

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA CORROSÃO DE ARMADURAS EM  
CONCRETOS COM ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA**

Fernanda Macedo Pereira Vieira

Tese para obtenção do título de Doutor  
em Engenharia

Porto Alegre  
2003

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA CORROSÃO DE ARMADURAS EM  
CONCRETOS COM ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA**

Fernanda Macedo Pereira Vieira  
Engenheira Civil

Trabalho realizado no Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração: Metalurgia Extrativa

Porto Alegre  
2003

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do título de Doutor em Engenharia, área de concentração Metalurgia Extrativa e Tecnologia Mineral e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr-Ing. Antônio Cezar Faria Vilela  
Dr. pela Universidade Técnica de Aachen, Alemanha  
Profa. Dra. Denise Carpena Coitinho Dal Molin  
Dra. Pela Universidade de São Paulo

Banca Examinadora:

Prof. Antonio Alberto Nepomuceno – UnB/DF  
Dr. pela Universidade Técnica de Madrid

Profa. Iduvirges Lourdes Muller – UFRGS/RS  
Dra. pela Universidade Nacional de Rosario – Argentina

Profa. Angela Borges Masuero – UFRGS/RS  
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Jairo José de Oliveira Andrade – PUC/RS  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Carlos Arthur Ferreira  
Coordenador do PPGEM

*Aos meus pais, Luiz Fernando e Maria Helena*

## AGRADECIMENTOS

Ao professor Antônio Vilela pela orientação competente, empenho e oportunidade para o desenvolvimento deste trabalho.

À professora Denise Dal Molin pela valiosa orientação, pela amizade, estímulo e dedicação. Por quem tenho enorme admiração, o meu especial agradecimento.

Ao professor José Luiz Ribeiro pela disponibilidade, auxílio e inúmeras contribuições na análise estatística dos resultados.

Aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, pelos ensinamentos e apoio recebidos.

Ao CNPq, cujos recursos financeiros possibilitaram o desenvolvimento deste trabalho.

À Camargo Corrêa Cimentos, pelo apoio financeiro para o desenvolvimento do programa experimental.

À professora Angela Masuero pela amizade e incentivo à conclusão da tese.

À CIENTEC, pelo afastamento concedido para a conclusão da tese.

Ao colega Eng. Fernando Recena pela colaboração e compreensão, sem as quais não teria sido possível o término deste trabalho.

Aos colegas do Departamento de Materiais de Construção Civil da CIENTEC pelo apoio recebido durante a etapa final do trabalho.

Ao pessoal do LEME, em especial ao Fontes, Flávio e Teixeira.

Ao Airton e ao Éderson pela colaboração na realização das atividades de laboratório.

Às amigas de *sempre*: Adriana S., Aguida, Marlova, Lucília e Rosana, pelo apoio, carinho e amizade.

Aos colegas do NORIE: Adriana G., Ângela Azevedo, Antônio Eduardo, Barata, Jairo, Maria Luíza, Mônica, Patrícia, Valéria, Paulo Sérgio, Rafael, Ricardo, Washington...pela troca de experiências, amizade e convivência.

Aos ex-bolsistas de iniciação científica, em especial à Ivy, Carlos, Ana Raquel, Marcelo e Fábio.

À Eng. Diana Cecatto, pelo competente apoio e dedicação na realização do programa experimental.

Aos meus pais, pelas oportunidades, incentivo, apoio e carinho em todos os momentos.

A todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho, o meu reconhecimento.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>XI</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>XVI</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>XVIII</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XIX</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA.....	1
1.2 OBJETIVOS .....	4
1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA .....	5
1.4 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	6
<b>2 CORROSÃO DA ARMADURA EM CONCRETO</b> .....	<b>8</b>
2.1 GENERALIDADES .....	8
2.2 PROTEÇÃO DO AÇO ATRAVÉS DO CONCRETO .....	9
2.3 CORROSÃO ELETROQUÍMICA DA ARMADURA.....	11
2.4 EFEITO DOS ÍONS CLORETO.....	15
2.4.1 Mecanismo de despassivação por íons cloreto .....	17
2.4.2 Valores críticos de cloretos para a despassivação .....	20
2.5 EFEITO DA CARBONATAÇÃO .....	23
2.6 TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS PARA AVALIAÇÃO DA CORROSÃO DA ARMADURA.....	29
2.6.1 Resistência de polarização ( $R_p$ ).....	30
2.6.2 Potencial de corrosão .....	34
<b>3 SÍLICA ATIVA</b> .....	<b>36</b>
3.1 OBTENÇÃO DA SÍLICA ATIVA .....	37
3.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E QUÍMICAS DA SÍLICA ATIVA.....	40
3.2.1 Características físicas .....	40
3.2.2 Características químicas .....	41
3.3 PRINCÍPIO DA ATUAÇÃO DA SÍLICA ATIVA NO CONCRETO.....	42
3.3.1 Efeito químico .....	42
3.3.2 Efeito físico .....	43
3.4 INFLUÊNCIA DA SÍLICA ATIVA NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO.....	45
3.4.1 Sílica ativa e a corrosão da armadura.....	46
3.4.1.1 Influência da sílica ativa na corrosão desencadeada por íons cloreto .....	47
3.4.1.2 Influência da sílica ativa na corrosão desencadeada por carbonatação.....	53
3.4.2 Resistência à compressão .....	56

<b>4</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>59</b>
4.1	VARIÁVEIS .....	59
4.1.1	Definição das variáveis independentes .....	59
4.1.2	Definição das variáveis dependentes .....	60
4.2	PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS.....	61
4.3	SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	64
4.3.1	Cimento .....	64
4.3.2	Agregado miúdo .....	65
4.3.3	Agregado graúdo .....	65
4.3.4	Sílica ativa .....	66
4.3.5	Aditivo Superplastificante .....	67
4.3.6	Água .....	68
4.3.7	Barras de aço .....	68
4.4	PROPORCIONAMENTO DOS MATERIAIS .....	69
4.5	PREPARO E CONFECÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA .....	71
4.5.1	Geometria e dimensões dos corpos-de-prova .....	71
4.5.2	Preparação das barras de aço .....	72
4.5.3	Moldagem e cura dos corpos-de-prova.....	72
4.6	CORROSÃO ACELERADA POR ÍONS CLORETO.....	74
4.7	CORROSÃO ACELERADA POR CARBONATAÇÃO .....	77
4.8	MÉTODOS DE ENSAIO .....	80
4.8.1	Ensaio de corrosão.....	80
4.8.1.1	Resistência de polarização .....	80
4.8.1.2	Perda de massa gravimétrica e taxa de corrosão gravimétrica.....	82
4.8.2	Ensaio complementares .....	83
4.8.2.1	Resistência à compressão axial .....	83
4.8.2.2	Profundidade de carbonatação.....	83
4.8.2.3	Determinação do teor de cloretos livres .....	84
4.8.2.4	Difração de raios-X .....	85
4.8.2.5	Avaliação da absorção de água – Método de Kelham .....	85
<b>5</b>	<b>APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>92</b>
5.1	ENSAIOS DE CORROSÃO DESENCADEADA POR ÍONS CLORETO.....	93
5.1.1	Potencial de corrosão.....	93
5.1.1.1	Tempo de início da despassivação da armadura – avaliação através do potencial de corrosão .....	96
5.1.1.2	Variação do potencial de corrosão em função do tempo .....	102
5.1.2	Intensidade de corrosão .....	108
5.1.2.1	Tempo de início da despassivação da armadura – avaliação através da intensidade de corrosão .....	110



