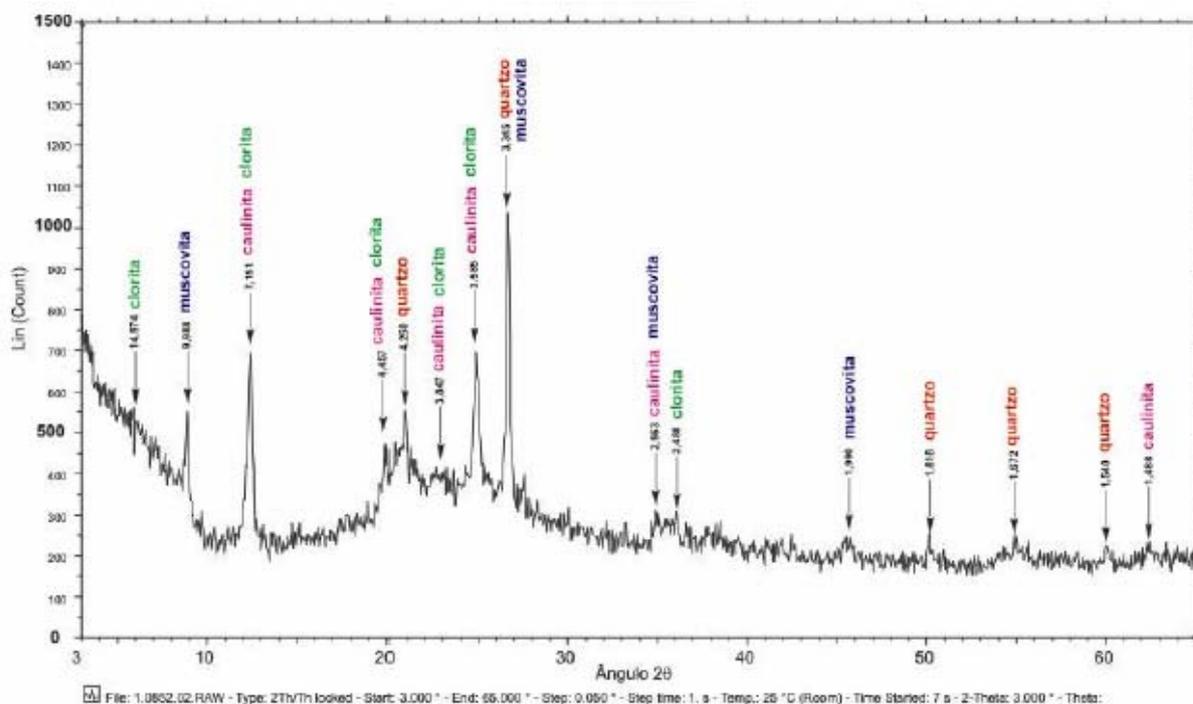


Figura 4.5 – Difratoograma do metacaulim.

### 4.3.3 Agregados

O agregado gráudo utilizado na produção dos concretos foi à pedra britada de rocha metamórfica micaxisto, classificada como número 1 de acordo com a norma brasileira de especificação NBR 7211 (ABNT, 1983) e, de acordo com essa norma revisada recentemente (ABNT, 2005), a brita empregada se classifica como zona granulométrica 9,5/25. O agregado gráudo definido para a pesquisa foi adquirido na região e teve única procedência. Sua caracterização básica é apresentada na Tabela 4.4.

**Tabela 4.4 – Caracterização do agregado graúdo.**

Ensaio realizado	Método	Brita 19 mm	Exigência segundo a NBR 7211 (ABNT, 1983)	Exigência segundo a NBR 7211 (ABNT, 2005)
Absorção de água (%)	NBR 9937/1987	0,60	N.E*	N.E*
Índice de forma (c/e)	NBR 7809/1983	2,40	N.E*	N.E*
Módulo de finura	NBR 7217/1987	6,95	N.E*	N.E*
Massa específica S.S.S. (kg/dm <sup>3</sup> )	NBR 9937/1987	2,75	N.E*	N.E*
Massa unitária - estado solto (kg/dm <sup>3</sup> )	NBR 7251/1982	1,48	N.E*	N.E*
Teor de argila e materiais friáveis (%)	NBR 7218/1987	0,00	N.E*	3
Teor de material pulverulento (%)	NBR 7219/1987	1,23	≤ 1,0	≤ 1

\* N.E. = Não especificado.

Como agregado miúdo, utilizou-se areia natural quartzosa, classificada como fina de acordo com a norma brasileira de especificação NBR 7211 (ABNT, 1983) e, de acordo com os critérios da NBR 7211 (ABNT, 2005), o material se insere na zona utilizável inferior de distribuição granulométrica. O agregado miúdo definido para a pesquisa também foi adquirido na região e teve única procedência. Sua caracterização básica é apresentada na Tabela 4.5.

**Tabela 4.5 – Caracterização do agregado miúdo.**

Ensaio realizado	Método	Areia natural	Exigência segundo a NBR 7211 (ABNT, 1983)	Exigência segundo a NBR 7211 (ABNT, 2005)
Absorção de água (%)	NBR NM 30/2001	0,50	N.E*	N.E*
Módulo de finura	NBR 7217/1987	2,13	N.E*	N.E*
Massa específica - Chapman (kg/dm <sup>3</sup> )	NBR 9776/1987	2,64	N.E*	N.E*
Massa unitária - estado solto (kg/dm <sup>3</sup> )	NBR 7251/1982	1,49	N.E*	N.E*
Teor de argila e materiais friáveis (%)	NBR 7218/1987	0,26	≤ 1,5	≤ 3,0
Teor de material pulverulento (%)	NBR 7219/1987	2,62	≤ 5,0	≤ 5,0
Impurezas orgânicas (+/- clara)	NBR NM 49/2001	mais clara	não pode ser mais escura que a solução padrão	10%

\* N.E. = Não especificado.

As análises petrográficas do agregado miúdo e do agregado graúdo, bem como suas composições granulométricas estão apresentadas no Anexo A.

#### 4.3.4 Aditivos Químicos

Foram empregados dois aditivos aos concretos da pesquisa, um primeiro aditivo plastificante com ação retardadora de pega (denominação comercial Plastiment VZ, da empresa Sika), para ajustar o abatimento requerido de  $(80 \pm 10 \text{ mm})$  e aumentar o tempo disponível para moldagem dos corpos-de-prova, e um segundo aditivo superplastificante (denominação comercial Sikament 300) nos casos em que a utilização apenas do plastificante não foi suficiente para garantir a trabalhabilidade especificada, tendo seus tipos e teores definidos no estudo de dosagem. As principais características dos aditivos estão apresentadas a seguir na Tabela 4.6.

**Tabela 4.6 – Caracterização dos aditivos químicos.**

Tipo de aditivo	Base	Massa específica	Teor de sólidos	Capacidade de redução de água	Nome comercial
Plastificante com ação retardadora de pega	compostos carboxílicos	0,50	26,0%	até 10%	Plastiment VZ
Superplastificante	melamina	2,13	37,5%	até 25%	Sikament 300

Obs.: informações obtidas junto ao departamento de assistência técnica do fabricante.

#### 4.2.5 Aço

Nesta pesquisa fez-se uso de aço carbono CA-50 com diâmetro nominal de 10 mm, adquiridos de dois fabricantes diferentes, e aço carbono CA-60 com 5 mm de diâmetro nominal.

#### 4.4 CONCRETOS ESTUDADOS

Os concretos estudados tiveram o proporcionamento dos materiais definido em estudo de dosagem, no qual se adotou o método utilizado por Furnas Centrais Elétricas S.A., que se fundamenta no desenvolvimento experimental de diversas combinações entre os agregados (alterando o módulo de finura da mistura), de forma a minimizar o consumo de cimento sem prejuízo da resistência mecânica e da trabalhabilidade do concreto.

Durante o desenvolvimento da dosagem, as misturas preliminares resultam em gráficos que relacionam o módulo de finura com o consumo de água ou resistência à compressão e relação água/cimento com resistência à compressão ou consumo de cimento.

Por fim, fazem-se alguns ajustes no teor de agregado miúdo. Por meio desses gráficos, obtém-se o traço desejado. Este método é empregado usualmente por Furnas Centrais Elétricas S.A no desenvolvimento dos mais variados concretos.

O estudo de dosagem resultou em dois traços de concretos de referência e, com base neles, desenvolveu-se os traços dos concretos com adições. Para os concretos com adições minerais, fez-se a substituição em massa de cimento (conforme seus teores) e para que a mistura permanecesse sem alteração de volume, devido à diferença entre as massas específicas dos aglomerantes, efetuou-se o ajuste da variação de volume por meio da alteração da quantidade dos agregados (componentes inertes do concreto), mantendo-se a proporcionalidade entre os agregados.

Desse modo, manteve-se a constância do volume da mistura e da massa de aglomerante em todos os concretos de uma mesma relação a/ag, resultando em alterações mínimas nos traços dos concretos.

Neste programa experimental os concretos apresentaram seis composições de aglomerantes (cinco com adições e uma de referência) e duas relações a/ag (0,40 e 0,55);

desta forma, foram estabelecidos doze traços de concreto para a moldagem dos corpos-de-prova, conforme apresentado na Tabela 4.7 e Tabela 4.8.

A consistência do concreto foi fixada por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone, de acordo com a NBR NM 67 (ABNT, 1998) no valor de  $(80 \pm 10)$  mm. Buscou-se, desta forma, garantir um volume de pasta de cimento que proporcionasse trabalhabilidade adequada aos procedimentos de moldagem dos corpos-de-prova.

**Tabela 4.7 – Dosagem dos concretos de relação água/aglomerante 0,40.**

Tipo de adição		Cinza Volante	Sílica ativa	Metacaulim			Concreto referência
Teor de substituição parcial do cimento em massa (%)		25	10	10	20	30	0
Relação água/aglomerante real <sup>(1)</sup>		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Traço em massa de aglomerante (cimento:adição:areia:pedra)		0,90:0,10:0,77:2,07	0,75:0,25:0,77:2,05	0,90:0,10:0,78:2,08	0,80:0,20:0,77:2,07	0,70:0,30:0,77:2,06	1,0:0,00:0,78:2,09
Massa de aglomerante (kg/m <sup>3</sup> ) (cimento + adição)		552	552	552	552	552	552
Traço em massa de cimento (cimento:adição:areia:pedra)		1,0:0,11:0,86:2,30	1,0:0,33:1,02:2,73	1,0:0,11:0,86:2,31	1,0:0,25:0,97:2,59	1,0:0,43:1,10:2,94	1,0:0,0:0,78:2,09
Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )		496,8	414	496,8	441,6	386,4	552
Teor de argamassa <sup>(2)</sup> em massa- $\alpha$ (%)		46	46	46	46	46	46
Teor de aditivo químico em relação à massa de aglomerante (%)	platicificante	0,15	0,15	0,16	0,15	0,15	0,15
	superplastificante	0,85	0,05	0	0,45	1,351	0

(1) Valor da relação água/aglomerante obtida após a correção da quantidade de água presente nos agregados e nos aditivos químicos.

(2) Onde  $\alpha = (c+ad+a) \times 100/(c+ad+m)$ , sendo c= cimento, ad= adição, a= areia, p= pedra, m= a+p

**Tabela 4.8 – Dosagem dos concretos de relação água/aglomerante 0,55.**

Tipo de adição	Cinza Volante	Sílica ativa	Metacaulim			Concreto referência
Teor de substituição - parcial do cimento em massa de cimento (%)	25	10	10	20	30	0
Relação água/aglomerante real <sup>(1)</sup>	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
Traço em massa de aglomerante (cimento:adição:areia:pedra)	0,75:0,25:1,68:3,11	0,90:0,10:1,69:3,13	0,90:0,10:1,69:3,13	0,80:0,20:1,69:3,13	0,70:0,30:1,68:3,11	1,0:0,00:1,70:3,15
Massa de aglomerante (kg/m <sup>3</sup> ) (cimento + adição)	368	368	368	368	368	368
Traço em massa de cimento (cimento:adição:areia:pedra)	1,0:0,33:2,24:4,15	1,0:0,11:1,88:3,47	1,0:0,11:1,88:3,47	1,0:0,25:2,11:3,91	1,0:0,43:2,40:4,45	1,0:0,0:1,70:3,15
Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	276	331,2	331,2	257,6	294,4	368
Teor de argamassa <sup>(2)</sup> em massa- $\alpha$ (%)	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
Teor de aditivo químico em relação à massa de aglomerante (%)	platificante	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
	superplastificante	0	0	0	0,00	0,60

(1) Valor da relação água/aglomerante obtida após a correção da quantidade de água presente nos agregados e nos aditivos químicos.

(2) Onde  $\alpha = (c+ad+a) \times 100 / (c+ad+m)$ , sendo c= cimento, ad= adição, a= areia, p= pedra, m= a+p

#### 4.4.1 Caracterização do Concreto Fresco

Os concretos no estado fresco foram caracterizados por meio das determinações da consistência pelo abatimento do tronco de cone, segundo a NBR NM 67 (ABNT, 1998), da massa específica, de acordo com a NBR 9833 (ABNT, 1987); e do teor de ar, conforme a NBR NM 47 (ABNT, 2002). A Figura ilustra a realização desses ensaios.



4.6 - Ensaio realizado no concreto fresco: (a) abatimento do tronco de cone, (b) massa específica e (c) teor de ar.

Os resultados médios desta caracterização estão apresentados na Tabela 4.9 e 4.10 e os resultados individuais estão constantes no mostrados no anexo B.

**Tabela 4.9 – Caracterização dos concretos de relação água/aglomerante 0,40 no estado fresco.**

Tipo de adição		Cinza Volante	Sílica ativa	Metacaulim			Concreto de referência
Teor de substituição parcial do cimento em massa (%)		25	10	10	20	30	0
Relação água/aglomerante real		0,40	0,40	0,4	0,40	0,40	0,40
Consistência pelo abatimento do tronco de cone – NBR NM67 (ABNT, 1998)	valor requerido (mm)	80±10	80±10	80±10	80±10	80±10	80±10
	valor medido (mm)	95	110	70	60	70	85
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> ) - NBR 9833 (ABNT, 1987)		2360,20	2374,30	2374,30	2361,60	2361,60	2405,00
Teor de ar (%) - NBR NM 47 (ANBT, 2002)		1,40	1,00	1,30	1,30	1,20	1,40

**Tabela 4.10 – Caracterização dos concretos de relação água/aglomerante 0,55 no estado fresco.**

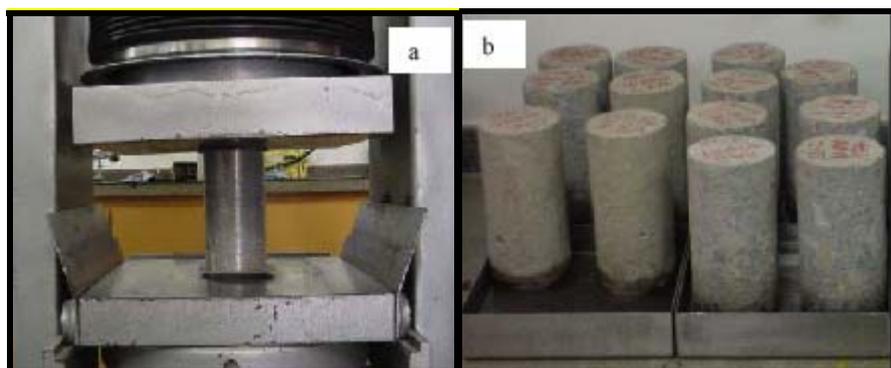
Tipo de adição		Cinza Volante	Sílica ativa	Metacaulim			Concreto de referência
Teor de substituição - parcial do cimento em massa de cimento (%)		25	10	10	20	30	0
Relação água/aglomerante real		0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
Consistência pelo abatimento do tronco de cone NBR NM67/1998	valor requerido (mm)	80±10	80±10	80±11	80±11	80±11	80±10
	valor medido (mm)	110	70	90	85	80	75
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> ) - NBR 9833 (ABNT, 1987)		2401,50	2328,20	2391,10	2376,90	2376,30	2328,00
Teor de ar (%) - NBR NM 47		0,80	1,40	1,40	1,40	1,30	1,60

#### 4.4.2 Caracterização do Concreto Endurecido

A caracterização do concreto endurecido foi realizada utilizando-se de corpos-de-prova cilíndricos (10 cm x 20 cm), os quais foram destinados apenas ao procedimento de cura úmida (28 dias em câmara úmida, com umidade relativa maior que 90%).

Foram empregados os seguintes métodos para caracterização do concreto:

- ensaio de resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos, seguindo as prescrições da NBR 5739 (ABNT, 1994), para as idades de 7, 28 e 91 dias (Figura 4.7);
- determinação da absorção de água por capilaridade, seguindo as prescrições da NBR 9778 (ABNT, 2005), para a idade de 28 dias (Figura 4.7).



**Figura 4.7 – Ensaio no concreto endurecido: (a) ensaio de resistência à compressão e (b) ensaio de absorção de água por capilaridade.**

Quanto ao tamanho da amostra, foram utilizados 3 corpos-de-prova por idade e por tipo de concreto para os testes de resistência a compressão, totalizando assim 144 corpos-de-prova cilíndricos, considerando as 12 situações individuais.

Na Tabela 4.11 estão apresentados os resultados médios da resistência à compressão nas idades de 7, 28 e 91 dias, absorção de água por imersão com 28 e 91 dias, massa específica e índice de vazios nas idades de 91 dias. Considerando-se que o desvio padrão adotado para o cálculo de  $f_{ck}$  foi de 4, obteve-se a classe de resistência dos concretos

considerando a idade de 91 dias, conforme comentado em no item 4.1 alínea “c” e apresentado na Tabela 4.12.

**Tabela 4.11 – Caracterização dos concretos no estado endurecido.**

Concreto	Teor de adição (%)	a/ag	Resistência à compressão média (MPa)			Classe de resistência	Absorção de água por imersão (%)	Índice de vazios (%)	massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )
			7 dias	28 dias	91 dias				
Referência	0	0,40	27,17	36,20	40,87	C35	6,29	12,14	2,6
		0,55	21,57	29,30	30,53	C25	5,99	12,48	2,6
Cinza volante	25	0,40	23,60	32,60	44,47	C40	3,63	13,22	2,6
		0,55	13,33	21,60	26,87	C20	4,93	12,05	2,6
Sílica ativa	10	0,40	28,83	44,00	47,00	C40	5,72	9,88	2,5
		0,55	23,23	35,70	41,57	C35	5,40	9,56	2,6
Metacaulim	10	0,40	37,37	38,30	46,43	C40	3,80	15,08	2,7
		0,55	24,33	27,07	34,97	C30	4,70	13,11	2,7
	20	0,40	35,53	42,60	46,10	C40	4,65	16,42	2,7
		0,55	27,90	33,23	38,63	C30	4,98	13,81	2,7
	30	0,40	35,37	41,83	45,93	C40	3,50	13,73	2,6
		0,55	26,60	31,70	39,20	C35	4,64	12,96	2,6

**Tabela 4.12 – Resumo das Classes de Resistência.**

Grupos de Classes de Resistência à Compressão				
C20	C25	C30	C35	C40
V5	R5	M5_10	R4	S4
		M5_20	S5	V4
			M5_30	M4_10
				M4_20
				M4_30

#### 4.5 CORPOS-DE-PROVA

Para os estudos de ataque por cloretos foram moldados corpos-de-prova cúbicos com arestas de 15 cm, armados com quatro barras longitudinais envolvidas por dois estribos. A quantidade de barras desses corpos-de-prova foi concebida para que as medidas eletroquímicas pudessem ser representadas por 4 repetições e as dimensões foram otimizadas de forma a facilitar o manuseio do corpo-de-prova.

Como resultado desse processo de otimização, obteve-se que foi suficiente o emprego de um corpo-de-prova por situação, totalizando 12 corpos-de-prova para desenvolvimento do estudo de cloretos. Ressalta-se que cada corpo-de-prova representa, em decorrência da quantidade de barras, um tamanho de amostra igual a quatro ( $n = 4$ ), o que permitiu quatro leituras individuais por ensaio.

As barras longitudinais em aço carbono CA-50, de diâmetro nominal de 10 mm e comprimento de 15 cm, foram parcialmente inseridas no corpo-de-prova, de maneira que, desse total de 15 cm de extensão, 12,5 cm ficaram embutidos no concreto e 2,5 cm ficaram projetadas para fora do corpo de prova. As barras foram posicionadas garantindo-se o cobrimento de 2,5 cm nas faces laterais e na face inferior (base do corpo de prova). Tal cobrimento representa um dos valores nominais prescritos pela NBR 6118 (ABNT, 2003) para duas situações possíveis, a saber: para vigas e pilares considerando a classe de agressividade ambiental (CAA) igual a 1 ou para lajes considerando a CAA igual a 2. Como estribos, foram empregadas barras de aço carbono CA-60 com diâmetro nominal de 5 mm. A Figura 4.8 e a Figura 4.9 apresentam o modelo descrito do corpo-de-prova.

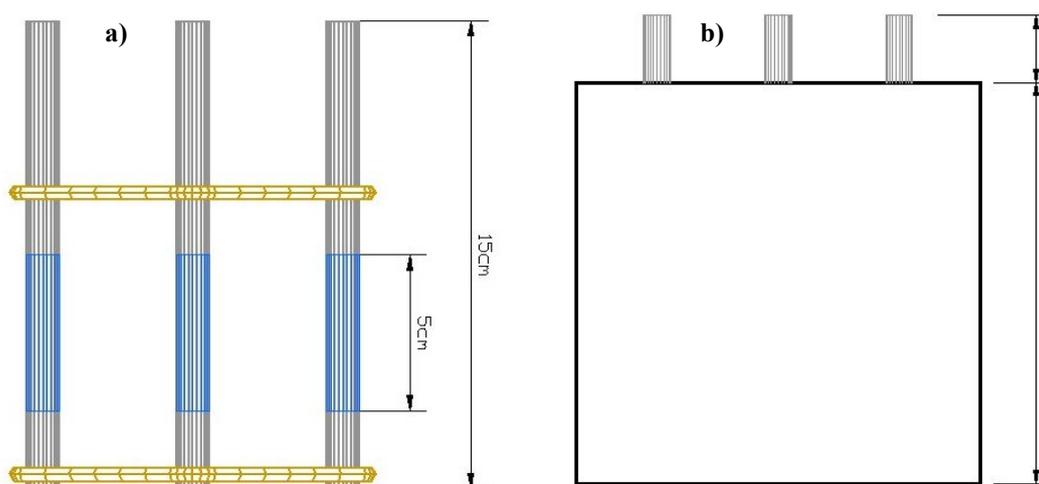


Figura 4.8 – Detalhamento do corpo-de-prova: (a) armaduras e (b) vista lateral.

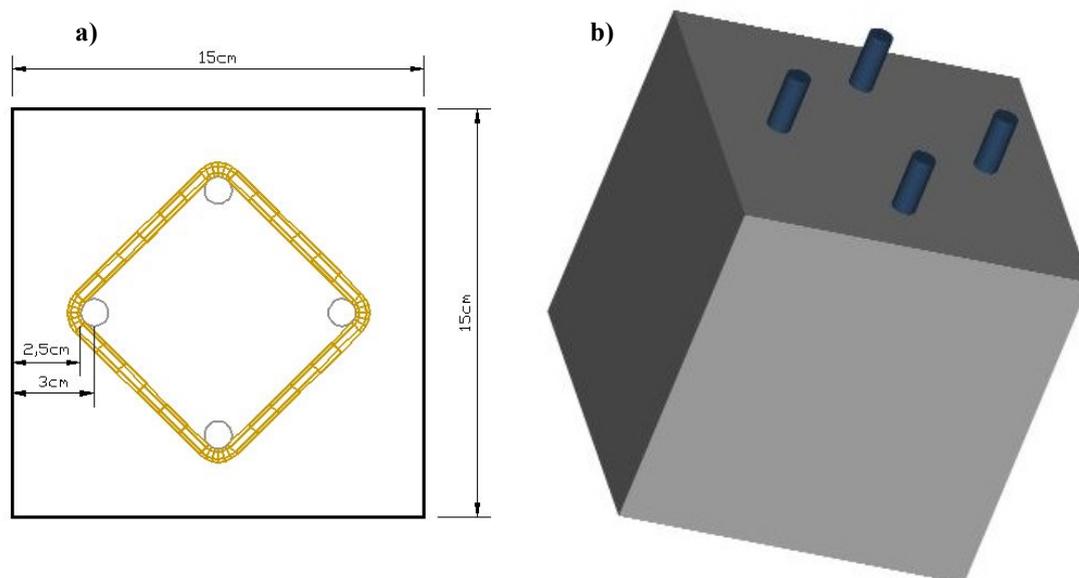


Figura 4.9 – Detalhamento do corpo-de-prova: (a) vista em planta e (b) aspecto final do corpo-de-prova após a desmoldagem.

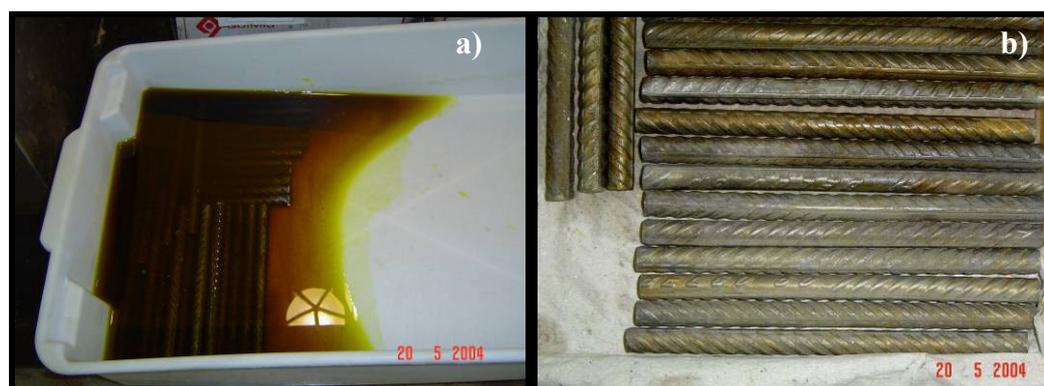
Além desses protótipos cúbicos foram moldados cilindros de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura utilizados nos ensaios de caracterização dos concretos.

A seguir, são descritos os procedimentos de preparação das barras de aço e, na seqüência, os detalhes da confecção das fôrmas.

#### 4.5.1 Preparação das Barras de Aço

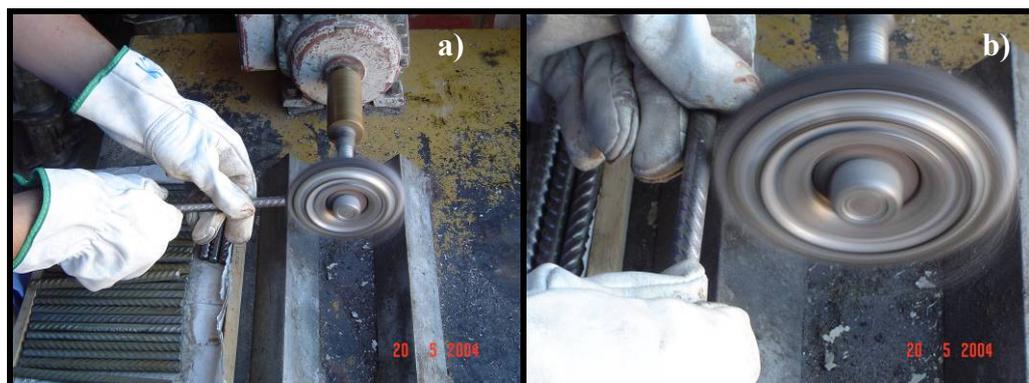
Os vergalhões foram cortados com disco de corte em pequenas barras de 15 cm de comprimento e o acabamento das extremidades foi realizado por meio da passagem das pontas irregulares em esmeril sob alta rotação.

Com objetivo de padronizar as condições superficiais das barras de aço, efetuou-se uma limpeza química por meio de soluções básicas (hexametiltetramina). Entretanto, esse procedimento não possibilitou a completa remoção dos óxidos visíveis das barras (Figura 4.10).



**Figura 4.10 – (a) Limpeza química das barras de aço e (b) aspecto final das barras após a limpeza química.**

Para que a condição de padronização da superfície das barras fosse atingida, foi necessário uma limpeza mecânica executada com escova circular acoplada em esmeril, conforme a Figura 4.11.



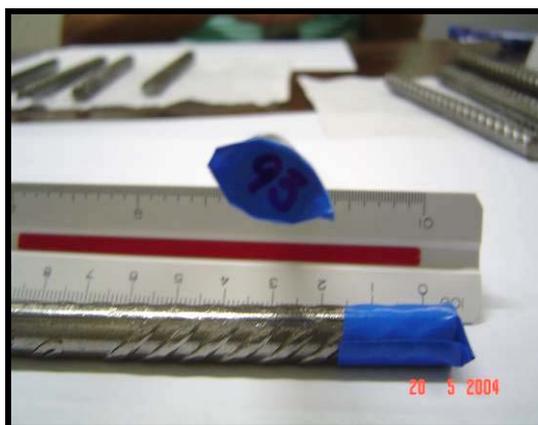
**Figura 4.11 – (a) Acabamento em pedra de esmeril da extremidade das barras de aço e (b) limpeza da superfície metálica ao longo da barra de aço por meio de escova de aço acoplada em aparelho rotacional.**

O aspecto geral das barras de aço antes da limpeza química e após a limpeza mecânica pode ser visto na Figura 4.12.



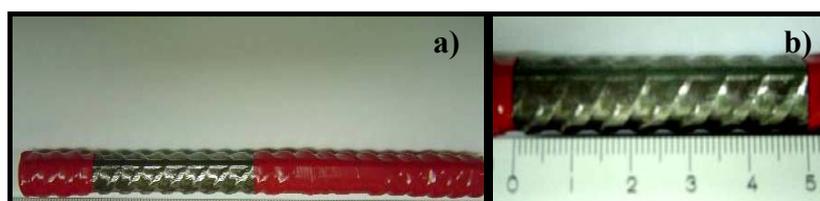
**Figura 4.12 – Barra de aço antes e após a limpeza mecânica com escova de aço, tendo-se óxidos visíveis.**

Após o procedimento de limpeza, as barras foram acondicionadas em embalagens plásticas hermeticamente fechadas para que as suas condições superficiais fossem mantidas e, em seguida, as barras foram identificadas com o envolvimento de uma fita isolante enumerada à extremidade da barra, conforme a Figura 4.13. Ao final, as barras foram novamente acondicionadas em sacos plásticos com fechamento hermético.



**Figura 4.13 – Identificação das barras de aço por meio de fita isolante enumerada.**

Para proteger parte das barras que se projetaram para o exterior do corpo-de-prova, assim como visando estabelecer no interior do concreto uma área metálica bem definida exposta à corrosão, as barras de aço foram envolvidas com fita isolante em toda a superfície metálica, exceto pela mencionada área exposta que ficou constituída na forma de um “vão central” de 5 cm (conforme a Figura 4.14). Assim, foi estabelecida uma área metálica rigorosamente definida, localizada no interior do corpo-de-prova.



**Figura 4.14 – (a) Extremidades da barra envolvidas com fita isolante (b) Detalhe “vão central” da barra (5 cm) exposto à ação corrosiva.**

Para proporcionar maior proteção mecânica e facilidade de manuseio, sem o receio de romper a proteção das barras, realizou-se sobre a região envolvida com fita isolante uma pintura com resina epóxi.

Após a desmoldagem dos corpos-de-prova, procedeu-se a retirada da proteção de epóxi e da fita isolante, em uma pequena região a 2,5 cm da extremidade exposta da barra.

Esta incisão visou permitir a passagem de um fio metálico (cabo de cobre de uso em instalações elétricas), cujo objetivo era propiciar a conexão elétrica nos ensaios eletroquímicos. Após a ligação do fio com a barra, esta era novamente envolvida com fita isolante.

O revestimento das barras com fita isolante deu-se pela sua elevada capacidade de envolver as nervuras da superfície metálica. A intenção em se deixar uma área metálica exposta rigidamente delimitada é, principalmente, em função da precisão das medidas eletroquímicas. Essa área lateral da barra estimada em  $12,88 \text{ cm}^2$  (considerando a extensão longitudinal de 5,0 cm, o diâmetro nominal de 10 mm e a presença das nervuras), constitui-se em um dado de entrada para as técnicas eletroquímicas que determinam a velocidade de corrosão, a saber, as técnicas de resistência de polarização e de impedância eletroquímica, como se apresenta no item 4.7.3.3.

#### **4.5.2 Preparação das Fôrmas**

Os protótipos foram moldados em fôrmas de madeira de chapa compensada plastificada de espessura 10 mm. As chapas da face de fundo foram perfuradas por broca metálica de diâmetro 12 mm, de modo a garantir o correto posicionamento das armaduras dentro do corpo-de-prova. As Figuras 4.15, 4.16 e 4.17 apresentam a fôrma utilizada.

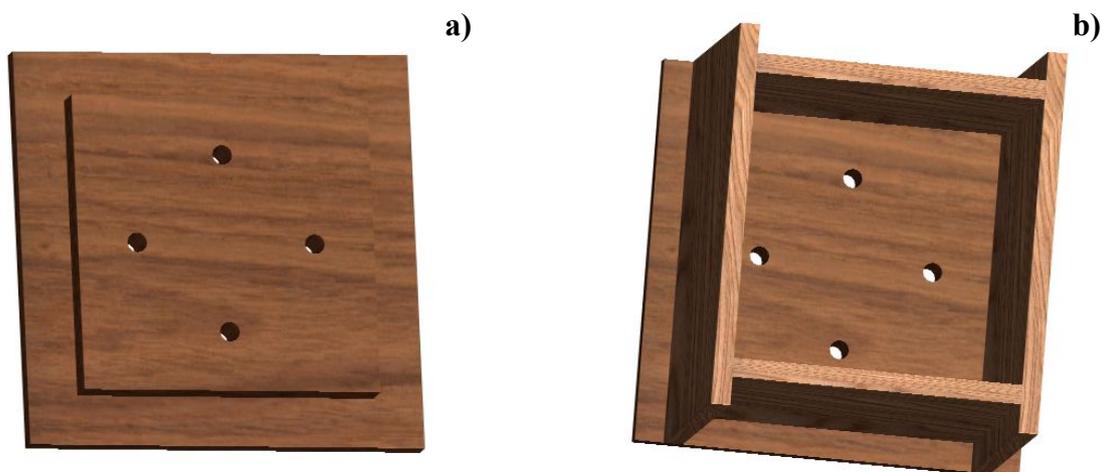


Figura 4.15 – Detalhamento das fôrmas: (a) placa de base perfurada e (b) aspecto final da fôrma.

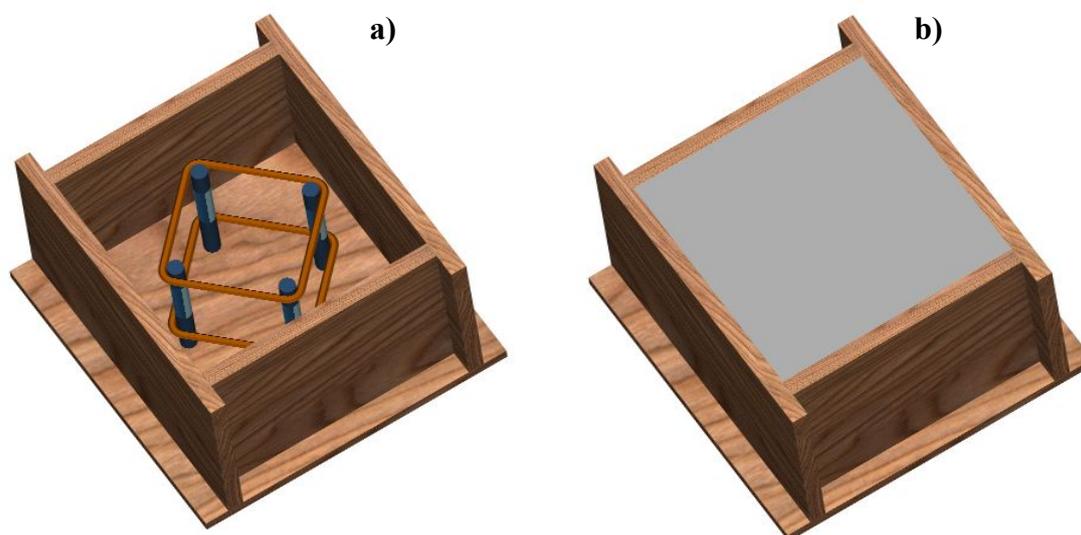
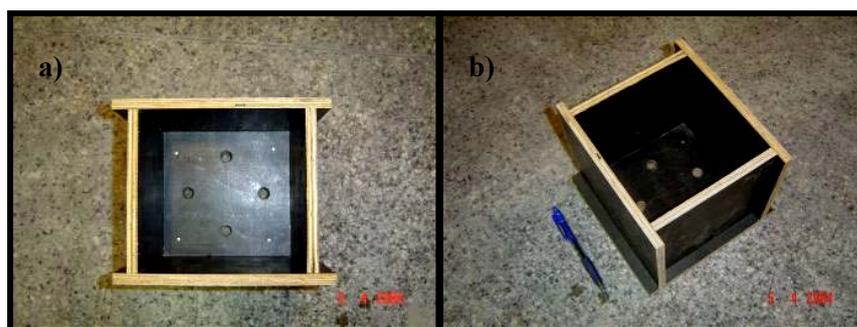


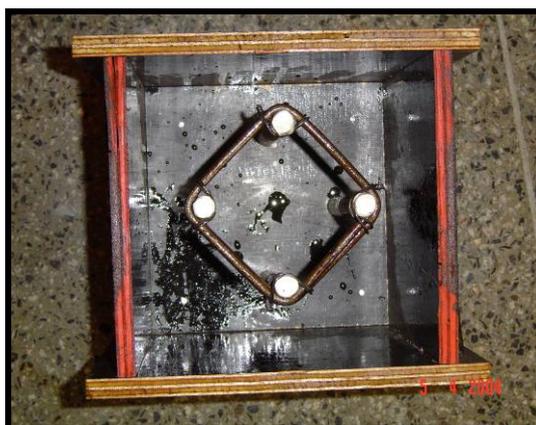
Figura 4.16 – Detalhamento das fôrmas: (a) montagem da fôrma com a armadura e (b) corpo-de-prova após concretagem.



**Figura 4.17 – (a) Fôrma dos corpos-de-prova destinados a estudos de corrosão: (a) vista em planta e (b) vista em perspectiva.**

Também foram utilizadas fôrmas cilíndricas metálicas de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, cujos corpos-de-prova destinaram-se aos ensaios de resistência à compressão e absorção de água por capilaridade.

Todas as fôrmas receberam uma película de desmoldante, de denominação comercial Desmol CD, num intervalo de tempo não inferior a uma hora antes da moldagem, conforme recomendação do fabricante. A Figura 4.18 ilustra a fôrma de madeira já com as barras posicionadas, pronta para receber o concreto.



**Figura 4.18 – Fôrma de madeira com as barras posicionadas, pronta para receber o concreto.**

#### **4.6 MOLDAGEM, ADENSAMENTO, CURA E ARMAZENAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA.**

A mistura do concreto foi realizada em betoneira pré-umedecida, com capacidade para 1,2 m<sup>3</sup>, em ambiente de laboratório com variação de temperatura entre 24° C e 27° C.

A seqüência de introdução dos materiais na betoneira e o tempo de amassamento do concreto seguiram os procedimentos recomendados pelo Laboratório de Concreto do Centro Tecnológico de Engenharia Civil de Furnas Centrais Elétricas S.A.. A seqüência de trabalho foi a seguinte:

- com betoneira parada, foram adicionados os agregados graúdo e miúdo e parte da água;
- após uma pequena movimentação, com a betoneira parada, foram introduzidos o cimento e a adição mineral;
- com a betoneira em movimento foram introduzidos o restante da água e os aditivos plastificante e superplastificante diluídos.

Após a introdução de todos os materiais na betoneira procedeu-se seu movimento por oito minutos ininterruptos. A descarga do concreto fresco foi feita diretamente ao chão (com superfície limpa, não absorvente e estanque) nas proximidades das fôrmas. O transporte foi realizado com carrinho de mão.

O concreto foi colocado nas fôrmas com auxílio de conchas (Figura 4.14) e o adensamento realizado por vibrador elétrico de imersão (vibrador agulha). Para os corpos-de-prova prismáticos (destinados aos ensaios de corrosão), o adensamento foi efetuado por meio de mesa vibratória (Figura 4.19).



**Figura 4.19 - Colocação do concreto nas fôrmas e adensamento; (a) vibração dos corpos-de-prova cilíndricos com vibrador de imersão e (b) vibração dos corpos-de-prova cúbicos por meio de mesa vibratória.**

No que se refere à concretagem dos corpos-de-prova, faz-se a ressalva de que as concretagens foram divididas em 3 grupos, a saber:

- primeiro grupo - composto por concretos de referência (relação água/aglomerante 0,40 e 0,55) e concretos com sílica-ativa (relação água/aglomerante 0,40 e 0,55), moldados em 05/04//2004;
- segundo grupo - composto por concretos com cinza volante (relação água/aglomerante 0,30 e 0,40) e concretos com metacaulim nos teores de 10%, 20% e 30% (relação água/aglomerante 0,40), moldados em 04/05//2004;
- terceiro grupo - composto por concretos com cinza volante (relação água/aglomerante 0,55) e concretos com metacaulim nos teores de 10%, 20% e 30% (relação água/aglomerante 0,55), moldados em 02/06//2004.

Após o término das moldagens, os corpos-de-prova de caracterização e os protótipos cúbicos destinados aos ensaios de corrosão das armaduras foram deixados por 36 horas em ambiente de laboratório, sendo devidamente recobertos com papel filme. Em seguida, eles foram desenformados e levados para a câmara úmida (temperatura de  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$  e umidade superior a 90%), onde permaneceram até a idade de 28 dias (exceto por alguns de caracterização, com ensaios aos 7 dias de idade). Aos 28 dias de idade, os corpos-de-prova

foram encaminhados ao local de armazenagem (Figura 4.18) até atingirem as idades de ensaio. Os corpos-de-prova foram empilhados sobre paletes de madeira, evitando o contato direto com a umidade do piso.



**Figura 4.20 – Corpos-de-prova em local de armazenagem após período de cura úmida.**

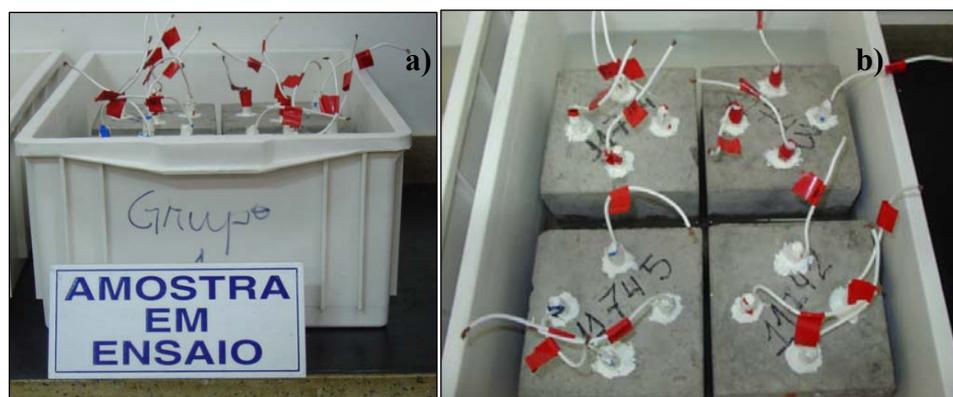
A cura, após a saída da câmara úmida, foi realizada em local seco e protegido de intempéries, sob uma tenda coberta com lona plástica, com variações de temperatura e umidade mais amenas que as variações do ambiente externo por um período 56 dias. O período total de cura foi, então, igual à 84 dias.

#### **4.7 MÉTODOS DE INDUÇÃO, DESENVOLVIMENTO E MONITORAMENTO DA CORROSÃO DAS ARMADURAS SOB A AÇÃO DE CLORETOS.**

Visando estudar a corrosão, avaliando a capacidade protetora dos diversos concretos frente a íons cloreto foram aplicados procedimentos de ensaio a fim de induzir e propagar a corrosão nas armaduras, monitorando-se a evolução da corrosão com o emprego de parâmetros obtidos de técnicas eletroquímicas.

A avaliação dos concretos estudados sob a ação de cloretos consistiu em submeter os corpos-de-prova a ciclos de imersão e secagem em solução agressiva rica em cloreto

contendo NaCl diluído a 5% em massa ou  $0,855 \text{ M}^{4.1}$ . Os ciclos foram semanais, constituindo-se de 2 dias de imersão e 5 dias de secagem em ambiente com temperatura em torno de  $40^\circ\text{C}$  e umidade relativa do ar de  $(50 \pm 5)\%$ . Os corpos-de-prova, durante a imersão, permaneceram em ambiente com temperatura controlada de em média  $(25 \pm 3)^\circ\text{C}$  e 55% de umidade relativa do ar. A Figura 4.21 ilustra a etapa de imersão do ciclo indutivo de corrosão por cloretos.



**Figura 4.21 – Fase de imersão em solução agressiva contendo cloretos com concentração de 5% de NaCl.**

Segundo Cascudo (2000), os ciclos aceleram o fenômeno de corrosão, visto que garantem condições facilitadas para a difusão do oxigênio, de forma a propiciar a ocorrência mais rápida possível do processo. Geralmente, a corrosão de armaduras é controlada por fenômenos de difusão de oxigênio, o que torna o processo catódico mais lento, portanto, controlador do mecanismo eletroquímico, os ciclos de imersão e secagem atuam justamente no sentido de aumentar a velocidade de transporte do gás  $\text{O}_2$  até as proximidades das áreas catódicas das armaduras. Por meio dos ciclos, o oxigênio pode difundir-se rapidamente pelo ar, quando da secagem dos poros, e dissolver-se no eletrólito já próximo às armaduras, quando do período de umedecimento do concreto. Há de se ressaltar também que, com o decorrer dos ciclos, ocorre um acréscimo considerável na concentração de cloretos nos poros

<sup>4.1</sup> Essa concentração de NaCl de 5% foi definida com base no trabalho de doutorado de Cascudo (2000), tendo como referência a concentração aproximada da água do mar, igual a 3,5% (em massa).

do concreto. Isto se dá porque quando da secagem e conseqüente evaporação da água, os cloretos, inicialmente presentes na forma iônica na solução, precipitam-se como sais nos poros da pasta de cimento endurecida e a medida que vão ocorrendo novos ciclos, mais cloretos vão sendo transportados para o interior do concreto, precipitando-se na secagem. Assim a cada ciclo empreendido ocorre um incremento da quantidade de sal no concreto no e o resultado final é um relevante aumento na concentração de cloretos solúveis na solução dos poros.

Também Page *et al.* (1991) *apud* Bauer (1995) em investigações de procedimentos de ingressos e cloretos (a partir de soluções), evidenciaram que metodologias que envolvem ciclos de secagem e imersão ou contato com soluções de NaCl correspondem aos regimes mais severos a nível de relação  $[Cl^-]/[OH^-]$  (quanto à despassivação das armaduras). Os mesmos autores concluíram ainda que em relação aos ensaios cíclicos, se destaca o aspecto de que o teor de cloretos a determinadas profundidades é superior ao valor calculado somente a partir dos coeficientes de difusão. Ressaltando-se desta forma que o ingresso por absorção capilar é expressivo nos ensaios cíclicos.

A imersão foi realizada em reservatório prismático, estando o nível da solução a aproximadamente  $\frac{1}{2}$  da altura dos corpos-de-prova, isto é, a 7,50 cm do topo dos corpos-de-prova, para evitar o contato direto da solução com a parte externa das barras de aço. A solução foi substituída a cada 28 dias, de forma a garantir um nível de aeração suficiente para o desenvolvimento da corrosão.

Conforme comentado no item 4.7, os corpos-de-prova foram concretados no ano de 2004 e a concretagem foi executada em datas diferentes formando 3 grupos distintos: grupo 1 - composto por concreto referência e concreto com sílica ativa de relações água/aglomerante 0,40 e 0,55; grupo 2 - formado por concretos com cinza volante (relação a/c 0,30 e 0,40) e concretos com metacaulim nos teores de 10%, 20% e 30% e de relação

água/aglomerante 0,40; e grupo 3 - constituído por concretos com cinza volante (relação a/c 0,55) e concretos com metacaulim nos teores de 10%, 20% e 30% e de relação água/aglomerante 0,55.

A idade para início da indução e aceleração da corrosão para os concretos do grupo 1 foi de 688 dias, para os concretos do grupo 2 foi de 656 dias e para os concretos do grupo 3 foi de 645 dias. Essas diferenças nas idades entre os grupos de concretos foram consideradas desprezíveis frente ao tempo total de cura considerando, que variam entre 1,8 e 1,9 anos, tendo em vista que as alterações físicas da pasta de cimento que podem ocorrer nessa faixa de idade dos concretos são ínfimas. O fato de se esperar quase dois anos para o início do ataque por cloretos se deve a questões operacionais do projeto. Esse período relativamente longo, contudo, não se constituiu em prejuízo técnico para o estudo; pelo contrário, permitiu alcançar maior maturidade para os concretos, em especial àqueles nos quais são esperadas as reações pozolânicas. Também permitiu a plena consolidação da película de passivação do aço característica de cada tipo de concreto.

Salienta-se que todos os corpos-de-prova foram submetidos às mesmas condições de ataque por íons cloretos, totalizando 308 dias (44 ciclos) de submissão à condição agressiva de cloretos.

O monitoramento da corrosão nas barras de aço embutidas no concreto foi realizado com auxílio de inspeções visuais e do emprego da técnica de resistividade elétrica superficial aparente, além do emprego de técnicas eletroquímicas de potencial de corrosão, resistência de polarização e impedância eletroquímica, conforme descreve-se na seqüência.

### 4.7.1 Inspeções Visuais

A inspeção visual foi efetuada mediante acompanhando do surgimento de manchas de corrosão e fissuras na superfície do concreto, bem como observação dos produtos de corrosão formados na superfície das barras de alguns concretos.

### 4.7.2 Resistividade Elétrica Superficial Aparente do Concreto

A resistividade elétrica superficial aparente do concreto foi medida pelo método de Wenner (quatro pontos), normalizado pela ASTM G 57/1995 (ASTM, 2003a). Para tanto, foi empregado um aparelho portátil de medição de resistividade (*resistivity meter*), da marca Proceq, mostrado na Figura 4.22.

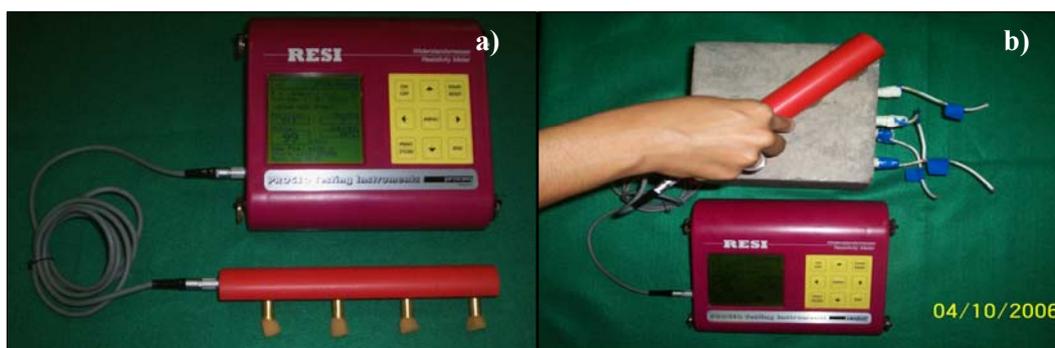


Figura 4.22 – (a) Aparelho utilizado para medição da resistividade do concreto e (b) execução do ensaio de resistividade superficial do concreto.

Este ensaio foi realizado após as medidas eletroquímicas e consiste na utilização do equipamento mencionado anteriormente, posicionando os quatro eletrodos na superfície do concreto e lendo diretamente no visor os valores de resistividade.

A avaliação da resistividade seguiu os critérios do CEB 192, citado por CASCUDO (1997), que consiste da relação entre faixas de valores de resistividade e probabilidades de corrosão, quais sejam:

- resistividade superior a 20 k $\Omega$ .cm: probabilidade de corrosão desprezível;

- resistividade de 10 a 20 k $\Omega$ .cm: probabilidade de corrosão baixa;
- resistividade de 5 a 10 k $\Omega$ .cm: probabilidade de corrosão alta;
- resistividade inferior a 5 k $\Omega$ .cm: probabilidade de corrosão muito alta.

#### 4.8 Técnicas Eletroquímicas

As técnicas eletroquímicas empregadas foram: potencial eletroquímico de corrosão, resistência de polarização e impedância eletroquímica.

As medidas eletroquímicas foram tomadas imediatamente após a saída dos corpos-de-prova da imersão.

O equipamento utilizado para execução das medidas eletroquímicas foi um potenciostato Voltalab 40 PGZ 301, versão 1.6, fabricado pela Radiometer Analytical e gerenciado pelo *software* Voltmaster 4, versão 6.02. Na figura 4.23 é apresentado o potenciostato utilizado e na Figura 4.24 é apresentada a interface do *software* Voltmaster, que gerencia o potenciostato.



Figura 4.23 – Potenciostato utilizado tipo Voltalab 40 PGZ 301 versão 1.6.

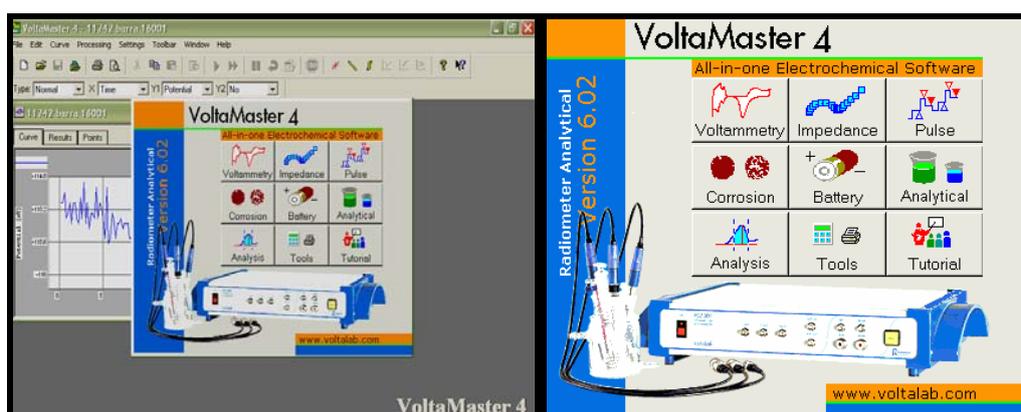


Figura 4.24 – Interface do *software* Voltmaster 4, versão 6.02.

Cabe salientar-se que o potenciostato utilizado possui uma “célula dummy” ou “rcb 200”, que consiste em um circuito eletro-eletrônico padrão cuja finalidade é a de conferir a calibração do referido equipamento. A célula padrão pode ser vista na Figura 4.23. Ao longo do trabalho, vários testes foram efetuados para verificar essa calibração.

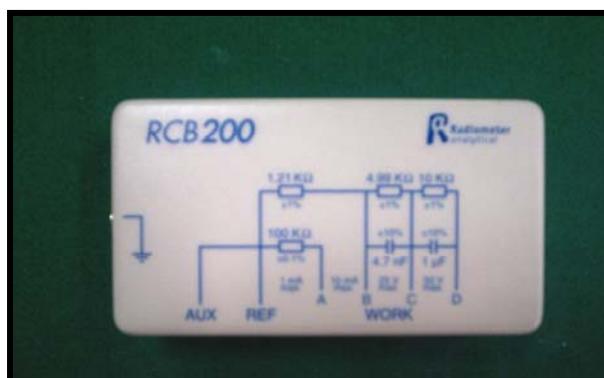


Figura 4.25 – “Célula dummy” ou “rcb 200” do potenciostato Voltalab 40 PGZ 301, versão 1.6.

Para execução das medidas eletroquímicas, foi utilizada uma gaiola de Faraday, devidamente aterrada<sup>4.2</sup>, com a finalidade de evitar quaisquer interferências nas medidas eletroquímicas. Estudos e testes iniciais comprovaram a importância do uso da gaiola no

<sup>4.2</sup> A célula de corrosão, isto é, o corpo-de-prova contendo os três eletrodos conectados, permanecia sempre dentro da gaiola de Faraday durante a execução das medidas eletroquímicas. Este procedimento tinha caráter preventivo e visava evitar que eventuais campos eletromagnéticos externos causassem interferência nas medidas

presente programa experimental, principalmente em função da ordem de grandeza das correntes ( $\text{nA/cm}^2$  e  $\mu\text{A/cm}^2$ ) medidas nas armaduras de aço embutidas ao concreto. Este estudo será disposto no anexo E. A gaiola de Faraday utilizada no programa experimental e, apresentada na Figura 4.26, é formada por uma liga de alumínio.



**Figura 4.26 – Gaiola de Faraday utilizada durante as medidas eletroquímicas**

O eletrodo de calomelano saturado foi empregado como eletrodo de referência e consiste de mercúrio, coberto por uma pasta de cloreto mercurioso ( $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ ), imerso em um eletrólito contendo íons de cloreto, usualmente de uma solução saturada de cloreto de potássio (KCl). Seu potencial de redução com relação ao eletrodo padrão de hidrogênio é igual a  $+0,242\text{ V}$  a  $25^\circ\text{C}$  (CASCUDO, 1997).

O eletrodo de trabalho foi constituído pela barra da armadura do próprio corpo-de-prova de concreto, conectada ao fio metálico, conforme comentado no item 4.6.1 e por fim, sendo ligada ao potenciostato por meio de conexão tipo “jacaré”.

O contra-eletrodo utilizado foi constituído por uma chapa de aço inoxidável disposta em uma face lateral do corpo-de-prova e fixada por cinta elástica. Entre a chapa de aço e a superfície do concreto foi inserida uma esponja umedecida com água para favorecer o contato elétrico entre as duas partes.

A configuração básica utilizada para medição eletroquímica consistiu numa célula de corrosão ligada a um potenciostato, conforme a Figura 4.27. Essa célula de corrosão foi constituída por 3 eletrodos, a saber: eletrodo de trabalho, eletrodo de referência e contra-eletrodo, conforme a Figura 4.28.



Figura 4.27 – (a) Célula de corrosão ligada ao potenciostato e ao computador.

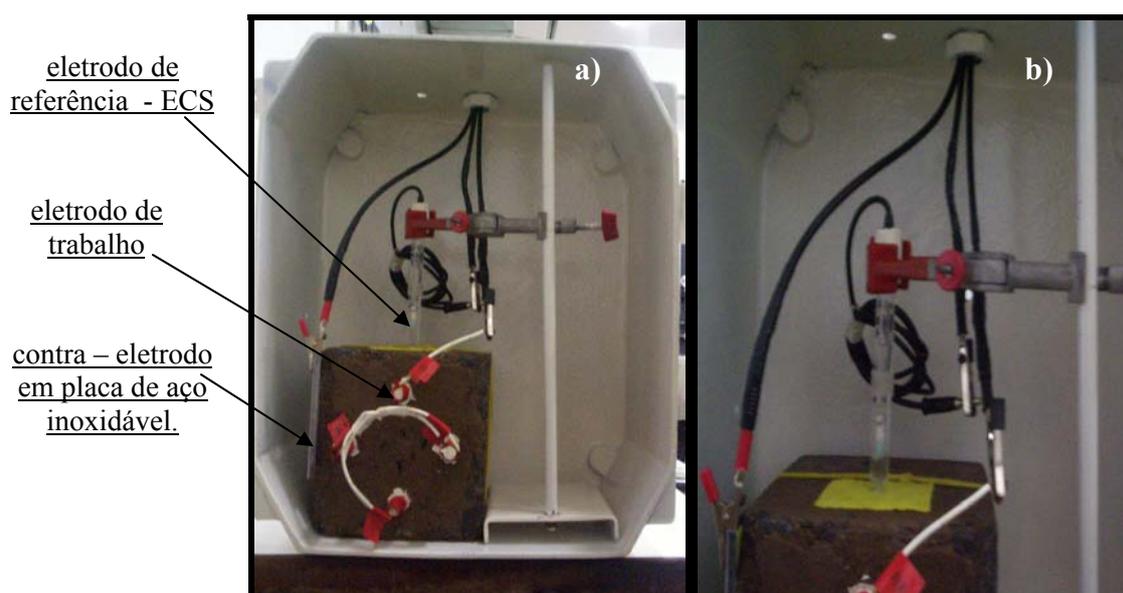


Figura 4.28 – (a) Configuração para medição dos parâmetros eletroquímicos (b) detalhe da célula eletroquímica.

Nos subitens a seguir serão apresentadas as técnicas eletroquímicas utilizadas neste programa experimental.

#### 4.8.1 Potencial de Corrosão Eletroquímico

Os corpos-de-prova prismáticos foram monitorados ao longo do tempo por meio da técnica de potencial de corrosão, de acordo com o método da ASTM C 876/91 (ASTM, 2003b).

Antes do início dos ciclos de imersão e secagem e até os 91 dias de idade, todos os corpos-de-prova foram monitorados semanalmente quanto ao potencial de corrosão. Durante esse período, foi possível constatar a passivação de todas as armaduras embutidas nos corpos-de-prova em estudo. Entre a idade de 91 e as idades de 685 dias de idade, 653 dias de idade e 642 dias de idade, respectivamente para os grupos 1, 2 e 3, os corpos-de-prova permaneceram em ambiente coberto e protegido de intempéries. Somente no 686º, no 654º e no 643º dias de idade, deu-se início à indução e aceleração da corrosão por meio dos ciclos de cloretos, passando-se a registrar os potenciais no instante imediatamente posterior à saída dos corpos-de-prova do tanque de imersão, ou seja, ao final de cada período de imersão para cada um dos ciclos realizados. Isto significou uma medida semanal até as idades de 975, 957 e 947 dias (respectivamente para os grupos 1,2 e 3), 308 dias de ataque, o que corresponde a 44 ciclos para todos os corpos-de-prova.

A avaliação dos resultados das medidas de potencial de eletrodo foi feita de acordo com os critérios da ASTM C 876/1991 (ASTM, 2003b), o qual associa os valores de potencial à probabilidade de corrosão com as seguintes faixas de potenciais (medidas com eletrodo de referência de calomelano saturado - ECS):

- potencial mais positivo que -126 mV: probabilidade de corrosão < 10%;

- potencial de -126 mV a -276 mV: probabilidade de corrosão incerta;
- potencial mais negativo que -276 mV: probabilidade de corrosão > 90%.

#### 4.8.2 Resistência de Polarização

Com o emprego da técnica de resistência de polarização ( $R_p$ ), pode-se estimar eletroquimicamente a velocidade instantânea de corrosão. Para se realizar as medidas de resistência de polarização, aplicou-se em cada uma das barras analisadas, isto é, no eletrodo de trabalho, uma pequena polarização em torno do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) de  $\pm 10$  mV, adotando-se para tanto um procedimento potencio dinâmico, com taxa de varredura de 10 mV/min ou 0,167mV/s e varredura no sentido anódico.

Cabe salientar-se que os valores de  $R_p$  foram obtidos por meio da técnica de voltametria cíclica, disponibilizada pelo *software* Voltmaster 4, e que permite a compensação de queda ôhmica do tipo dinâmica, isto é, a cada ponto na curva de voltametria é realizada uma rápida impedância corrigindo os valores de resistência ôhmica do concreto.

A taxa de corrosão ( $I_{corr}$ ) foi calculada dos valores obtidos da resistência de polarização, por meio da Equação 4.1 abaixo.

$$I_{corr} = B/R_p \quad (4.1)$$

Onde  $I_{corr}$  é a taxa de corrosão em  $\mu A/cm^2$ .

B é a constante de Stern-Geary. Para o presente trabalho, adotou-se os valores de 26 mV, para valores de potencial de corrosão mais eletronegativos que -276 mV (ECS) e 52 mV, para valores mais positivos que -276 mV (ECS).

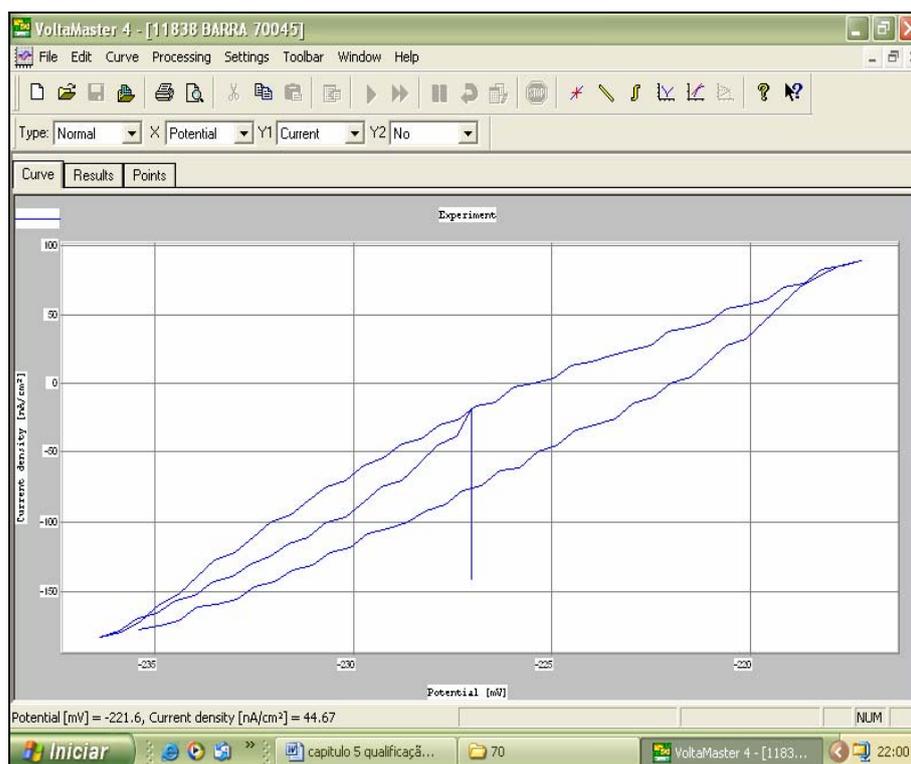
$R_p$  é a resistência de polarização em  $K\Omega cm^2$ , obtida pela técnica de voltametria cíclica.

Os valores adotados quando do cálculo da taxa de corrosão foram os propostos por Alonso e Andrade (1990), segundo Tabela 4.13.

**Tabela 4.13 - Correlação entre densidade da corrente de corrosão, taxa de penetração da corrosão e a classificação.**

Densidade da corrente de corrosão ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Taxa de penetração da corrosão ( $\mu\text{m}/\text{ano}$ )	Classificação
< 0,2	< 2,2	Desprezível
> 0,2	> 2,2	Início de corrosão ativa
~ 1,0	~ 11,0	Ataque importante, mas não severo
> 10,0	> 110,0	Ataque muito importante

Um exemplo de uma curva de voltametria cíclica pode ser vista na figura 5.29.



**Figura 4.29 – Curva de voltametria cíclica obtida pelo software Voltmaster 4 versão 6.02.**

O software Voltmaster 4, versão 6.02, determina o valor de  $R_p$  por meio da 2ª equação de Stern, conforme a Figura 4.30.

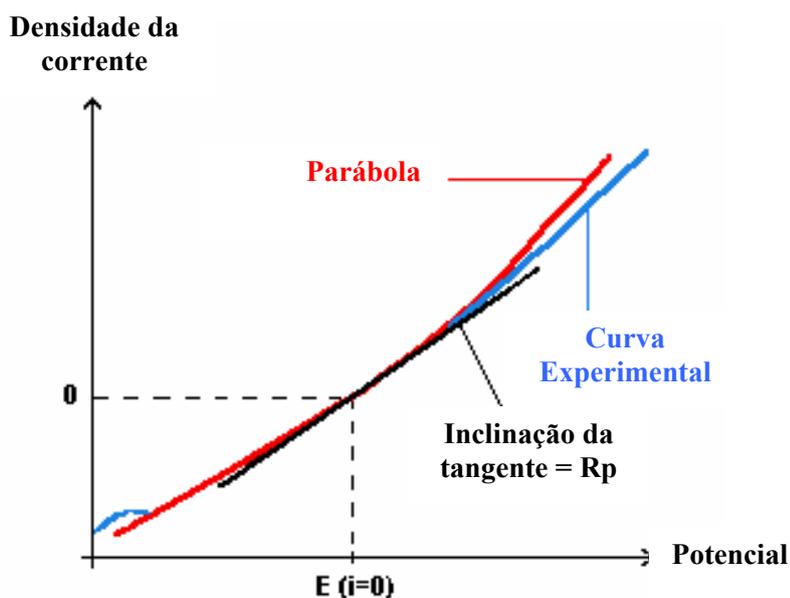


Figura 4.30 – Curva de voltametria cíclica obtida pelo *software* Voltamaster 4, versão 6.02 e determinação do valor de  $R_p$  por meio da 2ª equação de Stern.

### 4.8.3 Espectrometria de Impedância Eletroquímica

As medidas de impedância eletroquímica foram realizadas mediante a aplicação de um sinal alternado de 10 mV de amplitude, varrendo-se uma faixa de frequência de 100 kHz a 10 mHz e com 20 pontos por década, faixa esta considerada pela literatura específica sobre o assunto, como suficiente para avaliar os principais fenômenos envolvidos.

Foram traçados diagramas de Nyquist. Em função do prolongado tempo de ensaio para varrer as baixas frequências (cerca de 40 minutos), foram escolhidas duas barras em cada corpo-de-prova para a execução do ensaio de impedância eletroquímica.

Essa técnica foi aplicada nas referidas barras antes do 1º ciclo. Após o 10º ciclo, a impedância foi aplicada a cada semana alternada, de forma que intervalo entre uma medição e outra fosse de 14 dias. Na Figura 4.31, é apresentada a interface do *software* Voltamaster 4, versão 6.02, para o diagrama de Nyquist da impedância eletroquímica.

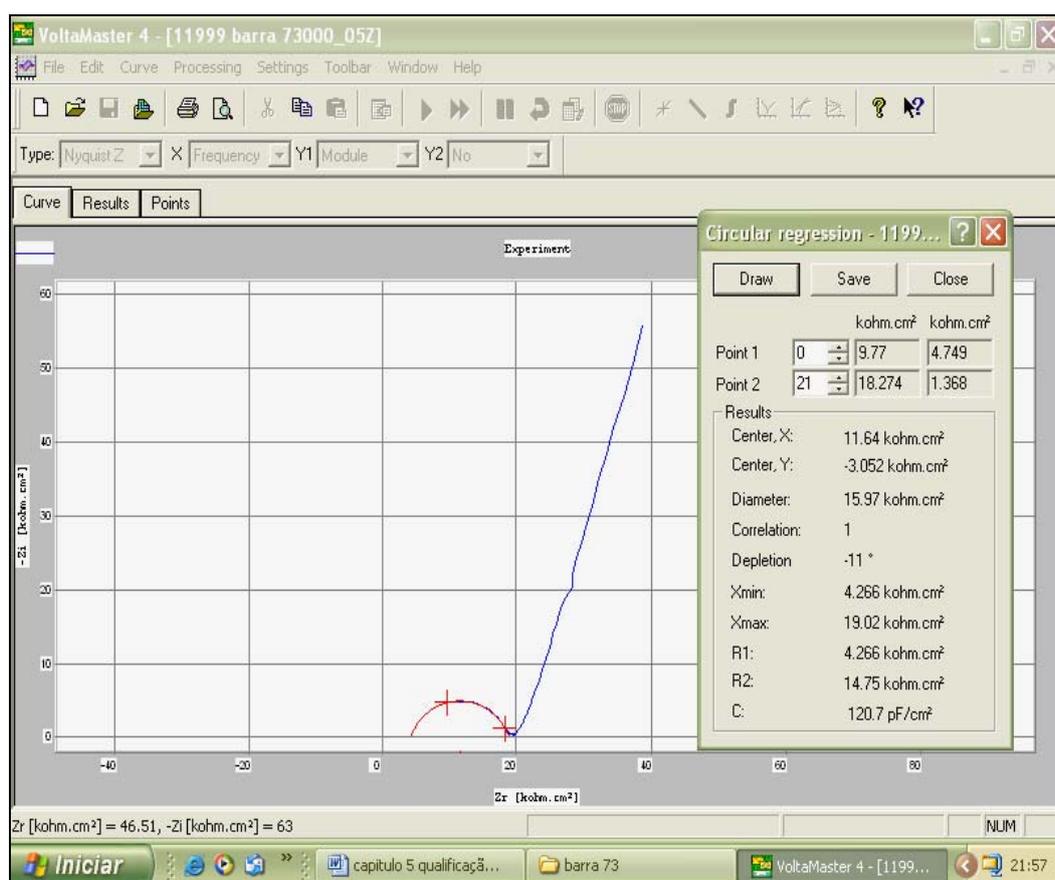


Figura 4.31 – Diagrama de Nyquist da técnica de impedância eletroquímica, obtida por meio do *software* Voltmaster 4, versão 6.02.

#### 4.9 Análise Estatística dos Dados

Com a finalidade de obter uma melhor interpretação dos resultados, os valores obtidos de resistividade elétrica e de potencial de corrosão foram submetidos à análise estatística. Assim, efetuou-se para cada parâmetro avaliado, duas análises, a saber, a primeira contempla o desempenho de sistemas com adições, abrangendo concretos de referência, cinza volante, sílica ativa e metacaulim no teor de 10% e a segunda análise estatística envolve a avaliação do desempenho dos concretos com os três teores de metacaulim utilizados.

A análise estatística dos fatores que exercem influência nessas variáveis dependentes foi realizada por meio de um projeto fatorial com dois fatores fixos, quais sejam

relação a/ag e tipo de concreto ou relação a/ag e teor de metacaulim. O modelo estatístico que de uma forma geral expressa as análises realizadas está representado na Equação 4.2.

$$X_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \alpha\beta_{ij} + \varepsilon_{(ij)m} \quad (4.2)$$

Onde:

$X_{ij}$  = modelo estatístico com 2 fatores a níveis fixos;

$\mu$  = média geral;

$\alpha_i$  = efeito da relação a/ag;

$\beta_j$  = efeito do tipo de concreto ou o efeito do teor de metacaulim;

$\alpha\beta_{ij}$  = efeito da interação entre relação a/ag e o tipo de concreto ou efeito da interação entre relação a/ag e do teor de metacaulim;

$\varepsilon_{(ij)m}$  = termo de erro,  $m = 1, 2 \dots n$  ( $n$  corresponde ao número de repetições dos ensaios de resistividade e potencial de corrosão para cada situação estudada,  $n=44$ )

Para testar a significância deste projeto fatorial foi efetuada uma análise de variâncias - (ANOVA), empregando-se, para tanto, o *software Statistica versão 6.0* da StatSoft®. Salienta-se que os experimentos fatoriais permitem expressar conclusões gerais, o que é mais interessante do que a análise isolada de cada variável.

# CAPÍTULO 5

## APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo estão apresentados e discutidos os resultados obtidos no programa experimental. Inicialmente são exibidos os dados relativos à qualidade do concreto que compreende medidas de resistividade elétrica. Em seguida, são expostos os resultados obtidos relativos à indução da corrosão eletroquímica (por ação dos íons cloreto) que contemplam à monitorização do fenômeno por meio da técnica de potencial de corrosão, resistência de polarização e impedância eletroquímica. Por fim, são apresentadas inspeções visuais nas barras de aço e na superfície dos concretos.

A seguir será abordado o monitoramento da resistividade elétrica, realizado durante o ataque por cloretos e na seqüência, a avaliação dos concretos quanto à indução da corrosão nas armaduras, abrangendo resultados sobre a termodinâmica e a cinética do fenômeno ao longo de quarenta e quatro ciclos de imersão e secagem em solução contendo íons cloreto.

## 5.1 RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO

Os resultados das medidas de resistividade elétrica nos concretos submetidos aos ciclos de imersão em solução contendo cloretos são abordados a seguir. Os valores de resistividade plotados ao longo do tempo de ataque (número de ciclos) são aqueles referentes às medidas realizadas logo após a imersão, enquanto os corpos-de-prova ainda encontravam-se saturados. Este procedimento justifica-se em função do concreto absorver água mais rapidamente do que perde e em virtude do estudo envolver concretos com diferentes características de porosidade, permeabilidade e zona de transição, dentre outras características que regem o fenômeno de transporte de fluidos, através do concreto. Assim, as particularidades inerentes aos concretos analisados poderiam gerar ligeiras diferenças de umidade interna nos concretos ao fim dos períodos de secagem dos ciclos de cloretos. Tais diferenças de umidade podem influir decisivamente nos valores de resistividade elétrica dos concretos (POLDER; PEELLEN, 2002).

Nos gráficos de resistividade em função do tempo estão evidenciados os critérios de avaliação do Comitê Eurointernacional do Béton – CEB 192 (1989 *apud* CASCUDO, 1997), conforme Tabela 5.1.

**Tabela 5.1 - Parâmetros de avaliação da medida de resistividade elétrica do concreto (elaborada com base em LANGFORD; BROOMFIELD, 1987 *apud* BROOMFIELD, 1997; CEB 192, 1989 *apud* CASCUDO, 1997).**

Resistividade do concreto	Taxa de corrosão	Probabilidade de corrosão
> 20 kΩ.cm	Baixa	Desprezível
10 a 20 kΩ.cm	Baixa a moderada	Baixa
5 a 10 kΩ.cm	Alta	Alta
< 5 kΩ.cm	Muito alta	Muito alta

Os resultados individuais dos resultados de resistividade podem ser encontrados no Anexo B.

Os resultados de resistividade elétrica estão ordenados e agrupados de forma a facilitar a sua leitura e compreensão. Assim, nos itens 5.1.1 e 5.1.2 estão discutidas, respectivamente, as influências da relação água/aglomerante e das adições minerais na resistividade elétrica. Da mesma forma, nas Figuras 5.1 a 5.11 estão apresentadas as faixas de probabilidade de corrosão determinadas pela CEB 192 (1989 *apud* CASCUDO, 1997).

### **5.1.1 Influência da Relação Água/Aglomerante**

As Figuras 5.1 a 5.7 apresentam os resultados médios de 3 determinações de resistividade elétrica superficial aparente em relação ao número de ciclos de imersão para cada tipo de concreto, considerando as duas relações água/aglomerante. Os valores de resistividade elétrica para os concretos R4, R5, S4 e S5 estão apresentados a partir do segundo ciclo de imersão. Nessas figuras, estão constando também os critérios do CEB 192, segundo a Tabela 5.1, tendo as faixas de resistividade sido referenciadas por cores e os critérios de corrosão identificados por caixas de texto contendo as probabilidades desprezível, baixa, alta e muito alta.

Entre o 31<sup>o</sup> e o 39<sup>o</sup> ciclo, a sala climatizada, onde os corpos-de-prova permaneciam durante os ciclos de imersão, apresentou problemas técnicos e registrou-se baixas umidades relativas do ar (em torno de 20%). Desta forma, os concretos estiveram mais secos, alterando o seu comportamento quanto a resistividade elétrica e quanto ao potencial de corrosão no referido período.

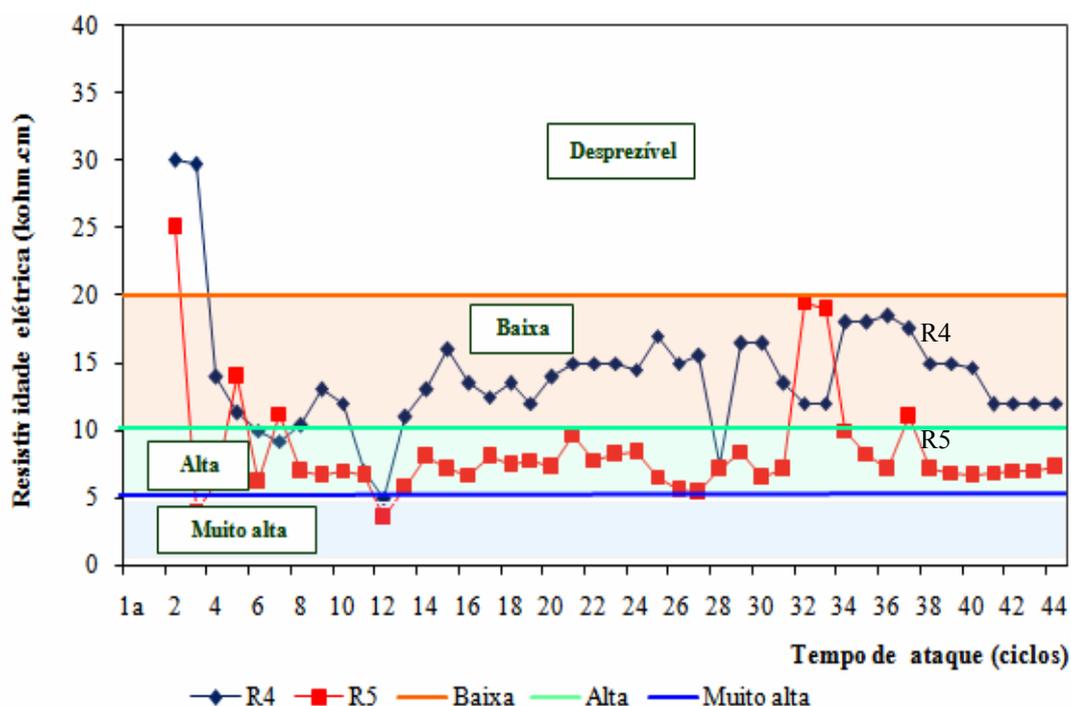


Figura 5.1 - Resistividade elétrica superficial aparente variando com o tempo de ataque (número de ciclos) para os concretos de referência (sem adições) com relação água/aglomerante igual a 0,40 ou 0,55, de acordo com os critérios da CEB 192 (1989 *apud* Cascudo, 1997).

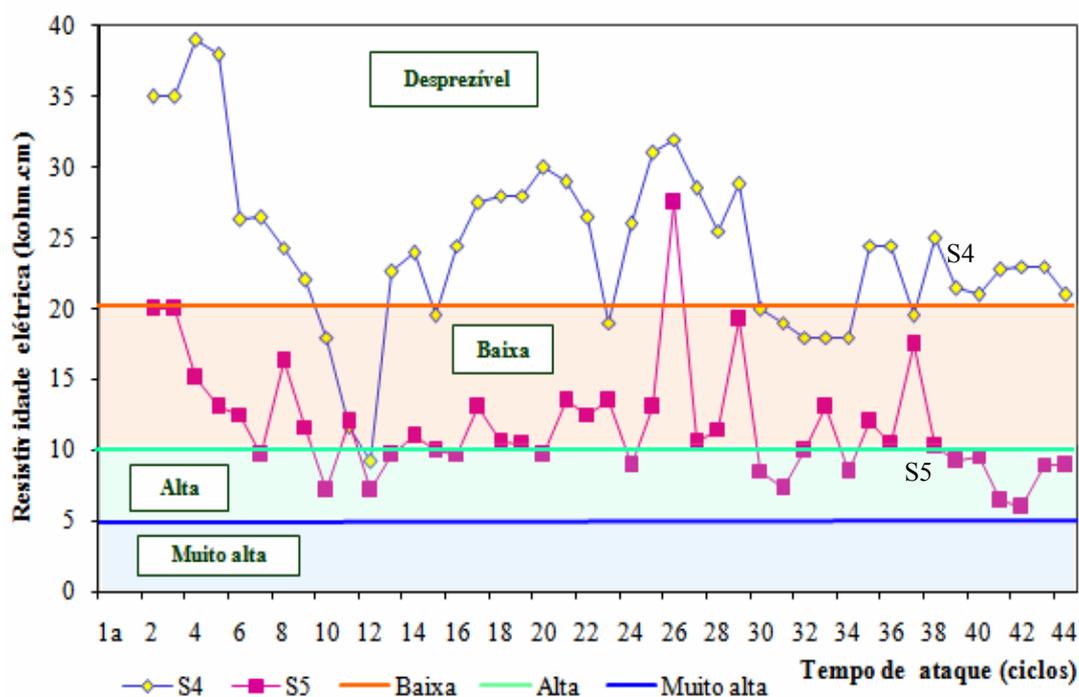


Figura 5.2 - Resistividade elétrica superficial aparente variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com adição de sílica ativa com relação água/aglomerante igual a 0,40 ou 0,55, de acordo com os critérios da CEB 192 (1989 *apud* Cascudo, 1997).

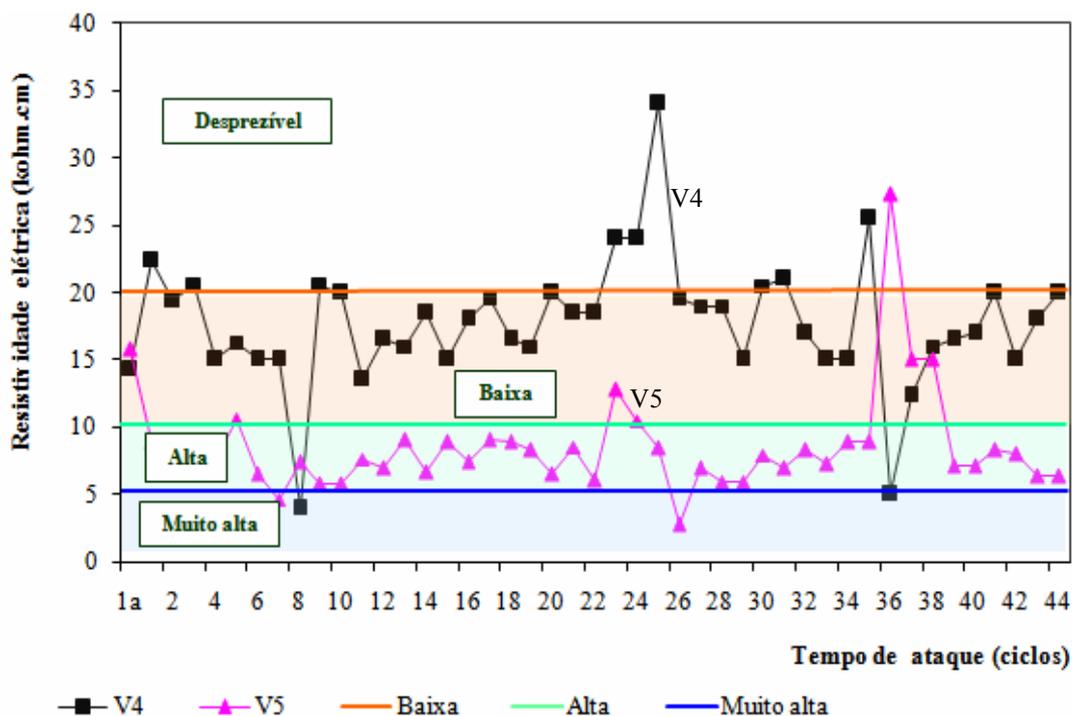


Figura 5.3 - Resistividade elétrica superficial aparente variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com adição de cinza volante ativa com relação água/aglomerante igual a 0,40 ou 0,55, de acordo com os critérios da CEB 192 (1989 *apud* Cascudo, 1997).

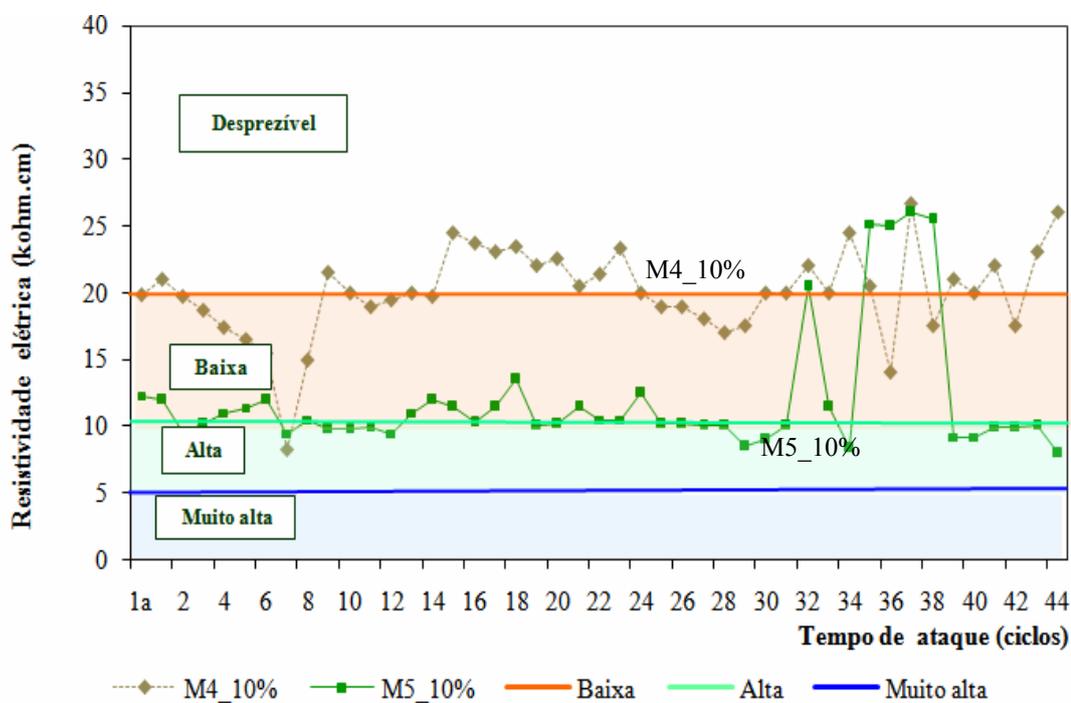


Figura 5.4 - Resistividade elétrica superficial aparente variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com adição de metacaulim no teor de 10% em substituição ao cimento Portland (em massa) com relação água/aglomerante igual a 0,40 ou 0,55, de acordo com os critérios da CEB 192 (1989 *apud* Cascudo, 1997).

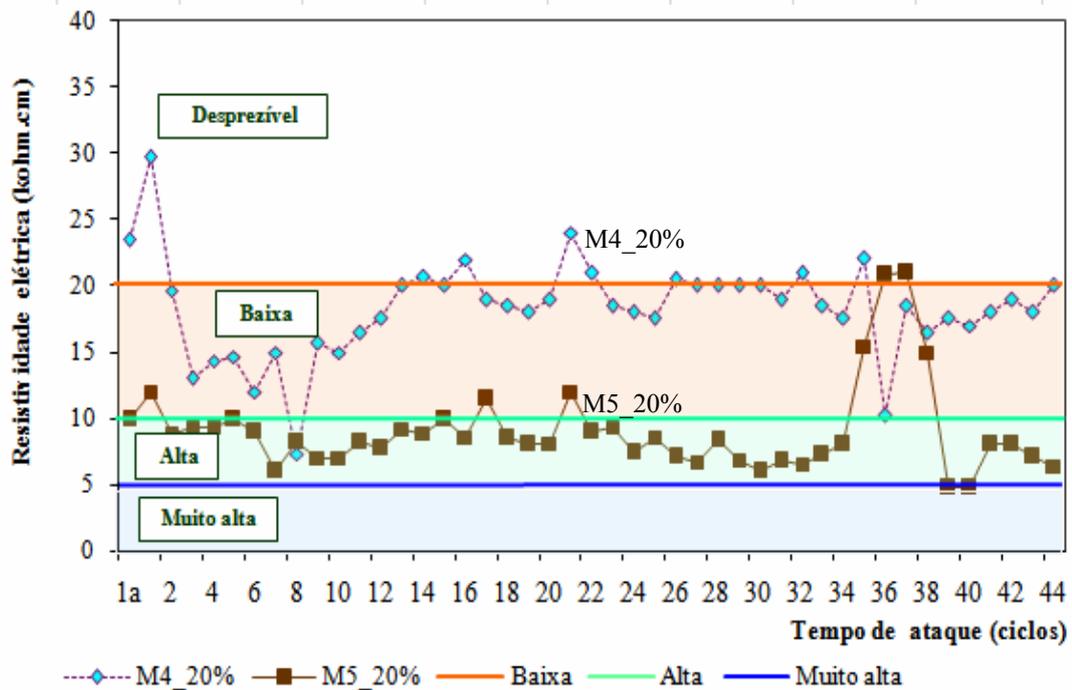


Figura 5.5 - Resistividade elétrica superficial aparente variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com adição de metacaulim no teor de 20% em substituição ao cimento Portland (em massa) com relação água/aglomerante igual a 0,40 ou 0,55, de acordo com os critérios da CEB 192 (1989 *apud* Cascudo, 1997).

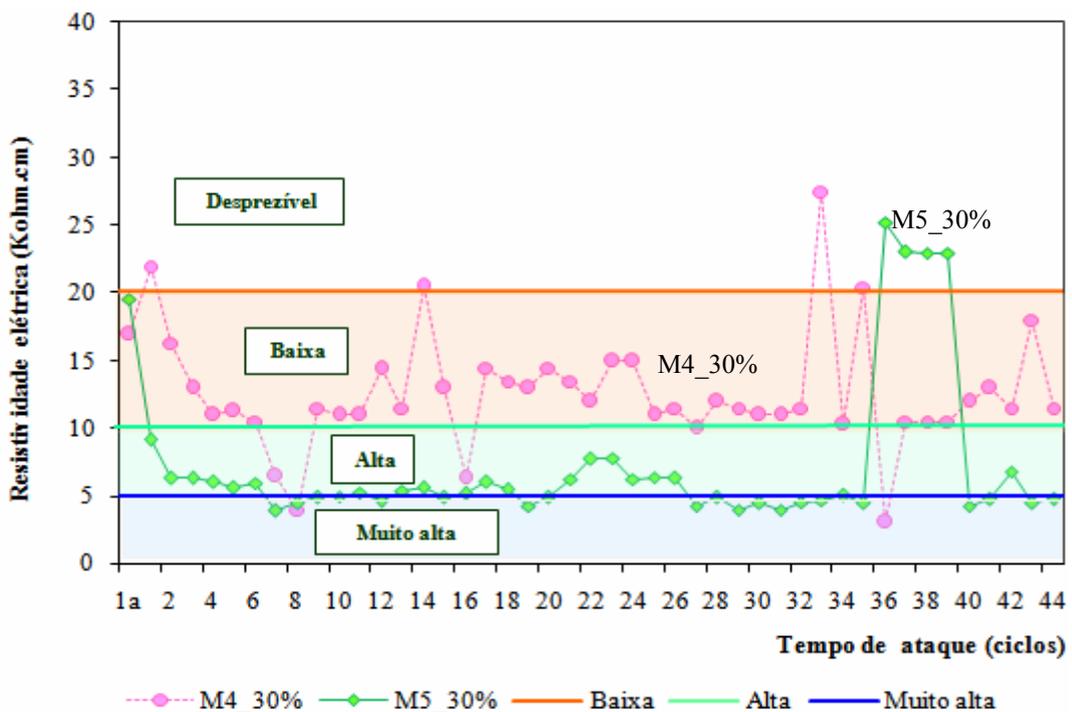


Figura 5.6 - Resistividade elétrica superficial aparente variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com adição de metacaulim no teor de 30% em substituição ao cimento Portland (em massa) com relação água/aglomerante igual a 0,40 ou 0,55, de acordo com os critérios da CEB 192 (1989 *apud* Cascudo, 1997).

Pode-se observar nas Figuras 5.1 a 5.6, que os concretos apresentaram comportamento bem definido em relação à resistividade elétrica: os concretos com menor relação água/aglomerante situaram-se em faixas de maiores resistividades elétricas comparativamente aos concretos com maiores relação água/aglomerante. Este comportamento se repete para todos os concretos, independente do tipo de concreto, do tipo e teor de adição mineral.

Os concretos com relação água/aglomerante 0,40 mantiveram-se na faixa de baixa probabilidade de corrosão, exceto para o concreto com sílica ativa que esteve na faixa de probabilidade de corrosão desprezível.

Considerando os concretos de relação água/aglomerante 0,40, nota-se que a sílica ativa exibiu os maiores valores de resistividade elétrica, comprovando a eficácia desta adição no refinamento dos poros do concreto, diminuindo sua interconexão na pasta de cimento, densificando a matriz cimentícia, seja por efeito filler, seja por ação pozolânica. Observa-se também que o concreto com adição de metacaulim no teor de 30% de substituição ao cimento Portland (M4\_30%) obteve os menores resultados de resistividade.

Percebe-se que todos os concretos com relação água/aglomerante 0,55 oscilaram na faixa de alta a muito alta probabilidade de corrosão, sendo que o concreto M5\_30% novamente apresentou os mais baixos valores de resistividade.

No gráfico a seguir (Figura 5.7) estão apresentadas as médias aritméticas dos concretos com relação água/aglomerante 0,40 e 0,55, incluindo concretos com adições minerais e concretos de referência.

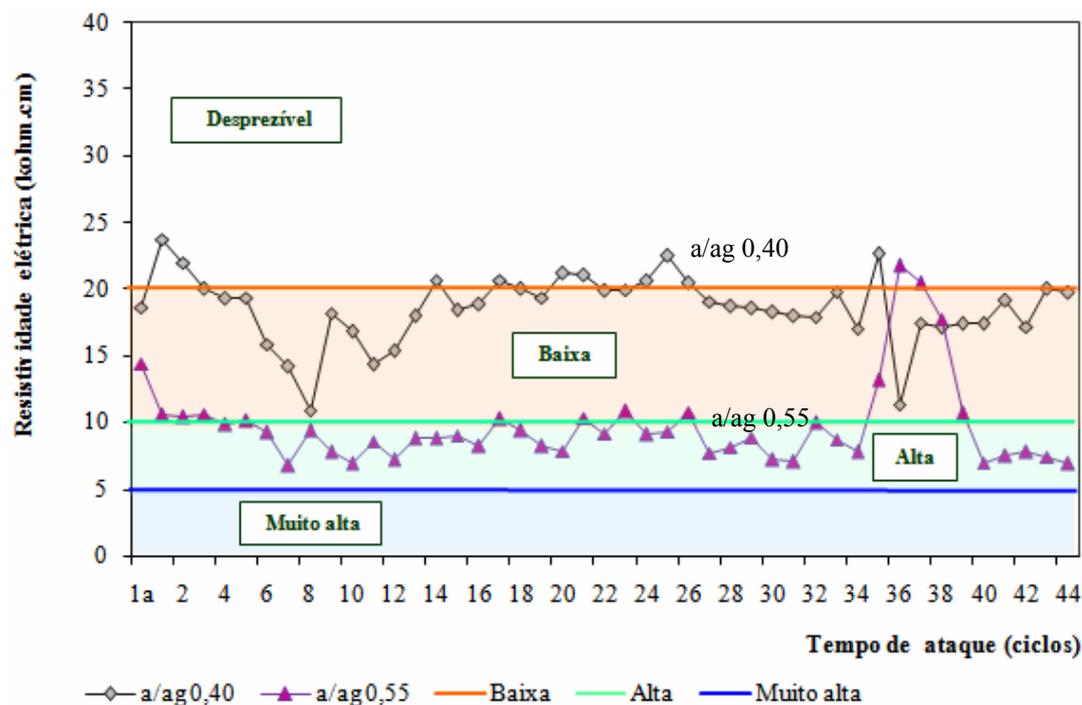


Figura 5.7 - Resistividade elétrica superficial aparente variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com relação água/aglomerante igual a 0,40 ou 0,55, de acordo com os critérios da CEB 192 (1989 *apud* Cascudo, 1997).

Analisando a figura anterior (Figura 5.7), novamente evidencia-se um comportamento já esperado e de conhecimento no meio técnico científico de que baixas relações água/aglomerante exibem concretos com características de menor permeabilidade e porosidade, o que se reflete em um acréscimo dos valores de resistividade elétrica.

Segundo Polder e Peelen (2002), o aumento do número de poros com grande diâmetro, isto é, dos poros definidos fundamentalmente pelo parâmetro “relação a/ag”, contribui sobremaneira para a redução dos valores de resistividade elétrica do concreto. Morris *et al.* (2002) salientaram que a resistividade elétrica para os concretos com relação a/ag 0,40 são em média o triplo dos concretos de relação a/ag 0,60. No presente trabalho, os concretos de relação a/ag 0,40 apresentaram valores de aproximadamente duas vezes os valores de resistividade dos concretos de relação a/ag 0,55.

Segundo Neville (1997), a resistividade do concreto aumenta rapidamente com a redução da relação água/cimento, enquanto que um aumento na umidade do ambiente ou uma

contaminação com íons no concreto, ao longo do tempo, pode reduzir drasticamente a resistividade do concreto.

### 5.1.2 Influência do Tipo de Adição Mineral

Para se comparar a influência do tipo de adição mineral, nas figuras a seguir (Figura 5.8 a Figura 5.9) estão apresentados os gráficos dos resultados de resistividade elétrica para os concretos de relação a/ag 0,40 e a/g 0,55, respectivamente.

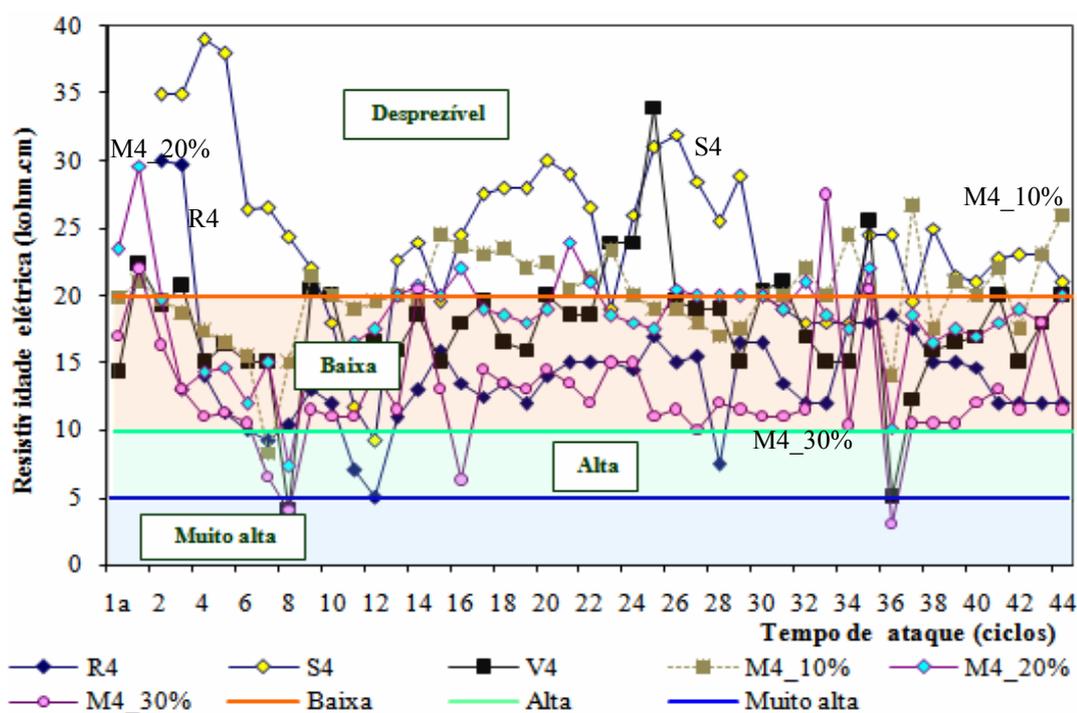


Figura 5.8 – Resistividade elétrica superficial aparente variando com o tempo de ataque (ciclos de imersão) para os concretos de relação água/aglomerante 0,40, considerando os seis tipos de concreto, de acordo com os critérios da CEB 192 (1989 *apud* Cascudo, 1997).

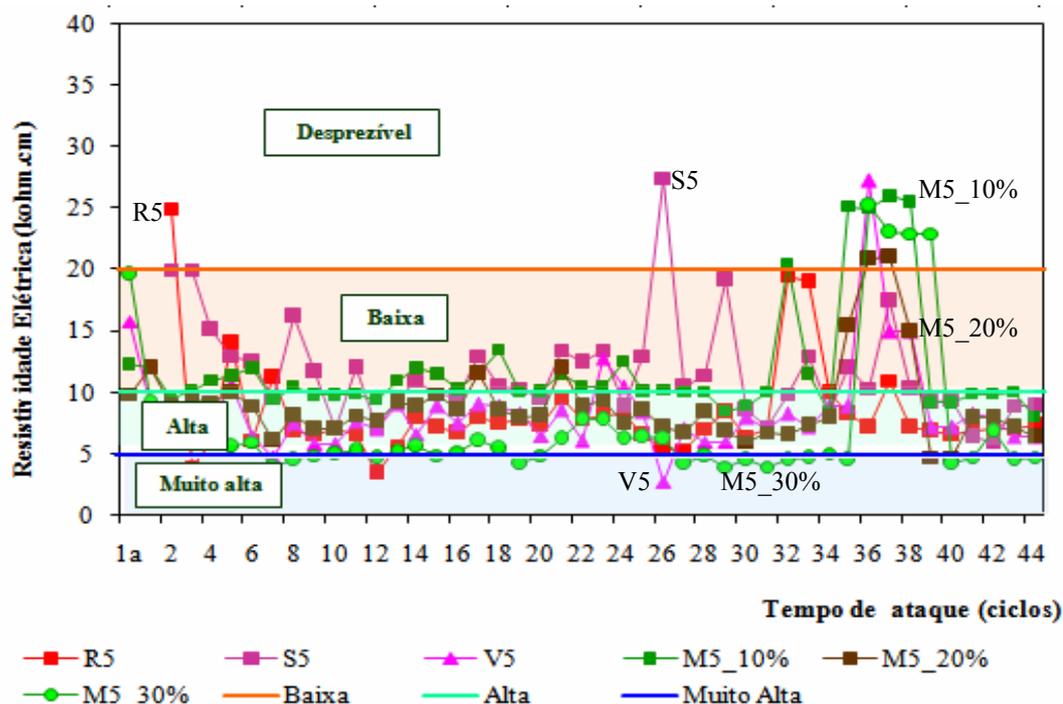


Figura 5.9 – Resistividade elétrica superficial aparente variando com o tempo de ataque (ciclos de imersão) para os concretos de relação água/aglomerante 0,55, considerando os seis tipos de concreto, de acordo com os critérios da CEB 192 (1989 *apud* Cascudo, 1997).

Nas figuras anteriores pode-se destacar que os valores de resistividade elétrica para os concretos com relação água/aglomerante 0,40 permaneceram em faixas de 10 a 25 kohm.cm, enquanto os concretos com relação água/aglomerante 0,55 mantiveram-se praticamente em patamares de 5 a 10 kohm.cm.

Dentre os concretos com adições minerais, destaca-se o desempenho superior do concreto com adição de sílica ativa, seguido pelo desempenho similar do concreto com adição de metacaulim no teor de 10% e cinza volante. Em um patamar inferior de desempenho estão os concretos com adição de 20% de metacaulim, o concreto com adição de 30% de metacaulim e, por fim, com os menores valores de resistividade estão os concretos de referência. Este efeito se repete para as duas relações água/aglomerante. Neste sentido, mais uma vez fica nítida a eficácia da utilização das adições minerais no concreto com a finalidade de promover incrementos em sua resistividade elétrica.

Desta forma, Cascudo (2005) relata que as adições minerais, especialmente aquelas de elevada finura e de natureza pozolânica, alteram a estrutura física da pasta de cimento, refinando poros e reduzindo a interconexão entre eles, o que reflete em expressivos acréscimos na resistividade elétrica dos concretos.

Neville (1997) expõe que as adições minerais ao cimento podem reduzir em uma ordem de grandeza a resistividade elétrica do concreto, e que o uso de sílica ativa pode ter um efeito benéfico significativo quando a evolução da corrosão no concreto é controlada pela resistividade.

### **5.1.3 Influência da Classe de Resistência**

No que tange à variável classe de resistência, conforme comentado no Capítulo 4, ainda que ela não tenha sido pré-definida no programa experimental, decidiu-se classificar em grupos os concretos, a partir dos resultados de resistência à compressão ( $F_{ck}$ ) e verificar seu comportamento em relação à resistividade elétrica.

A Figura 5.10 mostra os valores médios de resistividade elétrica para os todos os concretos estudados e suas respectivas classes de resistências.

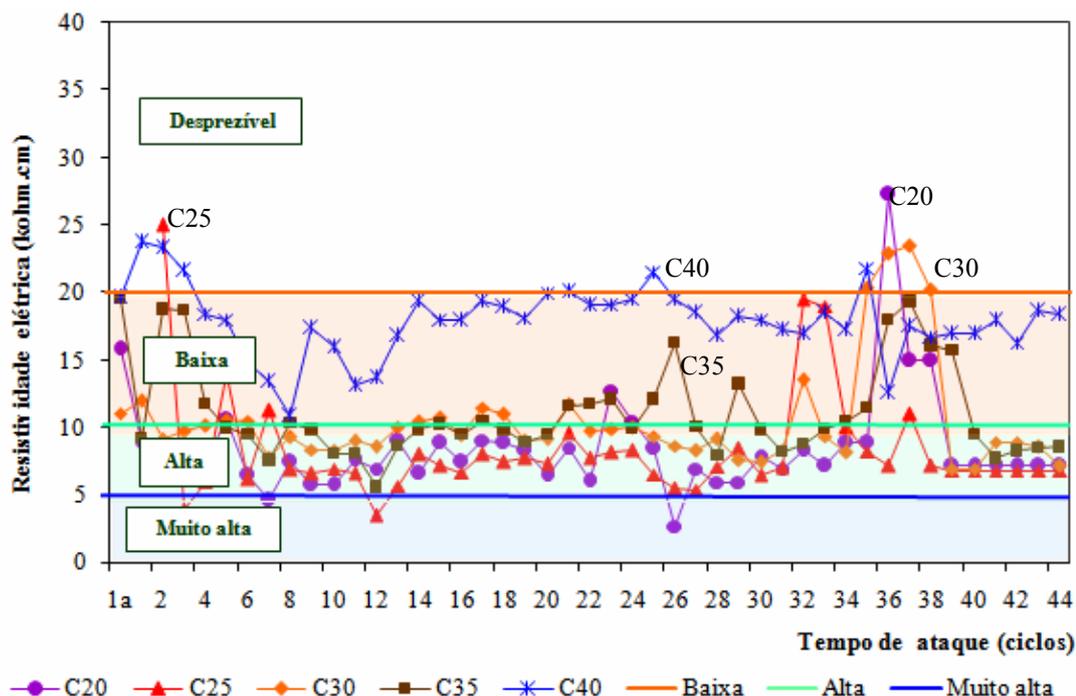


Figura 5.10 - Resistividade elétrica superficial aparente variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com classe de resistência C40, inclusive concreto de referência; de acordo com os critérios da CEB 192 (1989 *apud* Cascudo, 1997).