5.1.2.2	Varição da intensidade de corrosão em função do tempo .....	116
5.1.2.3	Perda de massa eletroquímica .....	123
5.1.3	Resistência ôhmica .....	124
5.1.4	Varição percentual da massa do corpo-de-prova .....	127
5.1.5	Perda de massa gravimétrica e taxa de corrosão gravimétrica .....	129
5.1.6	Perda de massa gravimétrica versus perda de massa eletroquímica .....	132
5.1.7	Relação entre a intensidade de corrosão e o potencial de corrosão .....	133
5.1.8	Relação entre a intensidade de corrosão e a resistência ôhmica.....	136
5.2	ENSAIOS DE CORROSÃO DESENCADEADA POR CARBONATAÇÃO .....	138
5.2.1	Potencial de corrosão.....	138
5.2.2	Intensidade de corrosão .....	145
5.2.2.1	Perda de massa eletroquímica .....	151
5.2.3	Resistência ôhmica .....	153
5.2.4	Varição percentual da massa do corpo-de-prova .....	155
5.2.5	Perda de massa gravimétrica e taxa de corrosão gravimétrica .....	157
5.2.6	Perda de massa gravimétrica versus perda de massa eletroquímica .....	160
5.2.7	Relação entre a intensidade de corrosão e o potencial de corrosão .....	161
5.2.8	Relação entre a intensidade de corrosão e a resistência ôhmica.....	164
5.3	ENSAIOS COMPLEMENTARES.....	166
5.3.1	Resistência à compressão .....	166
5.3.2	Profundidade de carbonatação .....	170
5.3.3	Teor de íons cloreto.....	178
5.3.4	Difração de raios-X.....	183
5.3.5	Absorção de água – Método de Kelham .....	187
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>198</b>
6.1	CONCLUSÕES .....	198
6.1.1	Efeito da sílica ativa na corrosão desencadeada por íons cloreto.....	198
6.1.1.1	Potencial de corrosão .....	199
6.1.1.2	Intensidade de corrosão.....	200
6.1.1.3	Em relação à perda de massa gravimétrica das barras de aço .....	201
6.1.1.4	Em relação ao teor de cloretos livres.....	202
6.1.2	Efeito da sílica ativa da corrosão desencadeada por carbonatação.....	203
6.1.2.1	Em relação à variação final do potencial de corrosão .....	203
6.1.2.2	Em relação à variação final da intensidade de corrosão .....	203
6.1.2.3	Em relação à perda de massa gravimétrica das barras .....	204
6.1.2.4	Em relação à profundidade de carbonatação .....	205
6.1.3	Efeito da sílica ativa na absorvidade .....	206
6.1.3.1	Em relação à taxa de absorção de água .....	206
6.1.3.2	Em relação à resistência capilar .....	207

6.1.4	Efeito da sílica ativa na resistência à compressão.....	207
6.1.5	Conclusão final .....	207
6.2	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS .....	208
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>		<b>209</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b>	Esquema básico da corrosão do aço no concreto proposto por TUUTTI (1982).....	12
<b>Figura 2.2</b>	Esquema simplificado da célula de corrosão (CEB 152, 1984). .....	14
<b>Figura 2.3</b>	Esquema do mecanismo de corrosão por cloreto (TREADAWAY, 1988). .....	19
<b>Figura 2.4</b>	Variação do teor crítico de cloretos em função da qualidade do concreto e da umidade relativa (CEB, 1992). .....	23
<b>Figura 2.5</b>	Esquema representativo do processo de carbonatação, segundo BAKKER (1988)...	25
<b>Figura 2.6</b>	Influência da umidade relativa na velocidade de carbonatação (VENUAT, citado por ROSENBERG et al., 1989). .....	27
<b>Figura 2.7</b>	Relação entre a difusão de CO <sub>2</sub> a umidade relativa (STEFFENS et al., 2002). .....	28
<b>Figura 2.8</b>	Curva de Tafel ideal.....	31
<b>Figura 2.9</b>	Representação esquemática do sistema para determinação da resistência de polarização.....	33
<b>Figura 2.10</b>	Representação esquemática para a medida do potencial de corrosão. ....	34
<b>Figura 3.1</b>	Princípio da fabricação do silício metálico e do ferro-silício (AÏTCIN, 2000). .....	37
<b>Figura 3.2</b>	Representação esquemática da produção do silício metálico e captação da sílica ativa (DAL MOLIN, 1995). .....	39
<b>Figura 3.3</b>	Produção silício metálico e ligas de ferro-silício 75% e captação potencial de sílica ativa no Brasil, no ano de 2001. ....	40
<b>Figura 3.4</b>	Imagens da sílica ativa obtidas através de microscopia eletrônica (a) de varredura e (b) de transmissão (AÏTCIN, 2000). .....	41
<b>Figura 3.5</b>	Zona de transição: (a) sem sílica ativa, com grandes cristais de hidróxido de cálcio orientados (b) com sílica ativa, estrutura densa e homogênea (MONTEIRO, 1992)...	44
<b>Figura 3.6</b>	Principais benefícios da utilização da sílica ativa no concreto. ....	45
<b>Figura 3.7</b>	Coefficiente de difusão em concretos com sílica ativa (GAUTEFALL E HAVDAHL, 1989). .	47
<b>Figura 3.8</b>	Coefficiente de difusão em pastas com sílica ativa (JENSEN et al., 1999). .....	49
<b>Figura 3.9</b>	Tempo para o início da corrosão (a) e Taxa de corrosão (b) (TALIB et al., 1994) ....	50
<b>Figura 3.10</b>	pH em concretos com sílica ativa (a) PAGE e VENNESLAND (1983), (b) BYFORS (1987), (c) EL-SAYED et al. (1997) e (d) SEIDLER (1999). .....	55
<b>Figura 3.11</b>	Resistência à compressão de concretos com sílica ativa (DOTTO et al., 2003). .....	58
<b>Figura 4.1</b>	Esquema simplificado dos ensaios realizados. ....	63
<b>Figura 4.2</b>	Difratograma da sílica ativa. ....	67
<b>Figura 4.3</b>	Diagrama de dosagem do concreto. ....	69
<b>Figura 4.4</b>	Consumo de cimento dos traços ensaiados.....	70
<b>Figura 4.5</b>	Geometria e dimensões nominais dos corpos-de-prova. ....	71
<b>Figura 4.6</b>	Ciclos de imersão parcial e secagem. ....	75

<b>Figura 4.7</b>	Imersão parcial dos corpos-de-prova em solução NaCl 3,5%. .....	76
<b>Figura 4.8</b>	Secagem dos corpos-de-prova em estufa a 50° C.....	76
<b>Figura 4.9</b>	Representação esquemática da câmara de carbonatação acelerada.....	79
<b>Figura 4.10</b>	Câmara de carbonatação acelerada.....	79
<b>Figura 4.11</b>	Equipamento utilizado e célula eletroquímica.....	81
<b>Figura 4.12</b>	Relação entre os agregados totais secos e a relação água/cimento.....	87
<b>Figura 4.13</b>	Dispositivo utilizado para a execução do ensaio de absorção de água (KULAKOWSKI, 2002).....	88
<b>Figura 4.14</b>	Representação esquemática do corpo-de-prova preparado para o ensaio de absorção de água.....	89
<b>Figura 4.15</b>	Corpos-de-prova preparados, colocados em imersão.....	90
<b>Figura 4.16</b>	Exemplo dos gráficos obtidos na realização do ensaio – (a) massa em função da raiz quadrada do tempo; (b) acréscimo de massa em função da raiz quadrada do tempo.....	90
<b>Figura 5.1</b>	Evolução do potencial de corrosão - relação água/aglomerante 0,40, corrosão por cloreto.....	93
<b>Figura 5.2</b>	Evolução do potencial de corrosão - relação água/aglomerante 0,55, corrosão por cloreto.....	94
<b>Figura 5.3</b>	Evolução do potencial de corrosão - relação água/aglomerante 0,70, corrosão por cloreto.....	94
<b>Figura 5.4</b>	Determinação do tempo de início de despassivação da armadura – potencial de corrosão.....	96
<b>Figura 5.5</b>	Tempo de início da despassivação – avaliação pelo $E_{corr}$ .....	98
<b>Figura 5.6</b>	Tempo de início da despassivação x resistência à compressão.....	101
<b>Figura 5.7</b>	Variação do potencial de corrosão – corrosão por cloreto - (a) relação água/aglomerante 0,40 (b) relação água/aglomerante 0,55 (c) relação água/aglomerante 0,70.....	104
<b>Figura 5.8</b>	Evolução do potencial de corrosão – corrosão por cloreto.....	107
<b>Figura 5.9</b>	Evolução da intensidade de corrosão - relação água/aglomerante 0,40, corrosão por cloreto.....	108
<b>Figura 5.10</b>	Evolução da intensidade de corrosão - relação água/aglomerante 0,55, corrosão por cloreto.....	108
<b>Figura 5.11</b>	Evolução da intensidade de corrosão - relação água/aglomerante 0,70, corrosão por cloreto.....	109
<b>Figura 5.12</b>	Determinação do tempo de início de despassivação da armadura – intensidade de corrosão.....	110
<b>Figura 5.13</b>	Tempo de início da despassivação – avaliação pela $i_{corr}$ .....	113
<b>Figura 5.14</b>	Tempo de despassivação por $E_{corr}$ x tempo de despassivação por $i_{corr}$ .....	116
<b>Figura 5.15</b>	Variação da intensidade de corrosão – corrosão por cloreto (a) relação água/aglomerante 0,40 (b) relação água/aglomerante 0,55 (c) relação água/aglomerante 0,70.....	119