A classe C40 exibe um comportamento expressivamente diferenciado das demais classes de resistência, exibindo valores de resistividade elétrica de aproximadamente 20 kohm.cm. Isto se justifica porque na classe de resistência 40 MPa estão os concretos com adições minerais e de relação  $a/ag$  0,40. Em outra faixa de resistividade elétrica (entre 5 kohm.cm e 10 kohm.cm) estão os concretos das demais classes de resistência, incluindo concretos com adições minerais, porém com relação  $a/ag$  0,55.

Na Figura 5.11 estão os valores médios de resistividade elétrica somente para os concretos com adições minerais e suas respectivas classes de resistências.

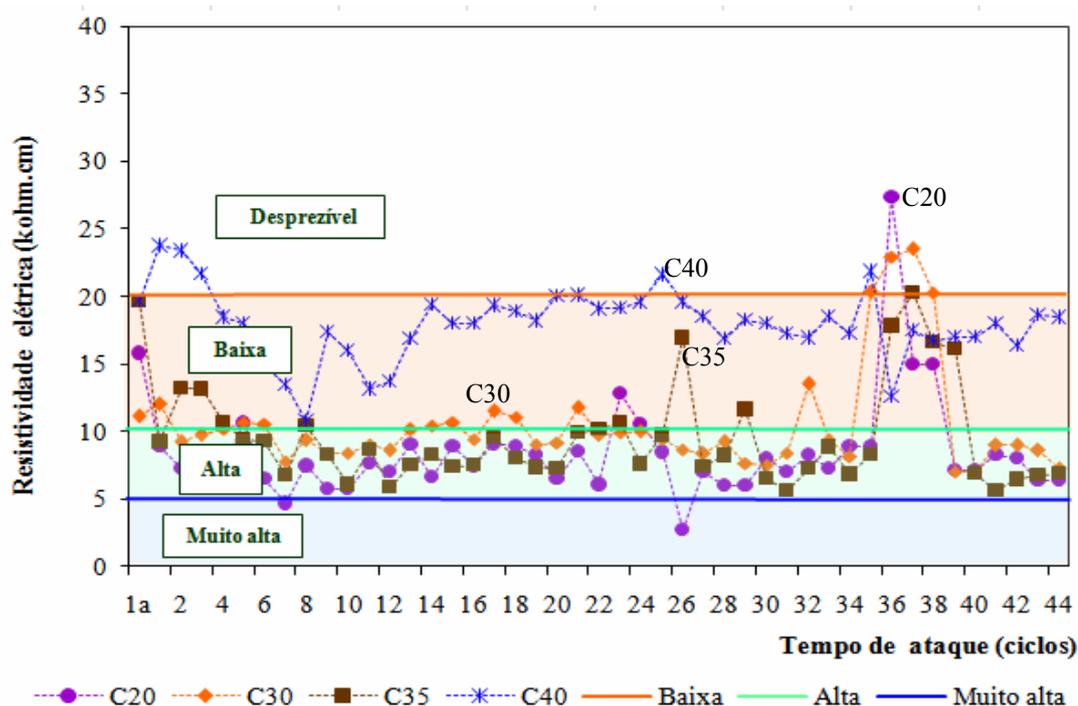


Figura 5.11 - Resistividade elétrica superficial aparente variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos de diferentes classes de resistência, considerando apenas concretos com adições minerais; de acordo com os critérios da CEB 192 (1989 *apud* Cascudo, 1997).

Comparativamente às demais classes de resistência, novamente destaca-se a C40 que exibe os mais elevados valores de resistividade elétrica. Observa-se que a C40 situou-se em faixas de resistividade de, aproximadamente, duas vezes os valores apresentados pelos concretos das demais classes.

#### 5.1.4 Análise Estatística dos Valores de Resistividade Elétrica

Na análise estatística dos valores de resistividade elétrica estão contempladas a análise estatística global e a análise estatística dos teores de metacaulim.

##### 5.1.4.1 Análise Estatística Global

Estão apresentados a seguir os resultados de resistividade elétrica analisados estatisticamente. Esses resultados estão apresentados em função das variáveis definidas no

programa experimental, a saber: relação água/aglomerante e tipo de concreto. Cabe salientar - se que foram escolhidos para a análise estatística global do experimento, os concretos de referência, de sílica ativa, de cinza volante e de metacaulim no teor de 10%. Não foram incluídos, nessa primeira análise, os concretos com 20% e 30% de metacaulim.

Os valores de resistividade elétrica foram submetidos à análise estatística de variâncias (ANOVA), segundo o modelo fatorial descrito na Equação 4.2, contida no item 4.10 do Capítulo 4. A Tabela 5.2 apresenta os resultados obtidos na ANOVA, onde os valores de F obtidos ( $F_{\text{calc.}}$ ) foram comparados aos valores de F tabelados ( $F_{\text{tab.}}$ ) para um nível e confiança de 95%.

**Tabela 5.2 - Resultados da análise de variância (ANOVA) realizada com dados de resistividade elétrica, para os fatores ou variáveis independentes consideradas no modelo estatístico<sup>5.1</sup>.**

Efeito	SQ	GL	MQ	$F_{\text{calc.}}$	$F_{\text{tab.}}$	Resultado
Modelo	10566,76	7	1509,54	201,5725	2,03	significativo
Erro (resíduo)	2718,44	363	7,49	--	--	--
Total	13285,19	370	--	--	--	--
Tipo de concreto	2337,53	3	779,18	104,05	2,63	significativo
Relação a/ag	8018,84	1	8018,84	1070,78	3,87	significativo
Tipo de concreto x relação a/ag	468,74	3	156,25	20,86	2,63	significativo
Erro (resíduo)	2718,44	363	7,49	--	--	--

$$R^2_{\text{mod}} = 0,80$$

$$R_{\text{mod}} = 0,89$$

Onde:

SQ = Soma dos quadrados;

GL = Graus de liberdade;

MQ = Média dos quadrados;

F = parâmetro de Fischer para o teste de significância dos efeitos;

Resultado = resultado da análise, com indicação se o efeito é significativo ou não;

$R^2_{\text{mod}}$  = coeficiente de determinação do modelo e  $R_{\text{mod}}$  = coeficiente de correlação do modelo.

<sup>5.1</sup>Considerando o concreto com adição de metacaulim no teor de 10% de substituição, conforme citado anteriormente.

A análise estatística mostrou que o modelo fatorial é significativo, uma vez que o valor de  $F_{\text{calc.}}$  é maior que o valor de  $F_{\text{tab}}$  e o valor resultante de  $R^2_{\text{mod}}$  foi de 0,80, o que significa dizer que 80% da variação total dos dados é explicada pelo modelo.

A análise de variâncias também mostrou que os efeitos individuais dos fatores tipo de concreto e relação água/aglomerante são estatisticamente significativos a um nível de confiança de 95%. Isso quer dizer que cada uma dessas variáveis, tomada isoladamente, exerce influência na resistividade elétrica e, nesse sentido, com base nos valores de  $F_{\text{calc.}}$ , pode-se constatar que a variável mais influente na resistividade é a relação água/aglomerante e, em segundo lugar, a variável tipo de concreto.

A interação dupla do tipo de concreto e relação água/aglomerante também foi significativa, indicando que há uma sinergia entre esses fatores, apesar da interação entre essas duas variáveis exercer menor influência na resistividade elétrica do que as variáveis tomadas isoladamente.

As duas variáveis (tipo de concreto e relação água/aglomerante) mostram-se significativas e, considerando o efeito sinérgico, realizou-se a comparação múltiplas de médias pelo método de Duncan, cujos agrupamentos em ordem decrescente de médias são mostrados a seguir.

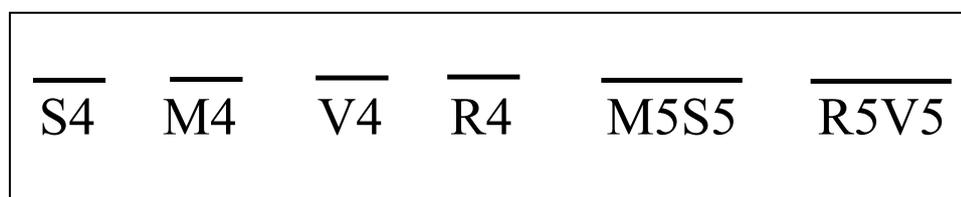


Figura 5.12 – Ordem decrescente de médias e disposição dos grupos definidos pela comparação múltipla de médias, por meio do teste de Duncan para os valores de resistividade elétrica.

Percebe-se, do resultado anterior, que os concretos de relação água/aglomerante 0,40 apresentam concretos de resistividade efetivamente mais alta do que aqueles de relação a/ag 0,55. Quanto à influência das adições minerais, considerando inicialmente os concretos de relação a/ag igual a 0,40, têm-se quatro grupos distintos estatisticamente. Desses quatro, o

concreto de sílica ativa é significativamente mais resistivo do que o de metacaulim, que, por sua vez, é mais resistivo que o concreto de cinza volante. Por fim, vem o concreto de referência, cujo valor médio global de resistividade é o mais baixo dentre todos (nesse grupo de relação  $a/ag$  igual a 0,40). Considerando os concretos de relação  $a/ag$  0,55, a separação desta feita se dá em dois grupos estatisticamente distintos. Em um primeiro grupo, de resistividade mais alta, estão juntos os concretos de sílica ativa e de metacaulim. Em um segundo grupo, aparecem juntos, estatisticamente, os concretos de cinza volante e de referência.

De modo geral, percebe-se o melhor desempenho da sílica ativa, seguida de perto pelo metacaulim. Abaixo dessas duas adições, vem a cinza volante e, com o pior desempenho, apresenta-se a situação de referência, que não possui adições (a rigor, há um pequeno teor de filer calcário incorporado ao cimento).

A seguir, são feitas considerações e análises (a partir do estudo estatístico) de modo segmentado, considerando individualmente cada um dos dois fatores principais do estudo, ou seja, o tipo de concreto (adições minerais) e a relação  $a/ag$ .

#### **a) Influência do Tipo de Concreto**

Na Figura 5.13 é mostrado o resultado do agrupamento de médias para cada tipo de concreto, onde as linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente entre si, obtidas do teste de comparação múltiplas de médias.

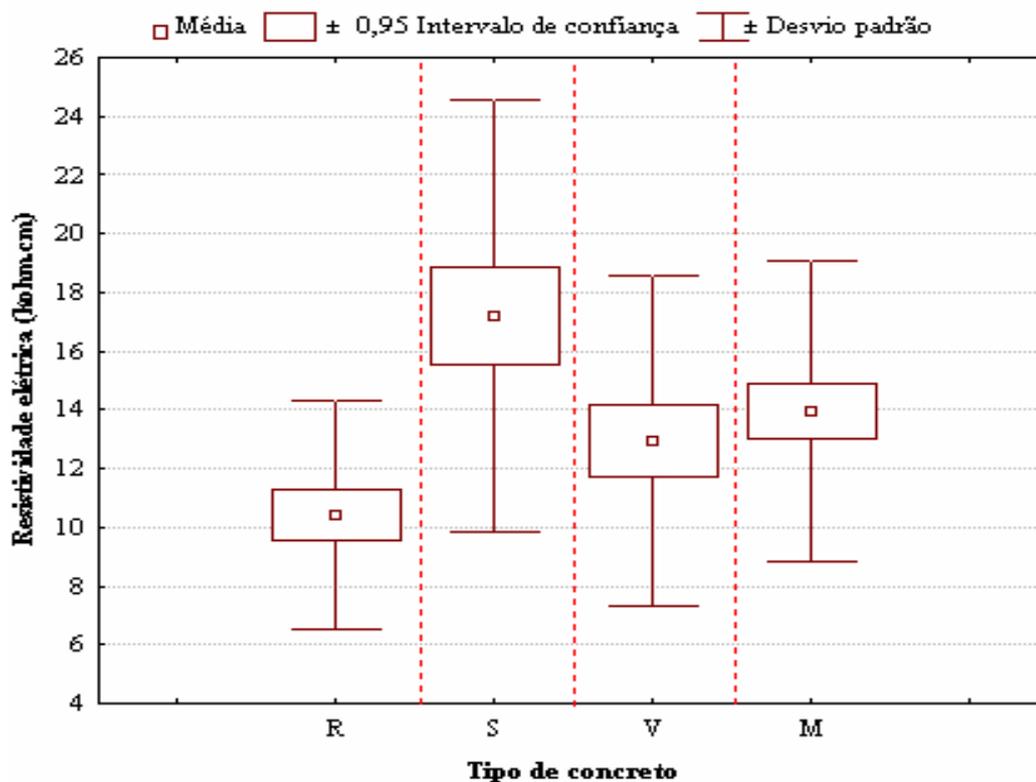


Figura 5.13 – Valores médios globais de resistividade elétrica para todos os concretos com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. A linha tracejada vertical define os grupos que diferem significativamente.

Comparando estatisticamente a média global de resistividade dos concretos por tipo de concreto, ou seja, em função das diferentes adições minerais, contudo sendo essas médias representativas das duas relações a/ag, obtêm-se quatro grupos estatisticamente distintos, cuja seqüência em ordem crescente é a seguinte: referência, cinza volante, metacaulim e sílica ativa. Esta é a seqüência global do resultado experimental, que exprime a tendência geral dos resultados de resistividade em função das adições minerais, corroborando assim os resultados e comentários constantes nos itens 5.1.2 e 5.1.4.1.

Na Figura 5.13, portanto, os concretos de referência apresentaram menor média global e menor dispersão nos resultados, enquanto os concretos com sílica ativa apresentaram maior valor de média global, porém, como os demais concretos, estes apresentaram grande dispersão dos resultados.

### b) Influência da Relação Água/Aglomerante

Na Figura 5.14 é mostrado o resultado do agrupamento de médias, considerando a influência da relação a/ag, onde a linha tracejada vertical define os grupos que diferem significativamente entre si, obtidas do teste de comparação múltiplas de médias.

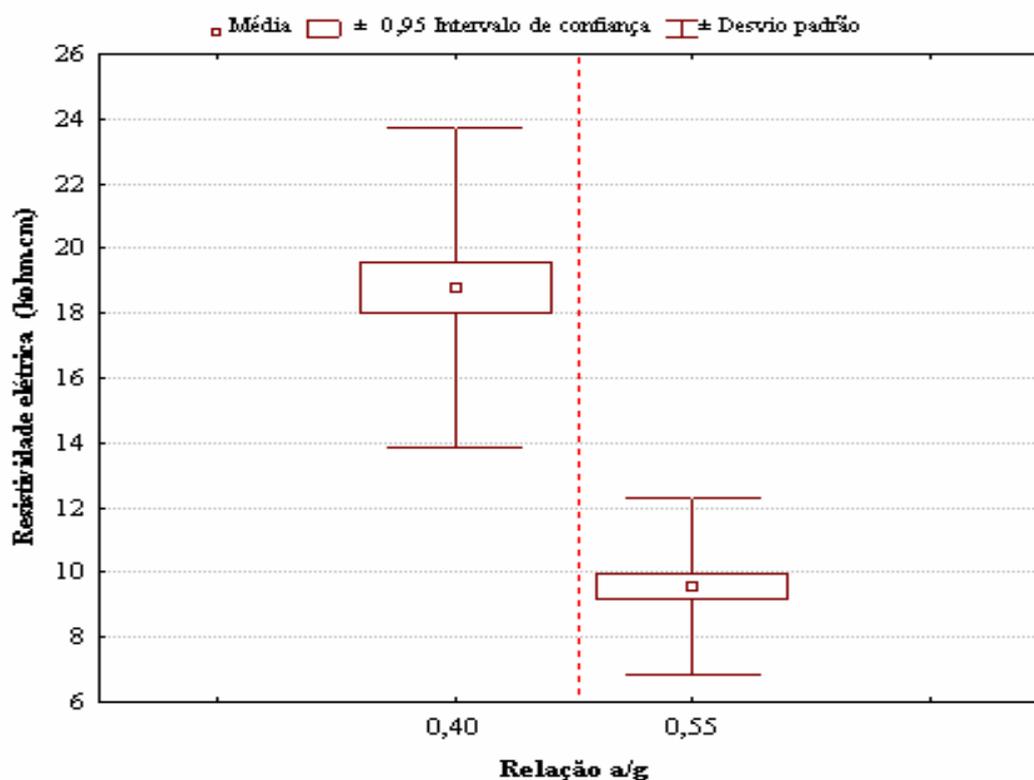


Figura 5.14 – Valores médios globais de resistividade elétrica para todos os concretos com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. A linha tracejada vertical define os grupos que diferem significativamente.

O teste de Duncan para o agrupamento de médias resultou na formação de dois grupos distintos, um formado pela relação a/ag 0,40 e outro composto pela relação a/ag 0,55. Este resultado é óbvio, uma vez que a análise de variâncias (Tabela 5.2) já concluíra ser significativa a influência da relação a/ag nos valores de resistividade do concreto e, tendo esta variável um nível de variação igual a 2 (apenas duas relações a/ag), então inequivocamente o teste de Duncan (comparação múltiplas de médias) separaria os resultados em dois grupos.

A diferença entre as médias globais dos concretos 0,40 e 0,55 é expressiva, indicando maior valor de resistividade elétrica para o concreto de a/ag 0,40, apesar da maior

dispersão nos resultados do que os concretos de relação a/ag 0,55. De fato, Neville (1997) ressalta que a resistividade do concreto aumenta rapidamente com a redução da relação água/aglomerante. O fato da dispersão, em geral, ser alta para esses resultados expressos conforme Figura 5.14, é porque cada uma das duas médias globais contempla os resultados individuais de todos os concretos em cada relação a/ag, em que se têm as várias adições minerais e a situação de referência.

### 5.1.4.2 Análise Estatística dos Teores de Metacaulim

Os resultados da análise estatística de variância (ANOVA) dos valores de resistividade elétrica para os concretos com adição de metacaulim nos teores de 10%, 20% e 30% em substituição ao cimento Portland estão apresentados na Tabela 5.3.

**Tabela 5.3 - Resultados da análise de variância (ANOVA) realizada com dados de resistividade elétrica dos concretos com adição de metacaulim, para os fatores ou variáveis independentes consideradas no modelo estatístico.**

Efeito	SQ	GL	MQ	F <sub>calc.</sub>	F <sub>tab.</sub>	Resultado
Modelo	6574,53	5	1314,91	130,97	2,25	significativo
Erro (resíduo)	2560,08	255	10,04	--	--	--
Total	9134,61	260,00	--	--	--	--
Teor de subst.	1813,41	2	906,71	90,314	3,03	significativo
Relação a/ag	4597,17	1	4597,17	457,907	3,88	significativo
Teor de subst. x relação a/ag	107,92	2	53,96	5,375	3,03	significativo
Erro (resíduo)	2560,08	255	10,04	--	--	--

$$R^2_{\text{mod}} = 0,72$$

$$R_{\text{mod}} = 0,85$$

Onde:

SQ = Soma dos quadrados;

GL = Graus de liberdade;

MQ = Média dos quadrados;

F = parâmetro de Fischer para o teste de significância dos efeitos;

Resultado = resultado da análise, com indicação se o efeito é significativo ou não;

$R^2_{\text{mod}}$  = coeficiente de determinação do modelo; e

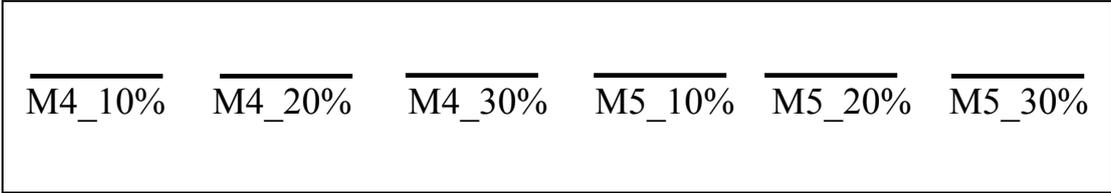
$R_{\text{mod}}$  = coeficiente de correlação do modelo.

A análise estatística evidenciou que o modelo fatorial é significativo, uma vez que o valor de  $F_{\text{calc.}}$  é maior que o valor de  $F_{\text{tab}}$  e o valor resultante de  $R^2_{\text{mod}}$  foi de 0,72, o que significa dizer que 72% da variação total dos dados é explicada pelo modelo.

A ANOVA também evidenciou que os efeitos individuais dos fatores teor de substituição e relação água/aglomerante são estatisticamente significativos a um nível de confiança de 95%. Isto significa dizer que cada uma dessas variáveis, tomada isoladamente, exerce influência na resistividade elétrica. Pode-se constatar, por meio de  $f_{\text{calc.}}$ , que a variável mais influente na resistividade é a relação água/aglomerante, vindo em seguida a variável teor de substituição.

Com relação às interações duplas, pode-se dizer que os resultados estatísticos indicaram uma sinergia entre teor de substituição e relação água/aglomerante, apesar do pequeno valor de  $F_{\text{calc.}}$  comparativamente aos demais.

Aplicando a comparação múltipla de médias, pelo método de Duncan, ao conjunto global de dados, verificou-se a tendência decrescente da resistividade (da esquerda para a direita), com cada um dos concretos assumindo uma posição individualizada na disposição dos grupos, ou seja, cada concreto (com o seu teor de metacaulim e relação a/ag) comporta-se estatisticamente diferente no tocante à resistividade.



$\overline{M4\_10\%}$     $\overline{M4\_20\%}$     $\overline{M4\_30\%}$     $\overline{M5\_10\%}$     $\overline{M5\_20\%}$     $\overline{M5\_30\%}$

**Figura 5.15 – Ordem decrescente de médias e disposição dos grupos definidos pela comparação múltipla de médias, por meio do teste de Duncan para os valores de resistividade elétrica.**

A seguir estão comentados os efeitos dos dois vários efeitos considerados na resistividade elétrica, tomados isoladamente.

### a) Influência do Teor de Metacaulim

Considerando, então, que a variável teor de substituição mostrou-se significativa e, buscando avaliar especificamente este efeito, realizou-se uma comparação múltipla de médias, pelo teste de Duncan, com a finalidade de agrupar médias que não diferem significativamente entre si e separar aquelas que diferem, distinguindo assim os grupos, conforme se apresenta na Figura 5.16.

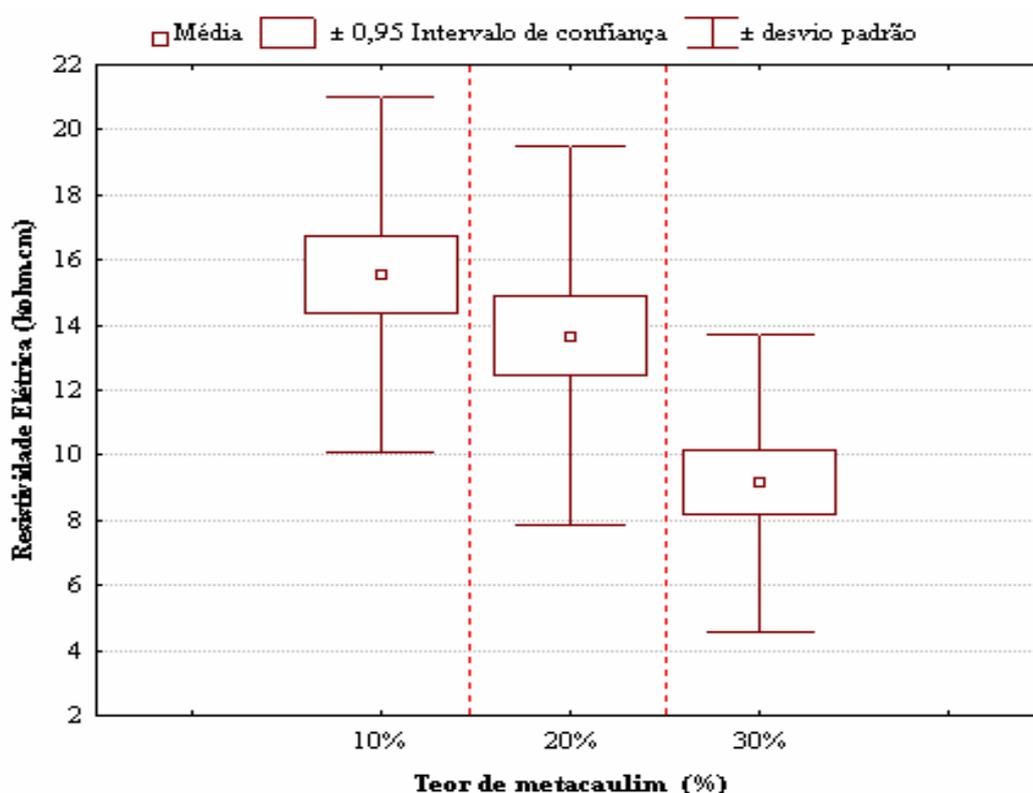


Figura 5.16 – Valores médios globais de resistividade elétrica para todos os concretos com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. A linha tracejada vertical define os grupos que diferem significativamente.

O teste de Duncan mostrou a existência de três grupos distintos quanto ao teor de substituição em relação à resistividade. Sob a ótica da estatística, os três teores de metacaulim, utilizados nos concretos em substituição ao cimento Portland, são diferentes no que se refere à resistividade do concreto, sendo que o teor de 10% apresentou os maiores valores de resistividade elétrica. O teor de 20% mostrou valores intermediários e o teor de 30% resultou nos mais baixos valores de resistividade.

O comentário pertinente para esse resultado é que, certamente, existe um teor ou uma pequena faixa de teores em que a presença do metacaulim se reflete em valores máximos de resistividade (teor ótimo), de modo que ao se ultrapassar esse teor ou faixa, a resistividade diminui. O conceito de teores ótimos para adições minerais incorporados ao concreto é verdadeiro, uma vez que, seja por ação pozolânica, seja por efeito filer ou ambos os efeitos, cada diferente tipo de adição atua também diferente na pasta de cimento. Assim, para cada tipo específico de adição, haverá sempre uma contribuição ótima da quantidade desse material com o teor de cimento, na qual a alteração física da pasta será a mais significativa em relação à propriedade avaliada.

O resultado observado na Figura 5.16 sugere que, dentre os teores de metacaulim considerados, 10% foi o que significou a maior resistência à transferência de cargas elétricas na capa superficial do concreto. Provavelmente, nessa situação, houve maior refinamento de poros e menor interconexão desses poros, o que implica menor permeabilidade (não necessariamente menor porosidade total).

### **b) Influência da Relação Água/Aglomerante**

A Figura 5.17 exhibe as médias globais de resistividade para os concretos com relação água/aglomerante 0,40 e 0,55 e a Figura 5.18 mostra os valores médios de resistividade para cada teor de metacaulim em função da relação a/ag.

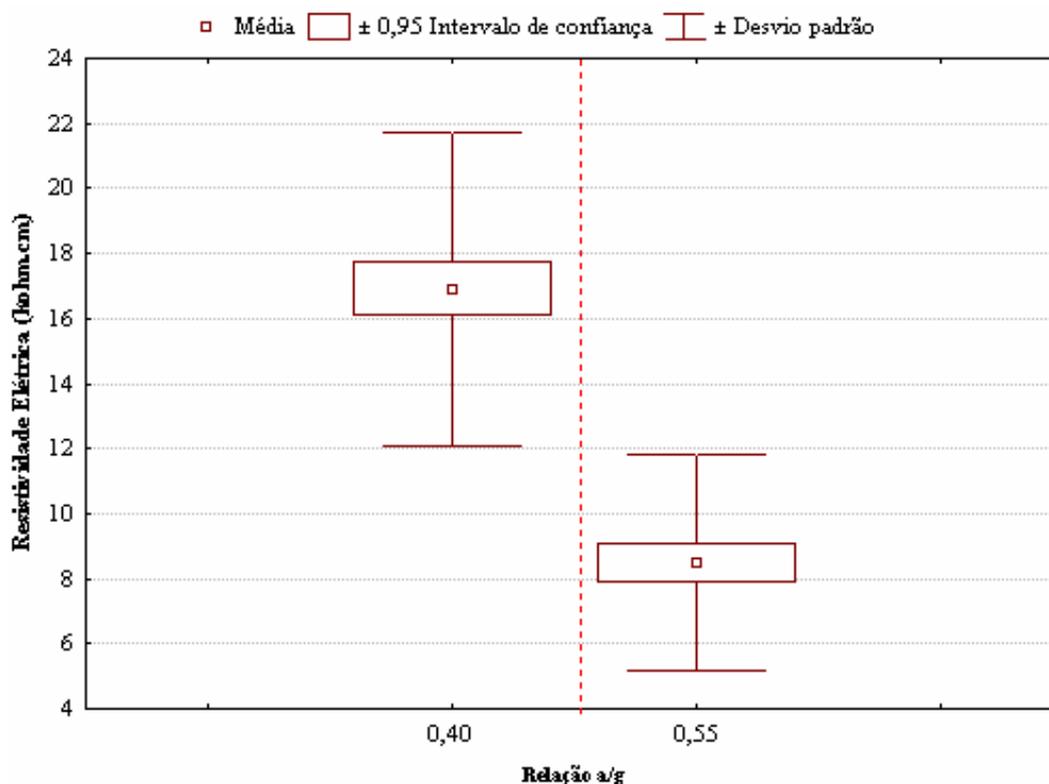


Figura 5.17 – Valores médios globais de resistividade elétrica para todos os concretos com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. A linha tracejada vertical define os grupos que diferem significativamente.

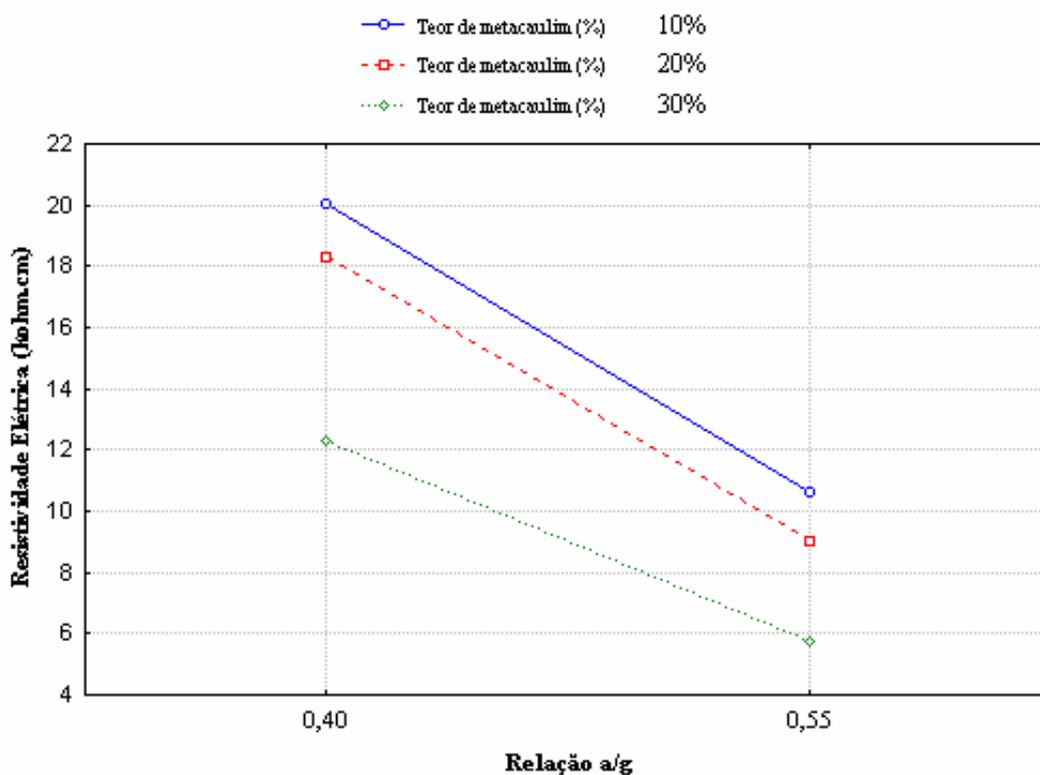


Figura 5.18 – Valores médios da resistividade elétrica para cada teor de adição em função da relação a/ag.

A Figura 5.18 exibe um resultado coerente e já esperado, que concretos com maior relação água/aglomerante obtêm baixos patamares de resistividades elétricas. Sendo a relação a/ag o principal parâmetro controlador da porosidade do concreto, é de se esperar que a resistividade seja fortemente influenciada por esse parâmetro, o que vai ao encontro com uma enorme gama de resultados de pesquisa, tanto no Brasil quanto internacionalmente.

Ao se detalhar as médias por teor de metacaulim, em cada relação a/ag, nota-se a tendência já comentada da queda de resistividade com o aumento do teor de metacaulim. Contudo, vê-se que os resultados com 10% e 20% de metacaulim estão mais próximos e, de fato, há uma forte redução da resistividade com 30% (como observado também na Figura 5.17, todavia ressaltando-se que há diferenças significativas entre os três teores de metacaulim).

### 5.1.5 Valores Médios e Análise Final dos Valores de Resistividade Elétrica

A Figura 5.19 mostra o valor médio<sup>5.2</sup> de resistividade elétrica para os concretos estudados.

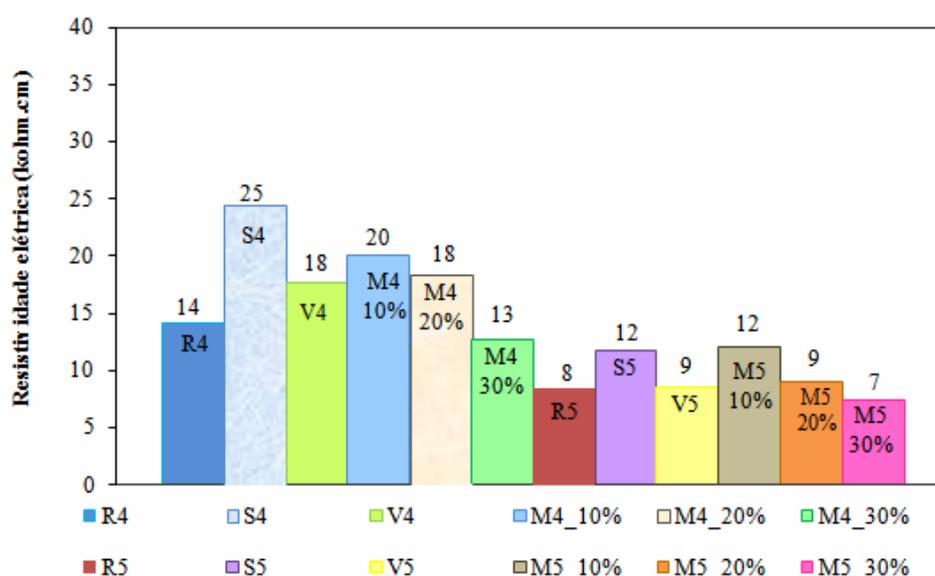


Figura 5.19 – Valores médios de resistividade elétrica para os concretos estudados.

<sup>5.2</sup> Entendendo-se como valores médios de resistividade a média aritmética das medidas efetuadas semanalmente ao longo de 44 ciclos de imersão, considerando que este valor semanal compreendeu a média de três determinações de resistividade elétrica.

Analisando a Figura 5.19, pode-se perceber que a sílica ativa, seguida pelo concreto com adição de 10% de metacaulim, exibe os maiores valores médios de resistividade elétrica.

A partir da análise global dos resultados, pode-se afirmar que os concretos com adição de sílica ativa mostraram os maiores valores de resistividade elétrica, podendo-se destacar também os concretos com adição de metacaulim, principalmente no teor de 10% de substituição ao cimento Portland com bons resultados. Por outro lado, os concretos de referência exibiram o pior desempenho. Cabe salientar-se que, com 30% de metacaulim, os resultados de resistividade foram muito similares aos dos concretos de referência, evidenciando que esse teor de metacaulim não propiciou alterações positivas no concreto quanto à resistividade elétrica.

Resultados semelhantes aos obtidos nesta pesquisa foram apresentados por Ferreira (2003), que utilizou três relações água/aglomerante, a saber: 0,40, 0,55 e 0,70, e obteve que os concretos com sílica ativa também tiveram os melhores resultados, seguidos pelos concretos com metacaulim.

Resultados obtidos desta pesquisa também concordam com os relatos gerais da bibliografia, de que a adição de sílica ativa ao concreto promove um acréscimo brusco na resistividade do concreto, apesar da sílica ativa reduzir a alcalinidade da matriz (NEVILLE, 1995; MONTEMOR *et al.*, 2000; LORENTZ; FRENCH, 1995 *apud* FERREIRA, 2003).

Assim, Dotto *et al.* (2004) indicaram que a adição de 6% de sílica ativa aumentou a resistividade elétrica do concreto em 2,5 vezes e que a adição de 12% de sílica ativa aumentou em 5 vezes a resistividade, sugerindo que a adição de sílica ativa pode ser eficazmente usada para a proteção da armadura de aço no concreto contra a corrosão. No presente trabalho, o acréscimo na resistividade promovido pela sílica ativa foi, em média, 1,60 (para as duas relações a/ag) em relação ao concreto de referência. Para Sun *et al.* (2004), a adição de sílica ativa ao concreto de alto desempenho, em mistura binária no teor de 10% em substituição

parcial ao cimento, aumentou a resistividade elétrica do concreto em 25%. Evidentemente que sendo o concreto de alto desempenho naturalmente muito resistivo, a contribuição da sílica ativa na resistividade é menor do que em concretos convencionais.

## **5.2 AVALIAÇÃO DA CORROSÃO DA ARMADURA**

A avaliação da corrosão na armadura dos concretos estudados contempla resultados que dizem respeito à termodinâmica e a cinética do processo corrosivo, além de resultados sobre a impedância eletroquímica e inspeções visuais na armadura.

### **5.2.1 Resultados Relacionados à Termodinâmica do Processo Eletroquímico**

Os resultados relacionados à termodinâmica do processo eletroquímico de corrosão, no presente trabalho, compreendem medidas de potencial de corrosão monitoradas com o tempo de ataque, conforme se discorre a seguir.

#### **5.2.2.1 Monitoramento do Potencial de Corrosão com o Tempo de Ataque**

Para a avaliação dos concretos quanto à técnica de potenciais de corrosão, adotou-se, entre outros, os critérios de probabilidade sugeridos pela ASTM C 876/1991 (ASTM, 2003b), o qual associa os valores de potencial à probabilidade de corrosão com as seguintes faixas de potenciais (medidas com eletrodo de referência de calomelano saturado - ECS), conforme a Tabela 5.5.

**Tabela 5.4 - Parâmetros de avaliação dos valores de potencial de corrosão, segundo a ASTM C 876/1991 (ASTM, 2003b).**

Potenciais de Corrosão	Probabilidade de corrosão (%)
Mais negativo que - 276	> 90
Entre -126 e -276	Incerta
Mais positivo que - 126	< 10

Os resultados das medidas de potenciais de corrosão com o tempo de ataque (ciclos), para os concretos estudados, estão apresentados, a seguir, nas Figuras 5.20 a 5.32. Os valores individuais estão mostrados no Anexo B.

#### **a) Influência da Relação Água/Aglomerante**

Nas Figuras 5.20 a 5.25, a seguir, apresentam-se os resultados médios<sup>5.3</sup> de potencial de corrosão em gráficos para cada tipo de concreto, considerando-se as duas relações água/aglomerante.

Entre o 31º e o 39º ciclo, conforme informado no item 5.1.1, a sala climatizada, onde os corpos-de-prova permaneciam durante os ciclos de imersão, apresentou problemas técnicos e registrou-se baixas umidades relativas do ar (em torno de 20%). Desta forma, os concretos estiveram mais secos, alterando o seu comportamento quanto ao potencial de corrosão e a resistividade elétrica no referido período.

<sup>5.3</sup> Ressaltando-se as curvas das figuras em questão são médias de 4 determinações individuais (uma determinação em cada barra de aço do corpo-de-prova). Alguns concretos apresentaram barras com comportamento de potencial muito diferente das demais barras e, por isso, essas barras foram consideradas como espúrias e, obviamente, não foram inseridas no cálculo do valor médio.

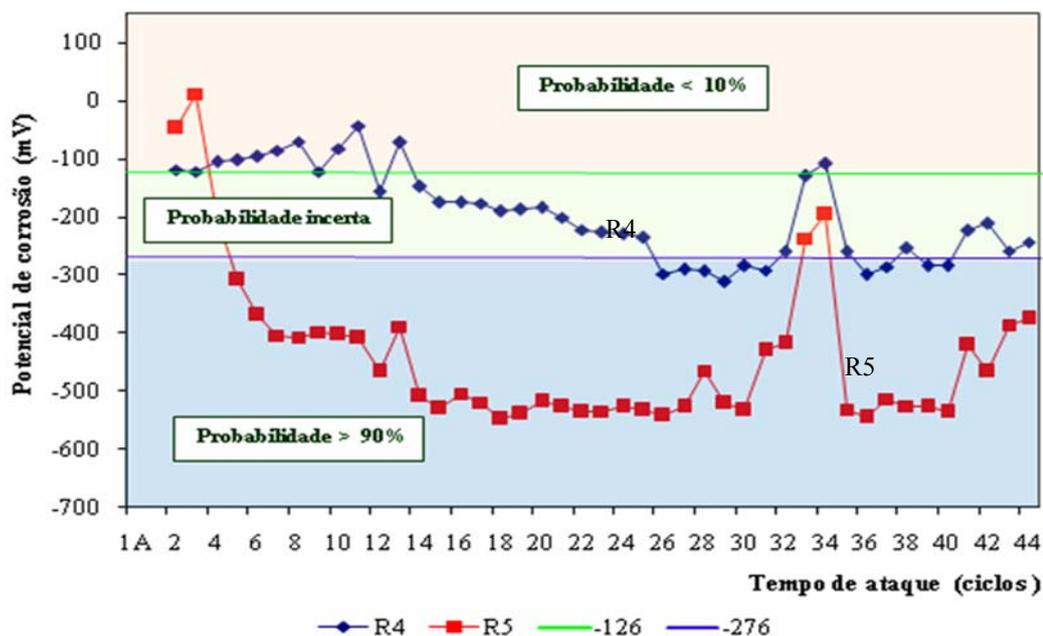


Figura 5.20 – Potenciais de corrosão variando com o número de ciclos de ataque para os concretos de referência (sem adições); medidas em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS).

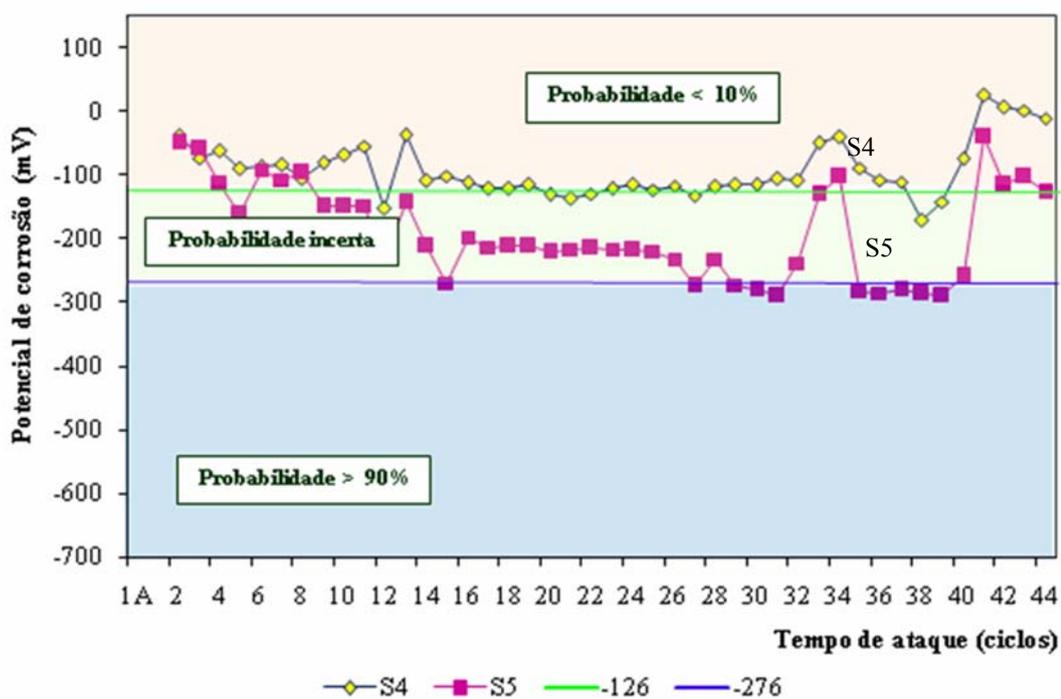


Figura 5.21 – Potenciais de corrosão variando com o número de ciclos de ataque para os concretos com adição de sílica ativa; medidas em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS).

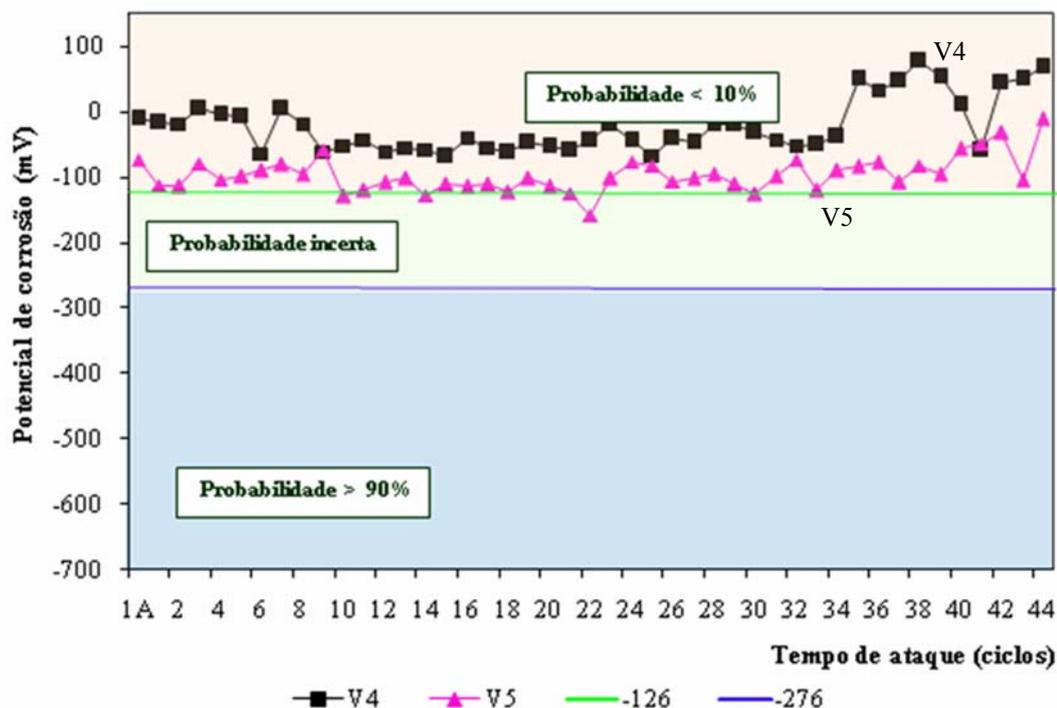


Figura 5.22 – Potenciais de corrosão variando com o número de ciclos de ataque para os concretos com adição de cinza volante; medidas em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS).

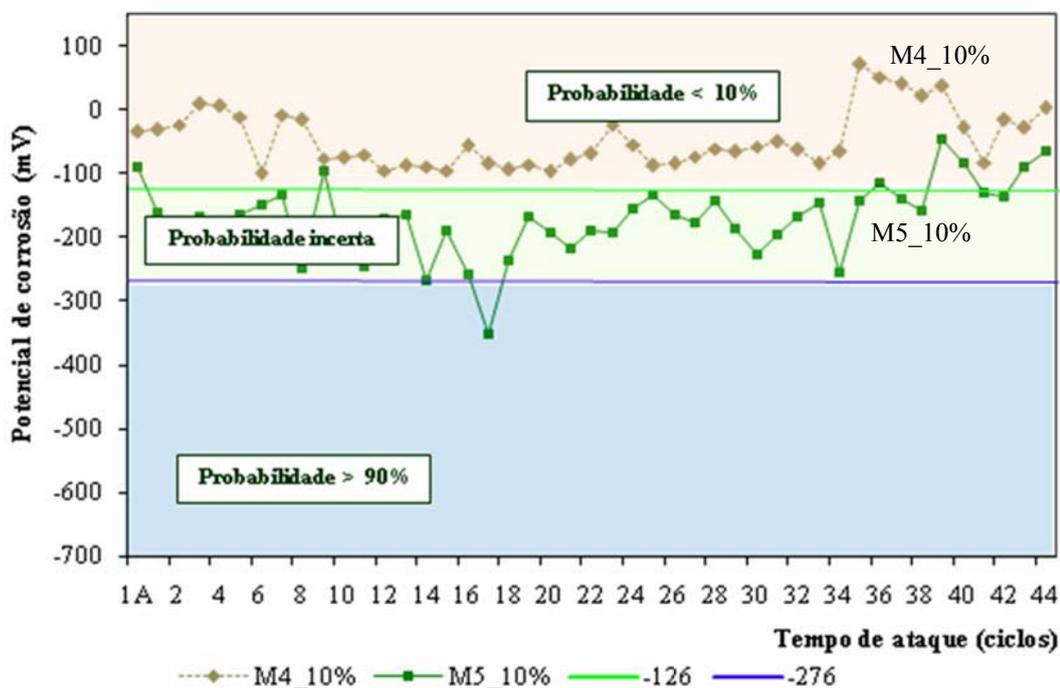


Figura 5.23 – Potenciais de corrosão variando com o número de ciclos de ataque para os concretos com adição de 10% de metacaulim; medidas em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS).

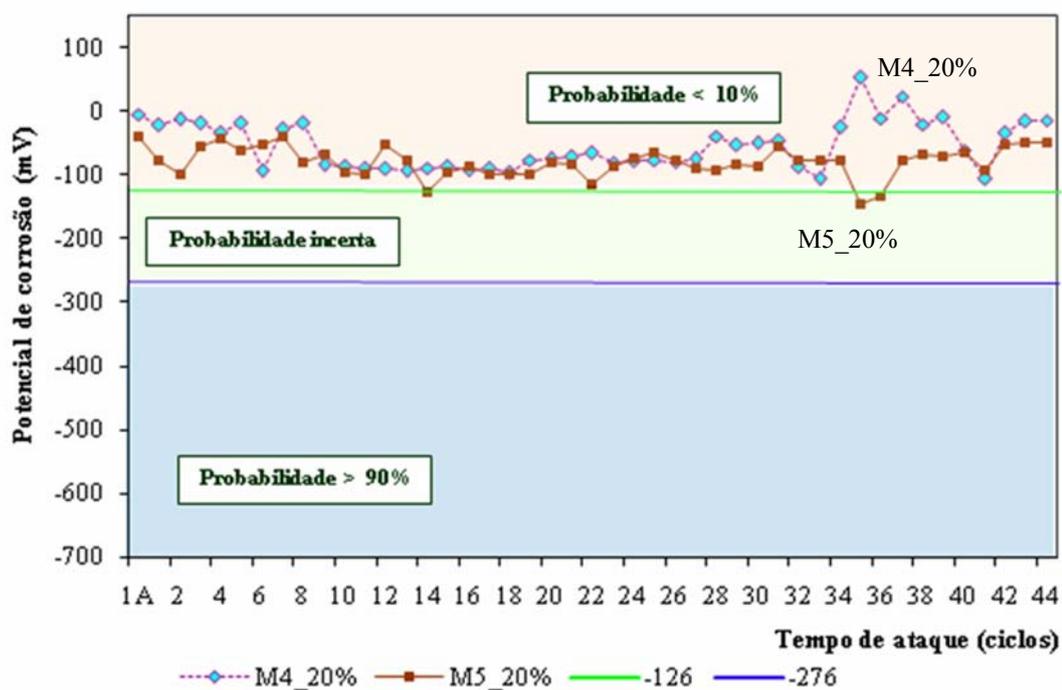


Figura 5.24 – Potenciais de corrosão variando com o número de ciclos de ataque para os concretos com adição de 20% de metacaulim; medidas em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS).

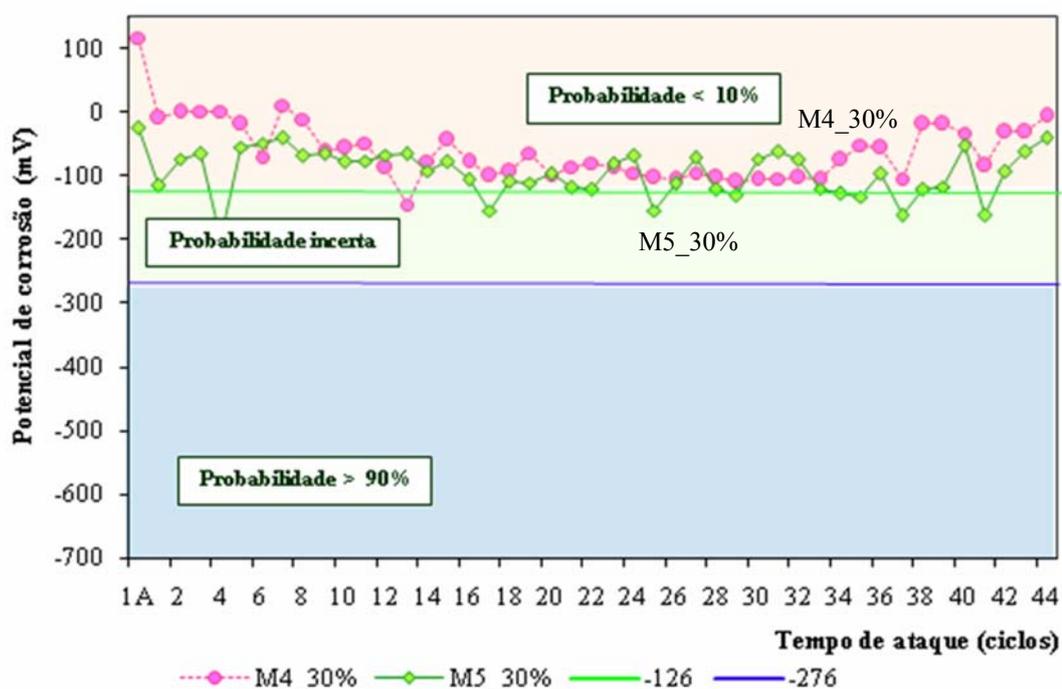


Figura 5.25 – Potenciais de corrosão variando com o número de ciclos de ataque para os concretos com adição de 30% de metacaulim; medidas em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS).

Nas figuras anteriores, pode-se notar uma tendência comum de que em presença de íons cloreto, os valores de potencial de corrosão são mais eletronegativos para relações água/aglomerante maiores. Em geral, nota-se que há uma ligação entre resistividade elétrica e os potenciais de corrosão, onde os concretos com maiores resistividades, causada pela densificação da microestrutura do concreto (menor volume de vazios, poros de pequeno diâmetro com pouca ou nenhuma interconexão entre eles, zona de transição menos frágil) exibem potenciais de corrosão mais eletropositivos.

Segundo Ferreira (2003), a presença de íons cloretos na solução dos poros do concreto reduz sobremaneira sua resistividade, tendendo a tomar valores de potencial de corrosão mais eletronegativos. Esta tendência parece predominar para os concretos estudados. Cabe salientar que para três concretos, a saber: M20%, M30% e V esta tendência foi diferenciada. Para os concretos com 20% de substituição de cimento Portland por metacaulim, apesar das resistividades terem sido diferentes para as duas relações a/ag (para a relação a/ag 0,40, a resistividade esteve na faixa de baixa probabilidade de corrosão e, para relação a/ag 0,55, a resistividade esteve na faixa de alta probabilidade de corrosão), o potencial de corrosão manteve-se em um mesmo patamar (da ordem de -75 mV e probabilidade menor que 10% de ocorrer corrosão), constatando que os dois concretos, no que se refere às características da interface, ou seja, quanto aos aspectos da passivação, são similares. Raciocínio semelhante pode ser usado para justificar o comportamento do concreto M30% e V. É interessante observar que, por hipótese, a menor alcalinidade dos sistemas com adições minerais, que tenderia a produzir películas de passivação menos densas e consolidadas em comparação àquelas dos concretos de referência (de maior pH da solução do poro), não se refletiu em potenciais mais eletronegativos em relação aos potenciais dos sistemas de referência. Nos períodos iniciais de monitoramento, os potenciais de todos os corpos-de-prova partem de uma mesma ordem de grandeza de potenciais (de uma faixa entre 0 e -100 mV, em geral), porém os dois únicos casos

sugestivos de despassivação<sup>5.4</sup> das armaduras se dão, justamente, com os concretos de referência (despassivação do concreto de relação a/ag 0,40 em torno de 27 ciclos de ataque e do concreto de relação a/ag 0,55 em torno de 6 ciclos).

Na Figura 5.26, a seguir, apresentam-se os resultados médios de potencial de corrosão para os concretos com relação água/aglomerante 0,40 e 0,55.

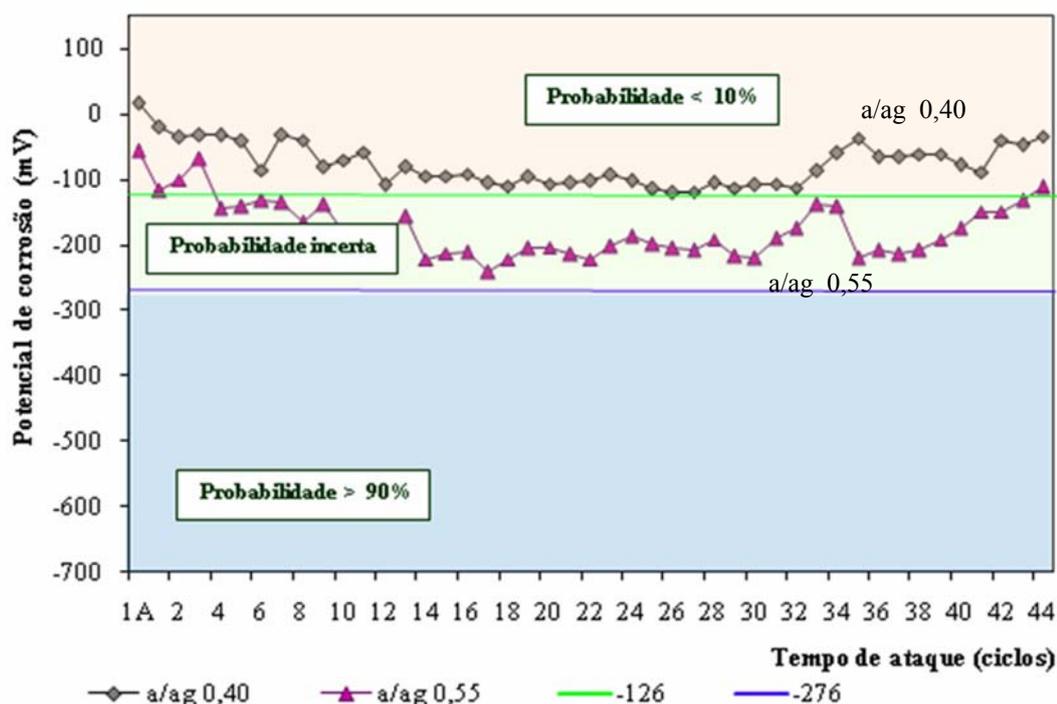


Figura 5.26 – Potenciais de corrosão (valores médios globais) variando com o número de ciclos de ataque para os concretos com relação a/ag 0,40 e a/ag 0,55, medidas em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS).

Nos valores médios de potencial de corrosão da Figura 5.26, onde cada ponto representa o valor médio de todos os concretos para cada relação a/ag, pode-se notar a coerência dos resultados expressos no gráfico, onde relações água/aglomerantes maiores tendem a exibir valores de potencial de corrosão mais eletronegativos, com uma diferença aproximada de 150 mV entre as duas relações a/ag consideradas.

## b) Influência da Adição Mineral

<sup>5.4</sup> Nesses sistemas com cloretos, considera-se prudente adotar como critério de despassivação o limite entre as faixas de incerteza e de alta probabilidade de corrosão, como discutido por Cascudo (1997; 2000).

As Figuras 5.27 e 5.28 apresentam a influência das adições minerais no potencial eletroquímico de corrosão (mV). Os valores de potencial de corrosão, expresso nas figuras a seguir, representam a cada ciclo, a média aritmética de 4 determinações individuais por tipo de concreto. Eventualmente, concretos com alguma barra de comportamento espúrio, foi excluída do calculo da média dos potenciais.

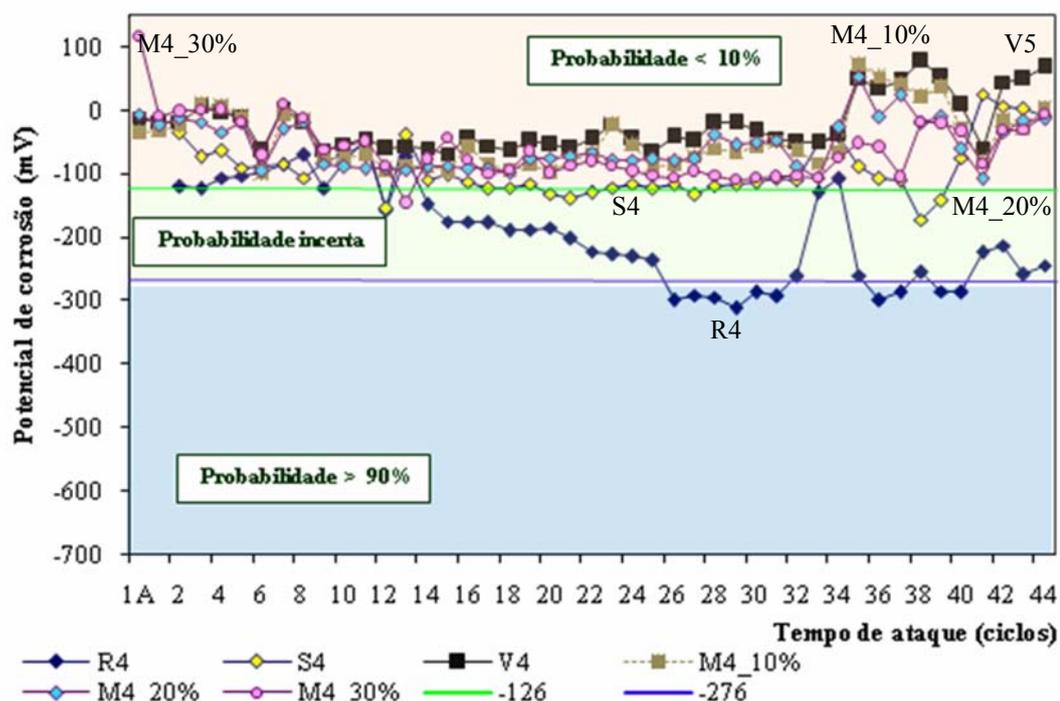


Figura 5.27 – Potenciais de corrosão variando com o número de ciclos de ataque para concretos com relação água/aglomerante igual a 0,40; medidas em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS).

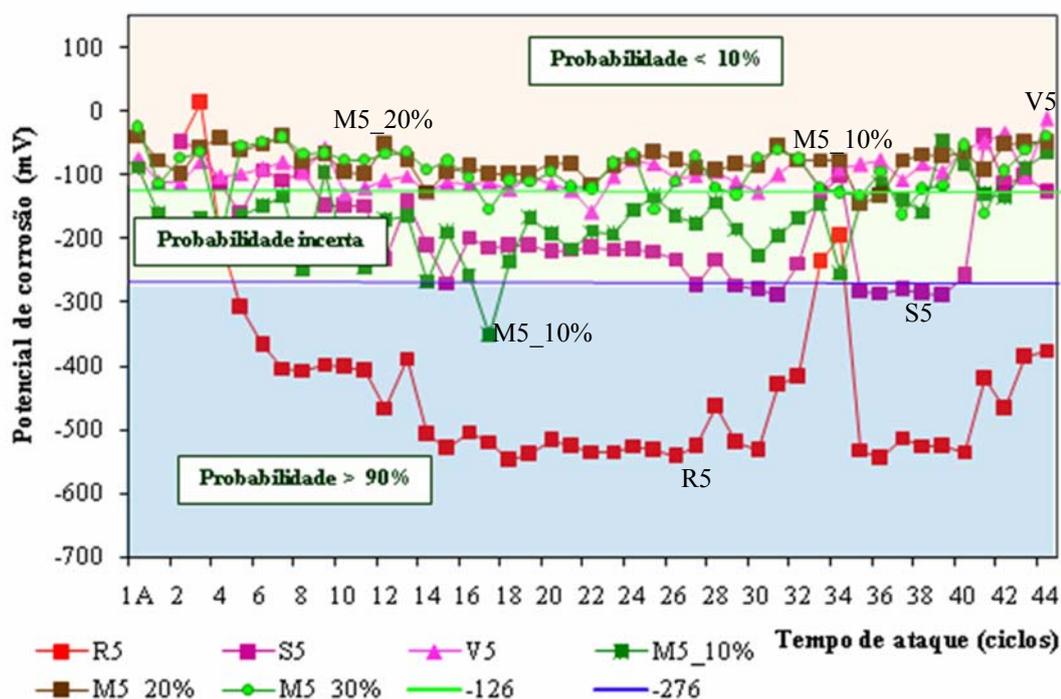


Figura 5.28 – Potenciais de corrosão variando com o número de ciclos de ataque para concretos com relação água/aglomerante igual a 0,55; medidas em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS).

Das figuras anteriores, é nítido o efeito benéfico que as adições minerais propiciam aos concretos, independente da relação água/aglomerante, promovendo valores de potencial de corrosão significativamente mais eletropositivos em relação aos concretos de referência. Desta forma, pode-se perceber que os concretos de referência, comparativamente aos concretos com adição mineral, exibem uma maior tendência à despasseivação das armaduras quando inseridos em ambientes contendo íons cloreto.

A sílica ativa, ao contrário do que se esperava, não obteve o melhor desempenho quanto ao potencial de corrosão, apesar de possuir altos valores de resistividades. Cabe destacar o bom desempenho dos concretos com cinza volante, seguido pelos concretos com adição de metacaulim nos teores de 20% e 30%, concretos com sílica ativa e concretos com metacaulim no teor de 10% e, por fim, com o menor desempenho apresentado, os concretos de referência. Assim, mais uma vez fica evidente a eficácia das adições minerais no que se refere a proteger física e quimicamente a armadura, mantendo à passivada o maior tempo possível. Conforme

comentado anteriormente, somente os concretos de referência dão evidências inequívocas de despassivação da armadura ao longo dos 44 ciclos de ataque.

### **c) Influência da Classe de Resistência**

A classe de resistência é uma variável que não foi pré-definida no programa experimental. Entretanto, com os valores médios de resistência à compressão aos 91 dias de idade e considerando desvio padrão (Sd) no valor de 4 MPa, classificou-se os concretos quanto à classe de resistência, segundo a NBR 8953 (ABNT, 1992). Os concretos e suas classes de resistência estão apresentados no item 4.1, alínea “d”, do Capítulo 4. Desta forma, a Figura 5.29 mostra a influência da classe de resistência no potencial de corrosão dos concretos estudados. Salienta-se que os valores expressos na Figura 5.29 são médias aritméticas dos resultados de potencial de corrosão de cada concreto, inclusive concretos de referência, em sua classe correspondente e, mesmo compreendendo que as médias não representam igualmente famílias de concretos, ainda sim decidiu-se apresentá-la para evidenciar o comportamento das classes de resistência quanto ao potencial de corrosão.

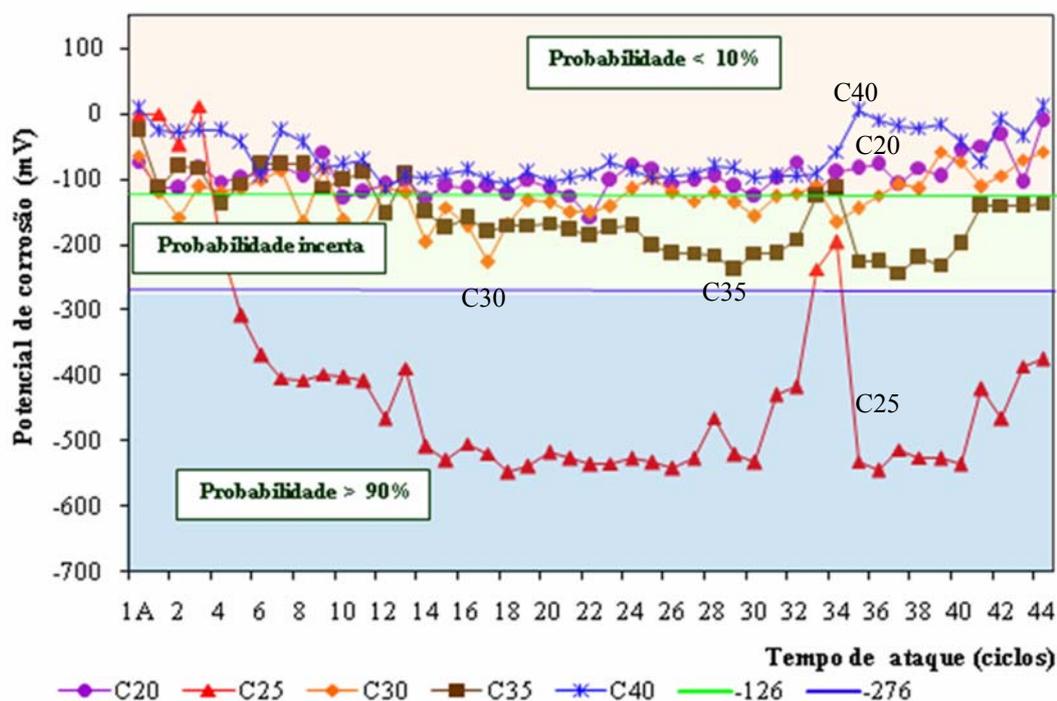
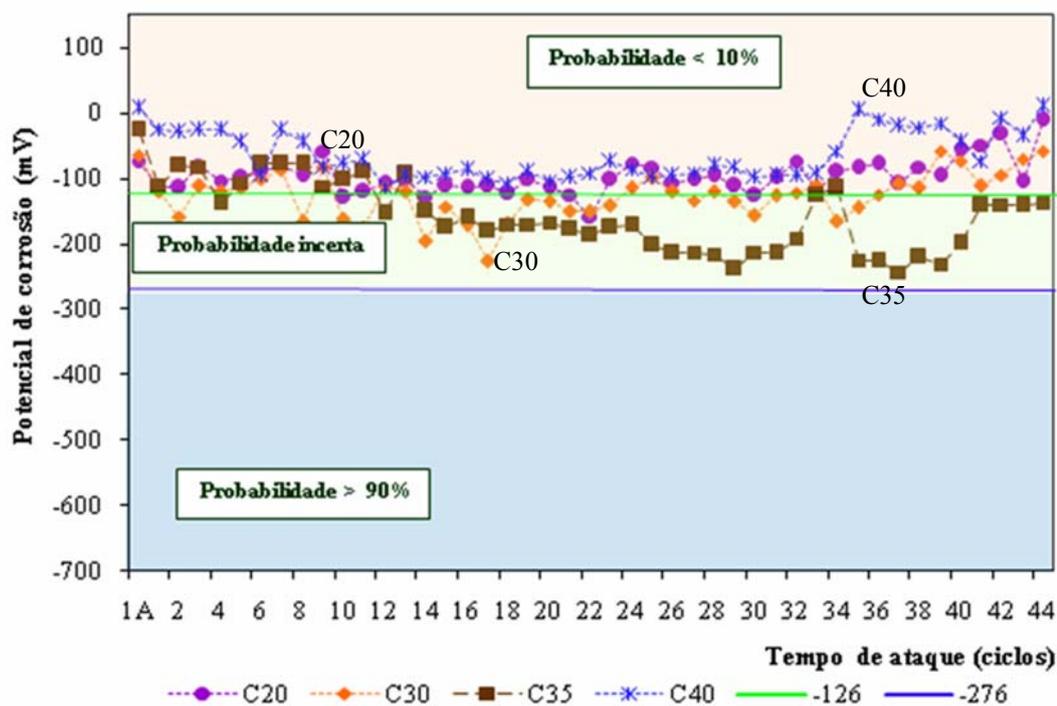


Figura 5.29 – Potenciais de corrosão variando com o número de ciclos de ataque para os concretos com adições e sem adições, considerando valores médios das classes ou grupos de resistência C20, C25, C30, C35 e C40; medidas em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS).

Analisando-se a Figura 5.29, nota-se que, para os concretos estudados, mais importante do que a classe de resistência é a presença das adições minerais interferindo decisivamente nos valores de potencial de corrosão. Comparando-se o concreto C25, cujo único representante é o concreto R5, com o concreto C20, que possui somente o representante V5, pode-se perceber a forte influência da adição mineral em manter valores mais positivos de potencial de corrosão. Os concretos C40 possuem faixas de potencial onde a probabilidade de corrosão é menor que 10%, isto se justifica porque nesta classe todos os concretos contêm adições, além de terem baixa relação  $a/ag$  (0,40). Para os concretos C35, pode-se evidenciar que o concreto de referência interfere na tendência da curva e a mantém na faixa de probabilidade de corrosão incerta.

Desta forma, para que análise dos potenciais de corrosão por classe de resistência fique mais coerente, apresenta-se na Figura 5.30 apenas os valores médios do potencial de corrosão para os concretos com adições minerais.



**Figura 5.30 – Potenciais de corrosão variando com o número de ciclos de ataque para concretos com adições minerais, considerando valores médios das classes ou grupos de resistência C20, C25, C30, C35 e C40; medidas em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS).**

A classe de resistência C25 que corresponde ao concreto referência R5 não está mostrada no gráfico da Figura 5.30, bem como o concreto R4 não foi imputado no cálculo da classe C35.

Na Figura 5.30, nota-se que, de modo geral, todas as quatro classes de resistência, com adições, têm comportamento similares, com valores superiores da classe C40, em que todos os concretos representantes desta classe possuem relação  $a/ag$  0,40. Quando se compara com os concretos sem adições (C25), percebe-se grande diferença nos resultados, logo a classe de resistência não é parâmetro suficiente para controle da corrosão sob ataque de cloretos, ou seja, não se constitui em um bom parâmetro de controle da durabilidade.

Nota-se também, analisando a Figura 5.30, que há uma semelhança, em termos de potencial de corrosão, entre concretos de C20 (V5) e C30 (M5\_10% e M5\_20%). Isto significa dizer que para a mesma relação a/ag de 0,55, concretos com metacaulim nos teores de 10% e 20% possuem performances próximas a concretos com cinza volante.

#### **d) Discussão de Parâmetros do Comportamento Termodinâmico – Tempo de Iniciação da Corrosão e Magnitude<sup>5.5</sup> dos Potenciais**

Na Tabela 5.6 está indicado o tempo de ataque até a despassivação da armadura, isto é, o tempo correspondente à fase de iniciação da corrosão de acordo com o diagrama de Tuutti (1982 *apud* CASCUDO, 1997). Para tanto, adotou-se que a armadura estaria despassivada quando os valores de potenciais de corrosão passem a valores mais eletronegativos que -276 mV, pelo menos, três medidas consecutivas (devido à variabilidade do ensaio), o que corresponde à região de probabilidade de corrosão superior a 90% (conforme comentado anteriormente).

---

<sup>5.5</sup> Definindo-se aqui, magnitude, como sendo o valor médio de potencial de corrosão mais eletronegativo ao longo dos 44 ciclos para cada concreto.

**Tabela 5.5 - Tempo de ataque até a despassivação da armadura, caracterizada pelo potencial de corrosão mais eletronegativo que -276 mV.**

Tipo de concreto	Teor de adição (%)	a/ag	Tempo de ataque até a despassivação	
			(dias)	ciclos
Referência (R)	0	0,40	196	28
		0,55	49	7
Silica ativa (S)	10	0,40	N*	N*
		0,55	217**	31**
Cinza Volante (V)	25	0,33	N*	N*
		0,40	N*	N*
		0,55	N*	N*
Metacaulim (M)	10%	0,40	N*	N*
		0,55	N*	N*
	20%	0,40	N*	N*
		0,55	N*	N*
	30%	0,40	N*	N*
		0,55	N*	N*

N\* - Não apresentaram indícios de despassivação de armaduras.

\*\* - Muito embora, este concreto obedeça ao critério adotado para definir a despassivação das armaduras e esteja na faixa de incerteza quanto à probabilidade de corrosão; os aspectos cinéticos, além do exame visual das barras após a abertura dos corpos-de-prova poderão confirmar se armadura realmente se apresenta despassivada.

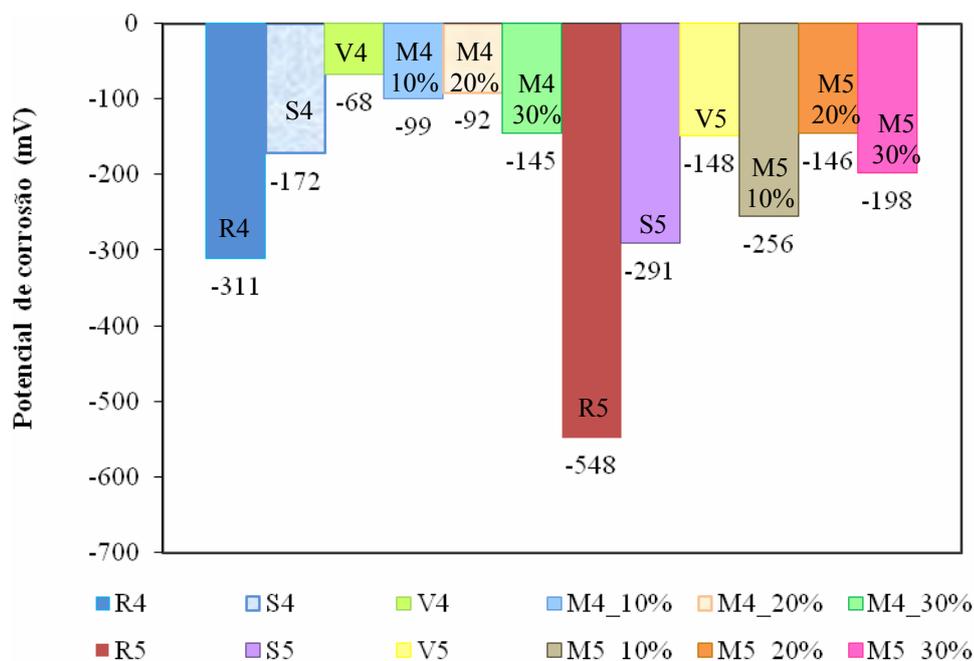
Na Tabela 5.6, pode-se perceber, de uma forma geral, a interveniência das adições minerais no comportamento dos potenciais de corrosão com o tempo de ataque, onde a presença das adições minerais, independente do tipo e teor, promove um aumento no tempo de iniciação de corrosão. Este resultado é bastante significativo, pois, apesar de se tratar de ensaio acelerado, sempre que se reporta a períodos de tempo até a despassivação, está em discussão à vida útil dos elementos ou estruturas de concreto. No presente trabalho, muito embora não se possa empregar diretamente os períodos de iniciação (em cada caso) para se avaliar a vida útil, já que, como dito anteriormente, o ensaio de indução da corrosão por cloretos foi um procedimento acelerado, contudo é imediata a percepção de que concretos de mesma relação

a/ag e de mesma resistência, mas que não empreguem adições minerais em sua composição, terão certamente menor vida útil de projeto <sup>5,6</sup>

A Tabela 5.7 mostra a magnitude dos potenciais de corrosão para os concretos estudados e, na Figura 5.31, apresentam-se estes resultados graficamente.

**Tabela 5.7 – Magnitude do potencial de corrosão ao longo dos 44 ciclos de imersão em solução agressiva contendo cloretos.**

Tipo de concreto	Teor de adição (%)	a/ag	Magnitude do potencial de corrosão (mV)
Referência (R)	0	0,40	-311
		0,55	-548
Silica ativa (S)	10	0,40	-172
		0,55	-291
Cinza Volante (V)	25	0,40	-68
		0,55	-148
Metacaulim (M10)	10	0,40	-99
		0,55	-256
Metacaulim (M20)	20	0,40	-92
		0,55	-146
Metacaulim (M30)	30	0,40	-145
		0,55	-198



**Figura 5.31 – Magnitude dos valores médios de potencial de corrosão dos concretos estudados.**

<sup>5,6</sup> Considerando, conceitualmente, vida útil de projeto como o período de tempo desde a execução do elemento estrutural até o momento em que a armadura, parcialmente ou totalmente, perde a sua passivação natural.

Por meio da Tabela 5.7 e da Figura 5.31, pode-se perceber a eficácia das adições minerais na proteção da armadura. Dentre o tipo de concreto, o concreto referência obteve o pior desempenho e, dentre os tipos de concretos com adições minerais, destaque negativo cabe ao concreto com sílica ativa e de relação a/ag 0,55 que obteve o pior comportamento. Todavia, apesar de se registrar na tabela a despassivação para este concreto, há incerteza em relação a tal fato, em virtude da curva permanecer apenas um pouco mais negativa que  $-276$  mV (ECS) e, ao final do período de ataque, ela recuperou-se para potenciais mais positivos.

#### **e) Análise Estatística dos Resultados de Potencial de Corrosão**

Com os resultados médios de potencial de corrosão para cada tipo de concreto ao longo dos 44 ciclos de imersão, realizou-se análise estatística (ANOVA), contemplando uma análise global do experimento abrangendo concretos de referência, com sílica ativa, com cinza volante e com metacaulim no teor de 10% de substituição ao cimento.

O modelo estatístico referente ao estudo do teor ideal de metacaulim em relação ao potencial de corrosão não resultou significativo, tendo obtido um coeficiente de determinação do modelo ( $R^2$ ) muito baixo, igual a 0,17. Isto significa que o modelo adotado não representa adequadamente a variação dos dados obtidos. Por esta razão, não se apresentará neste caso, a análise estatística.

Os resultados da análise estatística de variância (ANOVA) dos valores de potencial de corrosão estão apresentados na Tabela 5.8.

A análise estatística mostrou que o modelo fatorial é significativo, uma vez que o valor de  $F_{\text{calc}}$  é maior que o valor de  $F_{\text{tab}}$  e o valor resultante de  $R^2_{\text{mod}}$  foi de 0,75, ou seja, 75% da variação total dos dados é explicada pelo modelo.

A análise de variâncias também mostrou que os efeitos individuais dos fatores tipo de concreto e relação água/aglomerante são estatisticamente significativos a um nível de

confiança de 95%. Isto significa dizer que cada uma dessas variáveis, tomada isoladamente, exerce influência no potencial de corrosão e, da mesma forma, com base nos valores de  $F_{\text{calc.}}$ , pode-se constatar que a variável que mais interfere no potencial de corrosão é a relação água/aglomerante, vindo em seguida a variável tipo de concreto. Este comportamento foi similar para a análise estatística dos dados de resistividade elétrica.

**Tabela 5.7 - Resultados da análise de variância (ANOVA) realizada com dados de potencial de corrosão, para os fatores ou variáveis independentes consideradas no modelo estatístico.**

Efeito	SQ	GL	MQ	$F_{\text{calc.}}$	$F_{\text{tab.}}$	Resultado
Modelo	4917324,63	7	702474,95	148,56	2,04	significativo
Erro (resíduo)	1626573,48	344	4728,41	--	--	--
Total	6543898,10	351	--	--	--	--
Tipo de concreto	3029987,55	3	1009995,85	213,60	2,63	significativo
Relação a/ag	1455909,45	1	1455909,45	307,91	3,87	significativo
Tipo de concreto x relação a/ag	452573,48	3	150857,83	31,905	2,63	significativo
Erro (resíduo)	1626573,48	344	4728,41	--	--	--

$$R^2_{\text{mod}} = 0,75$$

$$R_{\text{mod}} = 0,87$$

Onde:

SQ = Soma dos quadrados;

GL = Graus de liberdade;

MQ = Média dos quadrados;

F = parâmetro de Fischer para o teste de significância dos efeitos;

Resultado = resultado da análise, com indicação se o efeito é significativo ou não;

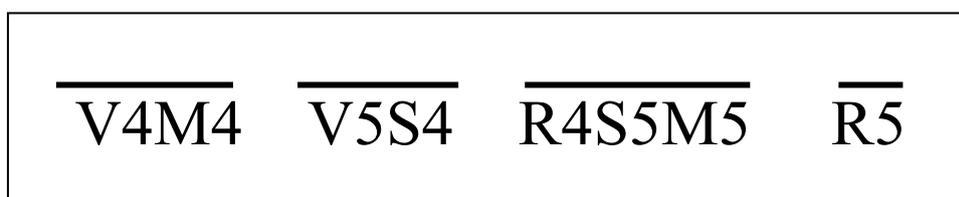
$R^2_{\text{mod}}$  = coeficiente de determinação do modelo e

$R_{\text{mod}}$  = coeficiente de correlação do modelo.

A interação dupla do tipo de concreto e relação água/aglomerante também foi significativa, indicando que há uma sinergia entre esses fatores, ou seja, a influência que cada fator (variável), individualmente, exerce sobre o potencial de corrosão depende do outro fator e vice-versa.

Após a análise de variância ter mostrado que as duas variáveis independentes (relação a/ag e tipo de concreto) exercem influência significativa nos valores de potencial de corrosão, assim como a interação dessas variáveis, realizou-se uma comparação múltipla de médias com todos os concretos considerados na ANOVA (considerando ao mesmo tempo as

duas variáveis principais do experimento, anteriormente citadas) . Essa comparação de médias realizada pelo método de Duncan, cujos agrupamentos em ordem decrescente de médias (no sentido da maior eletronegatividade, da esquerda para a direita) são mostrados a seguir.



**Figura 5.32 – Ordem decrescente de médias e disposição dos grupos definidos pela comparação múltipla de médias, por meio do teste de Duncan para os valores médios de potencial de corrosão.**

Vê-se, da figura anterior, que os resultados mais positivos de potenciais foram os dos concretos de relação a/ag 0,40 compostos com cinza volante e com metacaulim (10%). Em seguida, aparecem os concretos de cinza volante (relação a/ag 0,55) e sílica ativa (relação a/ag 0,40). Um terceiro grupo contempla os concretos de referência de relação a/ag 0,40, bem como os de sílica ativa e de metacaulim (10%), de relação a/ag 0,55. Por fim, com os potenciais de corrosão significativamente mais negativos dentre todos, tem-se o concreto de referência de relação a/ag 0,55.

A seguir, são comentados, individualmente, os efeitos da relação água/aglomerante e da adição mineral nos resultados medidos de potencial de corrosão.

#### • **Influência da Relação Água/Aglomerante**

Na figura 5.33 são mostrados as médias globais dos potenciais de corrosão, para cada relação a/ag, sendo expressos também o intervalo de confiança (para um nível de confiança de 95%) e o desvio padrão da média, dados esses extraídos da ANOVA. As linhas tracejadas denotam a separação das médias em dois grupos distintos estatisticamente, uma vez

que o fator “relação a/c” mostrou-se significativo em relação à sua influência nos potenciais de corrosão (como visto na Tabela 6.5, a partir da análise de variâncias).

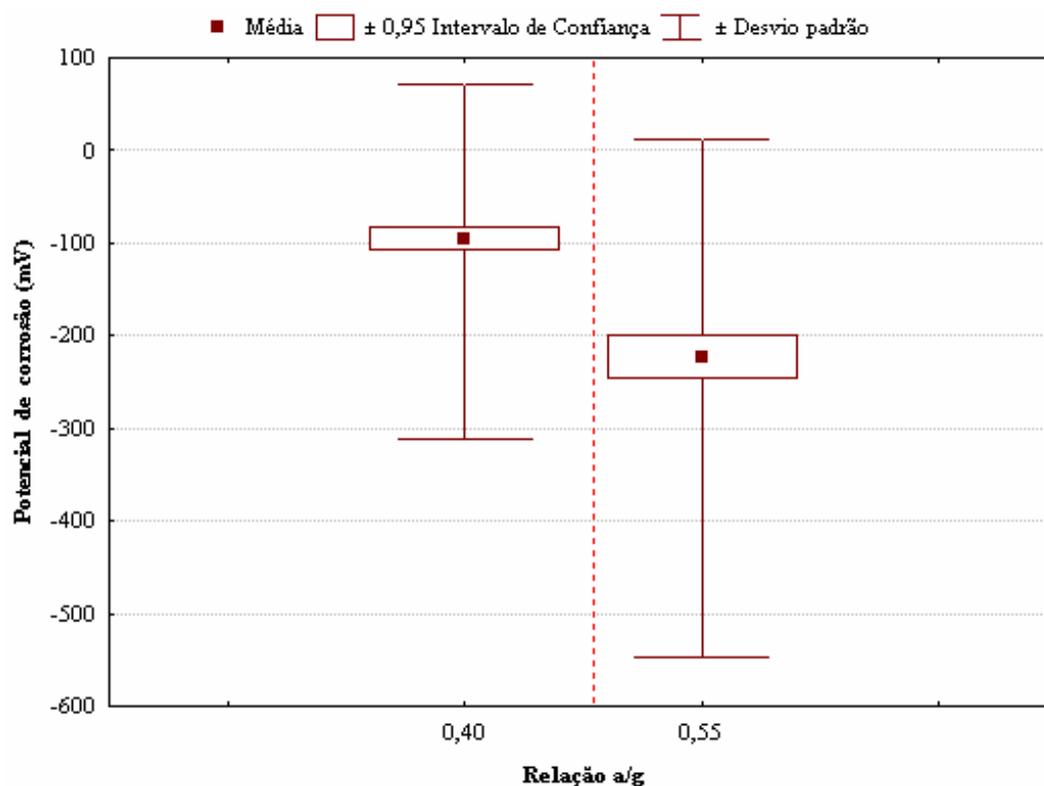


Figura 5.33 – Estimativa da média global dos valores de potencial de corrosão, com seu erro padrão e desvio padrão. A linha tracejada vertical indica os grupos que se diferem significativamente.

Da Figura 5.33, é importante observar que a relação a/ag 0,40 apresenta valor médio de potencial de corrosão mais eletropositivo, bem como menor desvio padrão, enquanto a relação a/ag 0,55 comporta-se de forma exatamente oposta, apresentando valor médio de potencial de corrosão mais eletronegativo, com maior desvio padrão. Esse comportamento já era esperado e concorda com a literatura de que altas relações a/ag comparativamente a relações a/ag mais baixas, propiciam concretos com maior porosidade e permeabilidade, permitindo mais facilmente a entrada de cloretos, o que torna os potenciais de corrosão mais eletronegativos, tanto pela redução da resistividade do concreto, quanto pela ruptura da película passivadora que protege o aço (que no trabalho em questão só ficou notoriamente evidente para os concretos de referência).

Na Figura 5.34, pode-se notar a tendência de comportamento dos potenciais de corrosão por tipo de concreto e por relação a/ag.

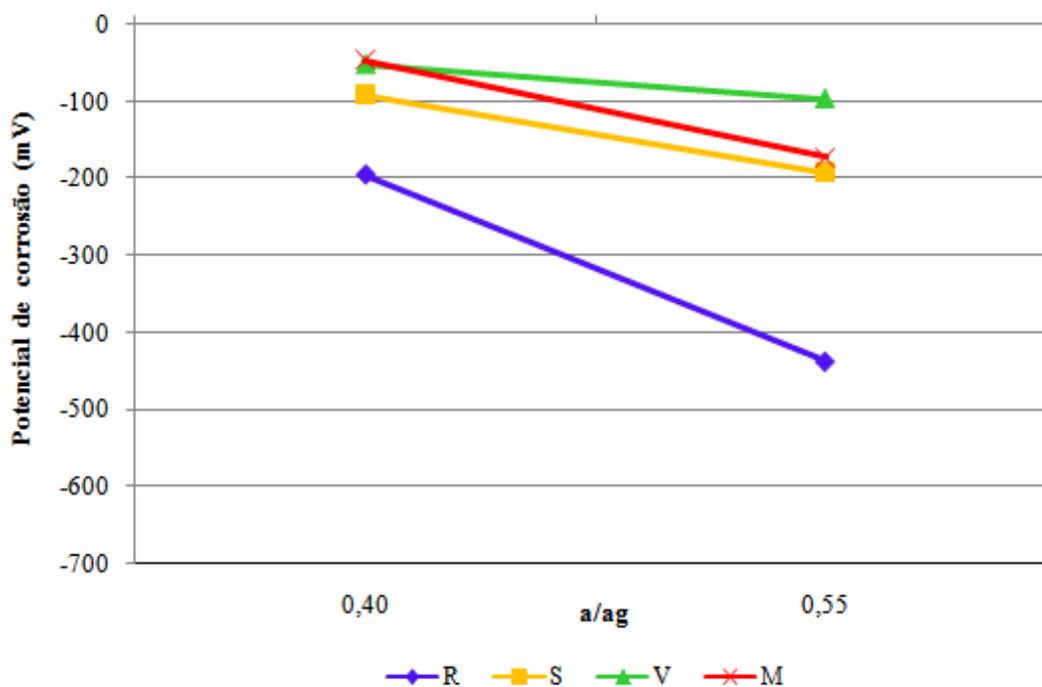


Figura 5.34 – Valores médios de potencial de corrosão para cada tipo de concreto em função da relação a/ag.

Pode-se notar, na Figura 5.34, uma tendência geral de potenciais de corrosão mais positivos associadas à relação a/ag mais baixas. Este efeito é bastante mais pronunciado para os sistemas de referência e mais brando para os concretos com adições. Dentre as adições, a cinza volante, representou os resultados mais favoráveis em relação aos potenciais de corrosão.

#### • Influência das Adições Minerais

Na Figura 5.35 são mostrados os valores médios de potencial de corrosão para cada tipo de concreto (adição), com o seu intervalo de confiança (95%) e seus respectivos desvios - padrões. As linhas tracejadas verticais definem os grupos que diferem significativamente.

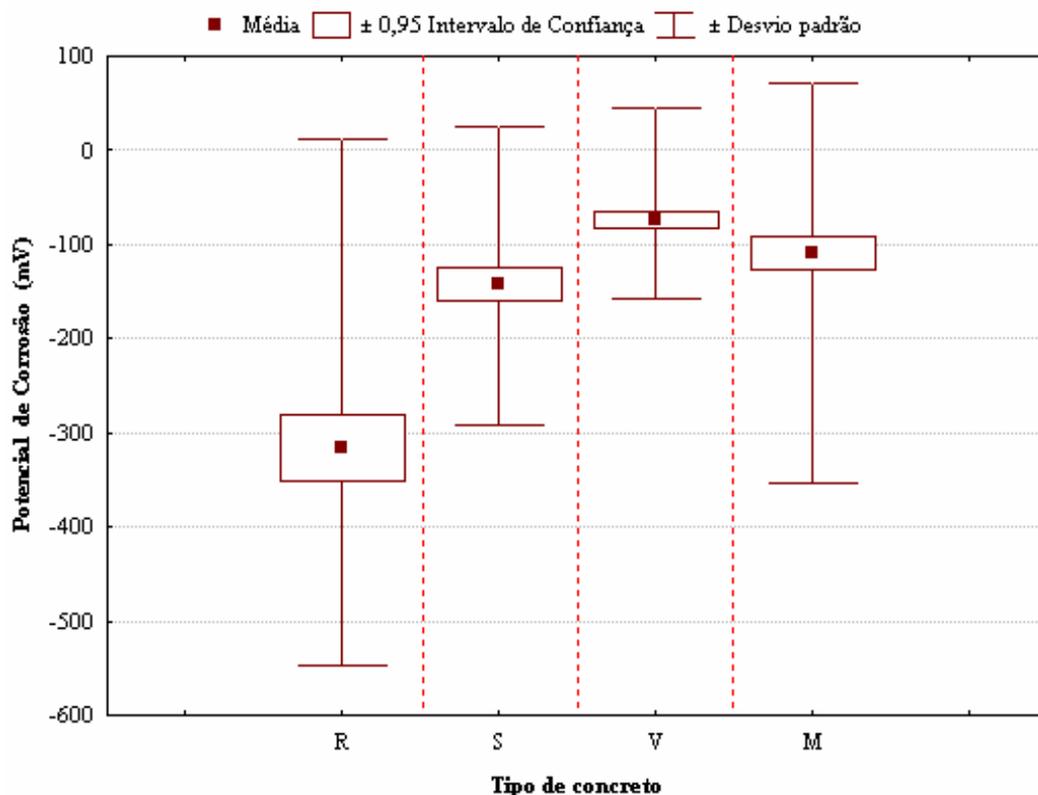


Figura 5.35 – Valores médios globais de potencial de corrosão para todos os concretos com seus intervalos de confiança de 95% e seus desvios padrões. A linha tracejada vertical define os grupos que diferem significativamente.

Com base na Figura 5.35, pode-se destacar que o concreto sem adições (R) possui um comportamento diferenciado dos demais concretos com adições, exibindo valores mais eletronegativos de potencial de corrosão, além de apresentar grande desvio padrão. Sob o ponto de vista estatístico, os concretos com adições minerais diferem significativamente entre si, embora, sob ponto de vista engenharia, eles apresentem valores próximos. Dentre os concretos com adições minerais, a cinza volante mostra melhor resultado por expressar menor desvio padrão, bem como por apresentar a média global dos potenciais mais eletropositivos.

Com relação à cinza volante, Ha *et al.* (2007) concluiu que apesar da cinza volante reduzir os valores de pH do concreto, a substituição de 30% de cimento Portland melhora as propriedades de permeabilidade e retarda o tempo de para iniciar a corrosão.

#### f) Análise Final do Comportamento dos Potenciais de Corrosão das Armaduras

Destaca-se a importância de se produzir concretos com baixas relações a/ag a fim de se reduzir a penetração de água e a porosidade dos concretos e, desta forma, evitar a entrada de agentes agressivos, tais como cloretos. Do mesmo modo, fica nítida a importância de se utilizar adições minerais em concretos sujeitos a ambientes contaminados por íons cloreto. Assim, com base na análise estatística global dos resultados de potencial de corrosão, no período para despassivação das armaduras e na magnitude dos potenciais de corrosão medidos, pode-se afirmar que, dentre as adições minerais, destaque cabe ao concreto com cinza volante, que apresentou o melhor desempenho, seguido pelo concreto com adição de metacaulim no teor de 10% e, por fim, pelo concreto com adição de sílica ativa. Apesar dessas diferenças estatísticas (calculadas na análise da ordem de grandeza dos valores de potencial), em termos práticos não se identificou grandes diferenças de desempenho entre os concretos com adições, haja vista que todos eles não permitiram a despassivação das armaduras neles embutidas durante todo o período de ataque (à exceção do concreto com sílica ativa e relação a/ag 0,55, que gerou incerteza quanto a essa questão).

### **5.2.2 Resultados Relacionados à Cinética do Processo Eletroquímico**

Os resultados que possibilitam a avaliação da cinética do processo de corrosão referem-se aos dados de resistência de polarização e dados de velocidade de corrosão eletroquímica. Cabe salientar-se que a taxa de corrosão eletroquímica foi obtida por meio da equação de Stern-Geary (equação 3.3, item 3.3.2, Capítulo 3), onde para valores de potencial de corrosão mais positivos que -276 mV (ECS), adotou-se para a constante de Stern - Geary, 52 mV, e para valores mais negativos que -276 mV, adotou-se 26 mV, a partir dos estudos de Song (2000), Cascudo (1997) e Kouril *et al.* (2006). Assim, no subitem a seguir (6.2.1.1), estão apresentados os dados de resistência de polarização, juntamente com os dados de taxa de corrosão eletroquímica.

### 5.2.2.1 Resistência de Polarização e Taxa de Corrosão Eletroquímica

Nas Figuras 5.36 a 5.53 estão apresentadas a resistência de polarização média<sup>5.7</sup> e a taxa de corrosão eletroquímica dos concretos estudados em função do tempo de ataque (número de ciclos). Para avaliação dos concretos quanto à taxa de corrosão eletroquímica, adotaram-se os critérios sugeridos por Alonso e Andrade (1990 *apud* CASCUDO, 1997), os quais associam taxas ou velocidades do fenômeno eletroquímico à intensidade da corrosão, conforme a Tabela 5.9.

**Tabela 5.8 – Critérios de avaliação da velocidade de corrosão, segundo Alonso e Andrade (1990 *apud* CASCUDO, 1997).**

Taxa de corrosão ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Graus de Corrosão
0,1 a 0,2	Desprezível
> 0,2	Início de corrosão ativa
1,0	Ataque importante, mas não severo
> 10,0	Ataque muito importante

#### a) Influência da Relação Água/Aglomerante

Nas Figuras 5.36 a 5.46, a seguir, estão apresentadas as curvas médias de resistência de polarização e de taxa de corrosão, ambas em função da quantidade de ciclos de ataque, organizadas por relação a/ag. Cada um dos diferentes sistemas contendo adições minerais avaliados separadamente nesta alínea, uma vez que (para cada caso) o objetivo neste momento é a análise da influência da variável relação a/ag.

<sup>5.7</sup> Entendo-se que a  $R_p$  média foi definida como a média aritmética de 4 determinações individuais por concreto a cada ciclo.

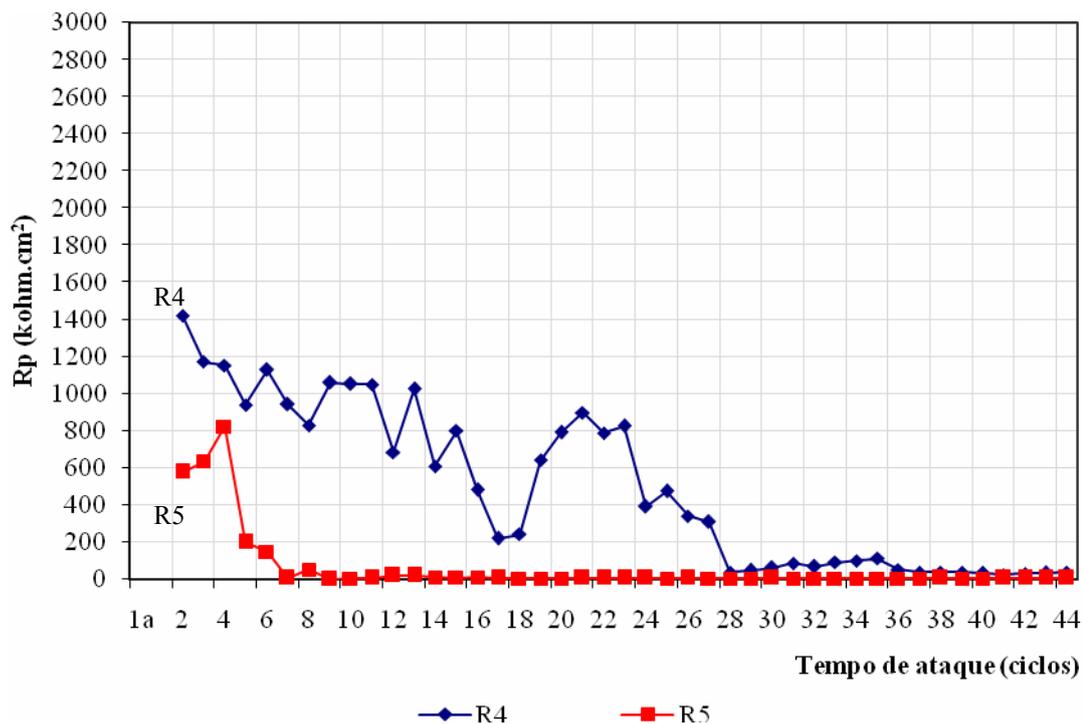


Figura 5.36 – Resistência de polarização (Rp) variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos de referência.

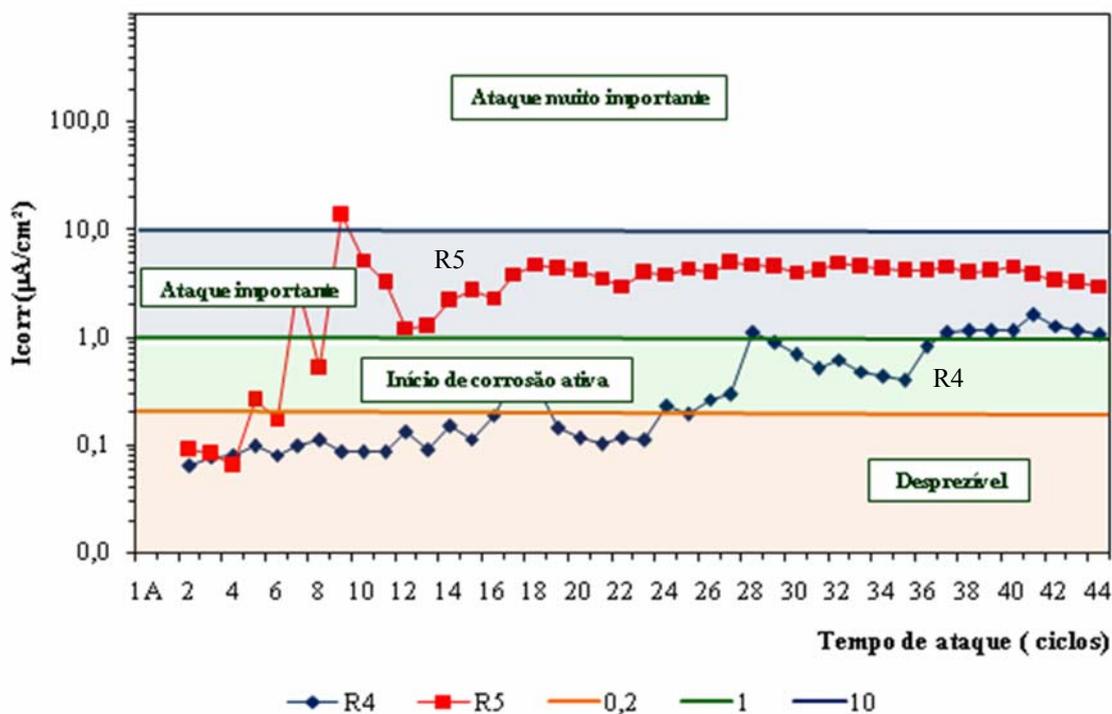


Figura 5.37 – Taxa de corrosão eletroquímica variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos de referência.

Analisando a Figura 5.36, pode-se observar uma coerência entre os resultados de resistência de polarização e potencial de corrosão. Por volta do sexto ciclo de imersão, o concreto R5 apresentou potenciais de corrosão mais eletronegativos (com faixa de probabilidade de corrosão maior que 90%); em paralelo, verifica-se uma queda brusca dos valores de resistência de polarização, que, em decorrência, denota, a partir do sexto ciclo, crescimentos expressivos na taxa de corrosão eletroquímica. A despassivação das armaduras para o concreto R4 ocorreu próximo ao ciclo de número 27 e, da mesma forma, houve um decréscimo significativo dos valores de  $R_p$  próximo a esta idade. Assim, fica evidente o efeito da relação a/ag na magnitude dos valores de  $R_p$  e no tempo decorrido até a despassivação. Isto é fruto da alteração do sistema de poros em virtude da variação da relação a/ag, conforme já comentado anteriormente.

Nas Figuras 5.39 e 5.39, pode-se notar a influência da relação a/ag na resistência de polarização e na taxa de corrosão em concretos com adição de sílica ativa.

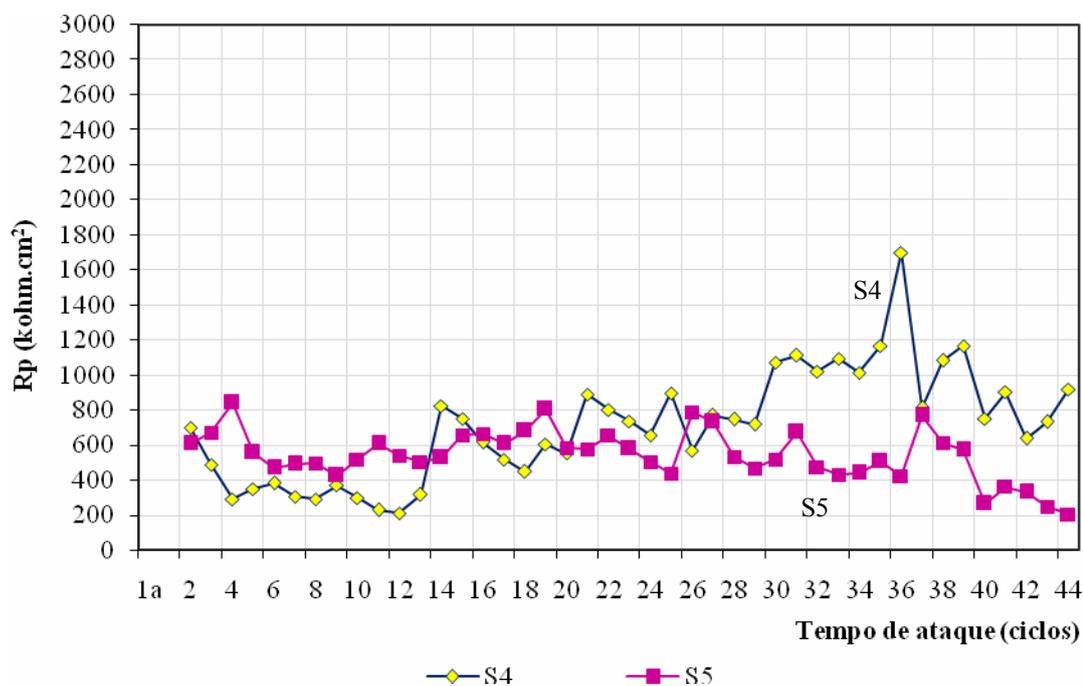


Figura 5.38 – Resistência de polarização ( $R_p$ ) variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com sílica ativa.