<b>Figura 5.16</b>	Evolução da intensidade de corrosão – corrosão por cloreto. ....	122
<b>Figura 5.17</b>	Grau de corrosão x tempo. ....	123
<b>Figura 5.18</b>	Perda de massa eletroquímica – corrosão por cloreto. ....	1234
<b>Figura 5.19</b>	Evolução da resistência ôhmica - relação água/aglomerante 0,40, corrosão por cloreto. ....	125
<b>Figura 5.20</b>	Evolução da resistência ôhmica - relação água/aglomerante 0,55, corrosão por cloreto. ....	125
<b>Figura 5.21</b>	Evolução da resistência ôhmica - relação água/aglomerante 0,70, corrosão por cloreto. ....	126
<b>Figura 5.22</b>	Evolução da variação de massa - relação água/aglomerante 0,40, corrosão por cloreto. ....	128
<b>Figura 5.23</b>	Evolução da variação de massa - relação água/aglomerante 0,55, corrosão por cloreto. ....	128
<b>Figura 5.24</b>	Evolução da variação de massa - relação água/aglomerante 0,70, corrosão por cloreto. ....	129
<b>Figura 5.25</b>	Efeito isolado da relação água/aglomerante (a) e do teor de sílica ativa (b) na perda de massa gravimétrica. ....	131
<b>Figura 5.26</b>	Efeito da interação entre a relação água/aglomerante e o teor de sílica ativa na perda de massa gravimétrica. ....	131
<b>Figura 5.27</b>	Perda de massa gravimétrica x Perda de massa eletroquímica – corrosão por cloreto. ....	132
<b>Figura 5.28</b>	Relação entre a intensidade de corrosão e o potencial de corrosão para as relações água/aglomerante (a) 0,40; (b) 0,55 e (c) 0,70 – corrosão por cloreto. ....	135
<b>Figura 5.29</b>	Relação entre a intensidade de corrosão e a resistência ôhmica para as relações água/aglomerante (a) 0,40; (b) 0,55 e (c) 0,70 - corrosão por cloreto. ....	137
<b>Figura 5.30</b>	Evolução do potencial de corrosão - relação água/aglomerante 0,40, corrosão por carbonatação. ....	138
<b>Figura 5.31</b>	Evolução do potencial de corrosão - relação água/aglomerante 0,55, corrosão por carbonatação. ....	139
<b>Figura 5.32</b>	Evolução do potencial de corrosão - relação água/aglomerante 0,70, corrosão por carbonatação. ....	139
<b>Figura 5.33</b>	Variação final do potencial de corrosão - corrosão por carbonatação. ....	143
<b>Figura 5.34</b>	Evolução da intensidade de corrosão – relação água/aglomerante 0,40, corrosão por carbonatação. ....	145
<b>Figura 5.35</b>	Evolução da intensidade de corrosão – relação água/aglomerante 0,55, corrosão por carbonatação. ....	146
<b>Figura 5.36</b>	Evolução da intensidade de corrosão – relação água/aglomerante 0,70, corrosão por carbonatação. ....	146
<b>Figura 5.37</b>	Variação final da intensidade de corrosão - corrosão por carbonatação. ....	149

<b>Figura 5.38</b>	Relação entre o teor de hidróxido de cálcio determinado por KULAKOWSKI (2002) e a absorvidade determinada no presente trabalho.....	151
<b>Figura 5.39</b>	Perda de massa eletroquímica – corrosão por carbonatação.....	152
<b>Figura 5.40</b>	Evolução da resistência ôhmica - relação água/aglomerante 0,40, corrosão por carbonatação.....	153
<b>Figura 5.41</b>	Evolução da resistência ôhmica - relação água/aglomerante 0,55, corrosão por carbonatação.....	153
<b>Figura 5.42</b>	Evolução da resistência ôhmica - relação água/aglomerante 0,70, corrosão por carbonatação.....	154
<b>Figura 5.43</b>	Evolução da variação de massa - relação água/aglomerante 0,40, corrosão por carbonatação.....	155
<b>Figura 5.44</b>	Evolução da variação de massa - relação água/aglomerante 0,55, corrosão por carbonatação.....	156
<b>Figura 5.45</b>	Evolução da variação de massa - relação água/aglomerante 0,70, corrosão por carbonatação.....	156
<b>Figura 5.46</b>	Aspecto das barras após o ensaio acelerado de carbonatação para as relações água/aglomerante (a) 0,40, (b) 0,55 e (c) 0,70. ....	158
<b>Figura 5.47</b>	Efeito da relação água/aglomerante na perda de massa gravimétrica.....	159
<b>Figura 5.48</b>	Efeito da interação entre a relação água/aglomerante e o teor de sílica ativa na perda de massa gravimétrica. ....	160
<b>Figura 5.49</b>	Perda de massa gravimétrica x Perda de massa eletroquímica – corrosão por carbonatação.....	161
<b>Figura 5.50</b>	Relação entre a intensidade de corrosão e o potencial de corrosão para as relações água/aglomerante (a) 0,40; (b) 0,55 e (c) 0,70 - corrosão por carbonatação.....	163
<b>Figura 5.51</b>	Relação entre a intensidade de corrosão e a resistência ôhmica para as relações água/aglomerante (a) 0,40; (b) 0,55 e (c) 0,70 - corrosão por carbonatação.....	165
<b>Figura 5.52</b>	Resistência à compressão.....	168
<b>Figura 5.53</b>	Relação entre a resistência à compressão e a variação final da intensidade de corrosão desencadeada por carbonatação.....	169
<b>Figura 5.54</b>	Relação entre a resistência à compressão e a variação da intensidade de corrosão no final do ensaio acelerado por cloretos. ....	170
<b>Figura 5.55</b>	Profundidade de carbonatação para as idades 4, 28, 70 e 161 dias.....	173
<b>Figura 5.56</b>	Tempo para a frente de carbonatação atingir a armadura.....	175
<b>Figura 5.57</b>	Relação entre a profundidade de carbonatação após 161 dias e a variação final da intensidade de corrosão.....	176
<b>Figura 5.58</b>	Profundidade de carbonatação x resistência à compressão.....	176
<b>Figura 5.59</b>	Correlação entre a profundidade de carbonatação e a resistência à compressão....	177
<b>Figura 5.60</b>	Teor de íons cloreto livres: (a) efeito da relação água/aglomerante e (b) efeito do teor de adição de sílica ativa.....	179

<b>Figura 5.61</b>	Teor de íons cloreto livres: interação entre a relação água/aglomerante e teor de adição de sílica ativa.....	182
<b>Figura 5.62</b>	Correlação entre o teor de cloretos livres e o tempo para despassivação da armadura.....	182
<b>Figura 5.63</b>	Difratogramas obtidos para os teores de 0%, 10% e 20% de sílica ativa com relação água/aglomerante 0,55. ....	183
<b>Figura 5.64</b>	Teor de hidróxido de cálcio determinado por KULAKOWSKI (2002).....	184
<b>Figura 5.65</b>	Relação entre o teor de hidróxido de cálcio, determinado por KULAKOWSKI (2002), e a (a) resistência à compressão, (b) absortividade, (c) profundidade de carbonatação, (d) variação final da intensidade de corrosão desencadeada por carbonatação e (e) variação da intensidade de corrosão no final do ensaio acelerado por cloretos. ....	186
<b>Figura 5.66</b>	Taxa de absorção de água.....	189
<b>Figura 5.67</b>	Taxa de absorção x resistência à compressão. ....	191
<b>Figura 5.68</b>	Taxa de absorção x profundidade de carbonatação. ....	192
<b>Figura 5.69</b>	Taxa de absorção x variação final da intensidade de corrosão no ensaio acelerado por carbonatação. ....	193
<b>Figura 5.70</b>	Taxa de absorção x teor de cloretos livres. ....	193
<b>Figura 5.71</b>	Taxa de absorção x tempo para despassivação da armadura no ensaio acelerado por íons cloreto.....	194
<b>Figura 5.72</b>	Taxa de absorção x variação da intensidade de corrosão no final do ensaio acelerado por íons cloreto.....	195
<b>Figura 5.73</b>	Resultados observados e previstos pelo modelo ajustado para resistência capilar. .	196