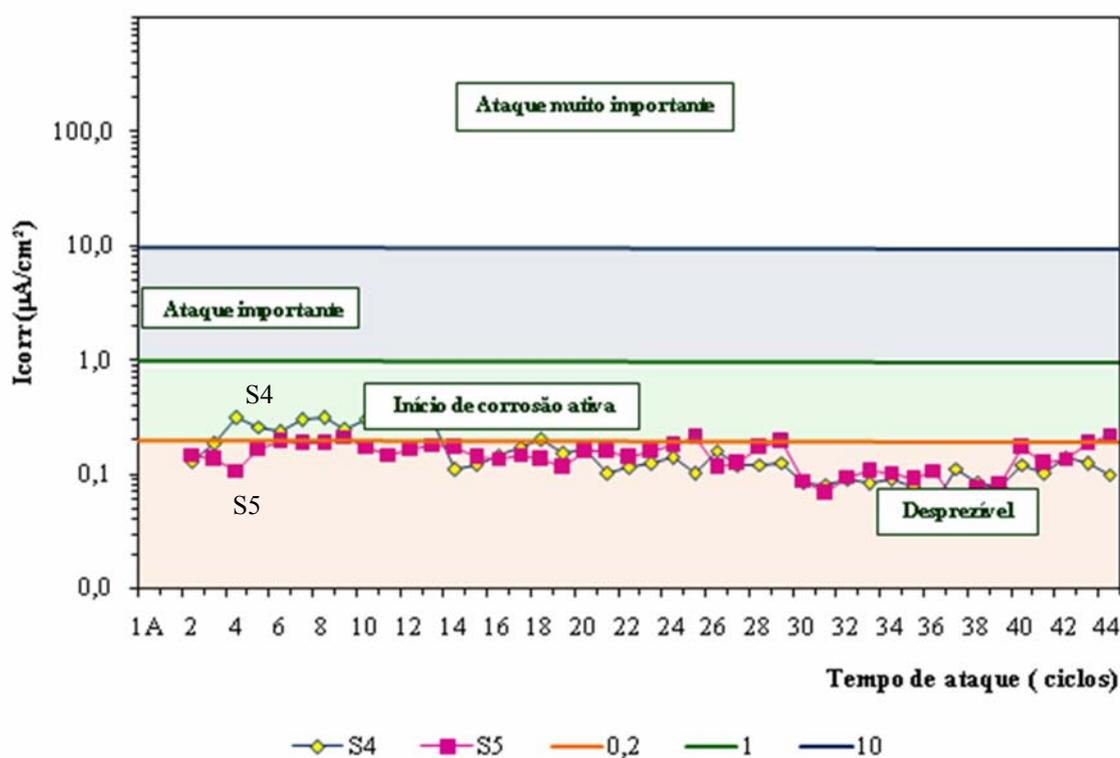


Figura 5.39 – Taxa de corrosão eletroquímica variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com sílica ativa.

Observando as Figuras 5.38, pode-se notar que as curvas seguem relativamente próximas até o 27º ciclo, quando então se separam, passando o concreto S4 a apresentar valores de  $R_p$  mais altos. Por volta do 35º ciclo, percebe-se uma tendência de queda nos valores de  $R_p$  para o concreto S5, o que poderia ser sugestivo de despassivação da armadura. Contudo, há incertezas quanto à efetiva ocorrência desse fato, já que ele não ficou evidente na análise dos potenciais de corrosão e tampouco se observa tal tendência quando são projetadas as velocidades de corrosão estimadas eletroquimicamente (Figura 5.39). Na Figura 5.39, as curvas dos dois concretos seguem muito próximas ao longo dos vários ciclos executados, permanecendo praticamente todo o período na faixa da taxa de corrosão desprezível, segundo os critérios de Alonso e Andrade (1990 *apud* CASCUDO, 1997).

Na Figura 5.40 e 5.41 é mostrada a resistência de polarização e taxa de corrosão em concretos com adição de cinza volante.

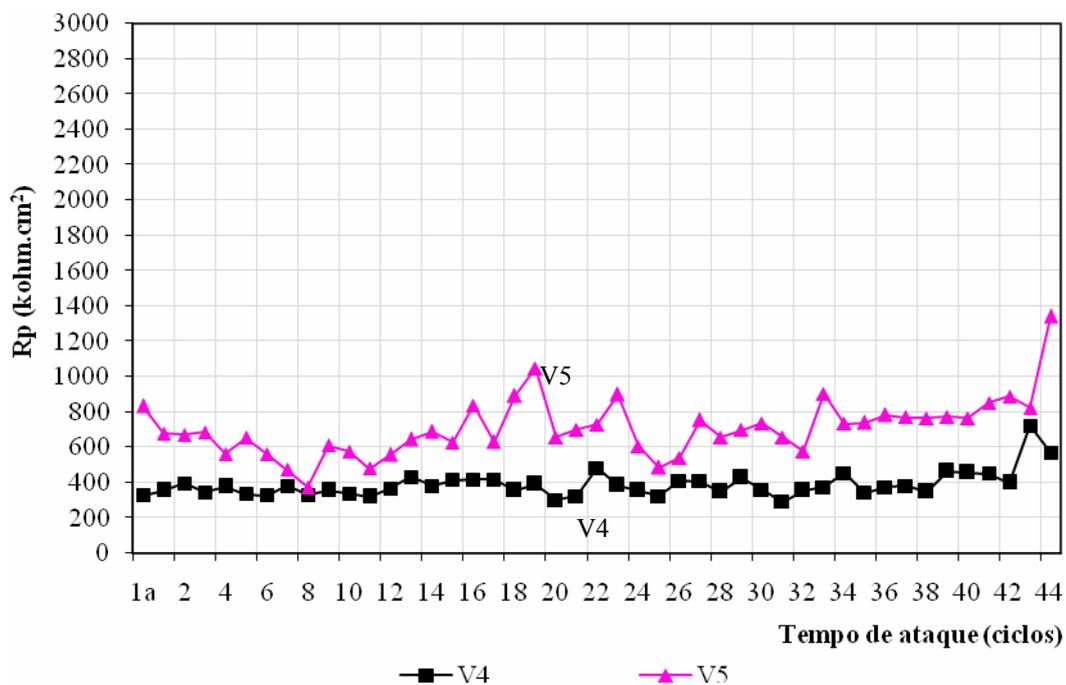


Figura 5.40 – Resistência de polarização (Rp) variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com cinza volante.

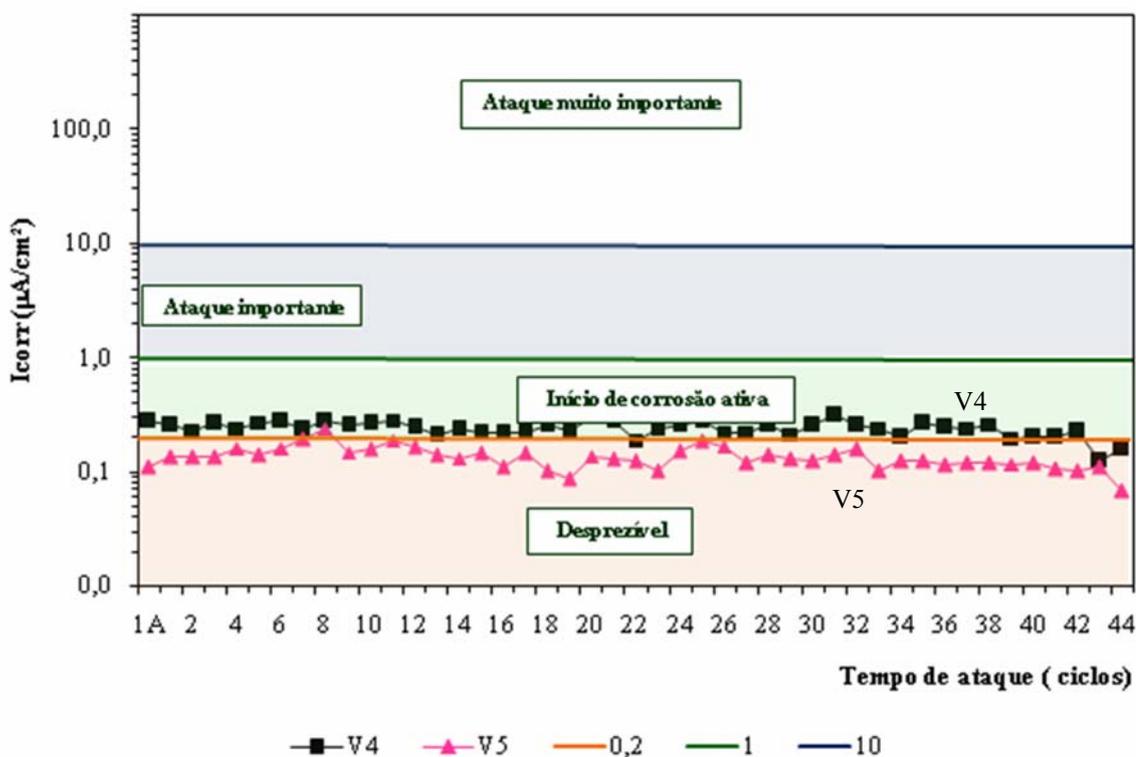


Figura 5.41 – Taxa de corrosão eletroquímica variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com cinza volante.

Os comportamentos evidenciados nas figuras anteriores se afastam da expectativa geral de comportamento com base na relação  $a/ag$ . Embora não tenham sido observadas claras evidências de despassivação da armadura para os dois concretos considerados, o que os tornam similares em termos de desempenho frente à corrosão, houve, todavia, uma inversão inesperada de comportamento das curvas. Isto pode ter ocorrido em função de vários fatores, tais como: defeitos nos corpos-de-prova, falhas (macrodefeitos ou vazios) no concreto, imperfeições na película de passivação, etc. Contudo, não ocorreu no trabalho suficiente controle e rastreabilidade para identificar as prováveis causas desse resultado.

As Figuras 5.42 a 5.46 mostram a resistência de polarização e a taxa de corrosão eletroquímica (em função dos ciclos) para os concretos com adição de 10%, 20% e 30% de metacaulim em substituição ao cimento Portland, em massa.

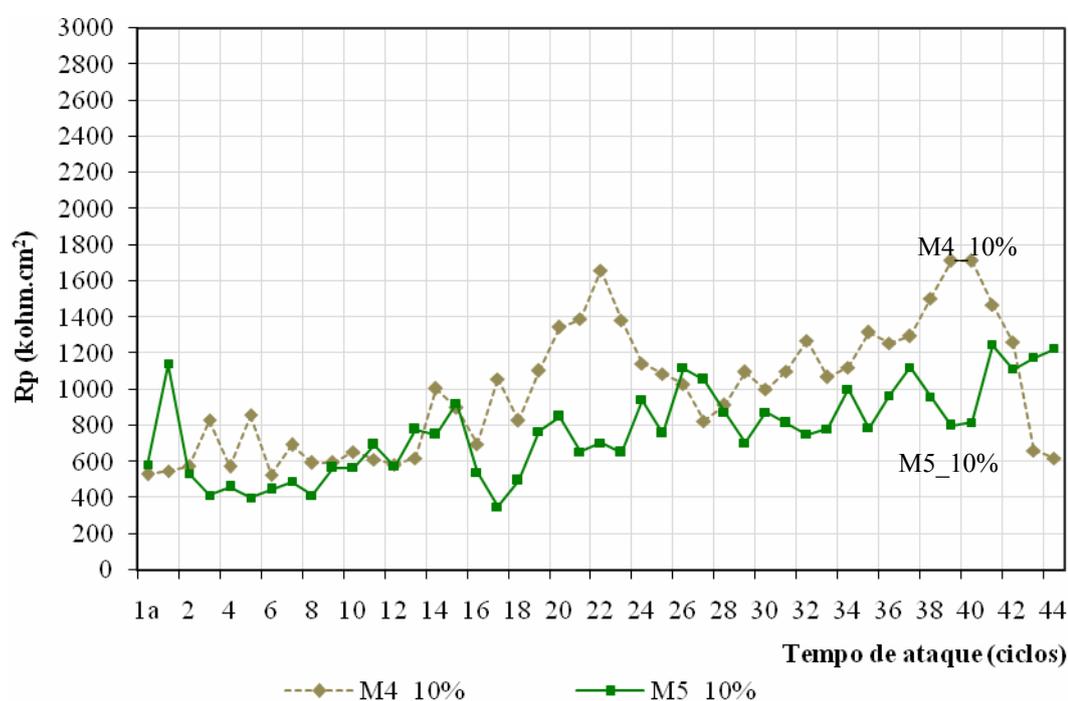


Figura 5.42 – Resistência de polarização ( $R_p$ ) variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com metacaulim no teor de 10% de substituição.

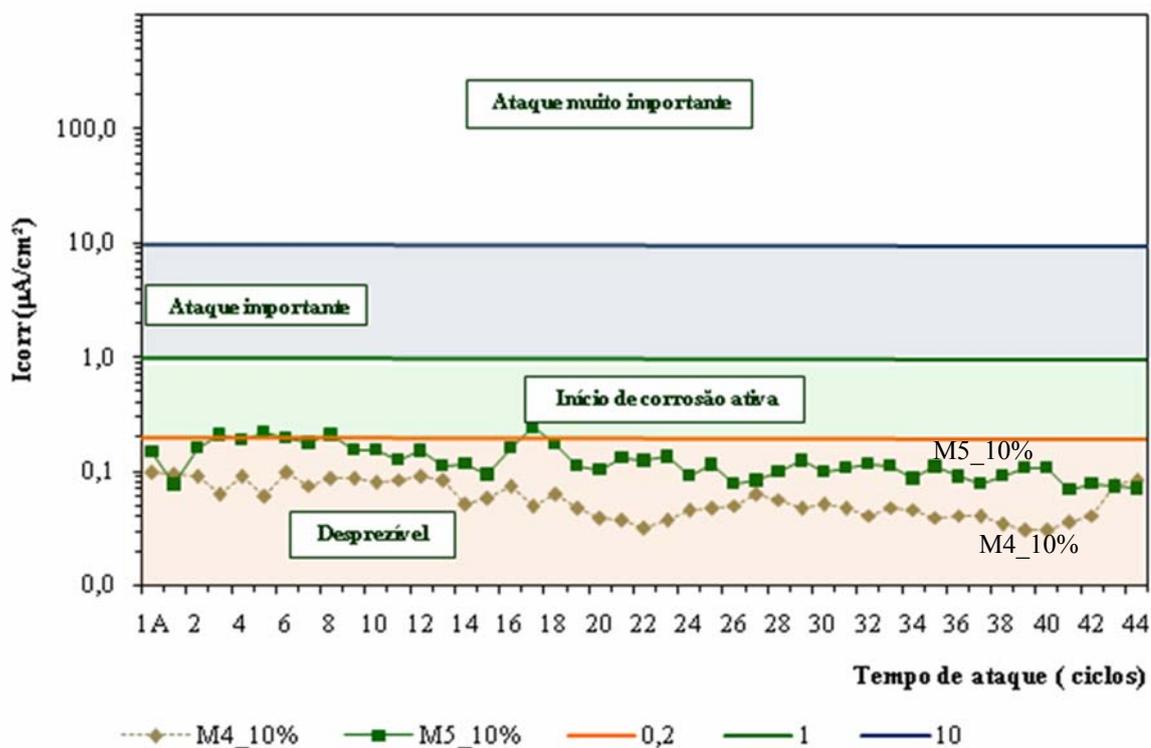


Figura 5.43 – Taxa de corrosão eletroquímica variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com metacaulim no teor de 10% de substituição.

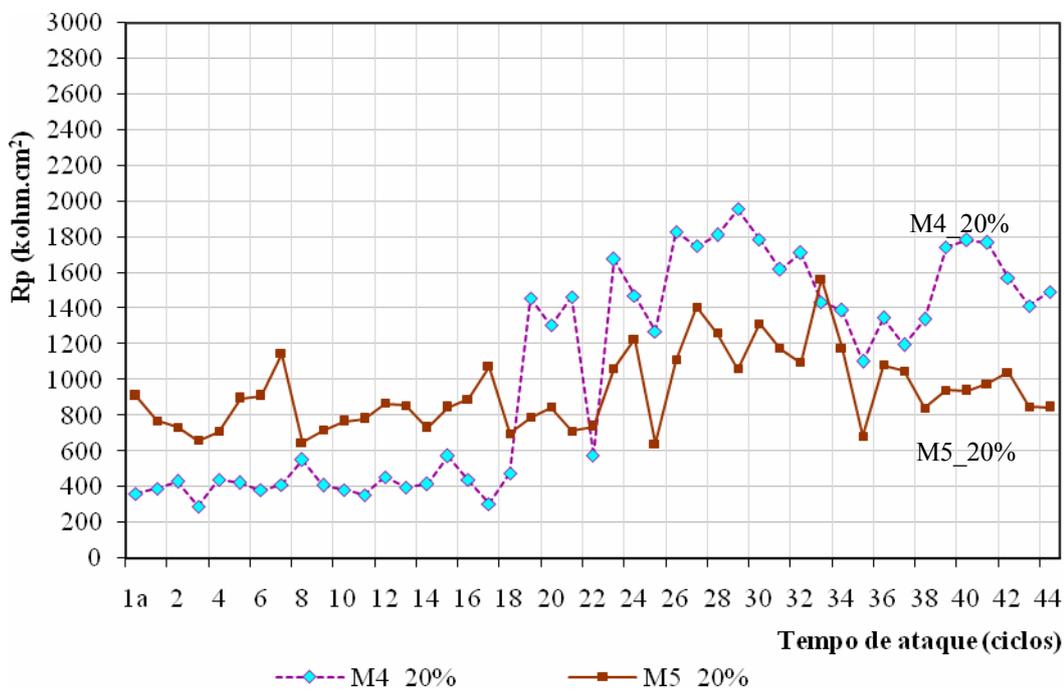


Figura 5.44 – Resistência de polarização ( $R_p$ ) variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com metacaulim no teor de 20% de substituição.

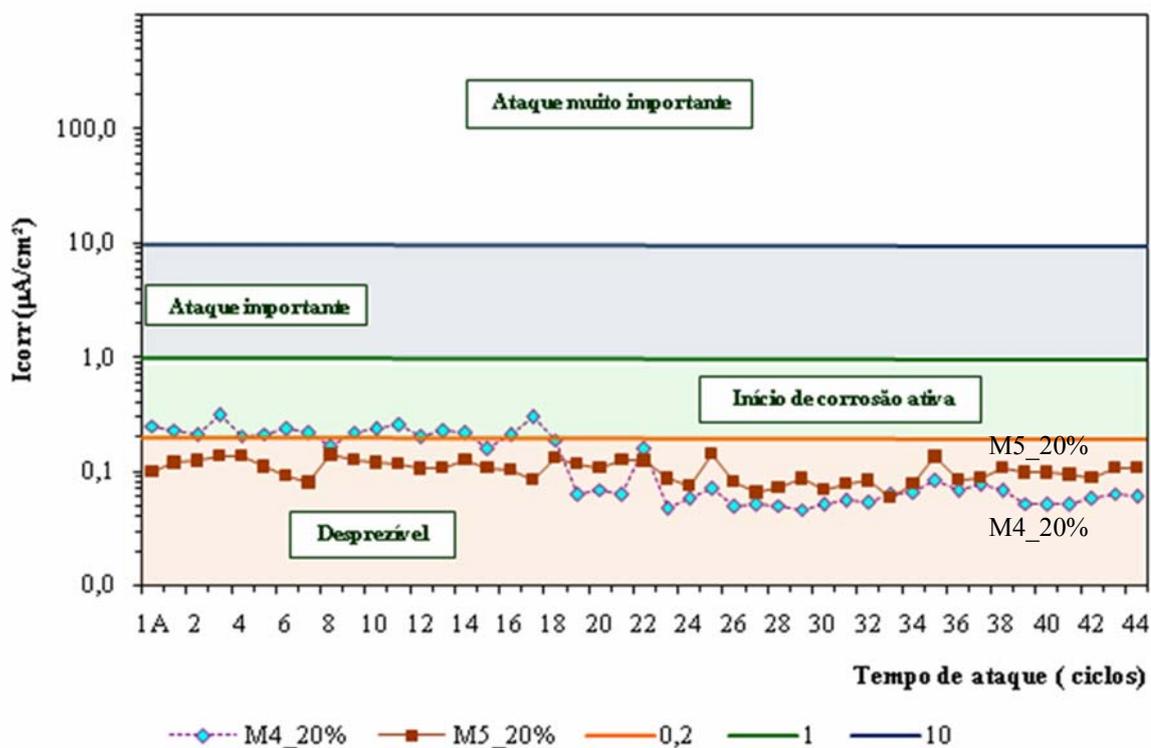


Figura 5.45 – Taxa de corrosão eletroquímica variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com metacaulim no teor de 20% de substituição.

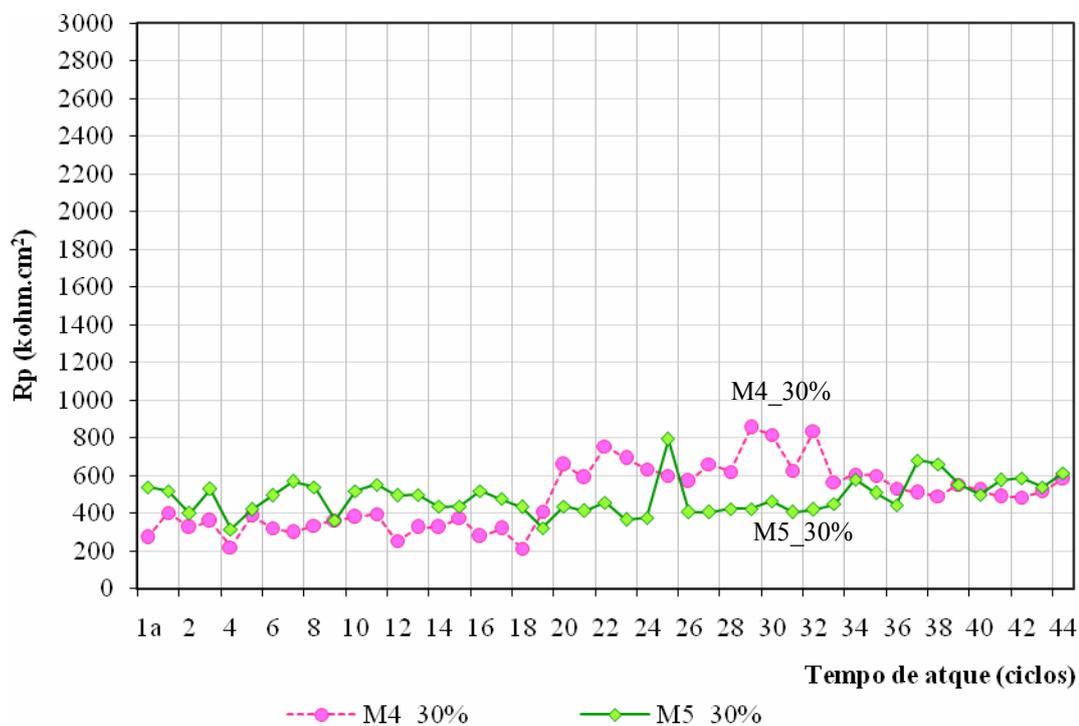


Figura 5.46 – Resistência de polarização ( $R_p$ ) variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com metacaulim no teor de 30% de substituição.

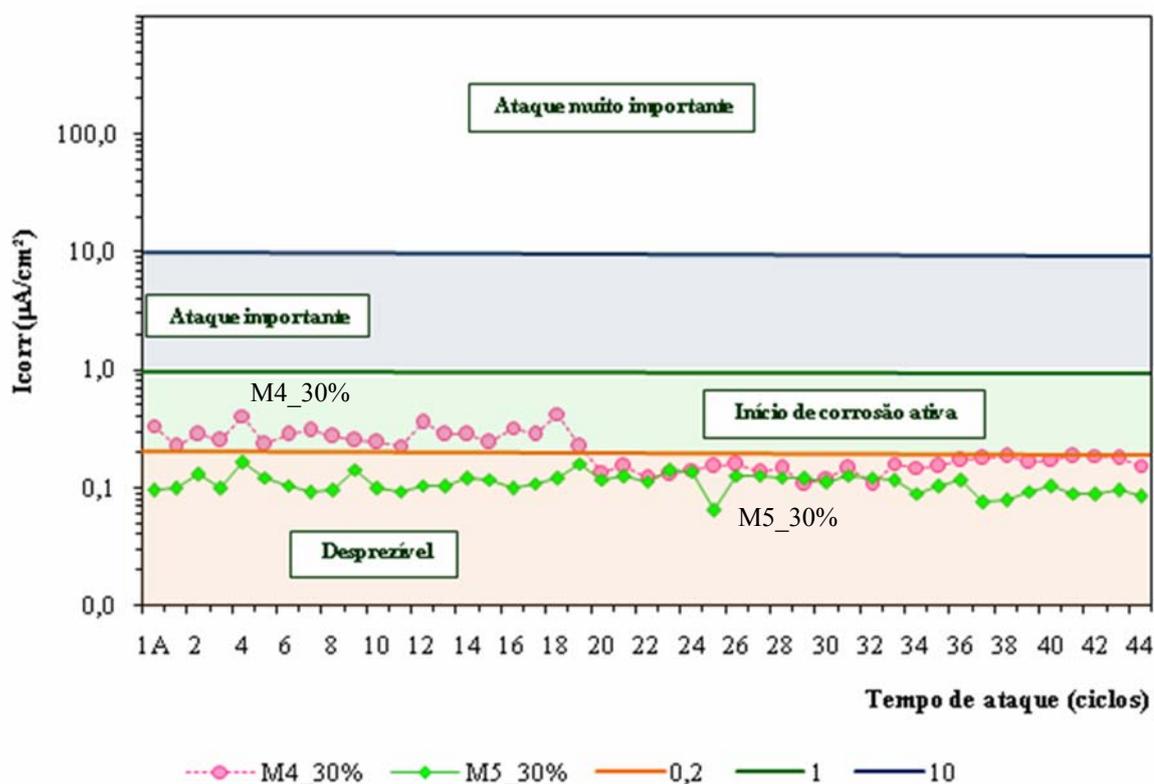


Figura 5.47 – Taxa de corrosão eletroquímica variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com metacaulim no teor de 30% de substituição.

Pode-se notar nos concretos com adição de 10% e 20% de metacaulim um ligeiro acréscimo nos valores de  $R_p$  ao longo dos ciclos. Acredita-se que isto seja atribuído ao fato do potenciostato, por alguma razão, não ter conseguido compensar corretamente a queda ôhmica, tomando medidas aparentes. Assim, o equipamento teria mensurado a  $R_p$ , que é um parâmetro da interface (associado à transferência de carga elétrica) mais a resistência ôhmica relativa à camada do concreto, tendendo assim a majorar o valor real de  $R_p$  (apenas da interface aço/concreto) e provocando erros na estimativa da taxa de corrosão da armadura. Talvez tenha havido associação desse fato com um comportamento interessante observado nos concretos com 20% e 30% de metacaulim, qual seja, até o 19º ciclo, aproximadamente, o valor médio de  $R_p$  é superior para a relação  $a/ag$  0,55 em comparação à relação  $a/ag$  0,40. Após esse período inicial, as curvas se invertem e mostram comportamentos que se enquadram melhor na expectativa prévia que se tem desses resultados. Isto porque, concretos de relação  $a/ag$  0,40 têm

maior consumo de cimento (em tese, maior alcalinidade), o que sugere uma película de passivação da armadura mais bem formada e, portanto, um valor mais alto de  $R_p$ . Além do mais, sendo os concretos de relação a/ag 0,40 mais densos e compactos do que os de relação a/ag 0,55, haveria para aqueles maior garantia de manutenção da estabilidade da película de passivação, refletindo-se em valores relativamente mais altos de  $R_p$ , por maior período de tempo (CASCUDO, 2000).

A partir de informações de Cascudo (1997), tem-se que a queda ôhmica é uma queda de potencial provocada pela alta resistividade elétrica do concreto, sendo função tanto da corrente quanto da forma geométrica e distância entre os eletrodos de trabalho e de referência. O referido autor comenta que a qualidade do concreto tem um papel importante nessa questão, porque concretos com baixa relação a/ag e com adições minerais têm altas resistividades elétricas.

Cabe ressaltar-se que a queda ôhmica efetuada pelo potenciostato utilizado consistia de “rápidas” impedâncias para se mensurar a resistência ôhmica da camada de concreto e, assim, detectar o valor da queda ôhmica a cada ponto da curva de voltametria. Com isto, o valor de  $R_p$  era corrigido mediante a subtração algébrica do valor inicialmente medido pela parcela resistiva do concreto (referente à queda ôhmica).

### **b) Influência da Adição Mineral**

Nas Figuras 5.48 a 5.50, pode-se perceber a influência do tipo de adição mineral na resistência de polarização e na taxa de corrosão estimada eletroquimicamente.

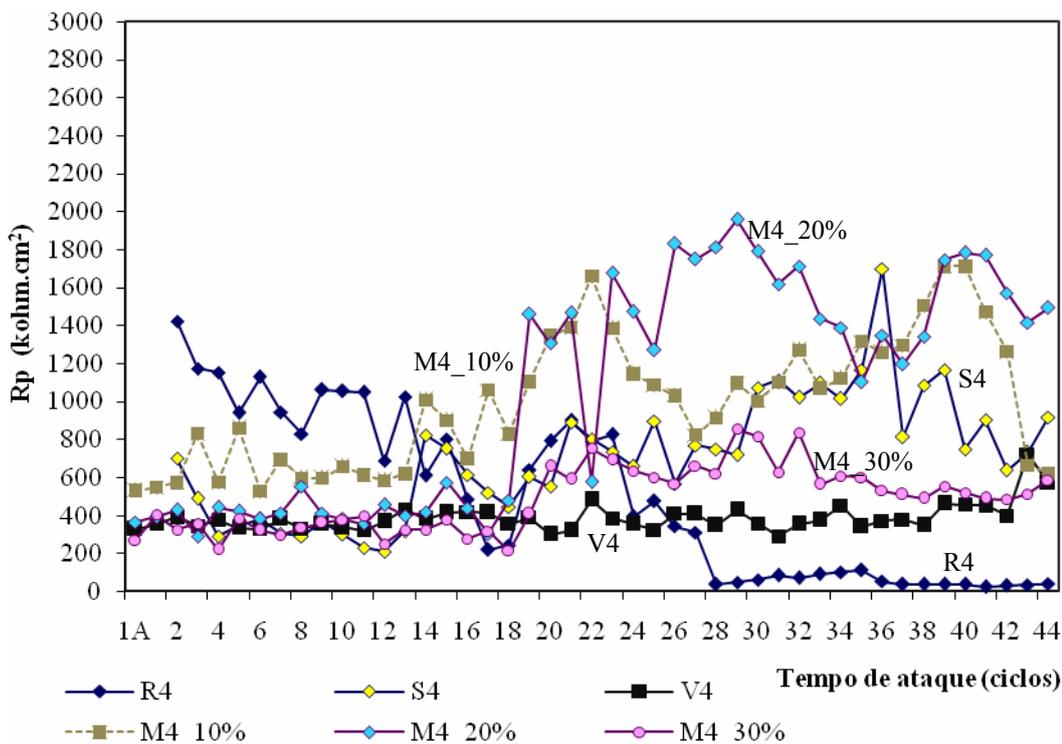


Figura 5.48 – Resistência de polarização ( $R_p$ ) variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com relação água/aglomerante 0,40.

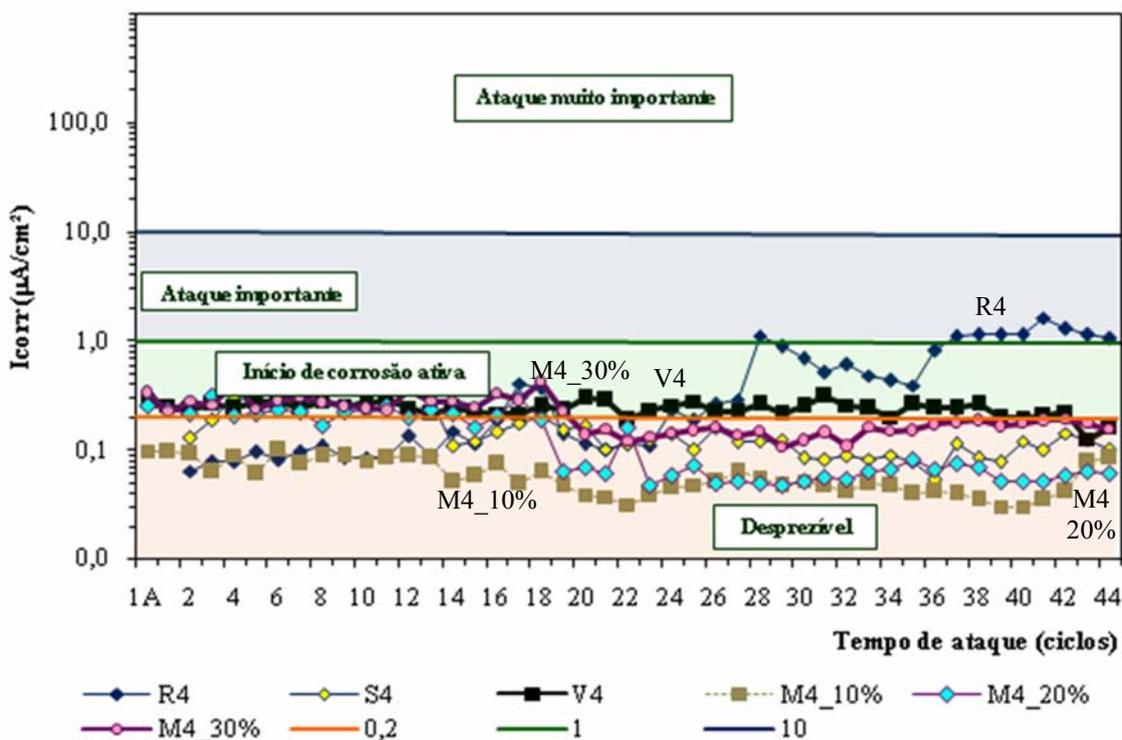


Figura 5.49 – Taxa de corrosão eletroquímica variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com relação água/aglomerante 0,40.

Provavelmente devido à maior alcalinidade do concreto que possibilita a formação de uma película de passivação bem formada e densa (CASCUDO, 2000), o concreto R4 exibiu inicialmente o maior valor de  $R_p$ . Porém ao longo dos ciclos, o concreto referência comparativamente aos concretos com adições, tornou-se mais susceptível à ação dos íons cloretos, apresentando queda acentuada nos valores de  $R_p$  e expressivas taxas de corrosão.

Dentre os concretos com adições minerais, destacam-se os concretos com 10% e 20% de metacaulim, assim como o concreto de sílica ativa, como os que resultaram em valores de  $R_p$  mais altos (e  $I_{corr}$  mais baixos) durante a maior parte do período de ataque. O concreto de cinza volante se manteve praticamente com os mesmos valores de  $R_p$  do início ao fim do período de ataque.

A seguir, nas Figuras 5.50 e 5.51, têm-se os gráficos de  $R_p$  e  $I_{corr}$  para os concretos de relação a/ag 0,55.

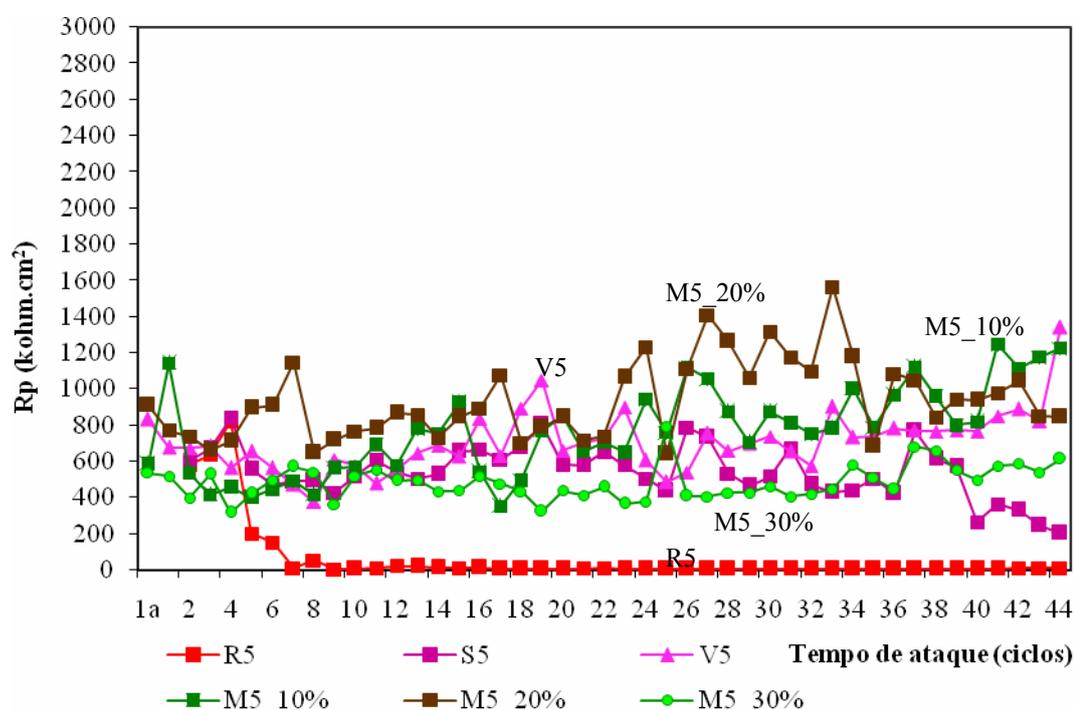


Figura 5.50 – Resistência de polarização ( $R_p$ ) variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com relação água/aglomerante 0,55.

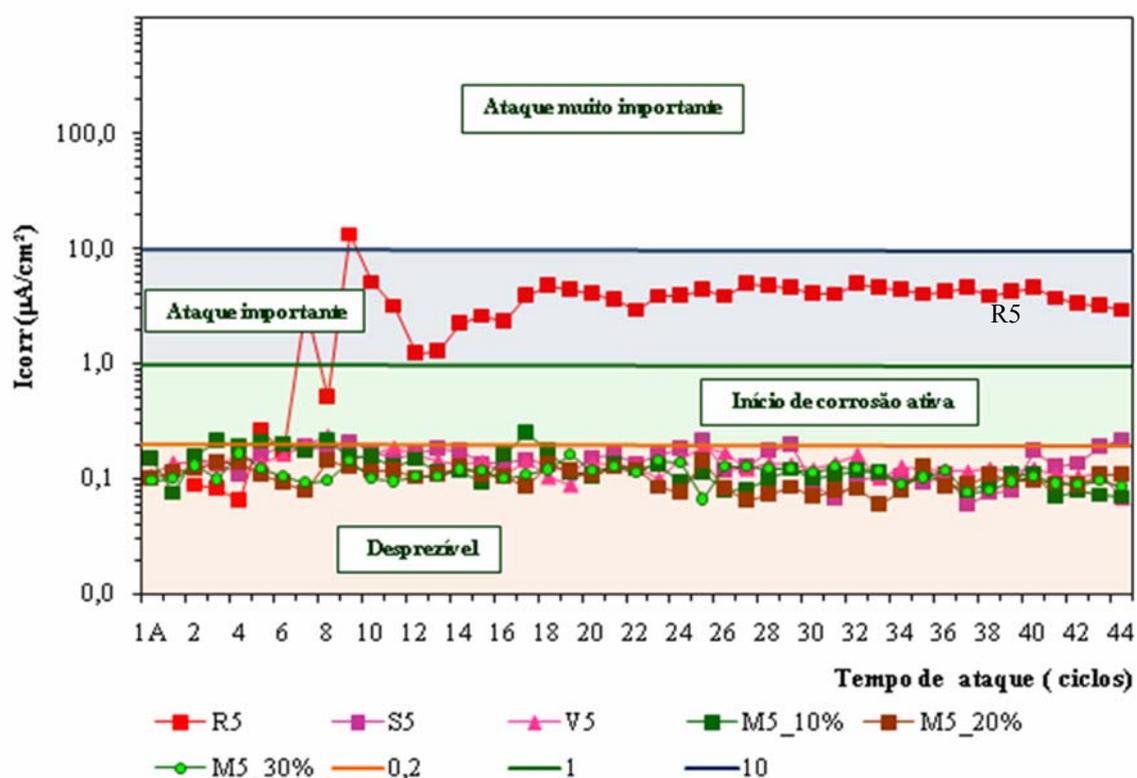


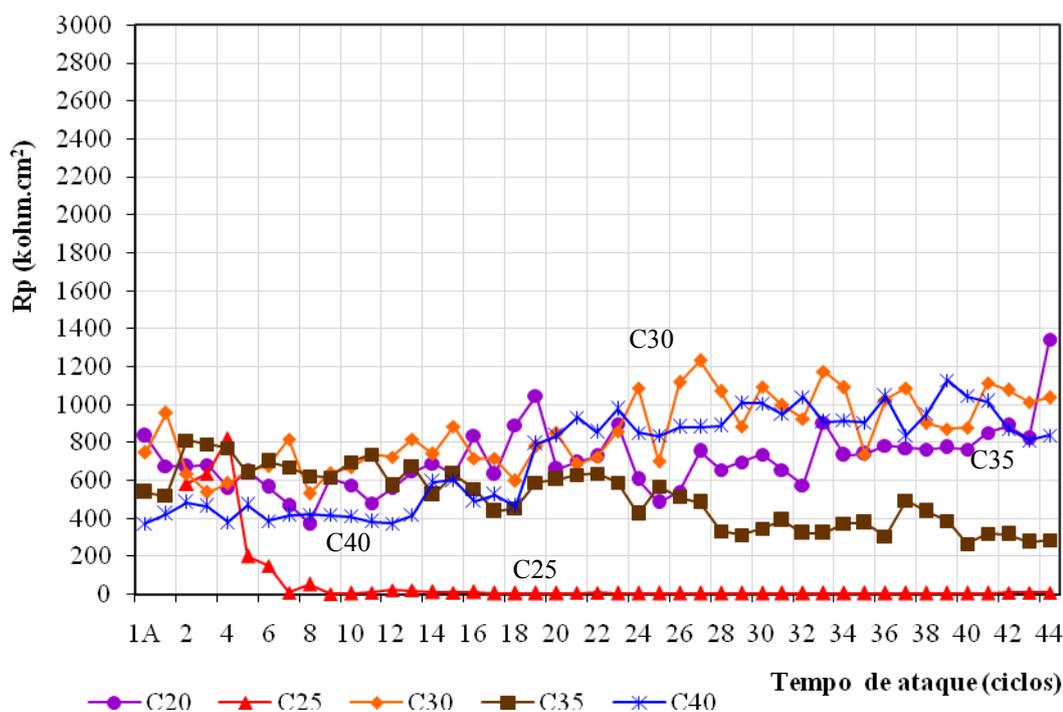
Figura 5.51 – Taxa de corrosão eletroquímica variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com relação água/aglomerante 0,55.

O concreto R5 mostra-se extremamente susceptível ao ataque por íons cloretos, evidenciado pela queda expressiva nos valores de  $R_p$  logo no início dos ciclos, evidenciado também na técnica de potencial de corrosão pela despassivação da armadura (visto no item 5.2.2.1, alínea “c”) e, em consequência, pelas altas taxas de corrosão eletroquímica.

Os demais concretos com adições mantiveram-se em um mesmo patamar de  $R_p$  e com taxas de corrosão desprezíveis, evidenciado também nos potenciais de corrosão destes concretos que se mantiveram em faixas de potencial com probabilidade de corrosão menor que 10% e nenhuma ou insignificante dissolução do aço, caracterizando cenário de passividade da armadura. Dentro da variação dos concretos com adições, percebe-se melhor desempenho dos concretos com metacaulim, nos teores de 10% e de 20%, que exibiram, comparativamente, os mais elevados valores de  $R_p$ .

### c) Influência da Classe de Resistência

Apesar da variável classe de resistência não ter sido pré-definida no programa experimental e sim calculada após a obtenção dos valores médios de resistência à compressão, ainda sim optou-se por expressar as várias classes de resistência obtidas na presente dissertação em relação à resistência de polarização e à taxa de corrosão. Lembrando que nas Figuras 5.52 e 5.55 estão apresentados os valores médios dos concretos em seus respectivos grupos de resistência, tanto para concretos de referência quanto para concretos com adições.



**Figura 5.52 – Resistência de polarização (RP) variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com classe de resistência C20, C25, C30, C35 e C40, incluindo os concretos de referência.**

Na Figura 5.52, pode-se perceber que a classe de resistência C25, representada pelo concreto R5, definitivamente mostra pouca ou nenhuma proteção física quanto à entrada de íons cloreto. Enquanto a classe C20, representada pelo concreto V5, apesar da menor classe de resistência, mostra-se como um concreto com melhores características de porosidade e

permeabilidade. Esse resultado reforça o que foi comentado anteriormente quando da avaliação da resistividade e dos potenciais de corrosão (itens 5.1.3 e 5.2.2.1, alínea “c”), de que a resistência à compressão não se constitui fator preponderante de controle da corrosão por cloretos (ou de durabilidade, de modo geral). Um fator como a presença de adições minerais se mostrou muito significativo quanto a esse aspecto, independente da classe de resistência.

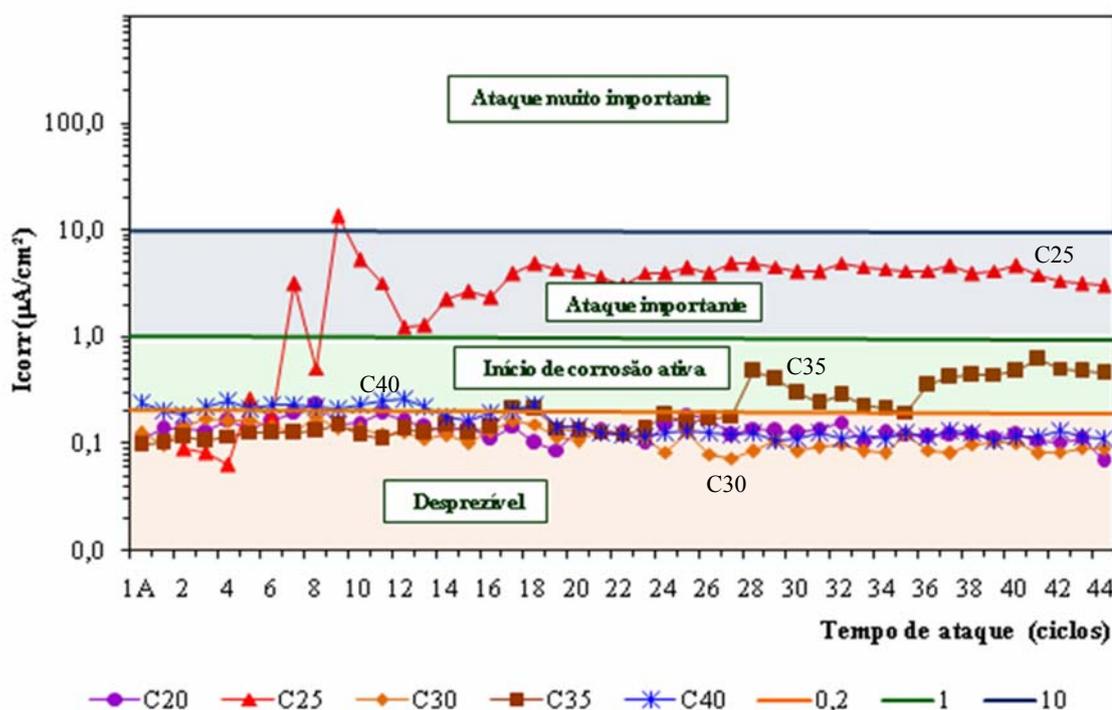


Figura 5.53 – Taxa de corrosão eletroquímica variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com classe de resistência C20, C25, C30, C35 e C40, incluindo os concretos de referência.

Para se poder proceder uma análise mais coerente, excluiu-se, na comparação das classes de resistência, os concretos de referência, como se vê nas Figuras 5.51 e 5.54. Ao proceder dessa forma, pode-se observar que entre C20 e C40 os resultados “caminharam” próximos. A estimativa das taxas de corrosão remete a uma situação de passivação durante todo o período de ataque.

Contudo, sabe-se, pelo controle das variáveis, que tal quadro de comportamento foi muito mais influenciado pelas adições (alterando a estrutura interna dos concretos) do que pela classe de resistência em si. Para se ter uma conclusão mais precisa sobre o efeito da classe de resistência sobre os parâmetros de corrosão em questão, a concepção de um futuro experimento seria necessária, desta feita considerando essa variável (classe de resistência) como uma variável principal da pesquisa. Dessa forma, questões como o tamanho da amostra (número de repetições para cada situação individual), os tipos de concreto (com e sem adições) e a faixa de variação de resistência, entre outros, deveriam ser criteriosamente levados em conta na pesquisa.

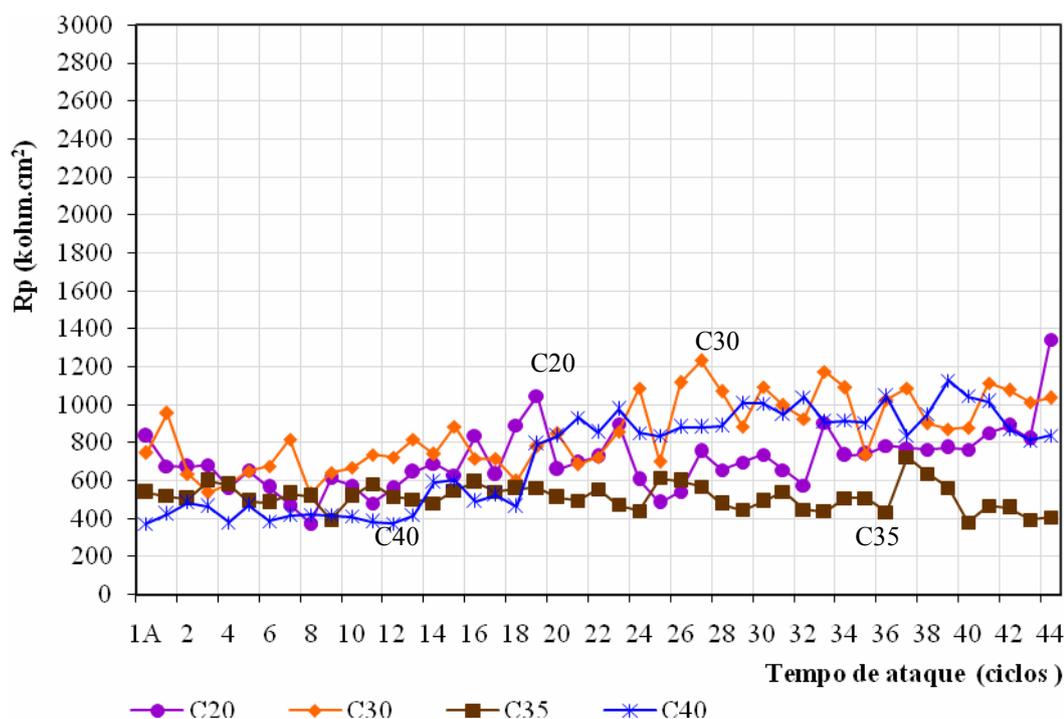


Figura 5.54 – Resistência de polarização ( $R_p$ ) variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com classe de resistência C20, C30, C35 e C40, somente considerando os concretos com adições (sem referência).

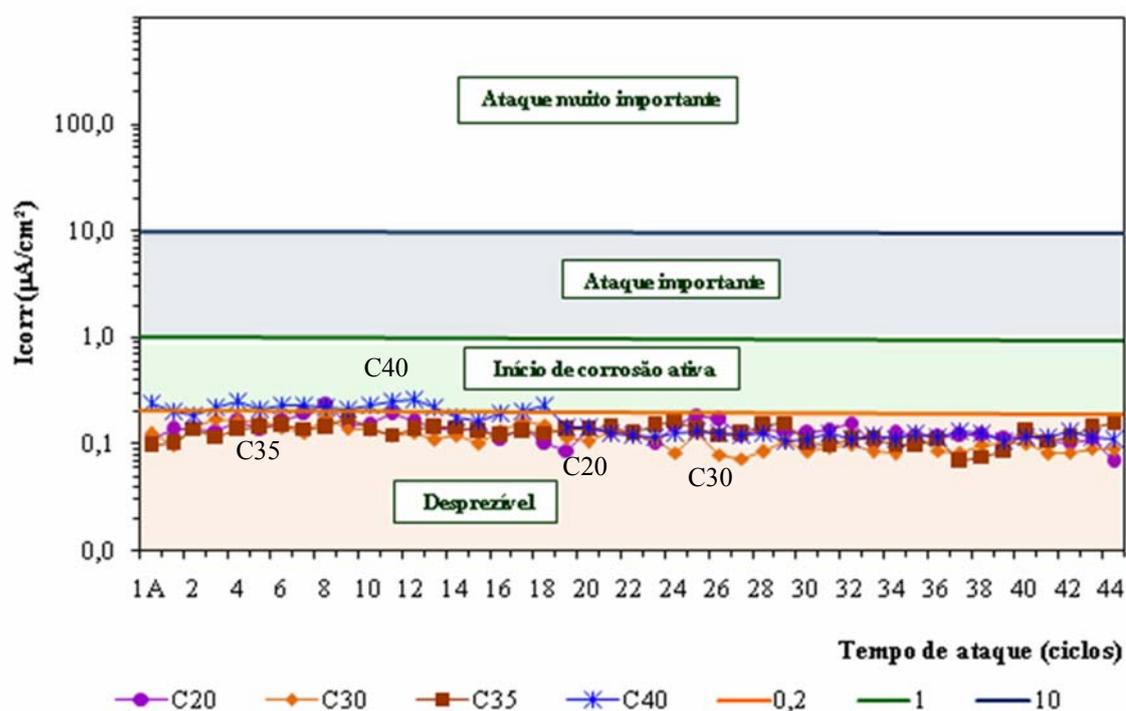


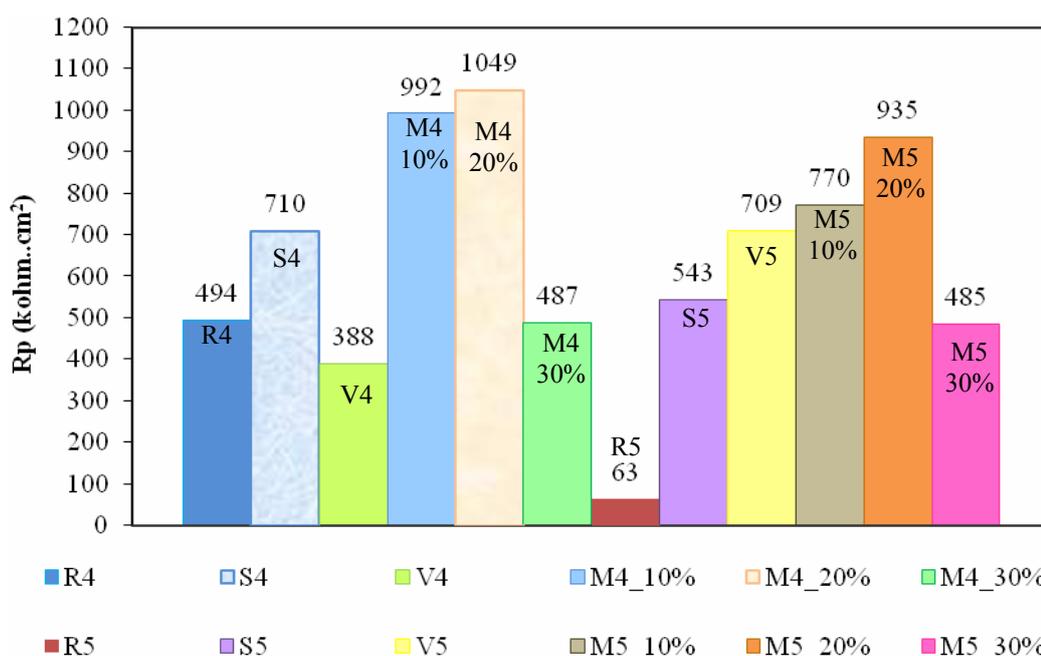
Figura 5.55 – Taxa de corrosão eletroquímica variando com o tempo de ataque (ciclos) para concretos com classe de resistência C20, C30, C35 e C40, incluindo somente concretos com adições (sem referência).

**d) Valores Médios e Análise Final de Rp**

A Tabela 5.10 mostra o valor médio total dos valores de resistência de polarização ( $R_p$ ) durante o tempo de ataque para todos os concretos estudados e a Figura 5.53 apresenta esses resultados graficamente.

**Tabela 5.9 – Valores médios de resistência de polarização durante o tempo de ataque para os concretos estudados.**

Tipo de concreto	Teor de adição (%)	a/ag	Valores médios de Rp (kohm.cm <sup>2</sup> )
Referência (R)	0	0,40	494
		0,55	63
Silica ativa (S)	10	0,40	710
		0,55	543
Cinza Volante (V)	25	0,40	388
		0,55	709
Metacaulim	10%	0,40	992
		0,55	770
Metacaulim	20%	0,40	1049
		0,55	935
Metacaulim	30%	0,40	487
		0,55	485



**Figura 5.56 – Valores médios expressos graficamente de resistência de polarização para os concretos.**

Por meio da Tabela 5.10 e da Figura 5.56, pode-se perceber o efeito das adições minerais, principalmente em concretos com maiores relações a/ag, no que tange aos patamares característicos dos valores de resistência de polarização. Fica claro que os sistemas com 10% e 20% de metacaulim representam os concretos com os mais altos valores de Rp, vindo, em

seqüência, os concretos com sílica ativa e os concretos com cinza volante. Há uma queda significativa na ordem de grandeza de  $R_p$  para os concretos de metacaulim 30% em relação aos outros dois teores. Nota-se também que para o concreto de referência, a alteração da relação  $a/ag$  de 0,40 para 0,55 implicou numa redução de 87% no valor médio de resistência de polarização, denotando o quanto este último sistema se mostra susceptível ao ataque das armaduras por íons cloreto.

### 5.2.2.2 Impedância Eletroquímica

Os resultados de impedância são apresentados a seguir, sendo expressos por um plano complexo (real-imaginário) de coordenadas cartesianas, denominado de diagrama de Nyquist, no qual se tem nas abscissas a parte real, ligada a termos resistivos da impedância, e nas ordenadas a parte imaginária, associada a termos capacitivos ou indutivos da impedância.

O circuito equivalente, sugerido por John *et al.* (1983) e Dawson *et al.* (1990) *apud* Cascudo (2000), proposto para modelar a interface aço-concreto, será adotado na presente pesquisa e, na Figura 5.57, pode-se observar a associação dos elementos deste circuito com as partes do concreto e interface, acompanhado do diagrama de Nyquist correspondente. Ressaltando-se que faixa de frequência adotada foi de 100 kHz a 10 mHz, conforme comentado no item 4.6.3.3, alínea “c”, do Capítulo 4,

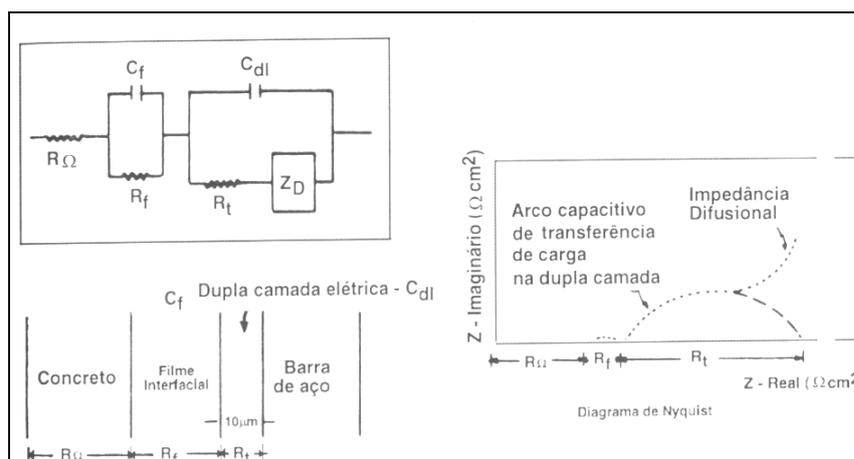


Figura 5.57 – Circuito equivalente proposto para o caso do concreto armado: associação dos elementos do circuito com as partes do concreto e interface e diagrama de Nyquist correspondente (JOHN *et al.*, 1983 *apud* CASCUDO, 2000).

Nas Figuras 5.58 a 5.74 estão apresentados os resultados de impedância dos concretos estudados referentes aos seguintes tempos de ataque: antes do início do ataque, 154 dias e 308 após o início do ataque por íons cloreto.

a) Influência da Relação Água/Aglomerante

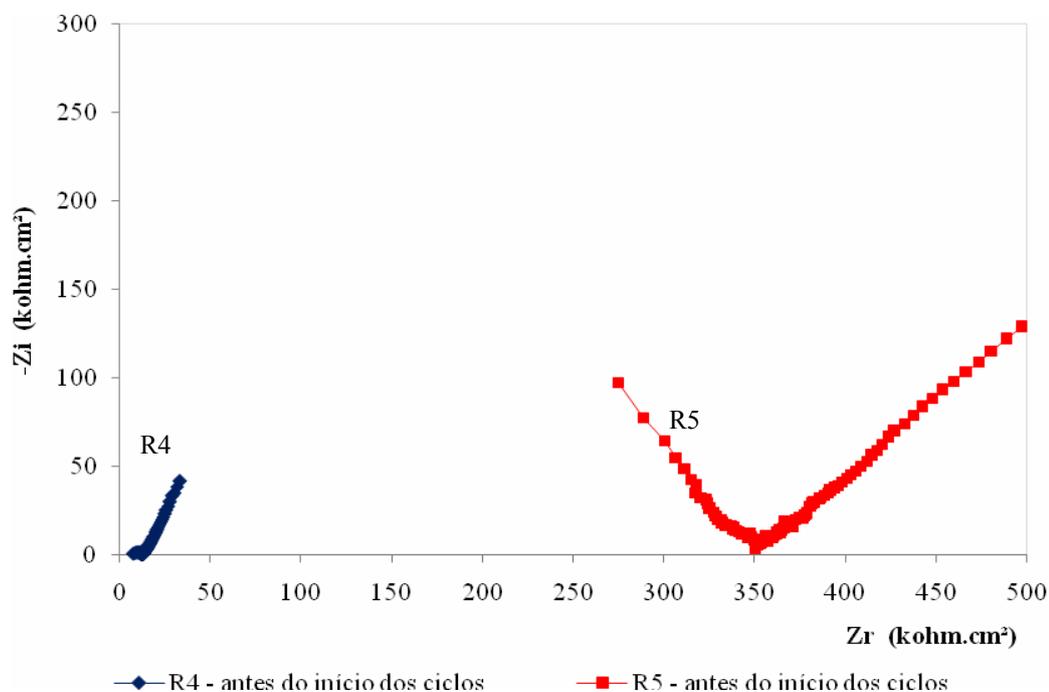


Figura 5.58 - Diagramas de Nyquist dos concretos de referência e relação a/ag 0,40 e 0,55, com as medidas realizadas anteriormente ao início do ataque por cloretos, com frequências de 100 kHz a 10 mHz.

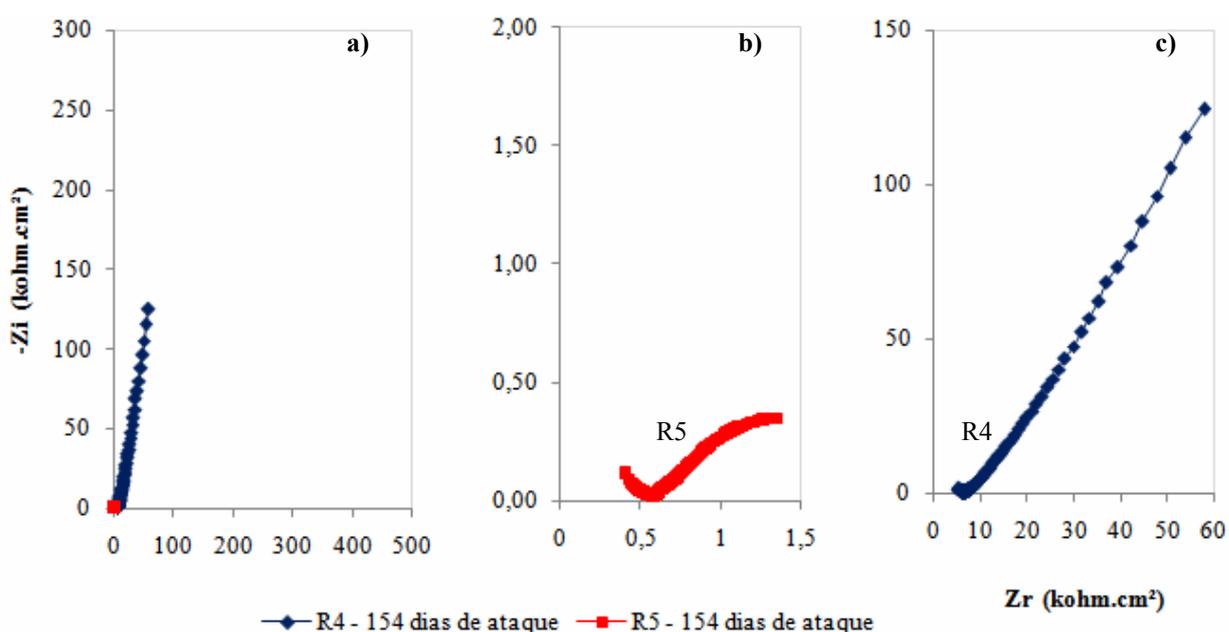


Figura 5.59 - Diagramas de Nyquist dos concretos de referência e relação a/ag 0,40 e 0,55, com as medidas realizadas após 154 dias do início do ataque por cloretos, com frequências de 100 kHz a 10 mHz: (a) concretos R4 e R5 (b) imagem ampliada para o concreto R5 (c) imagem ampliada para o concreto R4.

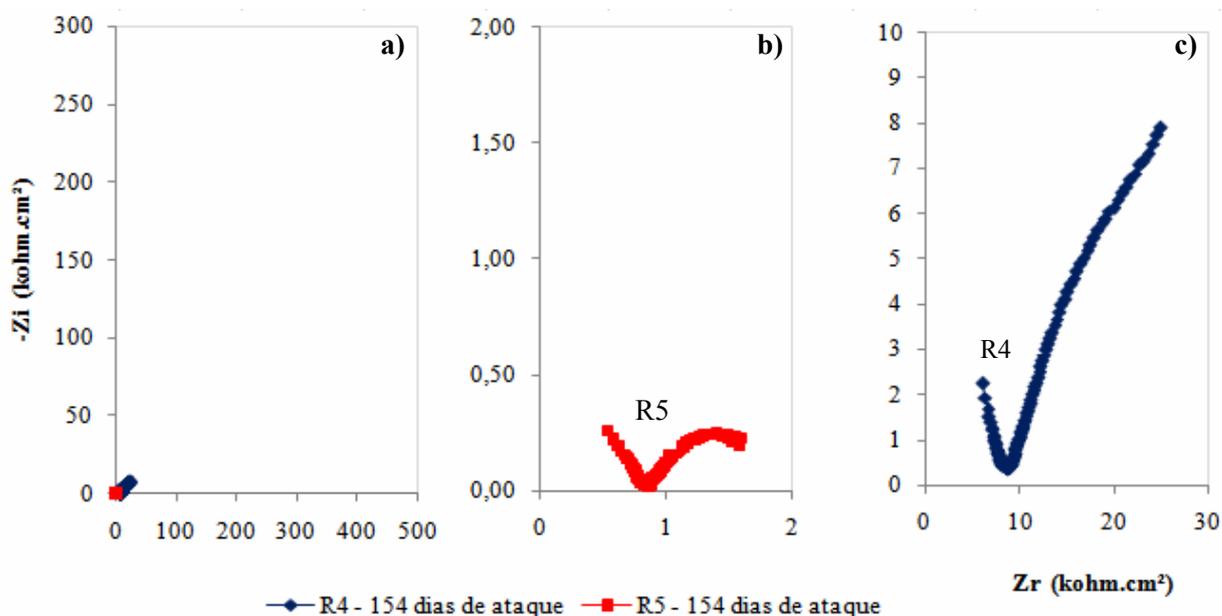


Figura 5.60 - Diagramas de Nyquist dos concretos de referência e relação a/ag 0,40 e 0,55, com as medidas realizadas após 308 dias do início do ataque por cloretos, com frequências de 100 kHz a 10 mHz: (a) concretos R4 e R5 (b) imagem ampliada para o concreto R5 (c) imagem ampliada para o concreto R4.

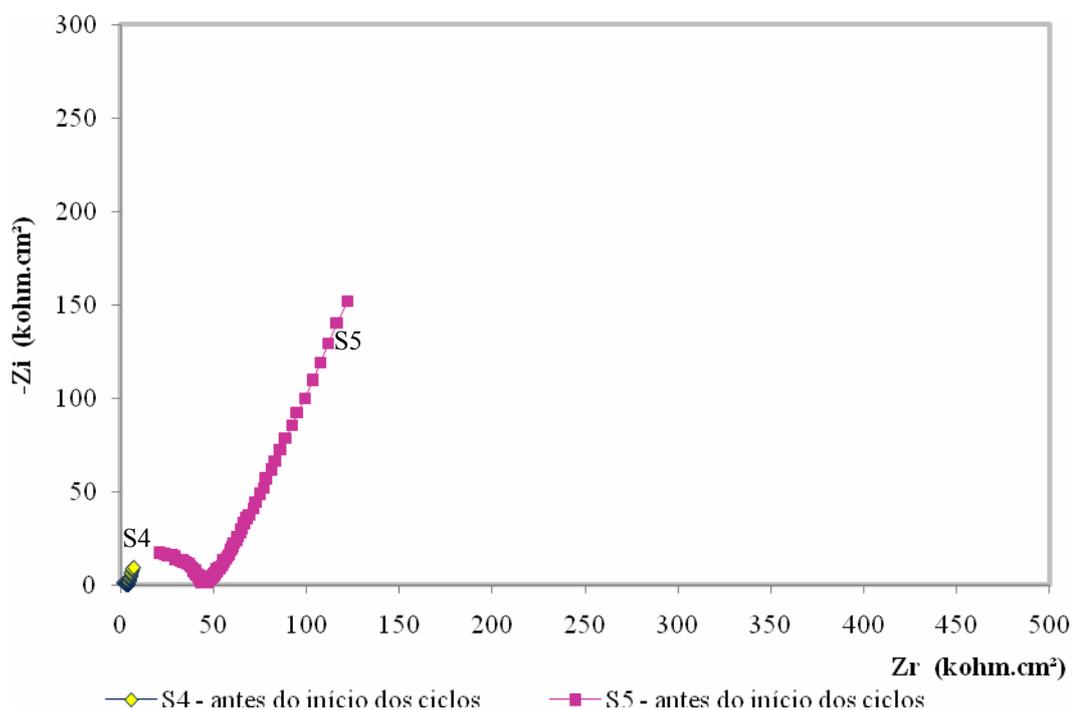


Figura 5.61 - Diagramas de Nyquist dos concretos com adição de sílica ativa e relação a/ag 0,40 e 0,55, com as medidas realizadas anteriormente ao início do ataque por cloretos, com frequências de 100 kHz a 10 mHz.

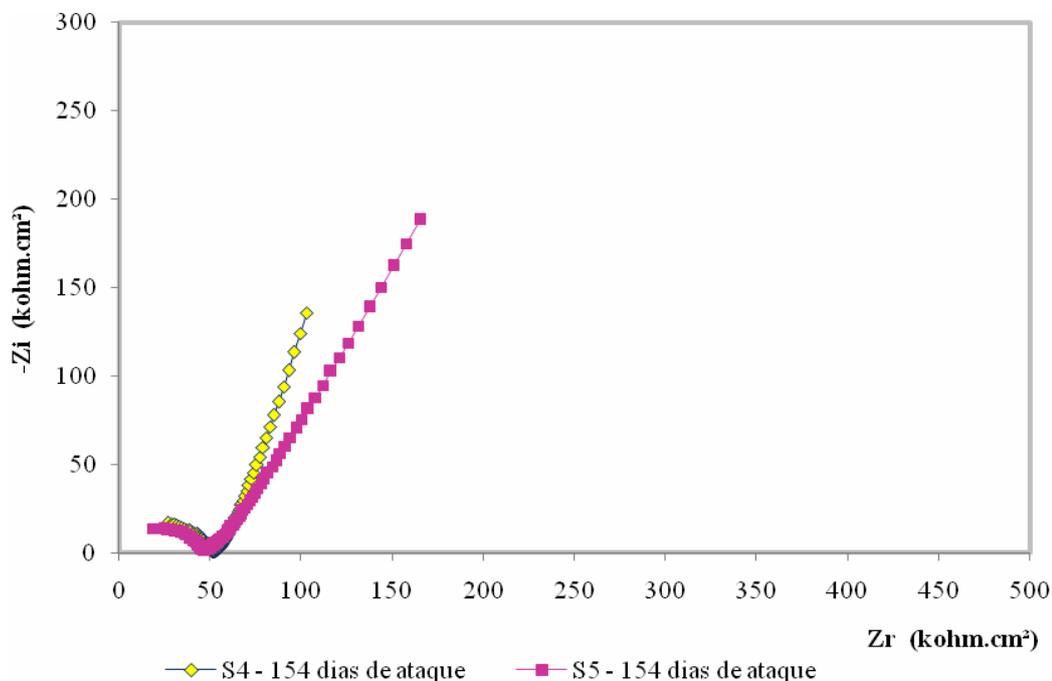


Figura 5.62 - Diagramas de Nyquist dos concretos com adição de sílica ativa e relação a/ag 0,40 e 0,55, com as medidas realizadas após 154 dias do início do ataque por cloretos, com frequências de 100 kHz a 10 mHz.

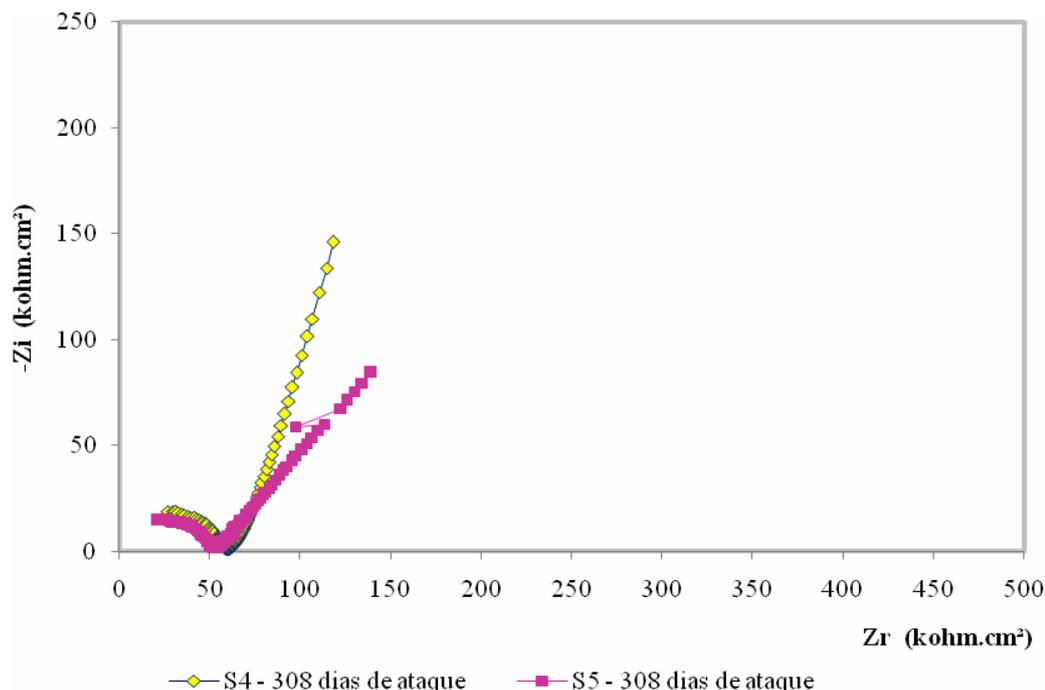


Figura 5.63 - Diagramas de Nyquist dos concretos com adição de sílica ativa e relação a/ag 0,40 e 0,55, com as medidas realizadas após 308 dias do início do ataque por cloretos, com frequências de 100 kHz a 10 mHz.

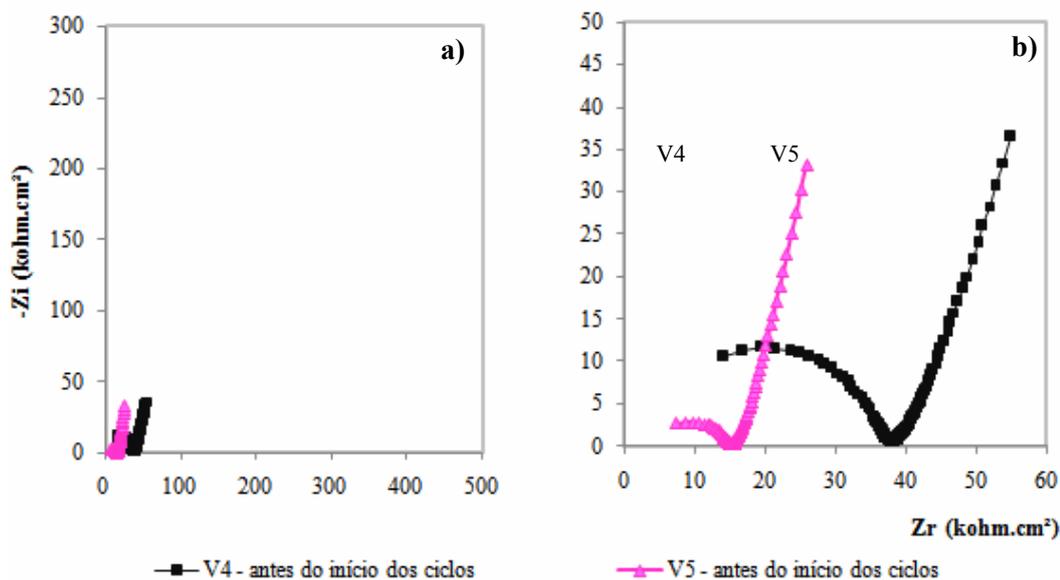


Figura 5.64 - Diagramas de Nyquist dos concretos com adição de cinza volante e relação a/ag 0,40 e 0,55, com as medidas realizadas anteriormente ao início do ataque por cloretos, com frequências de 100 kHz a 10 mHz: (a) concretos V5 e V4 (b) imagem ampliada para os referidos concretos.

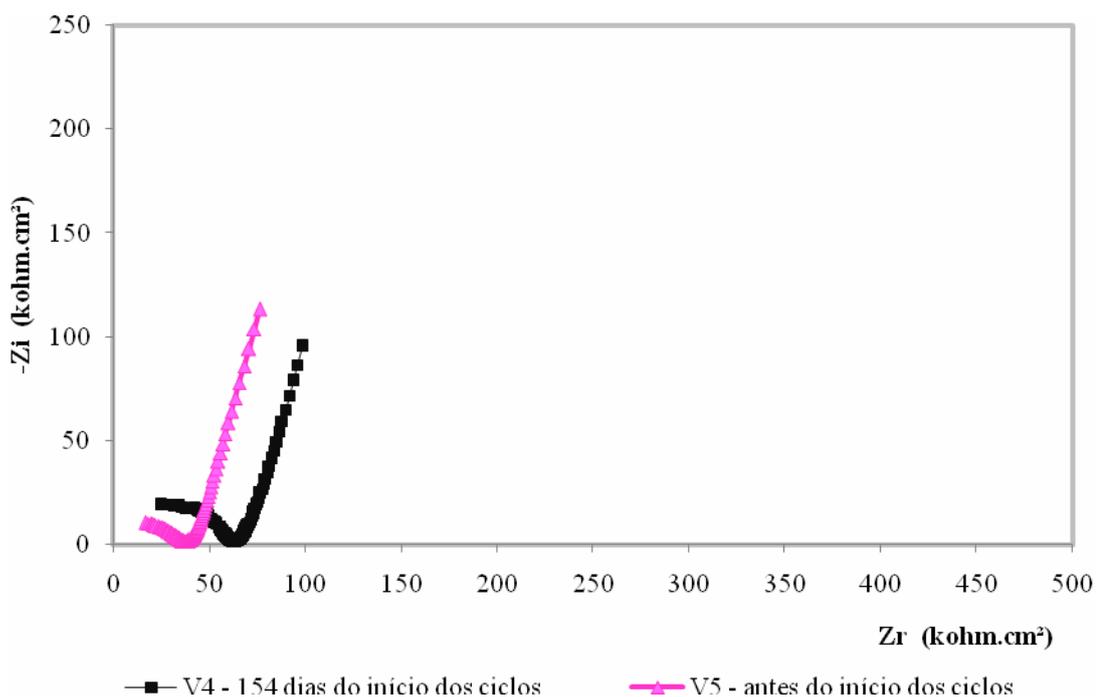


Figura 5.65 - Diagramas de Nyquist dos concretos com adição de cinza volante e relação a/ag 0,40 e 0,55, com as medidas realizadas após 154 dias do início do ataque por cloretos, com frequências de 100 kHz a 10 mHz.

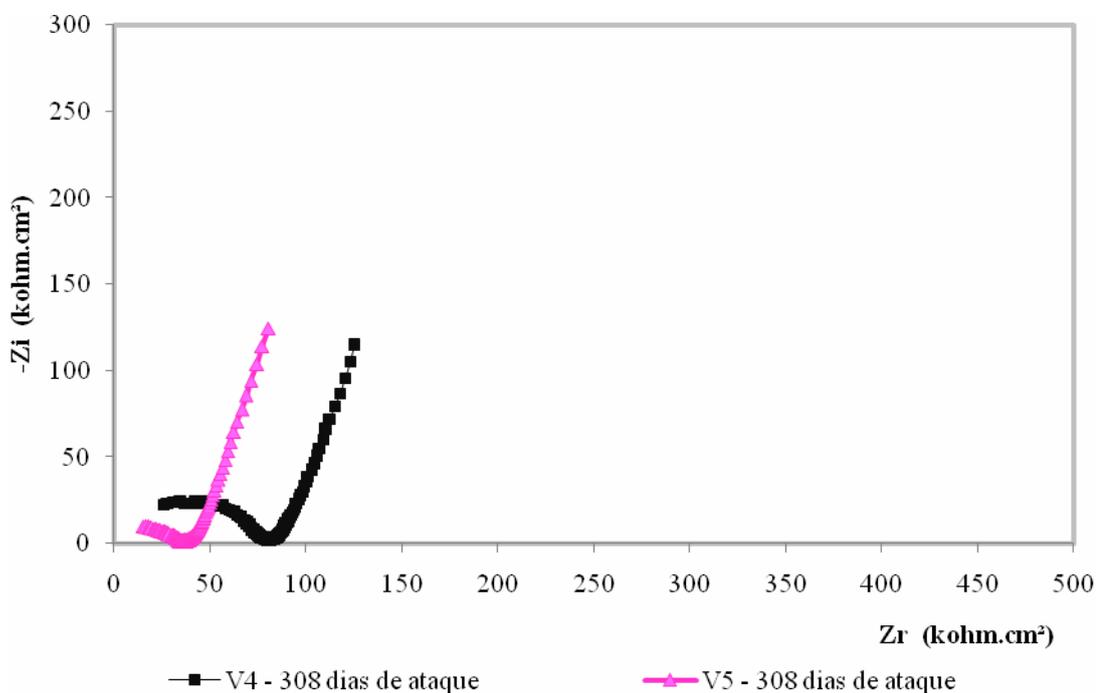


Figura 5.66 - Diagramas de Nyquist dos concretos com adição de cinza volante e relação a/ag 0,40 e 0,55, com as medidas realizadas após 308 dias do início do ataque por cloretos, com frequências de 100 kHz a 10 mHz.

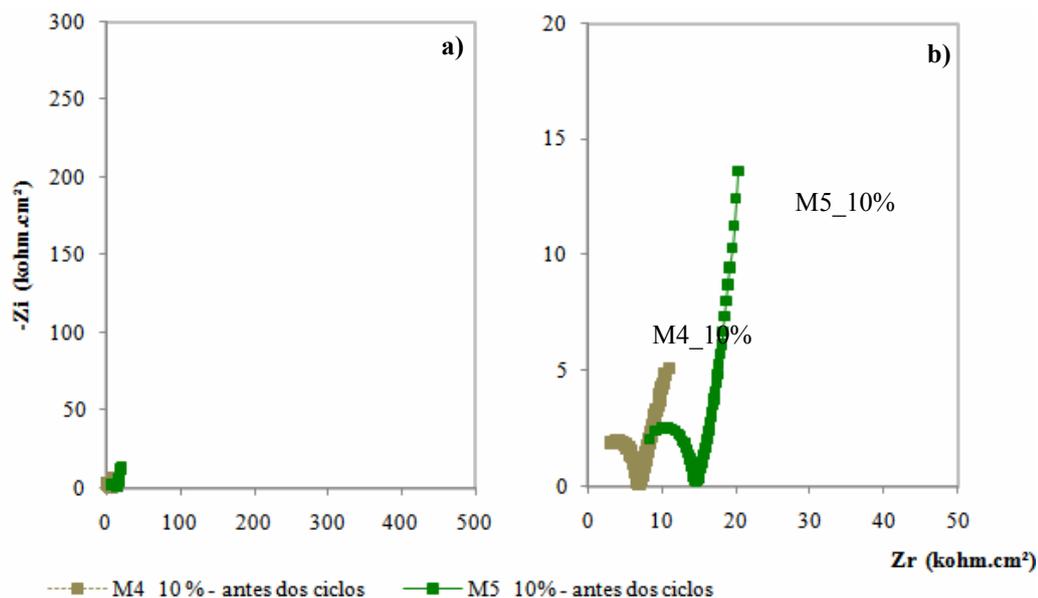


Figura 5.67 - Diagramas de Nyquist dos concretos com adição de metacaulim em substituição parcial ao cimento Portland em massa no teor de 10% e relação a/ag 0,40 e 0,55, com as medidas realizadas anteriormente ao início do ataque por cloretos, com frequências de 100 kHz a 10 mHz: (a) concretos M4\_10% e M5\_10% (b) imagem ampliada para os referidos concretos.

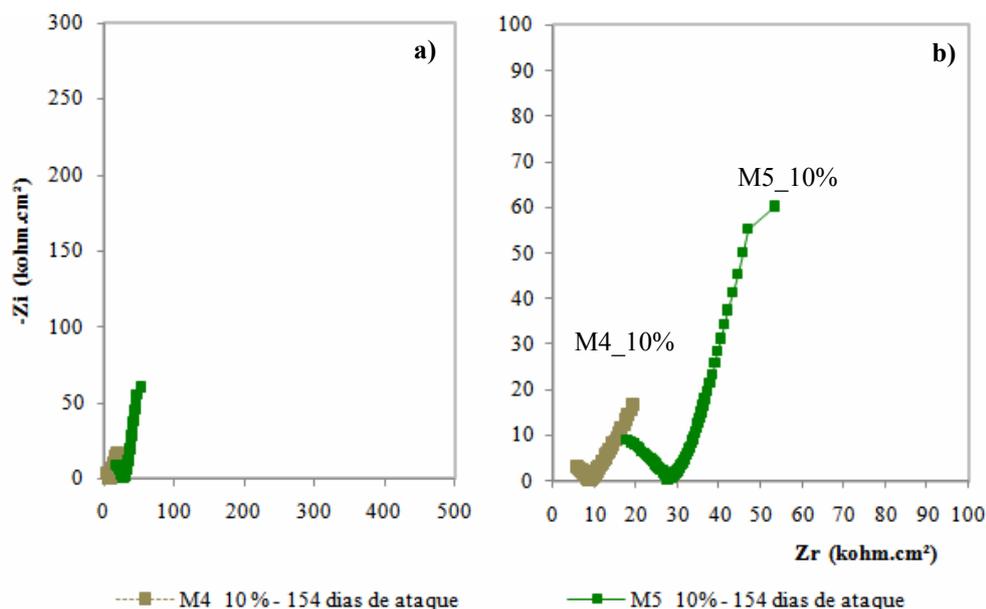


Figura 5.68 - Diagramas de Nyquist dos concretos com adição de metacaulim em substituição parcial ao cimento Portland em massa no teor de 10% e relação a/ag 0,40 e 0,55, com as medidas realizadas após 154 dias do início do ataque por cloretos, com frequências de 100 kHz a 10 mHz: (a) concretos M4\_10% e M5\_10% (b) imagem ampliada para os referidos concretos.

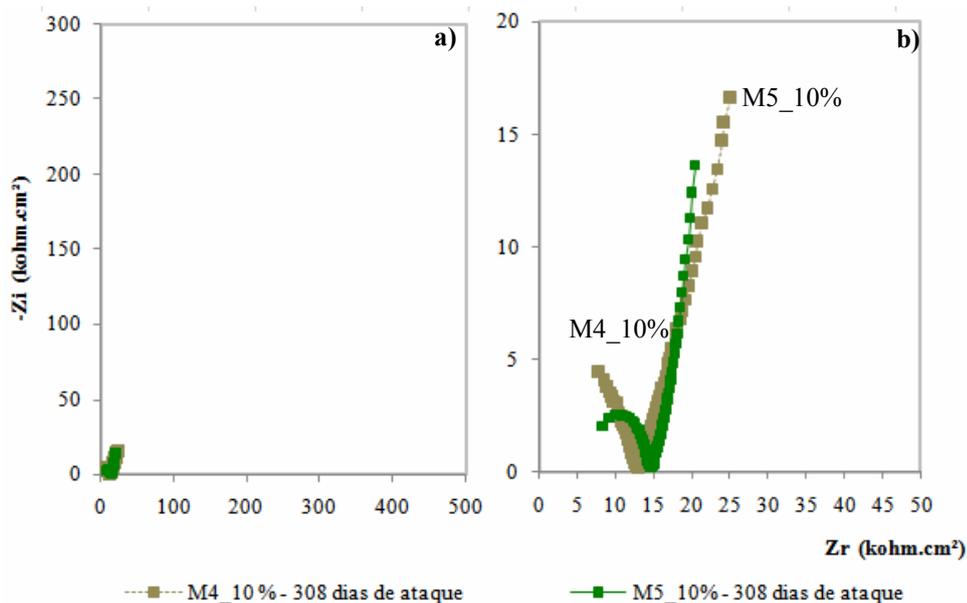


Figura 5.69 - Diagramas de Nyquist dos concretos com adição de metacaulim em substituição parcial ao cimento Portland em massa no teor de 10% e relação a/ag 0,40 e 0,55, com as medidas realizadas após 308 dias do início do ataque por cloretos, com frequências de 100 kHz a 10 mHz: (a) concretos M4\_10% e M5\_10% (b) imagem ampliada para os referidos concretos.

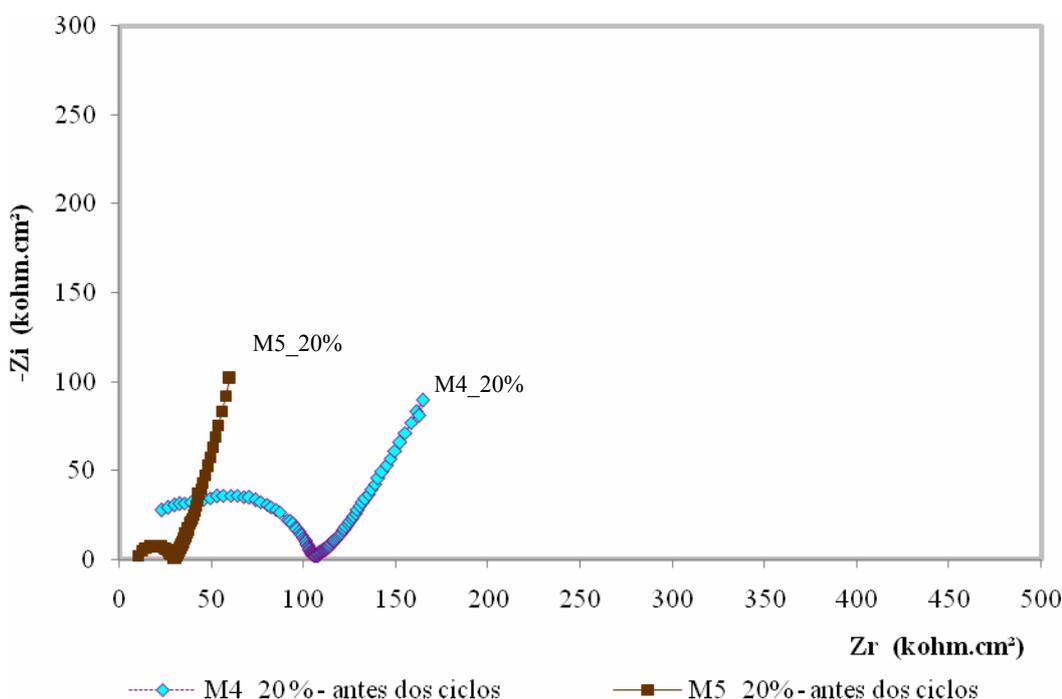


Figura 5.70 - Diagramas de Nyquist dos concretos com adição de metacaulim em substituição parcial ao cimento Portland em massa no teor de 20% e relação a/ag 0,40 e 0,55, com as medidas realizadas anteriormente ao início do ataque por cloretos, com frequências de 100 kHz a 10 mHz.

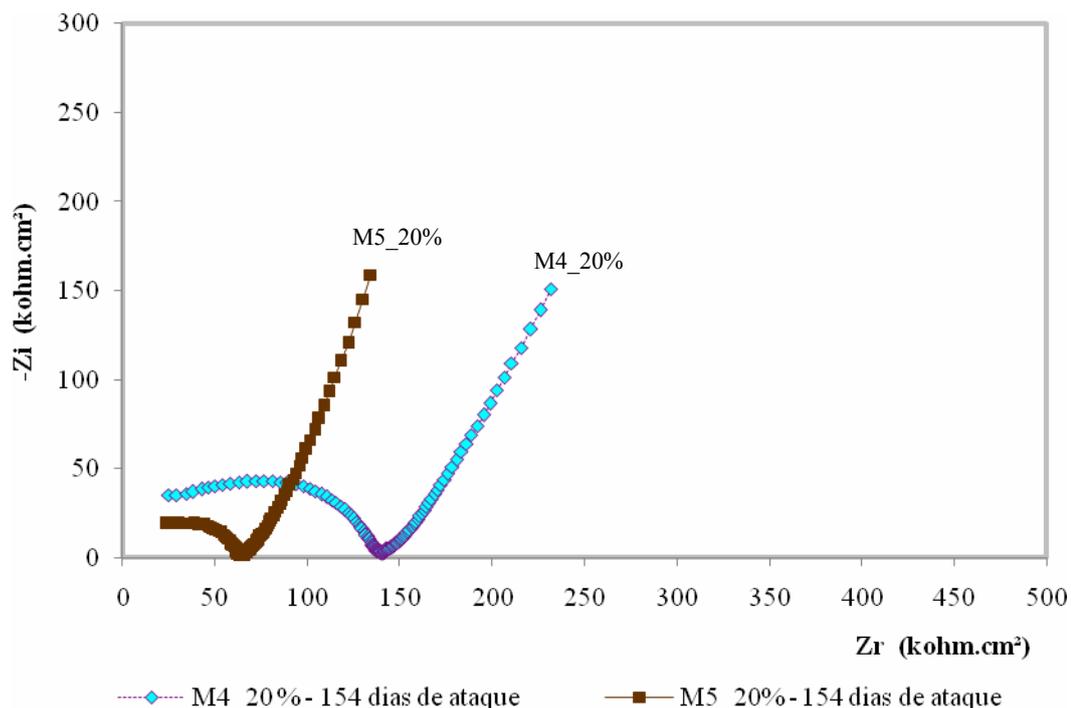


Figura 5.71 - Diagramas de Nyquist dos concretos com adição de metacaulim em substituição parcial ao cimento Portland em massa no teor de 20% e relação a/ag 0,40 e 0,55, com as medidas realizadas após 154 dias do início do ataque por cloretos, com frequências de 100 kHz a 10 mHz.

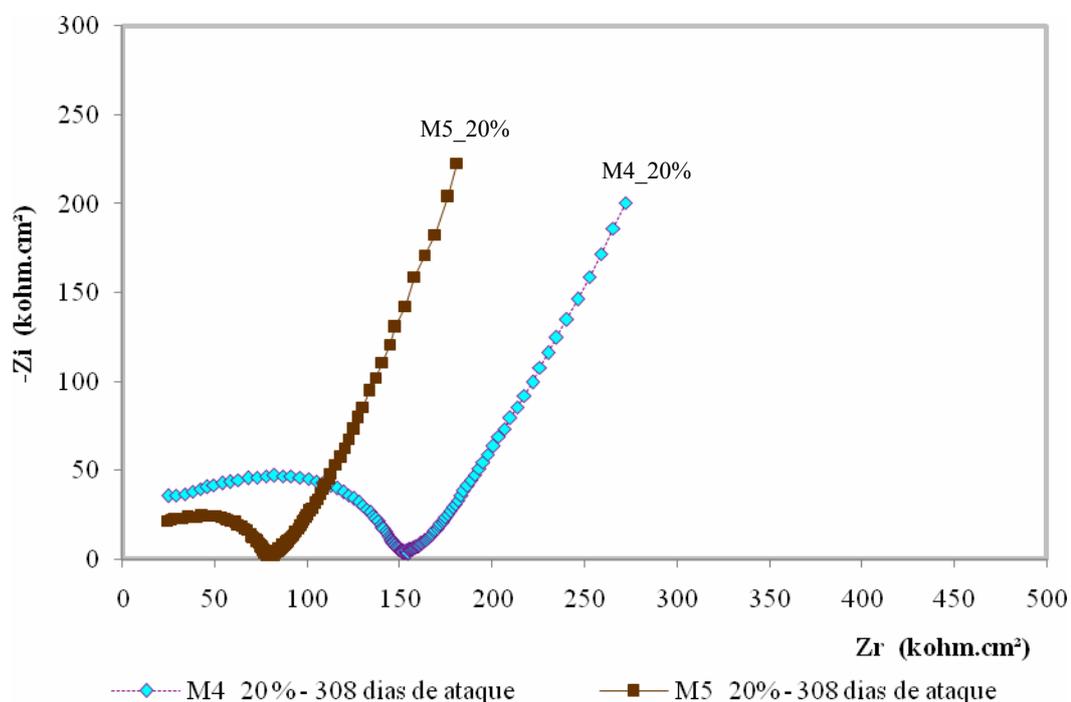


Figura 5.72 - Diagramas de Nyquist dos concretos com adição de metacaulim em substituição parcial ao cimento Portland em massa no teor de 20% e relação a/ag 0,40 e 0,55, com as medidas realizadas após 308 dias do início do ataque por cloretos, com frequências de 100 kHz a 10 mHz.

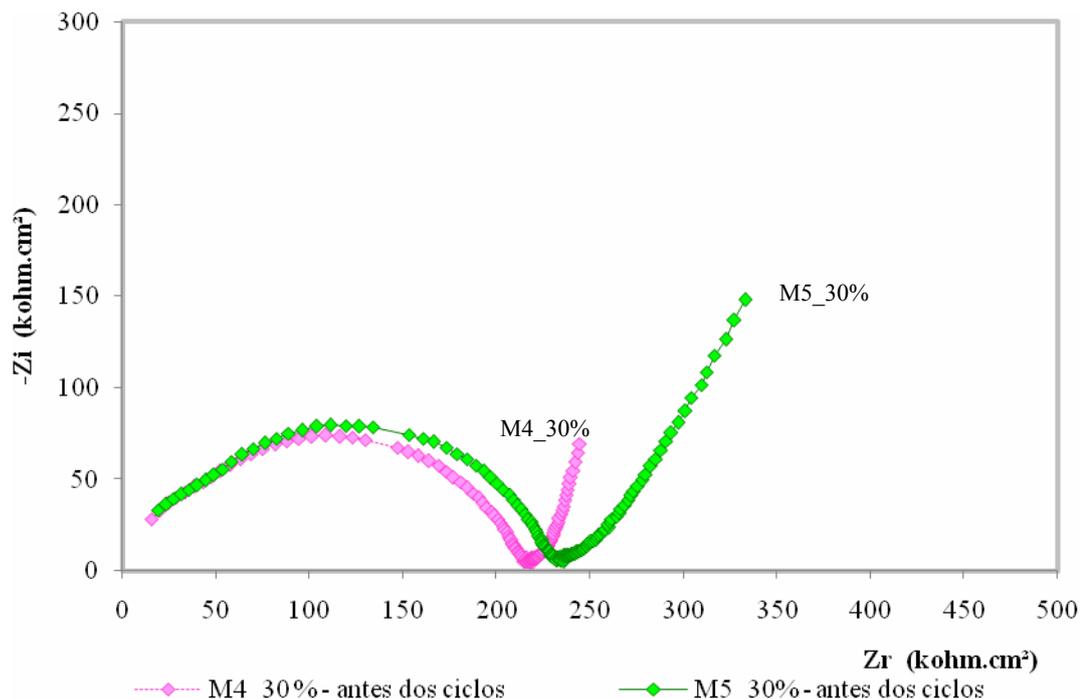


Figura 5.73 - Diagramas de Nyquist dos concretos com adição de metacaulim em substituição parcial ao cimento Portland em massa no teor de 30% e relação a/ag 0,40 e 0,55, com as medidas realizadas anteriormente ao início do ataque por cloretos, com frequências de 100 kHz a 10 mHz.

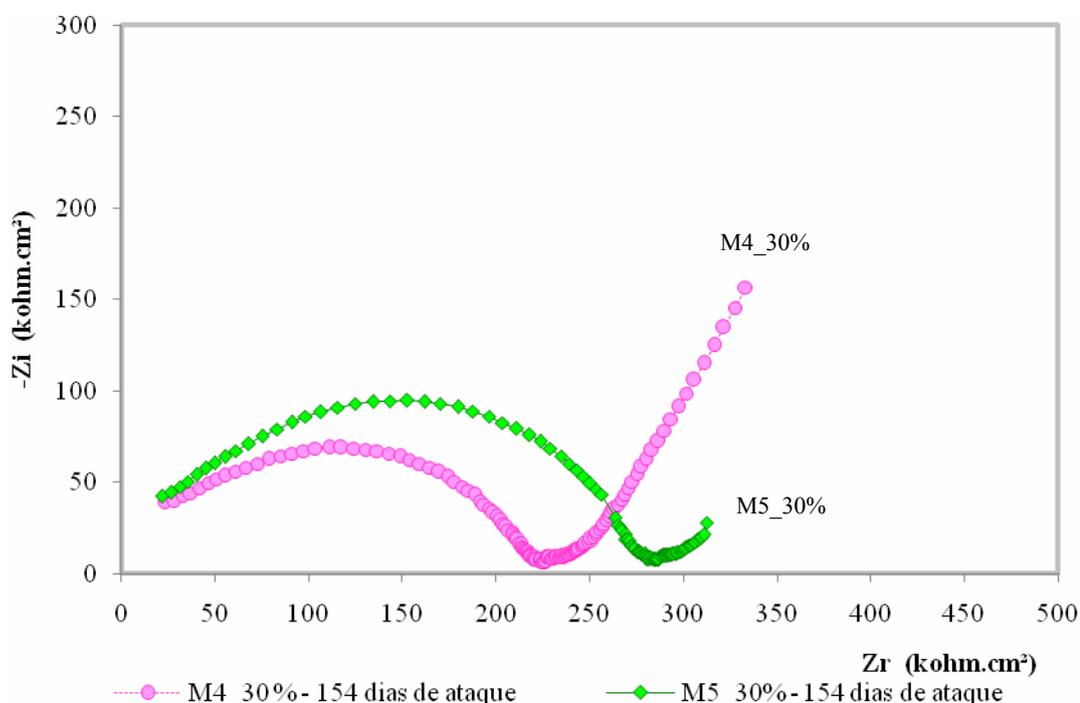
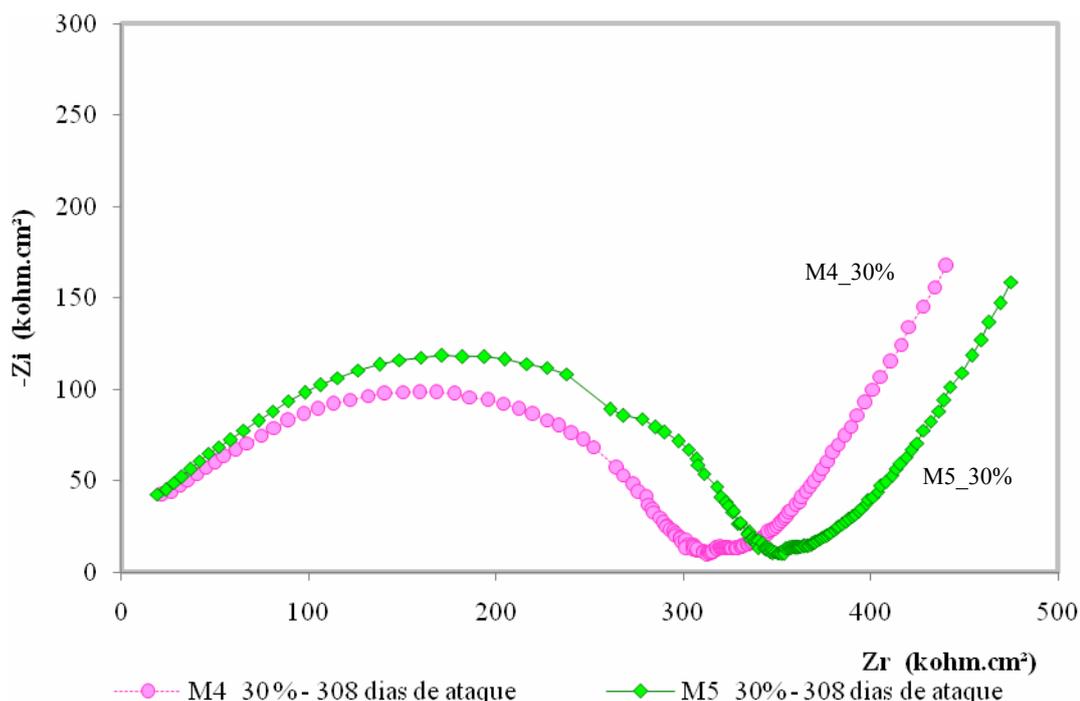


Figura 5.74 - Diagramas de Nyquist dos concretos com adição de metacaulim em substituição parcial ao cimento Portland em massa no teor de 30% e relação a/ag 0,40 e 0,55, com as medidas realizadas após 154 dias do início do ataque por cloretos, com frequências de 100 kHz a 10 mHz.



**Figura 5.75 - Diagramas de Nyquist dos concretos com adição de metacaulim em substituição parcial ao cimento Portland em massa no teor de 30% e relação a/ag 0,40 e 0,55, com as medidas realizadas após 308 dias do início do ataque por cloretos, com frequências de 80 kHz a 10 mHz.**

Das figuras anteriores, observa-se que o concreto R5 exibe maior impedância provavelmente por estar mais seco no momento da medida (antes do início dos ciclos), o que denota maior resistividade, isto é, maior resistência ôhmica em relação ao concreto R4. Possivelmente, os dois concretos, a saber, R4 e R5, estão passivos, muito embora, a avaliação gráfica não dê muitos subsídios para esta análise.

Pode-se perceber uma queda acentuada nos valores de impedância do concreto R5, com indicação de atividade corrosiva e, portanto, caracterizando despasseiração da armadura para esse concreto. A mudança abrupta nos dados de impedância pode dar informações sobre a morfologia do ataque, sugerindo eventual ataque localizado pela ação de cloretos (CASCUDO, 1997). Todavia, como o monitoramento da impedância no presente caso não se deu com frequência elevada (quanto ao número de medidas ao longo do tempo), não se pode inferir sobre esta questão neste trabalho.

Na idade de 154 dias de ataque, o concreto R4 apresentou maior impedância no campo imaginário, muito embora no campo real a impedância tenha sido muito reduzida, dando forte indicação de que também para esse concreto houve despassivação da armadura. A ocorrência da extrapolação da reta acentuada a 45° equivale dizer que nessa idade, a corrosão foi controlada principalmente por difusão do oxigênio. De fato, este comportamento é justificado pelo fato dos corpos-de-prova estarem imersos em solução e, mesmo apenas com 1/3 de sua altura (a do corpo-de-prova) em contato com a solução agressiva, mostrou-se continuamente com alto grau de umidade. A solução em contato com a base do corpo-de-prova rapidamente ascendia por capilaridade e, nesta condição, a difusão do oxigênio é lenta e o processo eletroquímico passa a ser controlado pela reação catódica de redução de O<sub>2</sub> (CASCUDO, 2000).

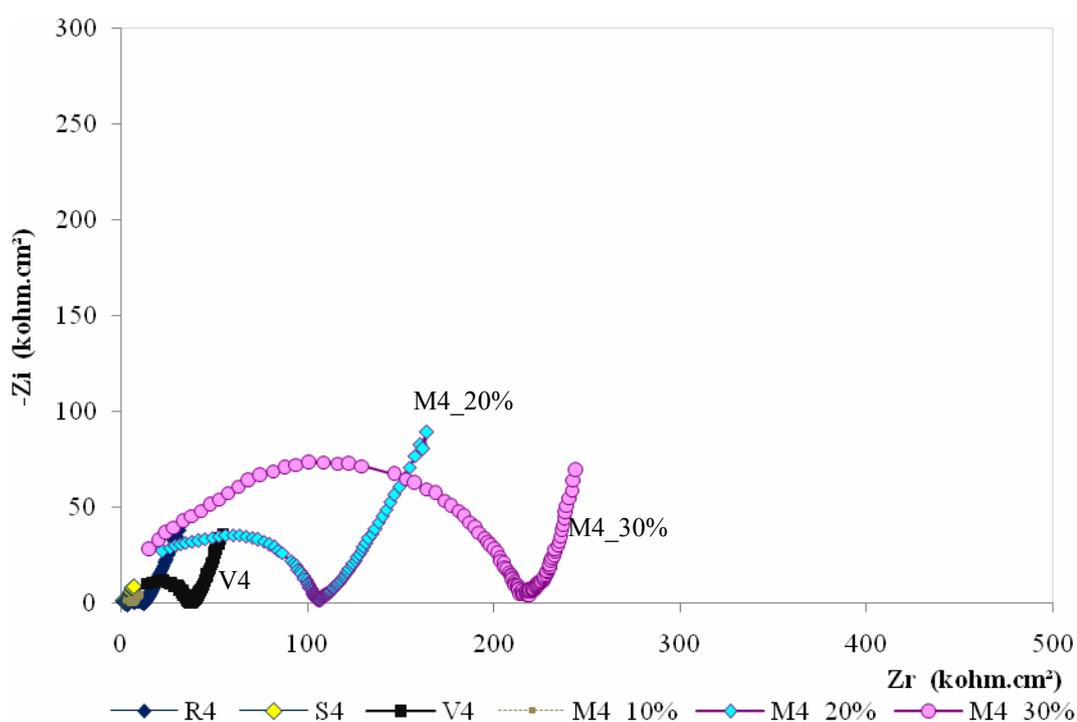
Para os demais concretos com adições, nota-se em geral que não houve alteração significativa dos dados de impedância com o tempo de ataque, o que expressa não ter havido alteração da interface aço/concreto e, portanto, da passivação da armadura.