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1</b>	Fontes de cloretos no concreto. ....	16
<b>Tabela 2.2</b>	Valores críticos para a despassivação da armadura por cloretos (ALONSO et al., 2000). ....	22
<b>Tabela 5.3</b>	Critérios de avaliação da taxa de corrosão (ALONSO e ANDRADE, 1990). ....	33
<b>Tabela 5.4</b>	Critérios de avaliação do potencial de corrosão segundo a ASTM C-876 (1991). ....	35
<b>Tabela 3.1</b>	Relação entre a produção da liga metálica e captação da sílica ativa (DASTOL, 1984). ....	39
<b>Tabela 3.2</b>	Composição química típica da sílica ativa, conforme a liga metálica produzida (AİTCIN et al., citados por MEHTA, 1986). ....	42
<b>Tabela 4.1</b>	Variáveis independentes. ....	60
<b>Tabela 4.2</b>	Planejamento do experimento. ....	62
<b>Tabela 4.3</b>	Características químicas do cimento CP V-ARI. ....	64
<b>Tabela 4.4</b>	Características físico-mecânicas do cimento CP V-ARI. ....	65
<b>Tabela 4.5</b>	Características do agregado miúdo. ....	65
<b>Tabela 4.6</b>	Características do agregado graúdo. ....	66
<b>Tabela 4.7</b>	Composição química e características físicas da sílica ativa. ....	66
<b>Tabela 4.8</b>	Propriedades do aditivo superplastificante. ....	67
<b>Tabela 4.9</b>	Propriedades mecânicas da armadura utilizada. ....	68
<b>Tabela 4.10</b>	Traços utilizados para a produção dos concretos (em massa). ....	70
<b>Tabela 4.11</b>	Corpos-de-prova moldados nas misturas de concreto realizadas. ....	73
<b>Tabela 4.12</b>	Programação da realização das misturas. ....	73
<b>Tabela 4.13</b>	Variáveis independentes e seus níveis – ensaio de absorção de água. ....	86
<b>Tabela 4.14</b>	Variáveis de resposta – ensaio de absorção de água. ....	86
<b>Tabela 4.15</b>	Matriz experimental para o ensaio de absorção de água. ....	86
<b>Tabela 4.16</b>	Traços de concreto para o ensaio de absorção de água. ....	87
<b>Tabela 5.1</b>	Parâmetros obtidos para o modelo do tempo de início da despassivação. ....	97
<b>Tabela 5.2</b>	Análise de variância do modelo obtido para o tempo de início da despassivação. ....	97
<b>Tabela 5.3</b>	Parâmetros obtidos para o modelo da variação de potencial com o tempo. ....	102
<b>Tabela 5.4</b>	Análise de variância do modelo obtido para a variação do potencial com o tempo. ....	103
<b>Tabela 5.5</b>	Parâmetros obtidos para o modelo do tempo de início da despassivação. ....	111
<b>Tabela 5.6</b>	Análise de variância do modelo obtido para o tempo de início da despassivação. ....	112
<b>Tabela 5.7</b>	Parâmetros obtidos para o modelo da variação da intensidade de corrosão com o tempo. ....	116
<b>Tabela 5.8</b>	Análise de variância do modelo obtido para o tempo de início da despassivação. ....	117
<b>Tabela 5.9</b>	Acréscimo no tempo de deterioração proporcionado pela sílica ativa. ....	123



<b>Tabela 5.10</b>	Perda de massa eletroquímica – corrosão acelerada por cloreto.....	124
<b>Tabela 5.11</b>	Perda de massa e taxa de corrosão gravimétrica.....	129
<b>Tabela 5.12</b>	Análise de variância (ANOVA) para perda de massa gravimétrica.....	130
<b>Tabela 5.13</b>	Parâmetros obtidos para o modelo da variação final do potencial de corrosão. ....	141
<b>Tabela 5.14</b>	Análise de variância do modelo obtido para a variação final do potencial de corrosão. ....	142
<b>Tabela 5.15</b>	Parâmetros obtidos para o modelo da variação final da intensidade de corrosão. ...	148
<b>Tabela 5.16</b>	Análise de variância do modelo obtido para a variação final da intensidade de corrosão. ....	148
<b>Tabela 5.17</b>	Perda de massa eletroquímica – corrosão acelerada por carbonatação.....	152
<b>Tabela 5.18</b>	Perda de massa e taxa de corrosão gravimétrica – corrosão acelerada por carbonatação. ....	157
<b>Tabela 5.19</b>	Análise de variância (ANOVA) para perda de massa gravimétrica.....	159
<b>Tabela 5.20</b>	Resultados de resistência à compressão aos 28 dias. ....	166
<b>Tabela 5.21</b>	Parâmetros obtidos para o modelo de resistência à compressão. ....	167
<b>Tabela 5.22</b>	Análise de variância do modelo obtido para a resistência à compressão. ....	167
<b>Tabela 5.23</b>	Profundidade de carbonatação.....	170
<b>Tabela 5.24</b>	Parâmetros obtidos para o modelo de carbonatação. ....	171
<b>Tabela 5.25</b>	Análise de variância do modelo obtido para a carbonatação.....	172
<b>Tabela 5.26</b>	Teor de cloretos livres, em relação à massa de concreto.....	178
<b>Tabela 5.27</b>	Análise de variância para o teor de íons cloreto. ....	178
<b>Tabela 5.28</b>	Comparação múltipla de médias. ....	180
<b>Tabela 5.29</b>	Taxa de absorção – $S$ ( $\text{mm/h}^{1/2}$ ) $\times 10^{-2}$ .....	187
<b>Tabela 5.30</b>	Resistência capilar – $M$ ( $\text{h/m}^2$ ).....	187
<b>Tabela 5.31</b>	Parâmetros calculados para o modelo da taxa de absorção. ....	188
<b>Tabela 5.32</b>	Análise de variância para o modelo da taxa de absorção.....	188
<b>Tabela 5.33</b>	Comparação múltipla de médias para a taxa de absorção. ....	190
<b>Tabela 5.34</b>	Parâmetros calculados para o modelo da resistência capilar. ....	195
<b>Tabela 5.35</b>	Análise de variância para o modelo de resistência capilar. ....	196

## RESUMO

Os crescentes problemas relacionados à durabilidade das estruturas de concreto armado, além dos elevados custos de manutenção e recuperação, têm incentivado os tecnologistas de concreto a buscarem alternativas para melhorar a qualidade do concreto e, conseqüentemente, aumentar a vida útil das estruturas. Nesse sentido, adições minerais como a sílica ativa, que é um subproduto das indústrias de processamento de ligas de silício, vêm sendo utilizadas, apresentando como resultado inúmeros benefícios às propriedades do concreto. Contudo, existem algumas questões ainda não esclarecidas em relação ao efeito da sílica ativa na corrosão das armaduras. Por um lado, a sílica ativa, em função do reduzido tamanho e da elevada reatividade pozolânica, promove a densificação da matriz cimentante, proporcionando uma diminuição significativa da porosidade e permeabilidade da pasta de cimento, o que pode impedir ou retardar o ingresso dos agentes agressivos desencadeadores do processo corrosivo. Por outro, por reagir com o hidróxido de cálcio produzido na hidratação do cimento e diminuir a alcalinidade do concreto pode acelerar a despassivação da armadura. Dessa forma, o presente trabalho tem por objetivo avaliar o efeito da sílica ativa na corrosão da armadura desencadeada tanto por íons cloreto como por carbonatação, através da técnica de resistência de polarização, em concretos com relações água/aglomerante na faixa de 0,40 a 0,70 e teores de sílica ativa variando de 0% a 20%. Paralelamente foi avaliada a influência da sílica ativa na absorvidade, resistência à compressão, profundidade de carbonatação e no teor de cloretos. Os resultados indicaram que, no caso da corrosão desencadeada por carbonatação, o efeito da sílica ativa depende do teor utilizado. Até 10% de adição, a sílica ativa não altera a resistência à corrosão, podendo, ainda, apresentar um efeito favorável quando utilizada em teor inferior a esse limite, enquanto que para teores maiores que 10% aumenta o risco de corrosão da armadura por carbonatação do concreto. No entanto, com exceção da profundidade de carbonatação, independente do teor utilizado, a sílica ativa apresenta favorável influência na resistência à corrosão desencadeada por íons cloreto e nos demais parâmetros analisados.