Percebe-se uma tendência comum, os concretos com maior relação a/ag apresentam dados de impedância, principalmente na parcela do eixo real superiores aos de menor relação a/ag. Em alguns casos, houve inversão das curvas na primeira medida (antes do início dos ciclos), provavelmente porque estes concretos estavam mais secos. Os concretos com adição de metacaulim e cinza volante foram conduzidos à câmara úmida e lá permaneceram por um período de 24 horas. Este procedimento fez-se necessário a fim de que os corpos-de-prova perdessem a condição seca que interferia nas medidas de potencial de corrosão. Acredita-se que este procedimento teve interveniência também nas medidas de impedância. Salienta-se que os concretos de menor relação a/ag (0,40) têm maior consumo de cimento (maior reserva alcalina) e menor porosidade do que o concreto de relação a/ag 0,55. Isto se refletiu na tendência geral observada nos maiores valores de resistência à transferência de carga (parte do

arco capacitivo) e resistências ôhmicas, respectivamente, para esses concretos de menor relação a/ag.

### b) Influência do Tipo de Adição Mineral

Nas figuras 5.75 a 5.80 estão apresentados os resultados de impedância para os concretos com relação a/ag 0,40 e 0,55, em período anterior ao início do ataque, aos 154 dias e aos 308 dias de ataque, confrontando em um mesmo gráfico os vários concretos (com os diferentes tipos de adições minerais).



**Figura 5.76 - Diagramas de Nyquist dos concretos com relação a/ag 0,40, com as medidas realizadas anteriormente ao início do ataque por cloretos, com frequências de 100 kHz a 10 mHz.**

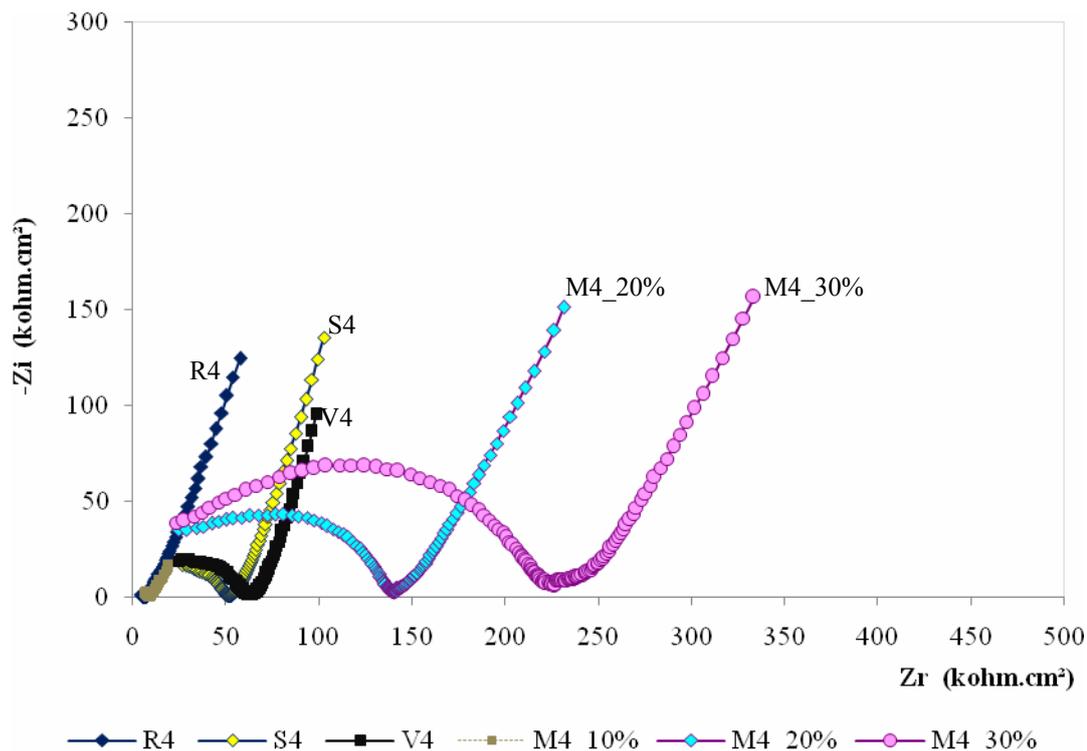


Figura 5.77 - Diagramas de Nyquist dos concretos com relação a/ag 0,40, com as medidas realizadas após 154 dias do início do ataque por cloretos, com frequências de 100 kHz a 10 mHz.

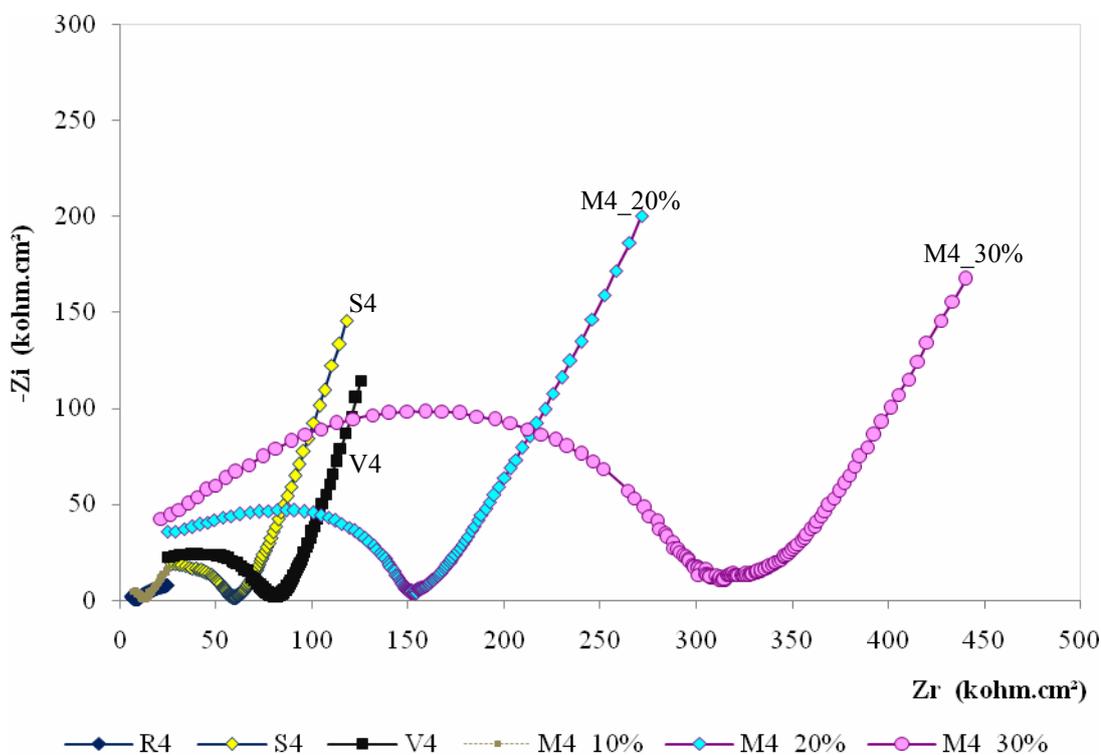


Figura 5.78 - Diagramas de Nyquist dos concretos com relação a/ag 0,40, com as medidas realizadas após 308 dias do início do ataque por cloretos, com frequências de 100 kHz a 10 mHz.

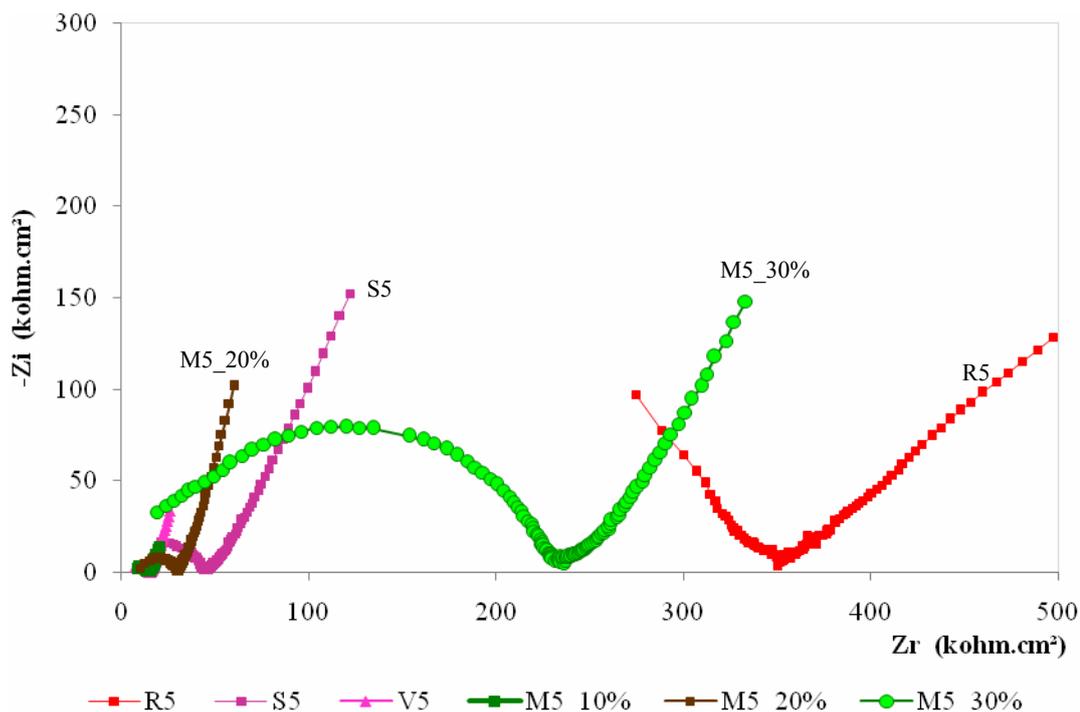


Figura 5.79 - Diagramas de Nyquist dos concretos com relação a/ag 0,55, com as medidas realizadas anteriormente ao início do ataque por cloretos, com frequências de 100 kHz a 10 mHz.

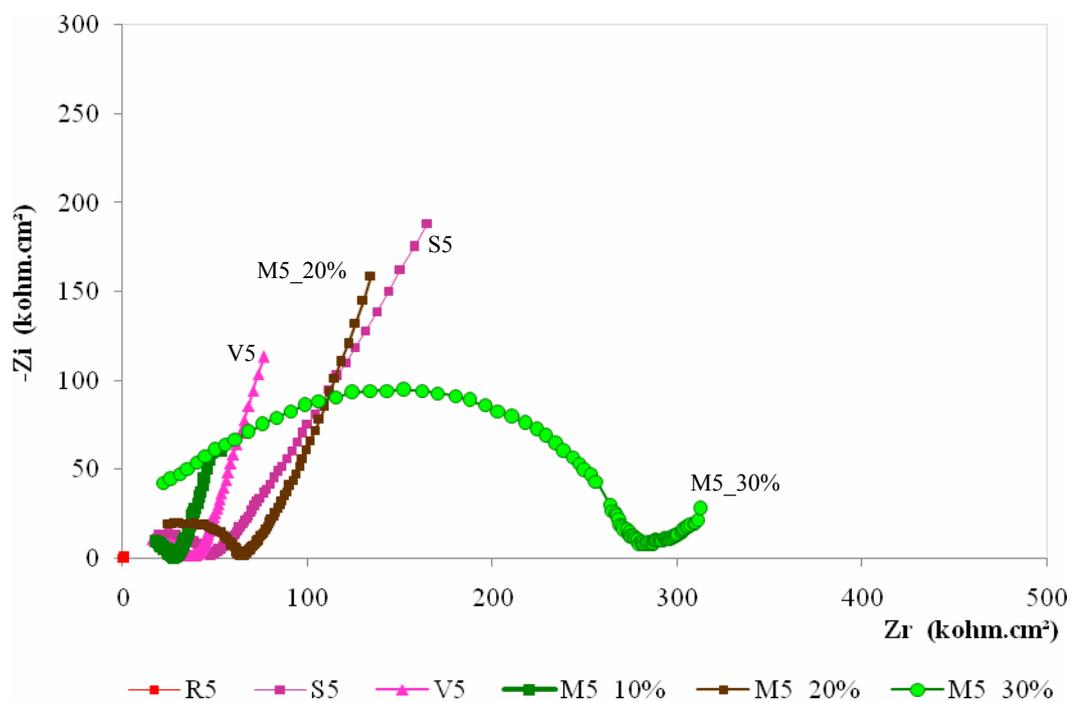
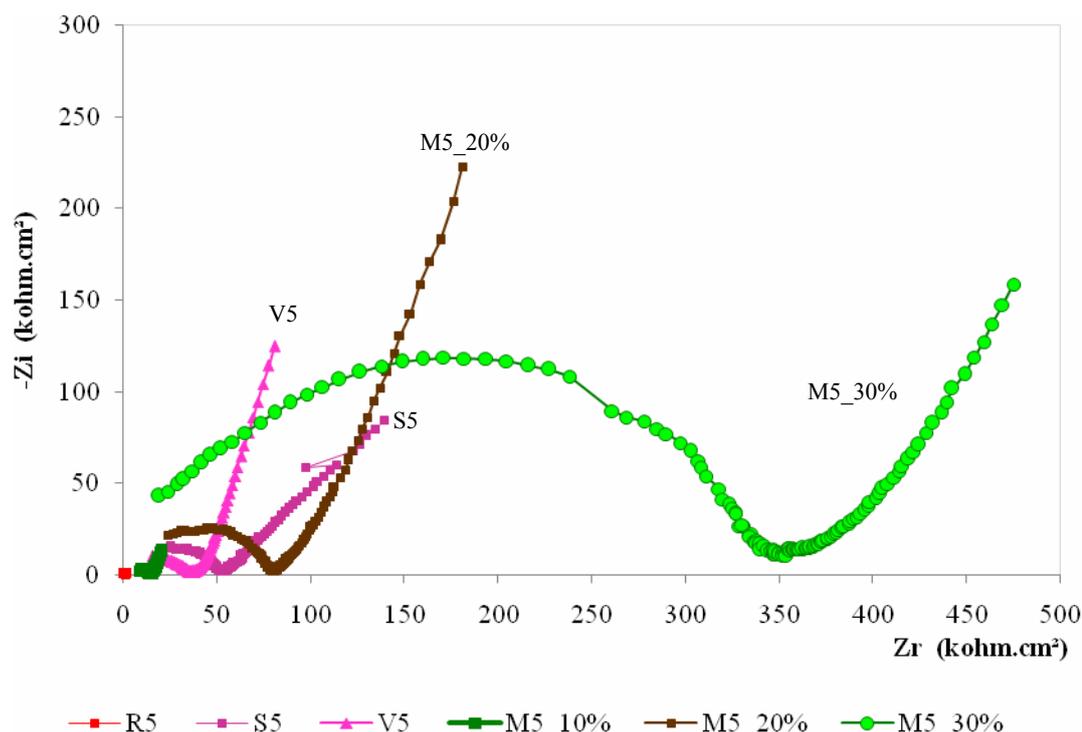


Figura 5.80 - Diagramas de Nyquist dos concretos com relação a/ag 0,40, com as medidas realizadas após 154 dias do início do ataque por cloretos, com frequências de 100 kHz a 10 mHz.



**Figura 5.81 - Diagramas de Nyquist dos concretos com relação a/ag 0,40, com as medidas realizadas após 308 dias do início do ataque por cloretos, com frequências de 100 kHz a 10 mHz.**

Nota-se com o tempo de ataque, a ocorrência da impedância difusional para os concretos estudados, como esperado, pelas características do tipo de ataque, isto é, pela difusão do  $O_2$  dificultada em meios úmidos.

Não houve diferenças significativas dos dados de interface aço/concreto com o tempo de ataque dos concretos estudados com adições minerais. Dentre estes concretos, não há, em princípio, indicação de despassivação das armaduras, o mesmo não se podendo dizer dos concretos de referência, cujos valores de impedância reduziram significativamente com o tempo de ataque.

Fica evidente também, nas figuras anteriores, uma maior impedância do sistema para os concretos com adições minerais.

Notou-se uma grande influência dos teores de metacaulim nos dados de impedância, independente da relação a/ag. Com 20% e 30%, há um aumento significativo em todos os parâmetros de impedância (impedância real, impedância imaginária, resistência à

transferência de carga), exceto na resistência ôhmica. O que de fato ficou marcante nesses casos do metacaulim foi o crescimento dos arcos capacitivos à medida que se aumentou o teor de metacaulim. O aumento da resistência à transferência de carga em função do acréscimo no teor de metacaulim ressalta a grande eficiência do metacaulim no que tange a produzir acréscimo na impedância dos sistemas.

### 5.2.3 Análise Visual das Barras de Aço e dos Concretos ao Final do Experimento

Após a abertura dos corpos-de-prova de concreto, as barras de aço foram inspecionadas visualmente. Nas Figuras 5.81 a 5.82, estão apresentados alguns registros fotográficos do aspecto visual das barras de aço e, nas Figuras 5.83 e 5.84, são mostrados os concretos próximos à região da armadura exposta à corrosão.



**Figura 5.82** – Aspecto superficial final de uma barra de aço inserida em um concreto de referência e relação  $a/a_g$  0,55, exposta à corrosão por 308 dias de ataque.



**Figura 5.83** – Aspecto superficial final de uma barra de aço inserida em um concreto de referência e relação  $a/a_g$  0,40, exposta à corrosão por 308 dias de ataque.

Pode-se visualizar, das figuras anteriores, que em relação à barra do concreto R4, a barra R5 corroeu-se de forma mais intensa, com maior formação de produtos de corrosão, perda de seção do aço e área de desgaste. Esse resultado é coerente com os resultados obtidos de potencial de corrosão, resistência de polarização e impedância eletroquímica.

Os resultados da análise visual confirmam os resultados dos ensaios eletroquímicos, em que, de fato, apenas os concretos de referencia (R4 e R5) tiveram despassivação das armaduras, com o conseqüente estágio de propagação da corrosão.



**Figura 5.84 – Concreto R4 próximo à armadura de aço exposta à corrosão por 308 dias.**



**Figura 5.85 – Concreto R5 próximo à armadura de aço exposta à corrosão por 308 dias.**

Nota-se, analisando as figuras anteriores, que o concreto R5 apresenta-se com acentuadas manchas de corrosão, claramente mais comprometido que o concreto R4, o que é condizente com a inspeção visual realizada na superfície das barras de aço.

Os vários concretos, exceto os de referência, não revelaram indícios visuais de corrosão nas armaduras de aço. Mesmo os que, de alguma forma, geraram alguma incerteza na avaliação eletroquímica quanto à despassivação e posterior desenvolvimento da corrosão, como os concretos S5, V4 e M4\_30%, tiveram suas incertezas devidamente esclarecidas mediante análise visual, que afastou a hipótese da corrosão. As fotografias das figuras 6.86 e 6.87 ilustram aspectos visuais de barras de aço íntegras (referentes aos concretos S5 e M5\_30%, respectivamente), após 308 dias de ataque por cloretos. As Figuras 5.87 e 5.88 mostram aspectos visuais dos concretos, após a extração das barras de aço, referentes às barras das Figuras 5.85 e 5.86.



Figura 5.86 – Aspecto superficial final de uma barra de aço inserida no concreto S5 exposto à corrosão por 308 dias de ataque.



Figura 5.87 – Aspecto superficial final de uma barra de aço inserida no concreto M5\_30% exposto à corrosão por 308 dias de ataque.



Figura 5.88 – Concreto S5 próximo à armadura de aço exposta à corrosão por 308 dias.



**Figura 5.89 – Concreto M5\_30% próximo à armadura de aço exposta à corrosão por 308 dias.**

Não se observam das figuras anteriores, evidências de corrosão (manchas de produtos de corrosão) nos concretos, nas regiões próximas das barras extraídas das Figuras 5.83 e 5.84.

Em relação a manchas de corrosão na superfície externa dos concretos, evidenciou-se que apenas o concreto R5 apresentou sutis manchas de corrosão.

Destaque cabe aos concretos M5\_20%, M5\_30% e V5, que apresentaram em sua superfície intenso acúmulo de NaCl precipitado.

### **5.3 Análise Global dos Resultados**

Este item contempla uma discussão do desempenho dos concretos estudados no que se refere às propriedades avaliadas na presente dissertação. Percebeu-se, ao longo de todo o experimento, a eficiência das adições minerais, em maior ou menor amplitude, em todas as

propriedades avaliadas. Bem como um melhor desempenho dos concretos com menor relação a/ag.

A seguir, estão discutidos os efeitos da relação a/ag e das adições minerais empregadas, analisando e relacionando, dentre outros, as características dos materiais empregados.

### 5.3.1 Relação a/ag

As análises de variância realizadas indicaram que a variável mais importante é a relação a/ag, seguida pela variável tipo de adição. De fato, os experimentos realizados apresentaram uma tendência geral dos concretos com menores relações a/ag mostrarem melhores desempenhos nas diversas propriedades avaliadas, a saber: maiores resistividades elétricas, potenciais de corrosão menos eletronegativos, maiores resistência de polarização, menores taxas de corrosão e maiores impedâncias.

A influência da relação a/ag foi maior para os concretos de referência, sendo que estes apresentaram os piores resultados em todos os parâmetros avaliados, denotando a superioridade dos sistemas com adições minerais nos resultados avaliados, o que provavelmente se dá em decorrência da densificação da matriz cimentícia e da alteração do sistema de poros, com refinamento e redução da conexão dos poros entre si.

Os resultados de absorção capilar aos 91 dias de idade dos concretos com adições, mostrados na Tabela 4.2 do Capítulo 4, indicaram uma maior absorção para os concretos com relação a/ag 0,40. Isto provavelmente se justifica porque estes concretos, especialmente como refinamento de poros em sistemas com adições minerais, possuem maior sucção capilar do que os concretos com relação a/ag 0,55 (em média). Corroborando, esse argumento, o concreto de referência obteve comportamento inverso, com o concreto R5 apresentando maior absorção capilar que R4. Ressalta-se, de uma forma geral, que o concreto com menor valor médio de

absorção capilar foi o concreto com adição de sílica ativa, seguido pelo concreto referência, cinza volante, metacaulim 30%, metacaulim 10% e metacaulim 20%. Em suma, a relação a/ag é um fator importante mas não suficiente para controlar a corrosão de armaduras de concretos contaminados por cloretos. Sua importância é muito maior em concretos sem adições. Em concretos modificados por adições, sua importância é minimizada.

### 5.3.2 Adição Mineral

De uma forma geral, pode-se afirmar que as adições minerais melhoram significativamente a performance (quanto à corrosão das armaduras) de concretos sujeitos ao ataque por cloretos. Isto se dá, provavelmente, pela alteração da microestrutura do concreto, mediante a densificação da matriz cimentícia, seja por ação pozolânica, seja por efeito filler.

Quanto às resistências mecânicas, o concreto com adição de cinza volante apresentou, em todas as idades, desempenho inferior às demais adições, provavelmente pela sua menor área específica ( $1500 \text{ m}^2/\text{kg}$ ). Este comportamento pode ser atribuído, comparativamente, às características químicas, físicas e mineralógicas da sílica ativa e do metacaulim, já que possuem elevadas áreas específicas paralelamente aos mais altos índices de atividade pozolânica, elevados índices de sílica (principalmente no caso da sílica ativa) e estruturas mais amorfas (conforme difratogramas de raios X, apresentado nos itens 4.3.2 do Capítulo 4), que proporcionam um acréscimo nos pontos de nucleação, acelerando as reações pozolânicas e promovendo a densificação da matriz. Assim, pode-se dizer que o metacaulim e a sílica ativa foram mais eficientes em suas contribuições no tocante ao ganho de resistência à compressão dos concretos.

Apesar dos concretos preparados com adições de cinza volante terem apresentado resistências à compressão axial menores ou da mesma ordem de grandeza dos concretos de referência, eles apresentaram bom desempenho quanto aos demais parâmetros avaliados no

contexto da durabilidade. Este fato confirma que a resistência mecânica não deve ser o único parâmetro a ser analisado quando da escolha ou especificação do concreto a ser empregado em obras de engenharia, principalmente no que tange à durabilidade.

Em relação ao potencial de corrosão, verificou-se que o menor tempo para a despassivação da armadura foi dos concretos de referência, enquanto os demais concretos não apresentaram despassivação. Da mesma forma, as taxas de corrosão eletroquímicas foram significativamente mais altas para os concretos de referência. Evidenciou-se que as adições minerais foram capazes de melhorar o desempenho dos concretos, mesmo para os concretos de relações a/ag 0,55.

Dentre as adições minerais, destaca-se a sílica ativa e o metacaulim que apresentaram em grande parte das propriedades avaliadas, os melhores desempenhos. No que se refere ao teor ótimo de metacaulim, o concreto com 20% obteve bom comportamento quanto à resistência de polarização, resistência à compressão, absorção capilar e índice de vazios, entretanto, destaca-se o concreto com 10% de metacaulim por este apresentar alta resistividade e por ela ser um fator importante que governa a corrosão eletroquímica.

Apesar da literatura (GERRAM, 1983 *apud* NITA, 2006; de ISAIA, 1995 *apud* NITA, 2006; DOTTO *et al.*, 2004; GOUWRIPALAN; MOHAMED,1998) retratar um decréscimo no pH na solução dos poros do concreto com o uso de adições minerais, este efeito parece não ter sido significativo para os concretos estudados.

A seguir, têm-se algumas considerações específicas sobre as adições minerais empregadas na avaliação experimental.

#### **a) Cinza Volante**

Analisando todas as propriedades avaliadas, observou-se que a cinza volante apresentou desempenho inferior em comparação às outras adições minerais. Esse

comportamento pode ser explicado por suas características mineralógicas e físicas. Quanto aos aspectos mineralógico e químico, vê se que da Tabela 4.3 (Capítulo 4) que a relação alumina/sílica na cinza volante é maior, por exemplo, do que em relação à sílica ativa (que é essencialmente sílica). Esse aspecto é negativo para a cinza volante, já que em eventuais reações pozolânicas, o material silicoso produz basicamente C-S-H. Também se vê um certo grau de cristalinidade no difratograma de raios X da cinza volante (em comparação com o difratograma essencialmente amorfo da sílica ativa), conforme Figura 4.3 e 4.4 (item 4.3.2, Capítulo 45). Este resultado sugere maior reatividade da sílica ativa e menor reatividade da cinza volante, apesar do ensaio de atividade pozolânica (Tabela 4.3 – Capítulo 4) ter apresentado resultado inverso, porém próximos.

Quanto aos aspectos físicos (finura), observou-se também que a cinza volante possui menor área específica ( $1500 \text{ kg/m}^2$ ) comparativamente às demais adições (área específica-BET, Tabela 4.3, Capítulo 4), o que compromete sua ação química como pozolana e, principalmente, sua ação física como fíler.

#### **b) Sílica Ativa**

A sílica ativa originou concretos com bom desempenho no que tange a todas as propriedades avaliadas. Contudo, a sílica ativa apresentou sensibilidade quanto à alteração da relação a/ag de 0,40 para 0,55 no potencial de corrosão. Seu bom desempenho global pode ser justificado por seu grau de amorfismo, por elevada finura (área específica igual a  $15990 \text{ m}^2/\text{kg}$ ) e por sua natureza química essencialmente silicosa.

#### **c) Metacaulim**

O difratograma de raios X do metacaulim (Figura 4.5 – Capítulo 4) mostra certa cristalinidade, porém, acredita-se que o bom desempenho apresentado pelos concretos com metacaulim se justifica por sua elevada área específica, da ordem de  $21250 \text{ m}^2/\text{kg}$ , o que

---

certamente contribui para uma eficiente ação fíler, com significativo refinamento de poros e redução da permeabilidade.

Dentre os teores de metacaulim, destaca-se o teor de 10% que obteve elevados valores de resistividade elétrica, conforme comentado anteriormente.

# CAPÍTULO 6

## CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos neste programa experimental, para as condições de ensaio, variáveis e materiais adotados, são estabelecidas as conclusões listadas a seguir:

- Os concretos de referência apresentaram, em geral, os piores resultados nas propriedades avaliadas e nos estudos realizados, deixando evidente o efeito positivo da incorporação de adições minerais em concretos submetidos à corrosão das armaduras induzida por cloretos, sobretudo adições de elevada reatividade como a sílica ativa e o metacaulim;
- A influência da relação a/ag, para os níveis estudados 0,40 e 0,55, é muito mais acentuada para os concretos de referência do que para concretos com adições minerais; essa variável, a partir da análise estatística, resultou no efeito mais significativo nas avaliações de resistividade elétrica e de potenciais de corrosão .
- Em relação à resistividade elétrica, os concretos com adição de sílica ativa mostraram os valores mais elevados, seguidos pelos concretos com adição de 10%, 20%, 30% de metacaulim, cinza volante e, por fim, pelos concretos de referência. O acréscimo na resistividade promovido pela sílica ativa foi da ordem de 40% (em média para as duas relações a/ag) em relação ao concreto de referência;
- Quanto aos potenciais de corrosão, a análise estatística global dos resultados mostrou que o concreto com cinza volante obteve os valores mais positivos de potencial de corrosão, seguido pelos concretos com 10%, 20% e 30% de metacaulim, concretos

com sílica ativa e de referência, respectivamente. Porém, apesar dessas diferenças estatísticas, em termos práticos não se identificou grandes diferenças de desempenho entre os concretos com adições, haja vista que todos eles não permitiram a despassivação das armaduras neles embutidas durante todo o período de ataque. Por outro lado, os concretos de referência mostraram desempenho inferior, sobretudo o concreto de maior relação a/ag (0,55), que apresentou despassivação das armaduras logo no 6º ciclo de imersão, enquanto o de relação a/ag menor (0,40) apresentou despassivação mais tardia (no 27º ciclo);

- Pela análise dos potenciais de corrosão, muito embora os resultados obtidos não permitam estimar a vida útil dos concretos estudados, pode-se notar que as adições promoveram uma maior proteção à película que protege o aço, denotando maior tempo de vida útil para esses concretos comparados a sistemas sem adição mineral;
- Quanto aos resultados de resistência de polarização, os sistemas com 10% e 20% de metacaulim representaram os concretos com valores médios mais elevados de  $R_p$ . Na seqüência e em ordem decrescente de desempenho, apresentam-se os concretos com sílica ativa, concretos com cinza volante e concretos com 30% de metacaulim. Há uma queda significativa na ordem de grandeza de  $R_p$  para os concretos com 30% de metacaulim em relação aos outros dois teores. Notou-se também que para o concreto de referência, alteração da relação a/ag 0,40 para 0,55 implicou numa redução de 87% no valor médio de resistência de polarização.
- Em relação à taxa de corrosão eletroquímica, o concreto de referência e relação a/ag 0,55, comparativamente aos demais concretos, apresentou expressivas taxas de corrosão ao longo dos ciclos agressivos, evidenciado também na técnica de potencial de corrosão pela despassivação da armadura. O concreto de referência e relação a/ag 0,40 apresentou taxas de corrosão significativas a partir do 27º ciclo de ataque. Os

demais concretos com adições mantiveram-se em um mesmo patamar de  $R_p$  e com taxas de corrosão desprezíveis, corroborado também com potenciais de corrosão destes concretos que se mantiveram em faixas de potencial com probabilidade de corrosão menor que 10% e nenhuma ou insignificante dissolução do aço, caracterizando cenário de passividade da armadura.

- No que tange aos resultados de impedância eletroquímica, os concretos com 20% e 30% de metacaulim apresentaram um aumento significativo em todos os parâmetros de impedância (impedância real, impedância imaginária, resistência à transferência de carga), exceto na resistência ôhmica. Não houve diferenças significativas dos dados de interface aço/concreto com o tempo de ataque dos concretos com adições minerais, o mesmo não se podendo dizer dos concretos de referência, cujos valores de impedância reduziram significativamente com o tempo de ataque, sendo isto condizente com o fato dos concretos de referência terem despassivado, enquanto os concretos com adições não perderam a passivação das armaduras.
- Dentre os resultados com metacaulim, obteve-se que o concreto com o teor de 10% apresentou o melhor desempenho em relação à maioria das propriedades avaliadas, seguido pelo concreto com 20% e pelo concreto com 30% de metacaulim.
- Promovendo um balanço geral dentre todas as avaliações realizadas, pode-se concluir que a sílica ativa e o metacaulim no teor de 10% representaram as adições cujos concretos apresentaram os melhores resultados, seguidos pelos concretos com metacaulim nos teores de 20% e 30%, cinza volante e, por fim, com a menor performance, tem-se a situação de referência.

## 6.1 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Com base no estudo realizado, sugere-se os seguintes temas para futuras pesquisas:

- Realizar um estudo detalhado contemplando a interpretação do diagrama de Bode da técnica de impedância eletroquímica, procurando obter correlações com os dados obtidos desta técnica e os dados das técnicas de Rp para concretos com adições minerais;
- Avaliar a microestrutura do concreto e as alterações promovidas na pasta e na composição da película passivadora do aço com o uso das adições minerais;
- Avaliar concretos com adições minerais quanto à corrosão de armaduras, tendo-se como variáveis principais do programa experimental, a classe de resistência e o ataque por carbonatação do concreto.
- Avançar os estudos no campo dos modelos de previsão de vida útil, aplicados aos concretos com adições, tanto para o ataque por cloretos quanto para o ataque por carbonatação do concreto.

## **Anexo A**

---

### *Caracterização Complementar dos Materiais*

**Tabela A-1 - Composição granulométrica do agregado miúdo (areia natural)**

Peneiras		1ª deteminação			1ª deteminação			% retido acumu l. médio	Limites NBR 7211 (ABNT, 1983) Zona 2 (areia fina) % retido acumul.		Limites NBR 7211 (ABNT, 2005) Zona utilizável inferior % retido acumul.
nº	mm	massa retida (g)	% retido indiv.	% retido acumul.	massa retida (g)	% retido indiv.	% retido acumul.				
3/8"	9,5	0,0	0,00	0	0	0	0	0	0	7	0
1/4"	6,3	14,9	2,40	2	6,2	1,1	1	2	0	10	0
4	4,8	8,7	1,40	4	7,2	1,3	2	3	0	15 (A)	0
8	2,4	24,1	3,90	8	23,7	4,1	7	4	0	25 (A)	0
16	1,2	42,2	6,80	15	40,3	7	14	14	0	40	5
30	0,6	90,2	14,50	29	85,3	15	29	29	21	88	15
50	0,3	222,8	35,7	65	210,2	36,6	65	65	60 (A)	100	50
100	0,15	184,1	29,5	94	168,5	29,4	95	94	90 (B)		85
Fundo (g)		37,1	5,9	100	32	5,6	100	100			
Massa total (g)		624,1			573,9			--			
Módulo de Finura		2,14			2,11			--			
Módulo de Finura médio		2,13									

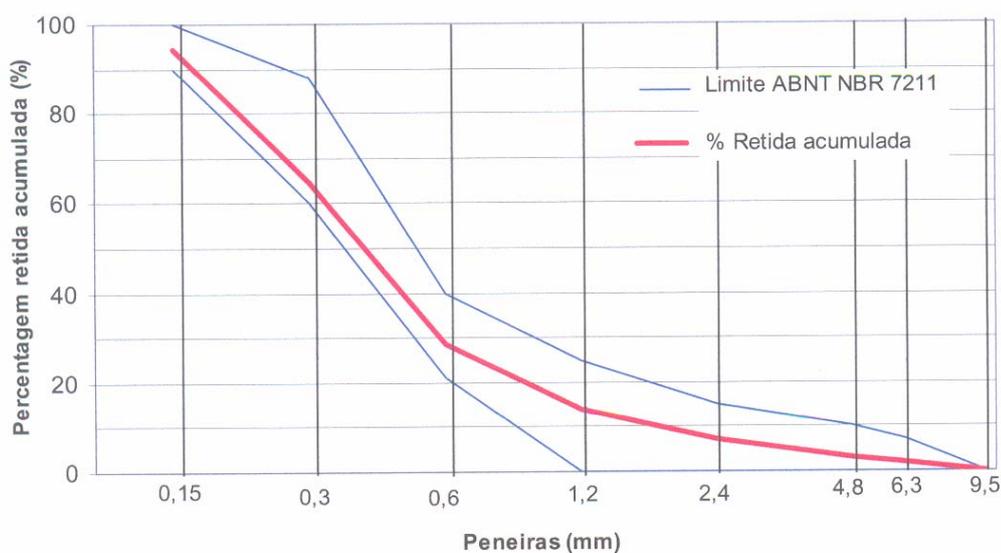
**Figura A.1 – Curva granulométrica do agregado miúdo (areia natural).**

Tabela A-2 - Composição granulométrica do agregado graúdo (brita 19 mm)

Peneiras		1ª deteminação			1ª deteminação			% retido acumul. médio	Limites NBR 7211 (ABNT, 1983) Zona 2 (areia fina) % retido acumul.		Limites NBR 7211 (ABNT, 2005) Zona utilizável inferior % retido acumul.	
nº	mm	massa retida (g)	% retido indiv.	% retido acumul.	massa retida (g)	% retido indiv.	% retido acumu l.					
1,00	25,4	0,0	0,00	0	0	0	0	0	0	0	5	
3/4"	19,0	450,0	4,50	5	0	0	6	5	0	10	15	
3/8"	9,5	8770,0	87,20	92	590	5,7	92	5	80	100	100	
1/4"	6,3	520,0	5,20	97	8890	86,2	97	92	92	100	100	
0	4,8	80,0	0,80	98	530	5,1	98	98	95	100	100	
Fundo (g)		240,0	2,40	100	80	0,8	100	100	100	100		
8	2,4	0	0	100	220	2,1	100	100				
16	1,2	0	0	100	0	0	100	100				
30	0,6	0	0	100	0	0	100	100				
50	0,3	0	0	100	0	0	100	100				
100	0,15	0	0	100	0	0	100	100				
Fundo (g)		0	0	100	0	0	100	100				
Massa total (g)		10060			10310							
Módulo de Finura		6,94			6,95							
Módulo de Finura médio		6,95										

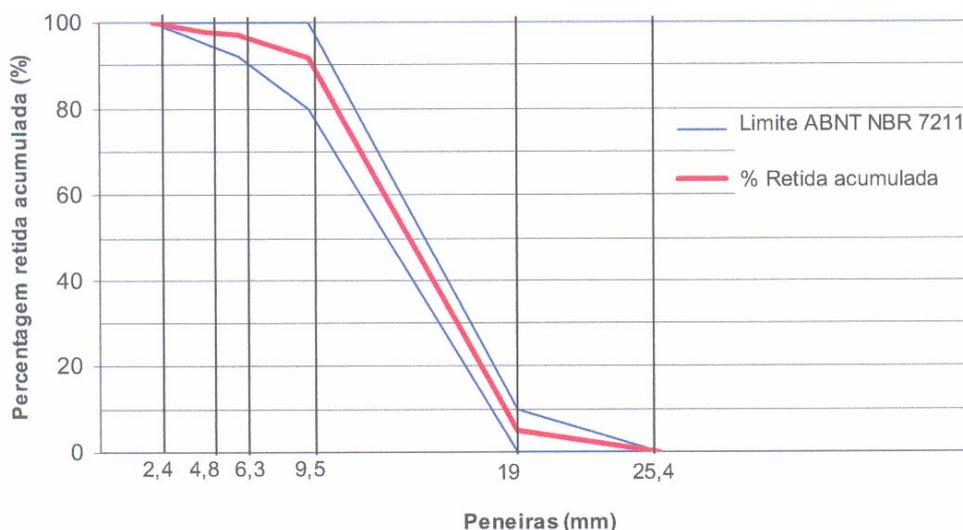
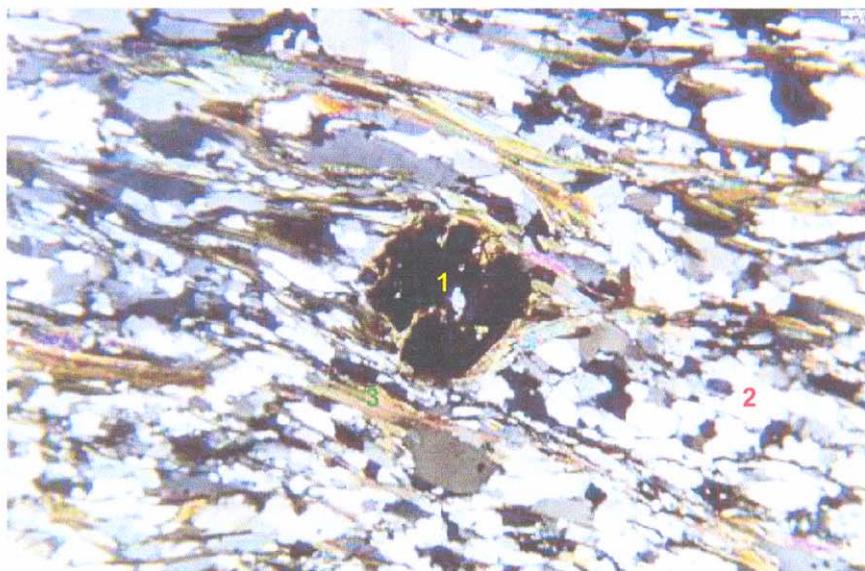


Figura A.2 – Curva granulométrica do agregado graúdo (19 mm).

Tabela A 3- Análise petrográfica\* do agregado graúdo.

EXAME MACROSCÓPICO	
Cor: cinza	Estrutura: foliada
EXAME MICROSCÓPICO	
Composição Mineralógica Estimada	
Quartzo: 45-50%; biotita/muscovita: 30%; granada: 10%; clorita/opacos: 10%.	



Vista geral da lâmina. 1. Granada com sombra de pressão; 2. Quartzo; 3. Micas. Imagem ao microscópio ótico com nicóis cruzados. Aumento de 250x.

#### DESCRIÇÃO

Rocha de granulação fina e textura lepdogranoblástica, caracterizada pela alternância de faixas micáceas e níveis quartzosos de espessuras variáveis. As faixas micáceas são compostas principalmente por palhetas orientadas de muscovita/biotita associadas com opacos e clorita, que definem uma xistosidade levemente ondulada, devido à presença de porfiroblastos granada. Alguns quartzos ocorrem em cristais irregulares e com tendência à poligonização e estirados, a maioria apresenta extinção ondulante bem marcante (ângulo de extinção maior que 25°). A granada apresenta-se em cristais ligeiramente mais desenvolvidos, estão intercaladas com faixas micáceas descontínuas, formadas principalmente por muscovita/biotita. Os porfiroblastos de granada, na maioria, contém inclusões de quartzo e mica recristalizados, alguns formando sombra de pressão. A biotita ocorre em lamelas pardo-escura e esverdeada, e em cristais mais desenvolvidos, associada a muscovita e a clorita. A clorita encontra-se associada com as micas. Notam-se cristais de mineral opaco, associados principalmente às micas e cloritas.

Executado: Ana Livia Z. P. Silveira  
Geóloga do Laboratório de Solos

Responsável: Cláudia H. de Castro  
Chefe do Laboratório de Solos

\*Procedimento FURNAS n. 4.15.10.

## **Anexo B**

---

**Resultados individuais dos ensaios de caracterização dos concretos: resistência à compressão, absorção de água por capilaridade, massa específica e índice de vazios.**

Tabela B1 - Resultados individuais dos ensaios de resistência à compressão.

Concreto	Teor de adição (%)	a/ag	Resistência à compressão (Mpa)		
			7 dias	28 dias	91 dias
R	0	0,40	26,4	37,4	41,1
			27,9	36,6	40,9
			27,2	34,6	40,6
		0,55	22,2	29,1	31,2
			21,8	29,4	30,7
			20,7	29,4	29,7
S	10	0,40	23,4	44,1	48,1
			31,2	45,1	46,1
			31,9	42,8	46,8
		0,55	19,4	36,1	41,9
			25,4	35,6	40,9
			24,9	35,4	41,9
V	25	0,40	27,4	31,1	45,9
			27,2	33,1	45,1
			16,2	33,6	42,4
		0,55	13	22,7	27,2
			14,5	20,9	26,2
			12,5	21,2	27,2
M	10	0,40	37,6	39,1	47,1
			36,1	36,4	46,3
			38,4	39,4	45,9
		0,55	23,4	25,2	34,4
			25,4	24,4	35,6
			24,2	31,6	34,9
	20	0,40	37,6	41,6	48,6
			37,4	43,6	47,6
			31,6	42,6	42,1
		0,55	28,4	34,4	37,1
			26,4	30,9	38,4
			28,9	34,4	40,4
	30	0,40	34,9	39,1	44,6
			35,1	43,6	47,1
			36,1	42,8	46,1
		0,55	26,2	32,6	39,6
			27,2	29,9	38,4
			26,4	32,6	39,6

Tabela B2 - Resultados individuais de absorção de água por imersão (%)

Concreto	Teor de adição (%)	a/ag	Absorção capilar (%)		
			7 dias	28 dias	91 dias
R	0	0,40	6,80	6,09	5,16
			6,80	6,42	5,43
			6,87	6,37	5,22
			6,27	5,91	5,57
		0,55	6,30	5,98	5,41
			6,48	6,07	5,38

S	10	0,40	5,73	5,66	4,30	
			5,70	5,79	4,24	
			5,77	5,70	4,39	
		0,55	N.D*	N.D*	4,09	
			N.D*	N.D*	4,24	
			N.D*	N.D*	4,10	
V	25	0,40	7,03	3,52	6,08	
			6,34	3,57	5,92	
			5,95	3,79	5,43	
		0,55	N.D*	4,86	4,84	
			N.D*	5,15	5,06	
			N.D*	4,78	5,70	
	M	10	0,40	6,94	3,93	6,61
				6,45	3,77	6,49
				6,75	3,71	6,87
			0,55	N.D*	5,10	5,40
				N.D*	4,98	5,61
				N.D*	4,03	5,99
20		0,40	7,09	4,72	7,74	
			6,76	4,78	7,28	
			6,09	4,46	6,92	
		0,55	N.D*	4,90	6,02	
			N.D*	4,95	5,98	
			N.D*	5,09	6,11	
30		0,40	5,74	3,68	6,23	
			5,04	3,56	6,31	
			5,01	3,26	5,60	
		0,55	N.D*	4,67	5,95	
			N.D*	4,73	5,84	
			N.D*	4,52	5,21	

N.D\* – NÃO DETERMINADO

Tabela B3 - Resultados individuais de massa específica (kg/dm<sup>3</sup>)

Concreto	Teor de adição (%)	a/ag	Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )		
			7 dias	28 dias	91 dias
R	0	0,40	2,68	2,64	2,63
			2,68	2,64	2,63
		0,55	2,69	2,65	2,61
			2,65	2,61	2,62

			2,65	2,65	2,61
			2,65	2,62	2,61
			2,59	2,57	2,54
			2,6	2,58	2,54
		0,40	2,6	2,58	2,55
			N.D*	N.D*	2,56
			N.D*	N.D*	2,55
S	10	0,55	N.D*	N.D*	2,54
			2,62	2,52	2,64
			2,61	2,52	2,62
		0,40	2,61	2,52	2,61
			N.D*	2,60	2,63
			N.D*	2,60	2,63
V	25	0,55	N.D*	2,60	2,65
			2,68	2,55	2,68
			2,68	2,56	2,68
		0,40	2,65	2,56	2,65
			N.D*	2,62	2,66
			N.D*	2,63	2,66
	10	0,55	N.D*	2,63	2,67
			2,68	2,58	2,69
			2,66	2,57	2,69
		0,40	2,75	2,57	2,68
			N.D*	2,60	2,66
			N.D*	2,60	2,65
	20	0,55	N.D*	2,61	2,65
			2,61	2,52	2,65
			2,60	2,51	2,62
		0,40	2,59	2,52	2,62
			N.D*	2,57	2,64
			N.D*	2,58	2,64
M	30	0,55	N.D*	2,58	2,61

N.D\* – NÃO DETERMINADO

Tabela B4 - Resultados individuais de índice de vazios (%)

Concreto	Teor de adição (%)	a/ag	Índice de vazios (%)		
			7 dias	28 dias	91 dias
R	0		15,43	13,86	11,94
			15,43	14,49	12,48
		0,40	15,62	14,41	12,00
		0,55	14,25	13,38	12,74

			14,32	13,70	12,38
			14,65	13,70	12,33
S	10	0,40	12,91	12,69	9,84
			12,90	12,99	9,73
			13,05	12,88	10,06
		0,55	N.D*	N.D*	9,47
			N.D*	N.D*	9,76
			N.D*	N.D*	9,44
V	25	0,40	15,57	8,15	13,81
			14,20	8,24	13,43
			13,44	8,72	12,42
		0,55	N.D*	11,22	11,31
			N.D*	11,80	11,72
			N.D*	11,05	13,13
M	10	0,40	15,70	9,12	15,04
			14,74	8,79	14,82
			15,19	8,69	15,38
		0,55	N.D*	11,78	12,56
			N.D*	11,57	12,96
			N.D*	11,67	13,80
	20	0,40	15,95	10,84	17,26
			15,24	10,94	16,37
			14,33	10,29	15,62
		0,55	N.D*	11,31	13,79
			N.D*	11,41	13,70
			N.D*	11,71	13,93
	30	0,40	13,06	8,48	14,17
			11,58	8,20	14,21
			11,47	7,59	12,81
		0,55	N.D*	10,69	13,56
			N.D*	10,86	13,35
			N.D*	10,44	11,96

N.D\* – NÃO DETERMINADO

## **Anexo C**

---

**Resultados individuais dos ensaios de resistividade elétrica, potenciais de corrosão, resistência de polarização.**

Tabela C1 - Resultados médios dos ensaios de resistividade elétrica dos concretos utilizados.

ciclos	Tipo de concreto e relação a/ag											
	R		S		V		M 10%		M 20%		M 30%	
	0,40	0,55	0,40	0,55	0,40	0,55	0,40	0,55	0,40	0,55	0,40	0,55
1a	N.D*	N.D*	N.D*	N.D*	14,26	15,80	19,90	12,30	23,50	9,90	17,00	19,60
1	N.D*	N.D*	N.D*	N.D*	22,33	8,90	21,00	12,00	29,67	12,00	22,00	9,20
2	30,00	25,00	35,00	20,00	19,33	7,22	19,75	9,57	19,67	8,87	16,33	6,36
3	29,70	4,00	35,00	20,00	20,66	7,30	18,67	10,13	13,00	9,35	13,00	6,30
4	14,00	6,00	39,00	15,10	15,00	7,53	17,33	11,00	14,33	9,27	11,00	6,10
5	11,33	14,00	38,00	13,00	16,33	10,62	16,50	11,38	14,67	9,95	11,33	5,67
6	10,00	6,16	26,33	12,50	15,00	6,50	15,50	12,00	12,00	9,00	10,50	6,00
7	9,23	11,25	26,50	9,60	15,00	4,65	8,27	9,47	15,00	6,06	6,45	3,97
8	10,33	6,90	24,33	16,25	4,00	7,45	15,00	10,50	7,33	8,15	4,00	4,50
9	13,00	6,60	22,00	11,66	20,40	5,75	21,50	9,80	15,67	7,00	11,50	4,95
10	12,00	7,00	18,00	7,13	20,00	5,75	20,00	9,80	15,00	7,00	11,00	5,00
11	7,00	6,64	11,66	12,00	13,50	7,63	19,00	9,90	16,50	8,20	11,00	5,30
12	5,00	3,50	9,20	7,13	16,50	7,00	19,50	9,47	17,50	7,70	14,37	4,65
13	11,00	5,70	22,66	9,60	16,00	9,05	20,00	11,00	20,00	9,20	11,50	5,40
14	13,00	8,00	24,00	11,00	18,50	6,63	19,67	12,00	20,67	8,90	20,50	5,60
15	16,00	7,15	19,50	9,90	15,00	8,90	24,50	11,50	20,00	9,90	13,00	4,95
16	13,50	6,70	24,50	9,70	18,00	7,45	23,67	10,26	22,00	8,60	6,30	5,25
17	12,50	8,00	27,50	13,00	19,50	9,10	23,00	11,50	19,00	11,50	14,50	6,10
18	13,50	7,45	28,00	10,50	16,50	8,90	23,50	13,50	18,50	8,55	13,50	5,50
19	12,00	7,80	28,00	10,40	16,00	8,30	22,00	10,00	18,00	8,00	13,00	4,27
20	14,00	7,30	30,00	9,60	20,00	6,50	22,50	10,13	19,00	8,13	14,50	4,95
21	15,00	9,60	29,00	13,50	18,50	8,55	20,50	11,50	24,00	12,00	13,50	6,25
22	15,00	7,80	26,50	12,50	18,50	6,06	21,33	10,50	21,00	8,95	12,00	7,80
23	15,00	8,15	19,00	13,50	24,00	12,80	23,33	10,50	18,50	9,35	15,00	7,85
24	14,50	8,30	26,00	8,90	24,00	10,50	20,00	12,50	18,00	7,45	15,00	6,25
25	17,00	6,55	31,00	13,00	34,00	8,45	19,00	10,13	17,50	8,60	11,00	6,40
26	15,00	5,50	32,00	27,50	19,50	2,75	19,00	10,20	20,50	7,15	11,50	6,30
27	15,50	5,40	28,50	10,50	19,00	7,00	18,00	10,00	20,00	6,70	10,00	4,27
28	7,50	7,13	25,50	11,48	19,00	6,00	17,00	10,00	20,00	8,40	12,00	4,90
29	16,50	8,45	28,83	19,20	15,00	6,00	17,50	8,45	20,00	6,85	11,50	4,00
30	16,50	6,50	20,00	8,55	20,50	7,95	20,00	9,00	20,00	6,00	11,00	4,50
31	13,50	7,08	19,00	7,26	21,00	7,00	20,00	10,00	19,00	6,80	11,00	4,00
32	12,00	19,50	18,00	9,90	17,00	8,30	22,00	20,50	21,00	6,55	11,50	4,55
33	12,00	19,00	18,00	13,00	15,00	7,23	20,00	11,50	18,50	7,30	27,50	4,70
34	18,00	10,00	18,00	8,50	15,00	8,90	24,50	8,35	17,50	8,00	10,33	5,10
35	18,00	8,25	24,50	12,00	25,50	8,90	20,50	25,18	22,10	15,47	20,45	4,50
36	18,50	7,15	24,50	10,40	5,00	27,30	14,00	25,00	10,18	20,83	3,05	25,23
37	17,50	11,00	19,50	17,50	12,33	15,00	26,67	26,00	18,50	21,00	10,50	23,08
38	15,00	7,15	25,00	10,27	16,00	15,00	17,50	25,50	16,50	15,00	10,50	23,00
39	15,00	6,85	21,50	9,20	16,50	7,15	21,00	9,20	17,50	4,80	10,50	23,00
40	14,67	6,60	21,00	9,47	17,00	7,15	20,00	9,20	17,00	4,80	12,00	4,27
41	11,98	6,88	22,75	6,42	20,00	8,30	22,00	9,90	18,00	8,00	13,00	4,80
42	12,00	7,00	23,00	6,00	15,00	8,00	17,50	9,90	19,00	8,00	11,50	6,85
43	12,00	7,00	23,00	9,00	18,00	6,40	23,00	10,00	18,00	7,15	18,00	4,50
44	12,00	7,30	21,00	8,90	20,00	6,40	26,00	8,00	20,00	6,40	11,50	4,80

N.D\* - Não determinada.