## ABSTRACT

The spread of problems related to the durability of reinforced concrete structures have incited researches on alternatives to improve the quality of concrete and increase its service life . One of these alternatives, which has presented numerous benefits to concrete properties, is mineral admixtures like silica fume, a by product of the silicon alloy industry. However, there are still some questions to be cleared about the effects of silica fume into steel reinforcement corrosion. For one side, silica fume, due to its very small size and high pozzolanic reaction, contributes to the binder matrix denseness. This effect is positive as it diminishes substantially the permeability of the cement paste and prevents corrosion. For the other side, the effect of its chemical reaction with calcium hydroxide produced during cement hydration is a negative effect as the alkalinity reduction can cause steel reinforcement depassivation. The present research aims at evaluating the effect of silica fume admixture into steel reinforcement corrosion resistance caused either by chloride ions and carbonation. The polarisation resistance method was used to measure such effect on concrete samples with water/binder ratios varying from 0,40 to 0,70 and silica fume content varying from 0% to 20%. Also, the effect of silica fume admixture into concrete performance was analysed in relation to sorptivity, compressive strength, carbonation depth, free chloride content. Considering corrosion caused by carbonation, the results indicated that the effect of silica fume admixture depends on its content. Silica fume contents down to 10% do not alter steel reinforcement corrosion resistance, furthermore, the effects are even better for lower contents. However, if contents surpass 10% they increase the likelihood of corrosion. Except for carbonation depth, and independently of content, silica fume has shown favourable effects on corrosion resistance caused by chloride ions and on the other parameters analysed.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA

O concreto de cimento Portland é o material estrutural mais versátil e de maior utilização na construção civil, com consumo mundial, segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), da ordem de 5,5 milhões de toneladas por ano. O comportamento mecânico satisfatório e um relativo baixo custo, bem como a facilidade de sua execução e adequação a formas variadas, são as principais razões para o seu amplo e diversificado uso.

No entanto, apesar de o concreto ser o material de construção mais utilizado no mundo e apresentar muitas vantagens como material estrutural, inúmeros problemas têm sido detectados em relação à sua durabilidade. Nos últimos anos, diversos trabalhos no Brasil e no exterior (ARANHA, 1994; ANDRADE, 1997; MEHTA, 1993; WAYERS, 1998; STEWART e ROSOWSKI, 1998; entre outros) vêm sendo publicados sobre manifestações patológicas em concretos e deterioração prematura de estruturas, principalmente devido à corrosão das armaduras no concreto.

No Brasil, CARMONA e MAREGA, citados por HELENE (1993), analisaram um extenso número de casos de patologias em diferentes regiões do país, demonstrando que a corrosão de armaduras ocorreu em 27% dos casos investigados. DAL MOLIN (1988), em seu trabalho de mestrado, concluiu que, no Estado do Rio Grande do Sul, a incidência de corrosão de armaduras em edificações, quando analisada segundo a gravidade e implicações da manifestação patológica na segurança estrutural, é da ordem de 40% das patologias encontradas. Na Região Amazônica, ARANHA (1994) observou que a corrosão das armaduras é o tipo de patologia de maior incidência, relatando que 45% das obras examinadas foram atacadas por corrosão. NINCE (1996), em um trabalho realizado em Brasília, mostrou que a corrosão das armaduras corresponde a 18% das manifestações patológicas avaliadas na região centro-oeste. Da mesma forma, em levantamento de manifestações patológicas realizado no Estado de Pernambuco, ANDRADE (1997) constatou que 64% dos problemas patológicos analisados são devidos à corrosão das armaduras do concreto.

A deterioração de inúmeras obras devido à corrosão da armadura é, desta forma, um dos principais problemas associados à durabilidade do concreto e, tanto a gravidade do problema, como a frequência de ocorrência de corrosão da armadura, evidenciam a

necessidade de buscar soluções que contribuam para minimizar a incidência e evolução do processo corrosivo nas estruturas de concreto.

Os danos causados às estruturas de concreto, resultantes da corrosão da armadura, além de se manifestarem na forma de expansão, fissuração e lascamento do concreto de cobertura, podem promover um comprometimento estrutural do concreto armado, devido à perda da aderência entre a armadura e o concreto e à redução da área útil de aço. Por esta razão MEHTA (1993) considera a corrosão de armaduras um dos mais sérios problemas de falta de durabilidade.

Nos últimos anos, o fenômeno da corrosão de armaduras passou a ser um problema econômico de grande importância na área da construção civil. ANDRADE e GONZÁLEZ (1988) mencionam pesquisas realizadas na Europa, Golfo Pérsico e, principalmente, nos Estados Unidos que questionam a vida útil das estruturas de concreto com problemas de corrosão de armadura com somente 5 a 10 anos de idade, quando foram projetadas para uma vida útil de 50 a 100 anos. PEREIRA (2001), citando GU et al., coloca que estudos realizados nos Estados Unidos pelo *Strategic Highway Research Program* indicam que até 1996 foram gastos aproximadamente 20 bilhões de dólares na recuperação de pontes com problema de corrosão. No Brasil, conforme estatística citada por TEIXEIRA (1998), no ano de 1994 foram investidos cerca de 10 bilhões de dólares em obras de recuperação e reforço estrutural. Dessa forma, o grande volume de investimentos requerido para realização de reparos em estruturas comprometidas resulta em um inevitável esforço para garantir a qualidade e durabilidade de novas estruturas, bem como a durabilidade das estruturas existentes, após uma intervenção.

Até pouco tempo atrás as questões relativas à durabilidade do concreto armado eram consideradas de forma mais restrita, visto que o desenvolvimento da tecnologia do concreto concentrava-se basicamente na obtenção de maiores resistências mecânicas. Todavia, o crescente número de manifestações patológicas decorrentes do envelhecimento precoce das estruturas de concreto armado, além dos elevados custos envolvidos na sua manutenção e recuperação, tem provocado uma mudança nesse comportamento e incentivado os tecnólogos de concreto a buscarem alternativas para melhorar a qualidade do concreto e, conseqüentemente, aumentar a vida útil das estruturas.

Nesse sentido, a utilização de pozolonas como a sílica ativa, que é um subproduto oriundo da produção de ferro-silício e silício metálico, vem sendo pesquisada, apresentando, como resultado, inúmeros benefícios às propriedades do concreto, tanto em relação ao comportamento mecânico como em relação à durabilidade.

A sílica ativa, por apresentar elevada finura e ser constituída basicamente por sílica amorfa, reage rapidamente com o hidróxido de cálcio formado na hidratação do cimento, formando silicato de cálcio hidratado adicional. Como resultado, obtém-se o refinamento da estrutura de poros e a densificação da matriz cimentante do concreto. O aumento da qualidade do concreto pela adição de sílica ativa promove, dessa forma, a obtenção de estruturas com melhor desempenho, mais resistentes à ação de agentes agressivos, sendo uma alternativa capaz de contribuir de maneira efetiva para aumentar a vida útil das estruturas.

Contudo, existem algumas questões ainda não esclarecidas no meio técnico em relação ao fenômeno da corrosão da armadura em concretos com sílica ativa. Por um lado, a sílica ativa por reagir com o hidróxido de cálcio produzido na hidratação do cimento e diminuir o pH da solução dos poros pode acelerar a despassivação da armadura. A redução da alcalinidade, além de facilitar a difusão de CO<sub>2</sub>, aumentando a profundidade de carbonatação (YAMATO et al., 1989; SCISLEWSKI e WÓJTOWICZ, 1996; entre outros), pode diminuir a capacidade de fixação de íons cloreto (ARYA et al., 1990; MANGAT e MOLLOY, 1995, entre outros), potencializando o efeito dos dois principais desencadeadores do processo de corrosão. Por outro lado, é indiscutível que a adição de sílica ativa no concreto, em função do reduzido tamanho (cem vezes menor que o grão de cimento) e da reação pozolânica, promove a densificação da matriz cimentante, proporcionando uma diminuição significativa da porosidade e permeabilidade do concreto (MALHOTRA et al., 1992; AİTCIN, 2000, entre outros). Sendo assim, a "barreira física" propiciada pelo refinamento de poros da matriz dificulta o ingresso de agentes agressivos ao concreto, retardando, portanto, a iniciação e propagação do processo de corrosão (WOLSIEFER, 1991; RASHEEDUZZAFAR et al., 1992; TALIB et al., 1993; EL-SAYED e EL-SABBAGH, 1997; TÜRKMEN et al., 2002; DOTTO et al., 2003, entre outros).

É consenso na literatura que a permeabilidade do concreto é um fator determinante na capacidade do concreto em suportar o efeito destrutivo dos agentes de degradação. Além da permeabilidade, a resistividade elétrica do concreto e o coeficiente de difusão de oxigênio são parâmetros de extrema importância na resistência à corrosão da armadura. Inúmeros estudos comprovam que a sílica ativa, por refinar a estrutura de poros da matriz cimentante, diminui a permeabilidade do concreto (WOLF, 1991; FORNASIER, 1995, entre outros), aumenta significativamente a resistividade (DOTTO et al., 2003; GJØRV, 1995; ABREU, 1997, entre outros), além de reduzir a difusão de oxigênio (HASSAN, 2000; KHAN e LYNSDALE, 2002).

DOTTO et al. (2003) verificaram que a adição de 6% e 12% de sílica ativa aumenta, respectivamente, 2,5 e 5 vezes a resistividade elétrica do concreto, sugerindo que a adição de sílica ativa pode proteger a armadura contra a corrosão.

Já KULAKOWSKI (2002) constatou que a adição de sílica ativa aumenta a profundidade de carbonatação de concretos com relação água/aglomerante maior que 0,50, o que pode representar um maior risco de ocorrência de corrosão da armadura.

O balanço entre os *efeitos da densificação da microestrutura e da redução do pH proporcionados pela sílica ativa* é variável e depende de uma série de fatores, tais como teor de sílica ativa, relação água/aglomerante, condições de cura e proporcionamento dos materiais, os quais possuem uma influência determinante no conteúdo de hidróxido de cálcio e na permeabilidade do concreto (MALHOTRA et al. 1992). Desse modo, diante das inúmeras variáveis que intervêm na despassivação da armadura e propagação do fenômeno da corrosão, a questão chave é: *Qual o efeito predominante da sílica ativa no tempo para a despassivação e na velocidade de corrosão da armadura?*

Essa questão motivou o desenvolvimento do presente trabalho, que visa contribuir para elucidar a influência da sílica ativa no fenômeno da corrosão da armadura, desencadeada tanto por íons cloreto como pela carbonatação do concreto.

Ainda, embora recentes publicações abordem a questão da durabilidade de concretos com sílica ativa (DOTTO et al., 2003; KHAN e LYNSDALE, 2002; KULAKOWSKI, 2002; HOFFMANN, 2001; CABRAL, 2000; SEIDLER, 1999; entre outros), poucas informações se tem a respeito da influência da sílica ativa no desenvolvimento da corrosão das armaduras, principalmente em relação ao processo desencadeado por carbonatação. Esse fato evidencia a necessidade da realização de ensaios que possibilitem avaliar o comportamento da corrosão em concretos com sílica ativa, de forma a contribuir para o avanço do conhecimento da sílica ativa sob o ponto de vista da durabilidade das estruturas de concreto armado, bem como estabelecer a melhor aplicação do material em questão.

## **1.2 OBJETIVOS**

A presente pesquisa tem como objetivo geral avaliar a influência da adição de sílica ativa na corrosão da armadura, desencadeada por íons cloreto e por carbonatação, em concretos com diferentes relações água/cimento e diferentes teores de adição de sílica ativa.

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- verificar a influência do teor de adição de sílica ativa e da relação água/aglomerante na corrosão da armadura desencadeada pela ação de íons cloretos;
- verificar a influência do teor de adição de sílica ativa e da relação água/aglomerante na corrosão da armadura desencadeada pela carbonatação do concreto;
- identificar interações entre a relação água/aglomerante, a adição de sílica ativa e a corrosão da armadura;
- avaliar o comportamento da corrosão de armaduras através de diferentes técnicas eletroquímicas (potencial de corrosão e resistência de polarização);
- verificar a influência do teor de sílica ativa e da relação água/aglomerante no teor de cloretos livres;
- verificar a influência do teor de sílica ativa e da relação água/aglomerante na profundidade de carbonatação;
- verificar a relação entre a corrosão da armadura desencadeada por carbonatação e a profundidade de carbonatação;
- verificar a relação entre a resistência à compressão dos concretos estudados e a corrosão da armadura;
- verificar a relação entre a corrosão da armadura e a taxa de absorção capilar.

### **1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA**

O presente trabalho está estruturado em seis capítulos, conforme descrito a seguir.

No *primeiro capítulo* são apresentadas a relevância e justificativa da realização da pesquisa, destacando-se os objetivos a serem atingidos, bem como a estrutura e as limitações do trabalho.

O *segundo capítulo* apresenta uma breve revisão sobre a corrosão das armaduras no concreto, onde são abordados aspectos relativos à passivação do aço no concreto, ao mecanismo da corrosão eletroquímica e aos principais fatores desencadeadores da corrosão – íons cloreto e carbonatação, bem como às técnicas eletroquímicas para avaliação da corrosão, particularmente resistência de polarização e potencial de corrosão.

No *terceiro capítulo* abordam-se os principais aspectos relacionados à sílica ativa no que diz respeito a sua obtenção, características químicas e físicas, princípio de atuação no concreto e o seu efeito na resistência à compressão e na corrosão das armaduras.



O *quarto capítulo* apresenta o programa experimental, onde se descreve as variáveis independentes e de resposta (dependentes), a caracterização dos materiais utilizados na pesquisa, o planejamento e a metodologia dos ensaios realizados.

No *quinto capítulo* encontram-se a apresentação, a análise e a discussão dos resultados obtidos no programa experimental.

Finalmente, no *sexto capítulo* são apresentadas as conclusões da pesquisa e algumas sugestões para futuros trabalhos.

#### **1.4 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA**

Tendo em vista os vários parâmetros que influenciam na corrosão das armaduras, conforme colocado na revisão bibliográfica, e a impossibilidade de abordá-los simultaneamente em um único programa experimental, em função da abrangência do trabalho e da limitação de recursos financeiros, tornou-se necessário limitar o número de variáveis a serem consideradas na avaliação experimental. A delimitação da pesquisa teve como princípio considerar os principais fatores que possam interagir com o efeito da sílica ativa, objeto do presente trabalho.

Dessa forma, este estudo restringe-se ao efeito da relação água/aglomerante, do teor de adição de sílica ativa e do agente agressivo desencadeador do processo corrosivo (íons cloreto e  $\text{CO}_2$ ), tal como apresentado no capítulo 4. O teor de adição de sílica ativa é a variável principal do estudo. A relação água/aglomerante foi incluída por poder interagir com a sílica ativa, sendo importante a avaliação do efeito combinado desse fator e a sílica ativa. A despassivação da armadura por íons cloreto e por carbonatação foi considerada por apresentarem efeitos diferenciados na corrosão da armadura, sendo essencial estabelecer a influência desses efeitos na armadura de concretos com adição sílica ativa.

Dos fatores não considerados no programa experimental, cabe ressaltar os listados a seguir.

- Tipo de cimento - como o objetivo principal da pesquisa é avaliar o efeito das adições de sílica ativa na corrosão da armadura, optou-se por utilizar apenas o cimento CP V-ARI, por ser isento de adições pozolânicas.
- Cobrimento – foi estabelecido em 15 mm, tomando-se como referência o valor estabelecido na NBR6118/78 para vigas e pilares (concreto revestido, no interior de edifícios).
- Temperatura e umidade relativa – a temperatura foi fixada em  $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$  e a umidade relativa em  $(70 \pm 5)\%$ , conforme justificado capítulo 4.

- Tipo de cura – para todos os corpos-de-prova adotou-se a cura úmida por 28 dias.
- Tipo de aço – utilizaram-se barras de aço tipo CA-60, com 5 mm de diâmetro.
- Concentração de CO<sub>2</sub> na câmara de carbonatação – os ensaios foram realizados em câmara de carbonatação acelerada com concentração de CO<sub>2</sub> ≥ 50%.
- Solução agressiva de cloretos – foi utilizada solução de 3,5% de NaCl.