**Tabela C2 - Resultados individuais do ensaio de potencial de corrosão (mV) para os concretos de referência.**

ciclos	R4				média	R5				média**
	1	2	3	4		1	2	3	4	
1a	N.D*	N.D*	N.D*	N.D*	-	N.D*	N.D*	N.D*	N.D*	-
1	N.D*	N.D*	N.D*	N.D*	-	N.D*	N.D*	N.D*	N.D*	-
2	-160	-70	-79	-167	-119	-56	-97	-154	9	-48
3	-118	-116	-131	-122	-122	3	-59	-103	92	12
4	-85	-98	-112	-125	-105	-319	-66	-92	-226	-204
5	-89	-119	-104	-99	-103	-457	-126	-59	-342	-308
6	-70	-84	-90	-139	-96	-473	-243	-65	-388	-368
7	-61	-49	-150	-80	-85	-316	-432	-86	-463	-403
8	-31	-70	-82	-96	-70	-475	-330	-30	-417	-407
9	-105	-89	-184	-110	-122	-395	-460	-73	-338	-398
10	-25	-79	-125	-102	-83	-433	-429	-97	-347	-403
11	55	-69	-65	-93	-43	-471	-398	-122	-356	-408
12	-264	-105	-129	-132	-158	-530	-391	-198	-478	-466
13	-61	-64	-54	-104	-71	-469	-331	-57	-365	-388
14	-295	-80	-104	-114	-148	-558	-447	-160	-520	-508
15	-308	-185	-98	-106	-174	-556	-490	-147	-545	-530
16	-306	-171	-103	-116	-174	-540	-476	-197	-496	-504
17	-322	-188	-87	-108	-176	-532	-505	-184	-519	-519
18	-346	-177	-109	-124	-189	-554	-532	-206	-559	-548
19	-332	-143	-143	-131	-187	-542	-523	-193	-552	-539
20	-340	-165	-116	-115	-184	-537	-491	-193	-524	-517
21	-350	-218	-113	-123	-201	-536	-506	-174	-537	-527
22	-338	-298	-119	-131	-222	-552	-508	-185	-545	-535
23	-311	-356	-115	-120	-225	-551	-512	-361	-541	-535
24	-289	-393	-124	-110	-229	-534	-502	-223	-541	-526
25	-297	-413	-120	-109	-235	-561	-496	-196	-543	-533
26	-297	-439	-322	-131	-297	-559	-508	-202	-558	-542
27	-252	-413	-368	-130	-291	-534	-514	-200	-534	-527
28	-160	-389	-267	-357	-294	-502	-478	-179	-413	-464
29	-235	-411	-250	-349	-311	-528	-505	-204	-528	-521
30	-253	-406	-171	-311	-285	-545	-506	-276	-549	-533
31	-254	-391	-163	-361	-292	-541	-494	-274	-256	-431
32	-225	-346	-158	-309	-259	-530	-527	-150	-195	-417
33	-133	-155	-82	-148	-130	-270	-256	-131	-185	-237
34	-105	-100	-115	-109	-107	-208	-190	-155	-189	-196
35	-309	-274	-171	-282	-259	-551	-498	-373	-545	-532
36	-285	-244	-377	-289	-299	-562	-506	-487	-570	-546
37	-242	-235	-377	-288	-286	-515	-482	-496	-541	-513
38	-220	-228	-299	-268	-254	-538	-495	-523	-544	-526
39	-253	-226	-380	-275	-284	-542	-496	-528	-544	-527
40	-246	-224	-394	-275	-285	-545	-513	-504	-548	-535
41	-97	-171	-349	-275	-223	-403	-458	-281	-402	-421
42	-110	-188	-350	-200	-212	-453	-495	-200	-453	-467
43	-187	-200	-394	-250	-258	-401	-401	-235	-356	-386
44	-224	-188	-363	-196	-243	-387	-362	-301	-379	-376

N.D\* - Não determinada.

\*\* corresponde a média da determinação de número 1,2 e 4.

**Tabela C3 - Resultados individuais do ensaio de potencial de corrosão (mV) para os concretos com sílica ativa.**

ciclos	S4				média	S5				média
	1	2	3	4		1	2	3	4	
1a	N.D*	N.D*	N.D*	N.D*	-	N.D*	N.D*	N.D*	N.D*	-
1	N.D*	N.D*	N.D*	N.D*	-	N.D*	N.D*	N.D*	N.D*	-
2	138	-82	-123	-75	-36	-27	-126	-14	-35	-51
3	65	-108	-127	-123	-73	-89	-84	-52	-13	-60
4	71	-112	-117	-93	-63	-67	-98	-140	-152	-114
5	87	-113	-145	-187	-89	-289	-194	-20	-141	-161
6	-1	-106	-123	-119	-87	-93	-77	-73	-125	-92
7	-19	-82	-124	-108	-83	-113	-116	-151	-50	-107
8	33	-246	-100	-109	-105	-106	-49	-86	-145	-96
9	9	-114	-127	-95	-81	-143	-250	-106	-99	-149
10	23	-94	-118	-82	-68	-128	-249	-95	-124	-149
11	37	-74	-110	-70	-54	-112	-247	-83	-150	-148
12	-150	-109	-126	-227	-153	-164	-238	-226	-307	-234
13	61	-63	-87	-60	-37	-88	-208	-100	-175	-143
14	-98	-100	-132	-104	-108	-153	-218	-179	-298	-212
15	-102	-102	-96	-107	-102	-290	-332	-173	-284	-270
16	-105	-103	-116	-124	-112	-232	-205	-142	-215	-198
17	-131	-100	-130	-126	-122	-238	-188	-153	-275	-214
18	-130	-109	-123	-122	-121	-189	-214	-160	-288	-213
19	-115	-102	-126	-117	-115	-164	-220	-167	-295	-212
20	-177	-102	-121	-121	-130	-199	-220	-166	-301	-222
21	-197	-107	-125	-123	-138	-142	-248	-169	-305	-216
22	-161	-105	-125	-124	-129	-131	-247	-176	-309	-216
23	-145	-98	-124	-118	-121	-135	-247	-174	-309	-216
24	-127	-99	-119	-116	-115	-129	-253	-174	-317	-218
25	-146	-104	-123	-118	-123	-123	-250	-177	-331	-220
26	-123	-94	-125	-124	-116	-163	-256	-174	-336	-232
27	-194	-100	-119	-116	-132	-348	-263	-169	-320	-275
28	-163	-98	-117	-94	-118	-276	-252	-127	-275	-233
29	-136	-120	-105	-101	-115	-366	-272	-144	-308	-272
30	-146	-80	-114	-117	-114	-349	-287	-166	-317	-280
31	-118	-92	-106	-111	-107	-359	-285	-174	-342	-290
32	-118	-94	-113	-111	-109	-250	-309	-162	-235	-239
33	-51	-43	-52	-51	-49	-143	-156	-70	-151	-130
34	-39	-34	-41	-42	-39	-98	-125	-62	-131	-104
35	-88	-77	-97	-91	-88	-320	-317	-120	-371	-282
36	-105	-94	-112	-119	-108	-249	-342	-176	-373	-285
37	-130	-112	-97	-103	-110	-267	-348	-161	-347	-281
38	-425	-81	-96	-85	-172	-269	-351	-169	-358	-287
39	-303	-78	-93	-92	-141	-296	-334	-178	-356	-291
40	-42	-82	-84	-87	-74	-231	-314	-174	-313	-258
41	178	-27	-37	-11	26	-119	57	-53	-45	-40
42	150	-35	-50	-35	8	-125	-135	-100	-100	-115
43	125	-33	-58	-26	2	-100	-150	-35	-125	-103
44	108	-34	-66	-49	-10	-188	-178	2	-144	-127

N.D\* - Não determinada.

**Tabela C4 - Resultados individuais do ensaio de potencial de corrosão (mV) para os concretos com cinza volante.**

ciclos	V4				média	V5				média
	1	2	3	4		1	2	3	4	
1a	83	-63	-48	-18	-12	-92	-63	-57	-78	-73
1	20	15	-42	-61	-17	-137	-86	-83	-144	-112
2	-3	82	-58	-93	-18	-113	-129	-97	-114	-113
3	-8	112	-38	-46	5	-93	-58	-104	-60	-79
4	-8	45	-16	-37	-4	-105	-128	-76	-105	-103
5	10	2	-13	-31	-8	-66	-137	-79	-110	-98
6	-29	-88	-64	-75	-64	-66	-135	-71	-85	-89
7	5	57	-18	-27	4	-66	-133	-63	-60	-81
8	11	-1	-31	-52	-18	-77	-117	-132	-58	-96
9	-35	-75	-62	-73	-61	-69	-51	-43	-69	-58
10	-25	-59	-57	-66	-52	-128	-135	-158	-96	-129
11	-15	-43	-52	-60	-43	-130	-102	-139	-111	-120
12	-27	-78	-67	-71	-61	-153	-98	-109	-72	-108
13	-26	-70	-62	-63	-55	-93	-109	-107	-95	-101
14	-28	-73	-64	-67	-58	-120	-130	-155	-104	-127
15	-35	-77	-63	-98	-68	-127	-113	-112	-93	-111
16	-13	-20	-65	-58	-39	-134	-112	-106	-100	-113
17	-31	-62	-63	-65	-55	-117	-119	-112	-95	-111
18	-39	-70	-71	-70	-62	-141	-107	-123	-120	-123
19	-8	-59	-63	-59	-47	-137	-80	-109	-77	-101
20	-66	-40	-52	-59	-54	-127	-103	-128	-98	-114
21	-72	-62	-61	-44	-60	-149	-85	-178	-89	-125
22	-16	-41	-59	-59	-44	-170	-125	-228	-108	-158
23	-15	22	-48	-43	-21	-129	-86	-111	-81	-102
24	-25	-23	-57	-71	-44	-111	-62	-71	-61	-76
25	-36	-68	-67	-98	-67	-90	-76	-80	-85	-83
26	-13	-35	-50	-65	-41	-138	-90	-89	-108	-106
27	-30	-52	-75	-30	-47	-145	-87	-82	-91	-101
28	12	-65	-15	-12	-20	-122	-89	-83	-85	-95
29	15	-23	-41	-27	-19	-115	-81	-169	-79	-111
30	-6	-32	-46	-41	-31	-106	-73	-255	-74	-127
31	-27	-41	-50	-54	-43	-109	-64	-158	-68	-100
32	-30	-65	-53	-58	-51	-112	-56	-61	-62	-73
33	-28	-53	-60	-61	-50	-110	-101	-212	-57	-120
34	-6	-38	-59	-50	-38	-108	-147	-55	-53	-90
35	44	140	-18	36	51	-150	-92	-52	-44	-84
36	-48	153	14	14	33	-192	-37	-48	-35	-78
37	60	167	-72	34	48	-102	-55	-55	-217	-107
38	60	178	52	19	77	-102	-39	-39	-149	-82
39	47	150	8	7	53	-150	-50	-65	-120	-96
40	10	100	-50	-20	10	-102	-24	-23	-81	-57
41	-25	-66	-76	-69	-59	-93	-36	-36	-32	-49
42	48	112	28	-11	45	-65	-24	-26	-14	-32
43	70	137	3	-11	49	-92	-43	-256	-27	-105
44	-40	126	154	35	69	-36	-36	-5	32	-11

**Tabela C5 - Resultados individuais do ensaio de potencial de corrosão (mV) para os concretos com metacaulim no teor de 10%.**

ciclos	M4 10%				média	M5 10%				média**
	1	2	3	4		1	2	3	4	
1a	-31	-27	-26	-52	-34	-74	-27	-29	-52	-43
1	-81	105	-64	-87	-32	-96	-79	-74	-68	-83
2	-91	172	-82	-92	-24	-106	-105	-110	-115	-107
3	-46	237	-71	-83	9	-39	-95	-126	-59	-87
4	-78	242	-69	-68	7	-86	-117	-154	40	-119
5	-58	162	-66	-80	-11	-81	-119	-124	100	-108
6	-110	-81	-93	-113	-99	-81	-99	-120	104	-100
7	-65	158	-55	-67	-7	-81	-79	-117	109	-92
8	-72	152	-64	-82	-16	-90	-235	-135	76	-154
9	-91	-23	-89	-103	-76	-66	-38	-113	118	-72
10	-75	-25	-90	-110	-75	-127	-95	-138	-71	-120
11	-86	-17	-82	-95	-70	-114	-128	-138	-99	-126
12	-91	-78	-100	-111	-95	-88	-84	-105	-38	-92
13	-96	-67	-88	-99	-87	-96	-74	-93	-47	-87
14	-92	-57	-106	-102	-89	-113	-193	-113	-87	-140
15	-97	-69	-102	-112	-95	-103	-90	-103	-73	-99
16	-71	29	-80	-100	-56	-102	-197	-109	-79	-136
17	-95	-56	-87	-98	-84	-329	-93	-116	-154	-179
18	-102	-74	-88	-107	-93	-157	-82	-127	-94	-122
19	-95	-66	-85	-95	-85	-97	-76	-89	-59	-87
20	-99	-95	-91	-103	-97	-103	-89	-101	-87	-97
21	-88	-49	-82	-92	-78	-99	-128	-110	-81	-112
22	-97	0	-85	-90	-68	-94	-93	-95	-95	-94
23	-60	99	-54	-75	-23	-114	-89	-91	-91	-98
24	-78	17	-67	-90	-55	-81	-77	-79	-65	-79
25	-96	-64	-81	-105	-86	-87	-69	-73	-5	-76
26	-89	-38	-89	-120	-84	-90	-83	-84	-61	-85
27	-75	-39	-75	-105	-74	-98	-86	-89	-74	-91
28	-73	-45	-50	-75	-61	-90	-83	-50	-55	-74
29	-72	-27	-79	-83	-65	-95	-134	-66	-53	-98
30	-67	-2	-85	-75	-57	-100	-184	-82	-51	-122
31	-61	23	-91	-66	-49	-92	-136	-82	-63	-103
32	-56	-37	-73	-85	-63	-84	-87	-82	-75	-85
33	-83	-77	-80	-93	-83	-88	-76	-73	-37	-79
34	-39	-65	-71	-91	-66	-264	-81	-79	-39	-141
35	-23	92	-42	262	72	-77	-74	-75	-46	-76
36	-7	248	-13	-20	52	-58	-61	-49	-70	-56
37	18	182	-14	-27	40	-85	-70	-67	-42	-74
38	20	84	-15	-3	21	-75	-95	-95	-20	-88
39	-5	212	-26	-35	37	-52	-25	-25	56	-34
40	-50	65	-56	-67	-27	-76	-97	-33	151	-69
41	-89	-68	-82	-92	-83	-118	-81	-69	107	-89
42	-27	8	-28	-15	-16	-82	-70	-74	-15	-75
43	-27	26	-52	-59	-28	-70	-59	-68	96	-66
44	-67	165	-46	-40	3	-67	-60	-38	122	-55

\*\* corresponde a média da determinação de número 1,2 e 3.

**Tabela C6 - Resultados individuais do ensaio de potencial de corrosão (mV) para os concretos com metacaulim no teor de 30%.**

ciclos	M4 30%				média	M5 30%				média
	1	2	3	4		1	2	3	4	
1a	81	180	61	148	118	-41	-2	60	-33	-25
1	-64	151	-54	-66	-8	-49	-230	81	-64	-114
2	-45	157	-67	-46	0	-44	-110	27	-64	-73
3	-55	185	-50	-73	2	-67	-68	124	-60	-65
4	-29	128	-39	-53	2	-148	-266	65	-181	-198
5	-48	140	-126	-36	-18	-59	-60	122	-43	-54
6	-70	-56	-76	-79	-70	-51	-73	118	-18	-48
7	-54	172	-41	-36	11	-44	-87	115	7	-41
8	-55	121	-63	-47	-11	-46	-119	111	-38	-68
9	-69	-28	-74	-79	-62	-54	-109	125	-35	-66
10	-76	3	-70	-77	-55	-72	-83	-114	-76	-77
11	-83	34	-66	-76	-48	-69	-79	-81	-81	-77
12	-126	-46	-96	-77	-86	-65	-78	-167	-57	-67
13	-126	-53	-289	-112	-145	-64	-67	-93	-64	-65
14	-51	-11	-156	-86	-76	-88	-84	-259	-104	-92
15	-81	-14	31	-107	-42	-70	-84	-270	-82	-79
16	-130	-13	-93	-74	-78	-131	-100	-272	-86	-106
17	-87	-62	-110	-140	-100	-81	-175	-360	-205	-154
18	-96	-62	-112	-106	-94	-79	-80	-374	-168	-109
19	-86	-48	-80	-42	-64	-81	-163	-387	-88	-111
20	-86	-148	-69	-90	-98	-79	-125	-373	-83	-95
21	-83	-114	-71	-76	-86	-93	-79	-369	-184	-119
22	-78	-103	-75	-61	-79	-207	-80	-354	-79	-122
23	-73	-149	-70	-57	-87	-67	-84	-341	-95	-82
24	-75	-169	-69	-68	-95	-69	-63	-331	-72	-68
25	-77	-189	-68	-79	-103	-240	-78	-322	-145	-154
26	-71	-192	-77	-80	-105	-86	-179	-309	-69	-111
27	-75	-183	-56	-65	-95	-46	-84	-321	-83	-71
28	-65	-205	-85	-54	-102	-68	-206	-335	-87	-120
29	-64	-221	-68	-85	-109	-65	-234	-299	-95	-131
30	-62	-199	-82	-85	-107	-55	-65	-351	-100	-73
31	-60	-177	-96	-84	-104	-52	-35	-325	-99	-62
32	-65	-204	-69	-71	-103	-56	-74	-317	-96	-76
33	-68	-205	-102	-50	-106	-194	-64	-311	-103	-120
34	-55	-90	-127	-29	-75	-240	-74	-262	-72	-129
35	-69	26	-152	-9	-51	-206	-98	-307	-93	-132
36	-294	131	-53	-11	-57	-104	-91	-316	-94	-96
37	-72	-22	-153	-168	-104	-218	-167	-304	-103	-163
38	-50	154	-173	-4	-18	-150	-125	-320	-92	-122
39	-43	18	-49	-3	-19	-180	-65	-335	-106	-117
40	-103	50	-55	-23	-33	-81	36	-335	-116	-54
41	-104	-142	-77	-15	-85	-325	-63	-231	-94	-161
42	-160	78	-36	-7	-31	-53	-185	-369	-43	-94
43	-165	64	-28	6	-31	-48	-71	-318	-67	-62
44	-92	77	-16	5	-6	-38	-47	-240	-34	-40

\*\* corresponde a média da determinação de número 1,2 e 4.

**Tabela C7 - Resultados individuais do ensaio de Rp para os concretos de referência.**

ciclos	R4				média	R5				média**
	1	2	3	4		1	2	3	4	
1a	N.D*	N.D*	N.D*	N.D*	-	N.D*	N.D*	N.D*	N.D*	-
1	N.D*	N.D*	N.D*	N.D*	-	N.D*	N.D*	N.D*	N.D*	-
2	1481	1090	1618	1503	1423	233	1393	1099	114	580
3	1959	1506	490	734	1172	125	1618	439	165	636
4	863	526	2811	419	1155	10	2454	1956	4	823
5	914	869	1316	663	940	3	596	2156	4	201
6	248	945	723	2607	1131	1	447	494	3	151
7	483	683	1585	1022	944	1	20	1173	3	8
8	990	1022	681	630	831	1	150	501	4	52
9	647	1937	525	1136	1061	2	2	445	2	2
10	413	1523	1334	950	1055	2	11	416	2	5
11	179	1109	2144	765	1049	1	20	387	3	8
12	129	1161	728	727	686	2	60	1335	2	21
13	189	1943	1185	786	1026	1	58	818	2	21
14	14	1459	46	928	612	1	31	59	3	12
15	7	873	1018	1305	801	2	25	1117	2	10
16	13	1232	614	67	481	2	29	299	2	11
17	13	752	65	54	221	2	17	555	1	7
18	5	856	64	50	244	2	14	562	1	5
19	4	914	839	814	643	3	15	642	1	6
20	3	840	1516	811	793	2	17	670	0,43	6
21	3	846	2174	575	900	3	19	490	0,23	7
22	3	515	1852	793	791	6	20	829	0,28	9
23	3	309	2000	993	826	2	17	154	1	7
24	4	147	278	1150	395	2	17	869	1	7
25	4	125	569	1210	477	1	16	717	1	6
26	4	61	206	1100	343	1	17	519	2	7
27	3	46	124	1070	311	1	13	689	2	5
28	4	28	84	39	39	2	13	603	2	6
29	4	17	135	40	49	0,12	16	547	2	6
30	4	15	187	47	63	1	17	579	1	7
31	3	8	288	43	86	1	16	386	1	6
32	3	16	223	43	71	2	13	148	1	5
33	3	29	279	58	92	1	15	130	1	6
34	3	35	307	66	103	1	16	121	1	6
35	3	41	335	73	113	1	16	112	1	6
36	3	43	60	106	53	1	17	16	1	6
37	3	50	38	62	38	1	15	52	1	6
38	4	52	39	58	38	1	17	47	1	7
39	4	59	16	70	37	1	16	31	1	6
40	3	67	12	68	37	1	15	29	1	6
41	4	54	10	34	25	1	18	32	1	7
42	3	49	10	68	32	1	21	20	1	8
43	3	47	10	85	36	2	22	14	1	8
44	2	45	9	103	40	2	23	8	1	9

N.D\* - Não determinada.

\*\* corresponde a média da determinação de número 1,2 e 4.

**Tabela C8 - Resultados individuais do ensaio de Rp para os concretos com sílica ativa.**

ciclos	S4				média	S5				média
	1	2	3	4		1	2	3	4	
1a	N.D*	N.D*	N.D*	N.D*	-	N.D*	N.D*	N.D*	N.D*	-
1	N.D*	N.D*	N.D*	N.D*	-	N.D*	N.D*	N.D*	N.D*	-
2	101	2114	405	181	700	767	550	1683	33	608
3	56	1150	377	371	488	546	880	1231	23	670
4	26	671	182	289	292	907	476	1966	16	841
5	24	883	309	181	349	334	401	1475	23	558
6	40	582	649	253	381	689	492	681	16	469
7	30	264	403	523	305	539	604	793	26	490
8	21	565	236	339	290	664	653	649	12	494
9	21	355	291	810	369	508	594	585	19	426
10	19	300	221	659	300	492	881	681	14	517
11	18	245	150	508	230	476	1168	777	9	608
12	26	270	182	365	211	836	665	640	14	539
13	20	695	320	233	317	774	808	417	11	503
14	65	2408	493	332	825	905	540	657	13	529
15	28	997	1035	943	751	17	361	2234	10	655
16	38	1410	453	557	615	700	601	1342	15	665
17	30	1015	539	490	518	564	732	1124	17	609
18	30	977	264	517	447	640	738	1329	17	681
19	30	1294	525	572	605	871	880	1449	15	804
20	31	1208	427	540	551	628	829	857	16	583
21	31	2550	514	464	890	811	640	840	14	576
22	36	1844	467	863	802	888	783	929	15	654
23	38	1655	464	791	737	854	540	905	15	579
24	36	1392	515	682	656	735	501	763	14	504
25	16	191	721	2660	897	417	452	860	13	435
26	34	179	674	1380	567	758	519	1860	13	788
27	30	182	894	1970	769	291	537	2090	13	733
28	77	326	769	1820	748	598	826	686	14	531
29	187	172	381	2130	718	245	461	1144	13	466
30	413	925	1420	1530	1072	383	483	1183	15	516
31	701	988	1470	1290	1112	344	343	2000	12	675
32	1360	362	753	1610	1021	343	266	1268	13	473
33	1505	387	881	1605	1095	234	345	1123	13	429
34	1333	346	922	1456	1014	436	333	976	11	439
35	1650	412	1010	1600	1168	524	482	1004	8	505
36	1530	2247	790	2230	1699	410	271	995	9	421
37	1034	385	720	1112	813	414	28	2620	8	767
38	783	388	1085	2080	1084	433	4	2010	7	614
39	258	234	1450	2730	1168	347	2	1930	9	572
40	357	269	1130	1240	749	501	138	411	9	265
41	233	224	1070	2080	902	543	177	716	12	362
42	301	206	1022	1022	638	498	156	654	10	330
43	211	267	879	1567	731	454	178	345	9	247
44	245	218	1320	1890	918	312	150	344	8	203

N.D\* - Não determinada.

**Tabela C9 - Resultados individuais do ensaio de Rp para os concretos com cinza volante.**

ciclos	V4				média	V5				média
	1	2	3	4		1	2	3	4	
1a	360	41	564	347	328	682	1158	852	642	833
1	384	62	576	395	354	717	1051	439	501	677
2	573	217	463	321	394	842	565	539	744	672
3	406	57	521	397	345	810	795	381	748	684
4	629	67	483	327	376	159	828	398	867	563
5	486	47	383	424	335	1323	492	287	514	654
6	536	40	376	358	328	790	663	336	464	563
7	523	83	388	528	381	256	835	386	414	473
8	375	84	605	259	331	220	461	532	286	375
9	428	44	490	457	355	494	566	787	594	611
10	469	53	443	384	337	790	650	436	423	575
11	510	63	397	310	320	60	784	399	675	480
12	467	48	605	347	367	521	821	481	409	558
13	536	49	786	357	432	582	773	373	850	645
14	593	54	548	325	380	668	1087	329	667	688
15	600	60	604	395	415	608	1028	386	489	628
16	773	57	459	380	417	914	1362	344	723	836
17	688	58	582	338	416	612	801	539	571	631
18	600	51	514	260	356	2059	798	290	424	893
19	554	83	579	345	390	1358	1824	442	564	1047
20	388	59	495	261	301	592	850	366	822	658
21	311	59	564	354	322	801	645	358	1000	701
22	699	75	851	300	481	1010	439	350	1110	727
23	487	76	652	322	384	1210	972	482	926	897
24	457	69	576	314	354	951	432	269	768	605
25	426	62	499	306	323	551	475	305	609	485
26	482	45	545	567	410	852	519	340	450	540
27	444	76	567	543	408	1030	1040	338	607	754
28	489	56	502	340	347	854	901	332	543	657
29	549	55	519	587	427	927	741	555	566	697
30	444	67	488	439	359	1000	582	779	589	737
31	339	79	458	290	292	874	631	530	584	655
32	402	69	522	426	355	748	691	281	579	575
33	489	86	564	360	375	1024	752	984	854	903
34	472	82	809	445	452	1300	654	356	627	734
35	407	84	504	374	342	1275	602	436	646	740
36	468	79	628	317	373	1250	699	517	666	783
37	363	54	752	347	379	1340	543	543	654	770
38	555	69	448	321	348	1370	475	458	753	764
39	634	42	789	387	463	1400	305	412	975	773
40	601	54	820	354	457	1120	302	326	1310	765
41	567	67	850	322	451	1380	460	305	1260	851
42	532	37	662	368	400	1310	447	420	1380	889
43	739	60	1550	543	723	1150	803	493	839	821
44	1020	55	659	545	570	1203	2450	566	1150	1342

**Tabela C10 - Resultados individuais do ensaio de Rp para os concretos com metacaulim no teor de 10%.**

ciclos	M4 10%				média	M5 10%				média**
	1	2	3	4		1	2	3	4	
1a	720	51	447	543	530	677	398	683	34	586
1	860	70	346	737	548	608	526	2292	42	1142
2	770	56	313	558	573	654	313	636	43	534
3	1489	50	344	439	830	479	285	478	96	414
4	626	52	478	471	574	777	320	282	91	460
5	1126	43	436	565	859	596	335	276	48	402
6	554	62	558	539	527	491	369	479	73	446
7	696	82	403	1046	694	386	403	681	98	490
8	576	73	434	593	597	548	221	472	130	414
9	746	63	428	957	596	607	323	767	66	566
10	735	81	431	783	657	547	406	752	68	568
11	724	98	434	608	614	849	270	962	79	693
12	689	86	427	808	584	746	430	551	36	576
13	774	83	555	562	620	533	561	1244	65	779
14	1732	70	425	636	1007	514	529	1210	81	751
15	1331	0	405	682	899	900	621	1255	64	925
16	800	71	432	857	700	950	339	334	76	541
17	1124	103	475	891	1059	168	445	443	96	352
18	753	116	392	907	829	548	500	439	96	496
19	1508	184	462	1590	1104	780	619	912	81	771
20	2100	138	443	1290	1347	908	467	1173	120	849
21	1920	112	355	1450	1390	881	698	392	225	657
22	2840	61	540	1400	1659	964	423	731	187	706
23	2130	179	429	1820	1385	778	424	752	148	651
24	2130	107	417	1720	1144	812	839	1180	157	944
25	2130	34	405	1620	1087	858	539	877	169	758
26	1840	13	456	845	1030	1030	559	1770	164	1120
27	978	150	345	786	824	1390	495	1280	93	1055
28	1339	130	299	950	913	1180	476	970	79	875
29	1700	169	382	1113	1098	1001	456	659	65	705
30	1567	145	399	1001	1001	822	632	1170	83	875
31	1590	148	423	1170	1101	871	597	972	112	813
32	2170	61	365	1070	1270	920	561	775	140	752
33	2140	214	482	1230	1070	871	805	676	146	784
34	930	140	471	1170	1122	409	761	1840	131	1003
35	1190	107	534	537	1316	1030	560	771	94	787
36	1450	74	597	1840	1257	1380	579	941	121	967
37	1640		645	2113	1296	1460	795	1110	149	1122
38	2245	77	642	1680	1504	1375	681	827	118	961
39	2850	153	639	1610	1712	1290	567	543	87	800
40	2550	141	603	1665	1712	969	796	687	89	817
41	2250	129	566	1720	1470	1590	862	1290	48	1247
42	2120	103	787	1800	1262	1720	720	898	56	1112
43	1990	77	461	1700	663	1320	929	1280	65	1176
44	1860	128	187	1480	620	1234	833	1610	88	1226

\*\* corresponde a média da determinação de número 1,2 e 3.

**Tabela C11 - Resultados individuais do ensaio de Rp para os concretos com metacaulim no teor de 20%.**

ciclos	M4 20%				média	M5 20%				média
	1	2	3	4		1	2	3	4	
1a	449	35	468	505	364	833	696	1116	991	909
1	346	70	635	514	391	953	777	536	814	770
2	519	45	660	492	429	776	793	716	663	737
3	314	52	369	431	292	711	734	459	741	661
4	427	95	546	697	441	342	661	500	1131	711
5	331	122	807	431	423	703	677	400	1306	895
6	468	70	492	499	382	612	787	733	1505	909
7	335	33	612	664	411	521	897	1466	1704	1147
8	617	39	825	727	552	862	709	442	587	650
9	381	92	795	372	410	671	557	615	1028	718
10	457	90	665	321	383	593	794	874	805	767
11	532	88	535	270	356	883	427	967	849	781
12	434	110	685	592	455	1116	625	991	744	869
13	346	99	540	607	398	831	671	1014	911	857
14	364	99	551	654	417	597	1024	776	525	730
15	476	120	786	908	572	878	821	822	859	845
16	445	114	862	336	439	843	928	766	1027	891
17	360	145	392	324	305	863	1888	744	812	1077
18	445	110	971	387	478	561	688	847	707	701
19	1640	199	1870	2130	1460	784	751	969	653	789
20	1140	114	1970	2000	1306	894	898	938	661	848
21	1030	144	2710	1980	1466	230	1078	813	740	715
22	1040	80	625	560	576	564	877	689	819	737
23	1270	131	2300	3000	1675	987	167	974	2130	1065
24	1190	135	2035	2535	1474	671	213	1218	2820	1230
25	1110	139	1770	2070	1272	328	278	1062	895	641
26	2530	113	1920	2760	1831	945	1001	905	1600	1113
27	2456	87	2000	2457	1750	700	265	2430	2240	1409
28	2100	124	2578	2450	1813	657	201	2090	2100	1262
29	2210	161	3050	2410	1958	702	195	1187	2160	1061
30	1865	140	2855	2295	1789	687	198	2400	1974	1315
31	1520	119	2660	2180	1620	712	211	2425	1357	1176
32	1630	139	2670	2410	1712	720	225	2450	995	1098
33	1620	138	1740	2245	1436	840	187	2660	2570	1564
34	2060	112	1210	2173	1389	943	219	819	2730	1178
35	1550	86	679	2100	1104	735	661	486	856	684
36	2540	87	765	2000	1348	527	643	2430	731	1083
37	1310	88	1382	2010	1198	808	646	1956	788	1050
38	1410	76	2000	1876	1341	604	649	1254	865	843
39	2480	54	2770	1675	1745	768	652	1480	865	941
40	2620	78	2424	2012	1783	654	655	1479	962	938
41	2760	101	2077	2145	1771	543	658	1478	1235	979
42	1790	79	2350	2070	1572	554	661	1477	1480	1043
43	1580	56	2033	1999	1417	318	664	1476	936	849
44	1654	76	2348	1896	1494	302	667	1475	939	846

**Tabela C12 - Resultados individuais do ensaio de Rp para os concretos com metacaulim no teor de 30%.**

ciclos	M4 30%				média	M5 30%				média
	1	2	3	4		1	2	3	4	
1a	287	49	298	443	269	317	485	95	810	537
1	392	50	686	483	403	388	424	56	745	519
2	361	42	445	447	324	401	298	51	499	399
3	463	41	536	392	358	565	500	64	521	529
4	310	56	52	460	220	361	338	69	249	316
5	394	49	512	590	386	379	297	56	587	421
6	369	69	428	420	322	377	593	59	517	495
7	324	51	594	221	298	375	888	63	446	570
8	386	42	496	421	336	405	610	88	604	539
9	346	59	547	493	361	316	465	69	305	362
10	368	59	551	537	379	432	387	159	734	518
11	390	59	555	582	396	460	689	76	511	553
12	405	67	285	251	252	489	533	65	457	493
13	409	71	564	252	324	409	582	65	500	497
14	398	78	578	244	324	423	530	56	351	435
15	394	104	667	340	376	392	267	50	656	438
16	376	85	361	291	278	344	615	47	597	519
17	380	50	572	271	318	408	646	91	373	476
18	236	59	324	238	214	419	438	18	443	433
19	456	82	683	409	408	449	162	34	355	322
20	1500	72	637	424	658	446	406	37	460	437
21	1210	63	654	430	589	321	455	33	465	413
22	1710	62	645	598	754	330	408	26	637	458
23	1543	59	698	465	691	320	286	41	489	365
24	1403	61	633	438	634	339	363	36	424	375
25	1360	63	567	411	600	532	1380	37	461	791
26	1160	72	640	397	567	378	400	40	442	407
27	1360	65	765	456	662	351	464	36	402	406
28	1160	78	675	567	620	258	513	41	502	424
29	1900	82	882	553	854	313	506	40	456	425
30	1530	79	843		817	368	478	34	544	463
31	1160	76	805	465	626	342	399	56	476	406
32	1640	76	1040	591	837	317	442	45	503	420
33	956	74	862	362	564	435	370	40	540	448
34	856	67	971	530	606	759	467	45	511	579
35	564	60	1080	698	600	596	456	38	474	509
36	504	138	923	559	531	354	477	40	498	443
37	487	121	887	540	509	661	628	42	756	682
38	477	112	851	521	490	600	678	56	699	659
39	469	110	1070	564	553	543	543	43	568	551
40	657	97	896	433	521	411	517	52	560	496
41	846	84	723	302	488	426	529	44	768	574
42	677	80	783	394	484	441	867	22	452	586
43	509	82	907	561	515	426	618	41	574	539
44	1200	76	763	306	586	646	646	46	544	612

\*\* corresponde a média da determinação de número 1,2 e 4.

# LISTA DE REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, A.G. **Efeito das adições minerais na resistividade elétrica de concretos convencionais**. 1998. 142 f. Dissertação de mestrado – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

AHMAD, S. Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction – a review. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, p. 459-471, 2003.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 222-3R**: Design and construction practices to mitigate corrosion of reinforcement in concrete structures. Committee 222, p. 1-29, 2003.

\_\_\_\_\_. **ACI 222-R**: Corrosion of metals in concrete. Committee 222, p. 1-30, 1996.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G 57/95a (Reapproved 2001)**: Standard test method for field measurement of soil resistivity using the Wenner four-electrode method. Annual Book of ASTM Standards, v. 03.02, p. 228-232, Philadelphia, 2003a.

\_\_\_\_\_. **ASTM C 876/91 (Reapproved 1999)**: Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. Annual Books of ASTM Standards, v.03.02, p.11-16, Philadelphia, 2003b.

\_\_\_\_\_. **ASTM G 59 – 97 (Reapproved 2003)**: Standard test method for conducting potentiodynamic polarization resistance measurements. Annual Books of ASTM Standards, v. 03.02, p. 240-243, Philadelphia, 2003c.

ANDRADE, C.; ALONSO, C.; SARRÍA, J. Corrosion rate evolution in concrete structures exposed to the atmosphere. **Cement and Concrete Composites**, v. 24, p.55-64, 2002.

ANDRADE, M.C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. Trad. Antonio Carmona e Paulo Helene. São Paulo, Pini: 1992.

ASRAR, N.; MALIK, A.U.; AHMAD, S.; MUJAHID, F.S. Corrosion protection performance of microsilica added concretes in NaCl and seawater environments. **Construction and Building Materials**, v. 13, p. 213-219, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: concreto para fins estruturais: classificação por grupos de resistência. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 11578**: Cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 1991.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 7211**: Agregado para concreto: especificação. Rio de Janeiro, 1983.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211**: Agregado para concreto: especificação. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 13956**: Sílica ativa para uso em cimento Portland, concreto, argamassa e pasta de cimento Portland: especificação. Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739**: Concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais: classificação por grupos de resistência. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 9204**: Concreto endurecido: determinação da resistividade elétrica-volumétrica. Rio de Janeiro, 1985.

\_\_\_\_\_. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 9833**: Concreto fresco: determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 1987).

\_\_\_\_\_. **NBRNM 47**: Concreto: determinação do teor de ar em concreto fresco - método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002.

\_\_\_\_\_. **NBRNM67**: Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

BASHEER, P.A.M.; GILLEECE, P.R.V.; LONG, A.E.; Mc CARTER, W.J. Monitoring electrical resistance of concretes containing alternative cementitious materials to assess their

resistance to chloride penetration. **Cement and Concrete Composites**, v. 24, p. 437-449, 2002.

BATIS, G.; KOULOMBI, N.; PANTAZOPOULOU, P. Corrosion protection of steel in pumice lightweight mortar by coatings. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, p. 261-267, 2005a.

BATIS, G.; PANTAZOPOULOU, P.; TSIVILIS, S.; BADOGIANNIS, E. The effect of metakaolin on the corrosion behaviour of cement mortars. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, p.125-130, 2005b.

BATIS, G.; ROUTOULAS, A.; RAKANTA, E. Effects of migrating inhibitors on corrosion of reinforcing steel covered with repair mortar. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, p. 109-115, 2003.

BAUER, E. **Avaliação comparativa da influência da adição de escória de alto-forno na corrosão das armaduras através de técnicas eletroquímicas**. 1995. 236 f. Tese de doutorado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

BEAUDOIN, J.J.; RAMACHANDRAN, V. S. **Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology**: principles, techniques and applications. In: RAMACHANDRAN, V.S; BEAUDOIN, J.J. New York, 2001.

BENTUR, A.; DIAMOND, S.; BERKE, N.S. **Steel corrosion in concrete**: fundamentals and civil engineering practice. London: E&FN Spon, 1997.

BENTZ, D.P. Influence of silica fume on diffusivity in cement-based materials: II. Multi-scale modeling of concrete diffusivity. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 7, p.1121-1129, 2000.

BERKE, N.S. Resistance of microsilica concrete to steel corrosion, erosion and chemical attack. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY-ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZZOLANIC, 3, 1989, Trondheim, Norway, 1989. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1989, v. 2, p. 861- 886, (ACI Special Publication, 114).

BLANCO, F.; GARCIA, M.P.; AYALA, J.; MAYORAL, G.; GARCIA, M.A. The effect of mechanically and chemically activated fly ashes on mortar properties. **Fuel**, v. 85, p. 2018–2026, 2006.

BRAUN, V. **Influência das condições de moldagem e cura nas características do concreto de cobrimento de diversos concretos**. 2003. 204 f. Dissertação de mestrado – Curso de Mestrado da Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.

BROOMFIELD, J.P. **Corrosion of steel in concrete**: understanding, investigation and repair. New York: E&FN Spon, 1997.

CABRERA, J.G.; NWAUBANI, S.O. The microstructure and chloride ion diffusion characteristics of cements containing metakaolin and fly ash. In: PROCEEDINGS OF THE SIXTH CANMET /ACI INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SÍLICA FUME AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE, vol. 1, bangkok, Thailand, 1998, p. 493-506.

CALLISTER JR., W.D. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. Ed. LTC, 5 ed. Rio de janeiro, 2002.

CAMÕES, A.; ROCHA, P.; JALALI, S.; AGUIAR, B.; DELGADO, R. High-performance concrete using fly ash. In: MALHOTRA, V.M.; HELENE, P.; FIGUEIRDO, E.P.; CARNEIRO, A. (edição). **High Performance Concrete**: performance and quality of concrete structures: ACI International- Proceedings third international conference, Recife (PE) Brazil, 2002. SP-207-2, p. 15-32.

CANUL, M.A.P.; CASTRO, P. Corrosion measurements of steel reinforcement in concrete exposed to a tropical marine atmosphere. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 491-498, 2002.

CARASEK, H.; CASCUDO, O. **Projeto integrado**: características do concreto de cobrimento e o seu papel na durabilidade das estruturas de concreto armado, Goiânia, 2001 (projeto de pesquisa).

CASCUDO, O. Inspeção e diagnóstico de estruturas de concreto com problemas de corrosão da armadura. In: Isaia, G.C. (edição). **Concreto**: ensino, pesquisas e realizações. 1. ed. São Paulo: Ibracon, 2005. v.2, p. 1071-1108.

\_\_\_\_\_. **Controle da corrosão de armaduras em concreto**: inspeção e técnicas eletroquímicas. 1 ed. São Paulo: PINI; Goiânia: Editora UFG, 1997.

\_\_\_\_\_. **Influência das características do aço carbono destinado ao uso como armadura para concreto armado no comportamento frente à corrosão**. 2000. 310 f. Tese de doutorado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

CASTRO, A. **Influência das adições minerais na durabilidade do concreto sujeito à carbonatação**. 2003. 215 f. Dissertação de mestrado – Curso de Mestrado da Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.

CNS FARNELL COMPANY. RM MKII Concrete Resistivity Meter Operation Manual. Hertfordshire, Inglaterra. 20 p.

COLEMAN, N.S.; PAGE, C.L. Aspects of the pore solution chemistry of hydrated cement pastes containing metakaolin. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n. 1, p.147-154, 1997.

DAL MOLIN, D.C.C. Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos com e sem adições de microssilica. 1995. Tese de doutorado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

DOTTO, J.M.R.; ABREU, A.G.; DAL MOLIN, D.C.C.; MÜLLER, I.L. Influence of silica fume addition on concrete physical properties and corrosion behavior of reinforcement bars. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, p. 31-39, 2004.

Especialistas apontam causas de queda de marquise de hotel no Rio, **Jornal A Folha**, São Paulo, 27 fev. 2007. Disponível em: <http://www1.folha.uol.com.br/folha/cotidiano/ult95u132331.shtml>. Acesso em 17 ago. 2007b.

FELIU, S. Relation between conductivity of concrete and corrosion of reinforcing bars. **Briting Corrosion Journal**, v.24, n.3, p. 195-198, 1989.

FELIU, S.; ANDRADE, C., coord. Manual inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras. Madrid, Instituto Eduardo Torroja, 1988.

FERREIRA, R.B. **Influência das adições minerais nas características do concreto de cobrimento e seu efeito na corrosão de armadura induzida por cloretos**. 2003. 220 f. Dissertação de mestrado – Curso de Mestrado da Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.

FORNASIER, R. S. **Porosidade e permeabilidade do concreto de alto desempenho com microssilica**. Porto Alegre, 1995. 150 f. Dissertação de mestrado - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995.

GENTIL, V. *Corrosão*. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara S.A., 1987.

GJØRV O.E. Effect of condensed silica fume on steel corrosion in concrete. **ACI Materials Journal**, n. 92, p. 591-598, 1995.

GOUWRIPALAN, N.; MOHAMED, H.M. Chloride-ion induced corrosion of galvanized and ordinary steel reinforcement in high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 28, n. 8, p.1119-1131, 1998.

GUTIÉRREZ, R.M.; DÍAZ, L.N.; DELVASTO, S. Effect of pozzolans on the performance of fiber-reinforced mortars. **Cement and Concrete Composites**. v. 27, p. 593-598, 2005.

HA, T.-H.; Muralidharan, S.; BAE, J.-H.; HA, Y.-C.; LEE, H.-G.; PARK, K.-W.; KIM, D.-K. Accelerated short-term techniques to evaluate the corrosion performance of steel in fly ash blended concrete. **Building and Environment**, v. 42, p.78–85, 2007.

HASSAN, K. E.; CABRERA, J. G.; MALIECHE, R. S. The effect of mineral admixtures on the properties of high performance concrete. **Cemente and Concrete Composites**, v. 22, p. 267-271, 2000.

HAUSSMANN, D. Steel Corrosion in concrete. **Materials protection**, v. 6, n. 11, p. 19-23, 1967.

HELENE, P.R.L **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. 231 f. Tese de livre docência – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

\_\_\_\_\_. Envelhecimento e inspeção de pontes e viadutos. 3 seminário internacional de durabilidade de materiais, componentes e estruturas. 1997. SÃO PAULO, SÃO PAULO, EDUSP.

HOFFMANN, A.T. **Influência da adição de sílica ativa, da relação água/aglomerante, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de cloretos em concretos**. 2001. 132 f. Dissertação de mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

HOLLOWAY, L.; NAIRN, K.; FORSYTH, M. Concentration monitoring and performance of migration corrosion inhibitor in steel-reinforced concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 1435-1440, 2004.

ING, M.; AUSTIN, S.; LYONS, R. Cover zone properties influencing acoustic emission due to corrosion. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 284–295, 2005.

JIANG, L.; LIU, Z.; YE, Y. Durability of concrete incorporating large volumes of low-quality fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 1467-1469, 2004.

JOIRET, S.; KEDDAM, M.; NÓVOA, X.R.; PÉREZ, M.C.; RANGEL, C.; TAKENOUTI, H. Use of EIS, ring-disk electrode, EQCM and raman spectroscopy to study the film of oxides formed on iron in 1 M NaOH. **Cement and Concrete Composites**, v. 24, p. 7-15, 2002.

JUNG, W.-Y.; YOON, Y.-S.; SOHN, Y.-M. Predicting the remaining service life of land concrete by steel corrosion. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 663-667, 2003.

KAYALI, O.; ZHU, B. Corrosion performance of medium-strength and silica fume high-strength reinforced concrete in a chloride solution. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, p. 117-124, 2005.

KHATRI, R.P.; SIRIVIVATNANON, V.; HEELEY, P. Critical polarization resistance in service life determination. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 829-837, 2004.

KOSTUCH, J.A; WALTERS, G.V.; JONES, T.R. High performance concrete incorporating metakaolin – a review, **Concrete 2000**. University of Dundee; September, 1993, p.1799-1811.

KOURIL, M.; NOVÁK, P.; BOJKO, M. Limitations of the linear polarization method to determine stainless steel corrosion rate in concrete environment. **Cement and Concrete Composites**, v. 28, p. 220-225, 2006.

KUŞ, E.; MANSFELD, F. An evolution of the electrochemical frequency modulation (EFM) technique. **Corrosion Science**, v. ?, p. 1-15, 2005.

LACERDA, C. S.; HELENE, P. Metacaulim: a nova opção para os concretos de alto desempenho. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO 44., 2002, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, 2002. 1 CD-ROM.

LANCHEMI, M.; TAGNIT-HAMOU, A.E.; AITCHIN, C. Long-term performance of silica fume concretes. **Concrete International**, v. 20, n. 1, p. 56-65, 1998.

Laudo aponta que edifício desabou por falha de construção em PE, **Jornal A Folha**, São Paulo, 06 ago. 2005. Disponível em: <http://www1.folha.uol.com.br/folha/cotidiano/ult95u110821.shtml>>. Acesso em 06 de ago. 2007a.

LAW, D.W.; CAIRNS, J.; MILLARD, S.G.; BUNGEY, J.H. Measurement of loss steel from reinforcing bars in concrete using linear polarization resistance measurements. **NDT&E International**, v. 37, p. 381-388, 2004.

LIMA, M. B. **Avaliação da Resistividade Elétrica e do Módulo de Elasticidade Estático de Concretos Auto-adensáveis**. 2006. 137 f. Trabalho de conclusão de curso – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, 2006.

LOCHE, J.M.; AMMAR, A.; DUMARGUE, P. Influence of the migration of chloride ions on the electrochemical impedance spectroscopy of mortar paste. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 1797-1803, 2005.

MALIK, A.U.; ANDIJANI, I.; AL-MOAILI, F.; OZAIR, G. Studies on the performance of migratory corrosion inhibitors in protection of rebar concrete in gulf seawater environment. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, p. 235-242, 2004.

MANSUR, A. Novo produto ataca corrosão. **Jornal do Brasil**. Rio de Janeiro, 24 nov. 1996, p.12.

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

MIRANDA, J.M.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; GONZÁLEZ, J.A.; PALOMO, A. Corrosion resistance in activated fly ash mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p.1210-1217, 2005.

MONTEMOR, M.F.; SIMÕES, A.M.P.; SALTA, M.M.; FERREIRA, M.G.S. The assessment of the electrochemical behaviour of fly ash-containing concrete by impedance spectroscopy. **Corrosion Science**, v. 35, p. 1571-1578, 1993.

MONTEMOR, M.F.; SIMÕES, A.M.P.; SALTA, M.M. Effect of fly ash on concrete reinforcement corrosion studied by EIS. **Cement and Concrete Composites**, v. 22, p.175-185, 2000.

MONTEMOR, M.F.; SIMÕES, A.M.P.; SALTA, M.M. Effect of fly ash on concrete reinforcement corrosion studied by EIS. **Cement and Concrete Composites**, v. 22, p.175-185, 2000.

MONTEMOR, M.F.; CUNHA, M.P.; FERREIRA, M.G.; SIMÕES, A.M. Corrosion behaviour of rebars in fly ash mortar exposed to carbon dioxide and chlorides. **Cement and Concrete Composites**, v. 24, p. 45-53, 2002.

MONTEMOR, M.F.; SIMÕES, A.M.P.; FERREIRA, M.G.S. Chloride-induced corrosion on reinforcing steel: from the fundamentals to the monitoring techniques. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, p.491-452, 2003.

MOON, H.Y.; SHIN, K. J. Evaluation on steel bar corrosion embedded in antiwashout underwater concrete containing mineral admixtures. **Cement and Concrete Research**, v. 6, p. 521–529, 2006.

MORRIS, W.; VICO, A.; VÁZQUEZ, M. Chloride induced corrosion of reinforcing steel evaluated by concrete resistivity measurements. **Eletrochimica Acta**, v. 49, p. 4447-4453, 2004.

NAIK TR, SINGH SS, HUSSAIN MW. Permeability of concrete containing large amounts of fly ash. **Cement Concrete Research**, v. 24, p. 913-922, 1994.

NAWY, E.G. **Fundamentals of high strength high performance concrete**. ED.: Longman, 1<sup>st</sup> publication, Concrete design & construction series. 1996. p. 340.

NEPOMUCENO, A.A. Mecanismo de transporte de fluidos no concreto. In: ISAIA, G.C. (editor). **Concreto: ensino, pesquisas e realizações**. 1. ed. São Paulo: Ibracon, 2005. v.2, p. 793-826.

NEVILLE, A. Chloride attack in reinforced concrete: an overview. **Materials Structures**, v. 28, n. 176, p.63-70, 1995.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. Trad.: GIAMMUSSO, S. E. São Paulo: PINI, 1997.

NITA, C. **Utilização de pozolanas em compósitos de cimento reforçados com fibras de celulose e pva**. 2006. 128 f. Dissertação de mestrado - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PAGE, C.L.; BAMFORTH, P.B.; FIGG, J.W. **Corrosion of reinforcement in concrete construction**. London, the Royal Society of Chemistry, 1996.

PANOSSIAN, Z. **Corrosão e proteção contra corrosão em equipamentos e estruturas metálicas: manual**, v. 1 e v. 2, 1. ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1993.

PAULA COUTO, A.B. **Influência das condições de cura nas características do cobrimento de diferentes concretos**. 2003. 167 f. Dissertação de mestrado – Curso de Mestrado da Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.

POLDER, R.B.; PEELLEN, W.H.A. Characterisation of chloride transport and reinforcement corrosion in concrete under cyclic wetting and drying by electrical resistivity. **Cement and Concrete Composites**, v. 24, p. 427-435, 2002.

POON, C. S.; KOU, S. C.; LAM, L. Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete. **Construction and Building Materials**, v. 20, p. 858-865, 2006.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION - PCA. **A Literature Review: Electrical Resistivity of Concrete**. By David A. Whiting and Mohamad A. Nagi. 2003. 56 p.

POUPARD, O.; AÏT-MOKHTAR, A.; DUMARGE, P. Corrosion by chlorides in reinforced concrete: Determination of chloride concentration threshold by impedance spectroscopy. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 991-1000, 2004.

ROCCHINI, G. A theoretical study of the influence of the ohmic drop on polarization curves. **Corrosion Science**, v. 38, n. 4, p. 655-668, 1996.

\_\_\_\_\_. Some considerations on the polarization resistance method. **Corrosion Science**, v. 41, p. 2353-2367, 1999.

Rumo ao Futuro. **Jornal do Brasil**, 2001, São Paulo, 07 jun. 2001. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/folha/cotidiano/ult95u110821.shtml>>. Acesso em 17 de ago. 2001.

SABIR, B. B.; WILD, S.; BAI, J. The Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. **Cement and Concrete Composites**, v. 23, p. 441-454, 2001.

SARASWATHY, V.; MURALIDHARAN, S.; THANGAVEL, K.; SRINIVASAN, S. Influence of activated fly ash on corrosion-resistance and strength of concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, p. 673-680, 2003.

SEKINE, I. Recent evaluation of corrosion protective paint films by electrochemical methods. **Progress in Organic Coatings**, v. 31, p. 73-80, 1997.

SELMO, S.M.S. **Aço carbono em pastas de gesso de construção: estimativas de taxas de corrosão por impedância e por método gravimétrico conjugado à análise de imagem**. 1997. 391 f., 2 v., tese de doutorado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

SHACKELFORD, James F. **Introduction to materials science for engineers**. 5.ed.-. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2000.

SILVA, P.R. **Estudo de aplicação de técnica eletroquímica para monitoramento da Corrosão em unidades de craqueamento catalítico fluido**. 2002. Dissertação de mestrado - Área de Concentração de Engenharia e Ciência dos Materiais (Setor de Tecnologia), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

SOLEYMANI, H.R.; ISMAIL, M.E. Comparing corrosion measurement methods to assess the corrosion activity of laboratory OPC and HPC concrete specimens. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 2037-2044, 2004.

SONG, G. Theoretical analysis of the measurement of polarization resistance in reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 22, p. 407-415, 2000.

SUN, W.; ZHANG, Y.; LIU, S.; ZHANG, Y. The influence of mineral admixtures on resistance to corrosion of steel bars in green high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p.1781-1785, 2004.

TAYLOR, H.F.W. **Cement Chemistry**. 2<sup>nd</sup> edition. London: Thomas Telford, 1997.

THOMAS M. Chloride thresholds in marine concrete. **Cement Concrete Research**. v. 26, p. 513–519, 1996.

TÜRKMEN, I.; GAVGALI, M.; GÜL, R. Influence of mineral admixtures on the mechanical properties and corrosion of steel embedded in high strength concrete. **Materials Letters**, v. 57, p. 2037–2043, 2003.

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

WOLYNEC, S. **Técnicas eletroquímicas em corrosão**. 1<sup>a</sup> ed. São Paulo: Edusp, 2003.

ZHANG, M.H.; MALHOTRA, V.M. Characteristics of a thermally activated alumino-silicate pozzolanic material and its use in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 8, p.1713-1725, 1995.