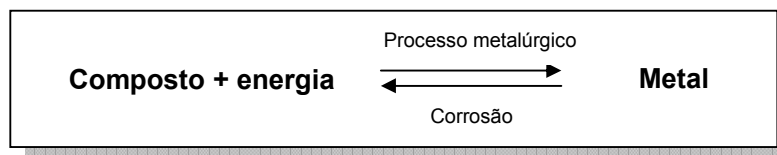
## 2 CORROSÃO DA ARMADURA EM CONCRETO

Diversos pesquisadores já abordaram com profundidade a problemática da corrosão das armaduras em concreto armado (TUUTTI, 1982; BROOMFIELD, 1997; NEPOMUCENO, 1992; HELENE, 1993; FIGUEIREDO, 1994; BAUER, 1995; ISAIA, 1995; MONTEIRO, 1996; TEIXEIRA, 1998; CASCUDO, 2000; CABRAL, 2000; entre outros), contando-se, portanto, com ampla revisão do conhecimento nessa área. Dessa forma, no presente trabalho o assunto é tratado de forma sucinta, com o simples intuito de contextualizar o tema de pesquisa abordado.

### 2.1 GENERALIDADES

GENTIL (1996) define corrosão como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente aliada ou não a esforços mecânicos. Como consequência da interação entre o material e o meio originam-se alterações prejudiciais indesejáveis que tornam o material inadequado para o uso.

A maioria dos metais, com exceção de alguns metais mais nobres, como o ouro, que pode ocorrer no estado elementar, encontra-se na natureza sob a forma de compostos (óxidos e sulfetos metálicos), considerados termodinamicamente estáveis por apresentarem conteúdo energético (energia de Gibbs) inferior ao dos metais. A extração do metal a partir de seus minérios requer a aplicação de uma certa quantidade de energia, que aumenta o nível energético do material final. Com um nível de energia superior, o metal tende a regressar ao seu estado original através de uma reação espontânea com líquidos ou gases do meio ambiente, caracterizando o processo de corrosão (ANDRADE, 1992). Dessa forma, GENTIL (1996) coloca que, em alguns casos, pode-se admitir a corrosão como o inverso do processo metalúrgico, sendo muito freqüente a semelhança entre o produto de corrosão de um metal e o minério do qual foi originalmente extraído.



Em se tratando da deterioração do aço, basicamente são dois os processos de corrosão que podem se desenvolver:

- Oxidação direta → é uma reação gás-metal, onde forma-se uma película uniforme e contínua de óxido de ferro. Segundo WEXLER e WOLYNEC, citados por HELENE (1986), este processo é bastante lento à temperatura ambiente e não provoca alteração significativa do metal, a não ser que existam na atmosfera gases muito agressivos.

- Corrosão eletroquímica → ocorre como resultado da formação de uma pilha eletroquímica, com reações de oxidação, reações de redução e a circulação de íons através de um eletrólito, formando-se sobre a superfície do metal zonas anódicas (reação de oxidação) e zonas catódicas (reação de redução) (HELENE, 1993).

O mecanismo de corrosão do aço no concreto está fundamentado nos princípios da corrosão eletroquímica, que só ocorre quando existe um eletrólito, uma diferença de potencial e a presença de oxigênio, podendo ser acelerada por agentes agressivos contidos ou absorvidos pelo concreto, conforme apresentado nos itens seguintes.

No contexto da engenharia civil as conseqüências da corrosão estão relacionadas à redução da seção transversal da armadura, com decréscimo da resistência e utilidade, à fissuração e/ou manchamento do concreto e à perda de aderência entre o aço e o concreto, afetando a segurança e estabilidade das estruturas (ANDRADE e ALONSO, 2001).

## **2.2 PROTEÇÃO DO AÇO ATRAVÉS DO CONCRETO**

O concreto possui uma característica de grande importância para a construção, onde além de apresentar um comportamento mecânico satisfatório, é capaz, desde que bem executado, de proteger a armadura contra a corrosão causada pelo meio ambiente.

Essa proteção se deve, em primeiro lugar, à natureza alcalina da solução dos poros, responsável por manter a armadura na condição de passividade enquanto o concreto apresentar uma adequada qualidade, sem fissurar ou sofrer a ação de agentes agressivos externos. O hidróxido de cálcio formado na hidratação dos silicatos de cálcio ( $C_3S$  e  $C_2S$ ) e, principalmente, os hidróxidos de sódio e potássio, originários dos álcalis do cimento, conferem ao concreto um pH alcalino, o qual mantém-se na faixa de 12,5 a 13,5 (CASTRO et al., 1998). Nessas condições se forma espontaneamente uma película compacta e contínua, constituída de um filme de óxidos estáveis e aderentes à superfície do metal, que mantém a armadura passivada, mesmo em presença de umidade (ANDRADE, 1992).

Segundo SAGOE-CRENTSIL e GLASSER (1989) acredita-se que a formação do filme passivo ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) na superfície da armadura ocorre rapidamente, durante os estágios iniciais da hidratação do cimento, com uma espessura que varia de  $10^{-3}$  a  $10^{-1}$   $\mu\text{m}$ .

HELENE (1993), citando SATO<sup>1</sup>, coloca que a teoria de passivação mais aceita é a da formação de um filme transparente, fino, aderente e estável, composto por duas camadas de óxido, sendo uma interna onde predomina o  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  e outra externa de  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ . No entanto, o autor salienta que não há um consenso sobre a estrutura do filme passivo, que apresenta difícil determinação e é altamente polarizado anodicamente, o que protege o metal da corrosão eletroquímica.

Uma segunda teoria, proposta por PAGE, citado por KITOWSKI e WHEAT (1997), refere-se à formação de uma camada rica em hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) que adere à superfície do metal, protegendo o acesso direto do oxigênio, minimizando a reação catódica de redução. No entanto, GLASS et al. (2001), ao analisarem a interface aço/concreto por microscopia de elétrons retroespalhados, verificaram que não há a formação de uma camada contínua de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  na interface, onde foi evidenciada também a presença de C-S-H e grãos anidros. Os autores ainda ressaltam que a quantidade de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  na interface aço/pasta é menor do que a observada na interface agregado/pasta. Da mesma forma, CONSTANTINOU e SCRIVENER (1997), ao caracterizarem a interface aço/concreto antes da carbonatação, concluíram que embora a porosidade na zona de transição aço/pasta seja maior, não foi encontrada grande quantidade de CH como na interface agregado/pasta, contrariando a teoria de que em zonas mais porosas o crescimento do CH é favorecido.

KITOWSKI e WHEAT (1997) mencionam uma terceira teoria apresentada por LEEK e POOLE, onde o aço é protegido por uma estrutura interfacial dupla constituída por uma camada mais interna composta por hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) e outra mais externa que consiste em  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  com inclusões de C-S-H.

Ainda, BASILIO (1972) considera que a película de passivação pode ser resultante da combinação da ferrugem superficial da armadura ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) com o hidróxido de cálcio da pasta de cimento, formando ferrato de cálcio.

KURTIS e MEHTA (1997) colocam que muitas pesquisas na área da corrosão das armaduras são conduzidas em solução aquosa que simulam a água contida nos poros do concreto, extrapolando-se os resultados obtidos para o comportamento do aço imerso no concreto. Os autores afirmam que essa abordagem negligencia o efeito dos compostos

---

<sup>1</sup> SATO, N. **Passivity of metals**. R. P. Frankenthal and J. Kruger, eds. Princeton, Electrochemical Society, 1978.

hidratados de cimento presentes na interface aço/concreto na proteção à armadura, que certamente atuam em conjunto com o filme passivo para proteger a armadura. Nesse sentido, os autores salientam que como o diagrama de Pourbaix<sup>2</sup> indica que o aço em pH elevado permanece passivo em uma ampla faixa de potenciais, muitos pesquisadores o utilizam equivocadamente para explicar a passivação do aço no concreto, assumindo que o pH é o único parâmetro relevante na passivação, sem considerar as limitações do diagrama, o qual é aplicável ao comportamento do aço em solução aquosa e não considera a presença dos compostos minerais na interface.

Segundo BORGARD et al. (1990) existem várias teorias que tentam explicar a formação do filme passivo nos metais. Contudo, os autores evidenciam que poucas pesquisas são realizadas para elucidar os mecanismos da passivação do aço no concreto.

HANSSON (1984) coloca que no estado de passivação a corrosão é limitada pela presença do filme passivo, mas não é nula, e destaca que a taxa de corrosão equivale a aproximadamente 0,1 µm/ano, o que pode ser considerada desprezível.

Além da proteção química, o concreto é capaz de proteger a armadura por atuar como uma “barreira física” que limita a entrada dos agentes agressivos que desencadeiam o processo corrosivo, bem como o acesso dos elementos básicos necessários à existência da corrosão eletroquímica e que desempenham um papel importante na cinética do fenômeno, ou seja água e oxigênio. Segundo HELENE (1993), um revestimento de concreto de alta qualidade garante por “impermeabilidade” a proteção ao aço contra o ataque de agentes corrosivos externos, limitando também o acesso de água e oxigênio. No entanto, CASTRO et al. (1998), citando PAGE e TREADAWAY, colocam que o concreto, devido à sua porosidade e tendência em fissurar, nem sempre atua como uma barreira perfeita e ressaltam que a importância da barreira física, representada pela espessura de revestimento do concreto, está relacionada principalmente à habilidade de preservar a condição de alcalinidade que mantém o aço no estado passivo.

## **2.3 CORROSÃO ELETROQUÍMICA DA ARMADURA**

A armadura pode perder a proteção oferecida pelo concreto (despassivação), geralmente, através da ação de elementos agressivos originários de fontes externas, que atuam sobre o concreto, reduzindo a alcalinidade ou quebrando a película protetora (HELENE, 1993). Segundo FIGUEIREDO (1993), para o caso das armaduras do concreto,

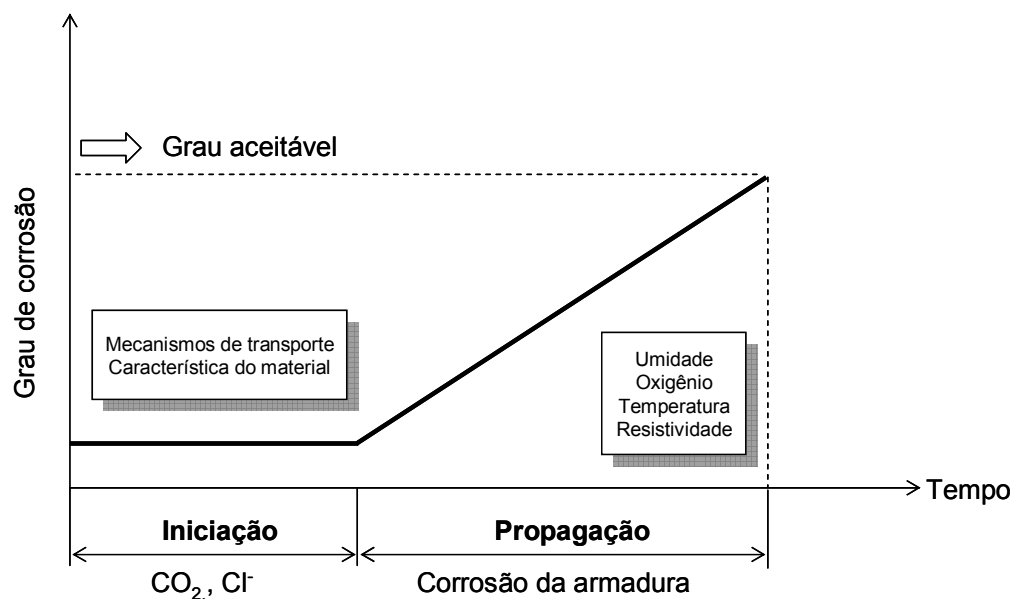
---

<sup>2</sup> Pesquisador belga que construiu o atlas de equilíbrio eletroquímico para a maioria dos metais e suas ligas, que indica as condições que os filmes passivos podem ser formados, em função do pH e do potencial.

os íons cloretos e a carbonatação do concreto são os principais iniciadores da corrosão. Fissuração, execução inadequada, ciclos de molhagem e secagem e atmosferas agressivas são outros fatores que contribuem para a perda da proteção natural ou para a aceleração de um processo corrosivo já iniciado.

De acordo com o modelo clássico de corrosão proposto por TUUTTI (1982), a corrosão ocorre através de fenômenos que se processam em duas etapas distintas: **período de iniciação**, que depende do tempo para ocorrer a despassivação por íons cloretos ou por carbonatação, e o **período de propagação** (deterioração), que depende da taxa de corrosão desenvolvida até alcançar um nível crítico de danos, onde é necessário reparos para que a vida útil de serviço da estrutura não seja atingida (Figura 2.1). A taxa de corrosão no período de propagação irá depender do teor de umidade, que define a quantidade de eletrólito, alterando a resistividade do mesmo, e da disponibilidade de oxigênio, sendo estes os fatores que controlam o processo catódico de formação da hidroxila  $\text{OH}^-$ . Além desses parâmetros, tanto a temperatura, por estimular a mobilidade das moléculas, como o teor de sais dissolvidos, por aumentar a condutividade do eletrólito, influenciam na velocidade de corrosão.

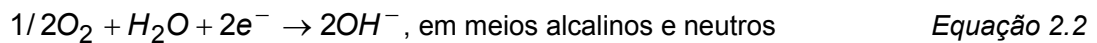
Segundo BAUER (1995), a evolução cronológica do desenvolvimento da corrosão das armaduras definida por TUUTTI (1982) é bastante adequada ao estudo da corrosão, principalmente por subdividir as etapas envolvidas no processo, possibilitando uma melhor definição do fenômeno.



**Figura 2.1** Esquema básico da corrosão do aço no concreto proposto por TUUTTI (1982).

Uma vez despassivada a armadura, seja pela ação dos íons cloreto (item 2.4) ou pela ação da carbonatação (item 2.5), ou ainda pela ação concomitante de ambos os agentes agressivos, a corrosão da armadura ocorre através de um processo eletroquímico, desde que exista um **eletrólito**, uma **diferença de potencial** e **oxigênio**, podendo ou não existir **agentes agressivos** (HELENE, 1993).

O mecanismo da corrosão eletroquímica é caracterizado pela formação de uma célula de corrosão, onde sobre a superfície do metal são geradas duas zonas, sendo uma que atua como ânodo, onde se produz a oxidação do metal (Equação 2.1), liberando elétrons, e outra que atua como cátodo, onde, em função da migração dos elétrons através do metal, acontece a redução do oxigênio dissolvido no eletrólito (Equação 2.2).



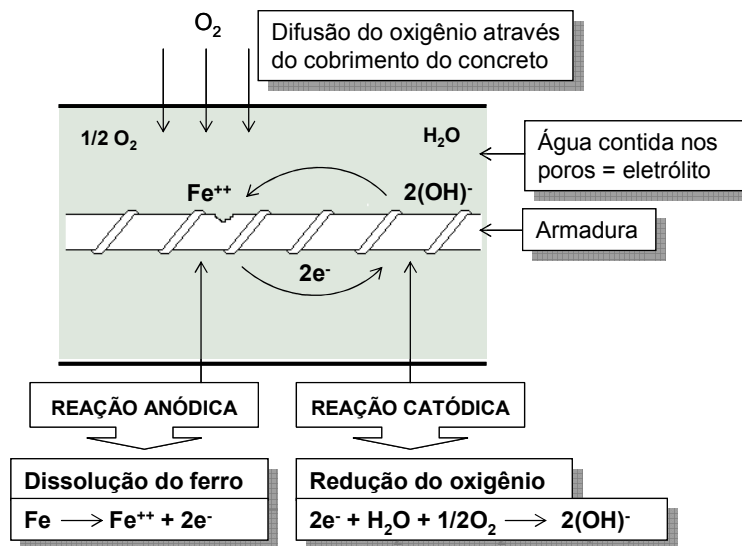
Os íons hidroxila se movem em direção ao ânodo e, após alguns estágios intermediários, combinam com os íons do metal, formando os produtos de corrosão, conforme a Equação 2.3.



Na realidade, as reações são mais complexas, podendo ocorrer em diversas etapas sucessivas (WOLYNEC, citado por CASCUDO; 1997), e os produtos de corrosão são uma gama de óxidos/hidróxidos de ferro (HELENE, 1986). CASCUDO (2000) apresenta as reações envolvidas nas etapas do fenômeno da corrosão das armaduras.

Portanto, a armadura funciona como um eletrodo misto, na qual ocorrem reações anódicas e catódicas, e a solução contida nos poros do concreto é o eletrólito (CEB 152, 1984). A Figura 2.2 apresenta um esquema simplificado da célula de corrosão formada. Qualquer diferença de potencial gerada entre as zonas anódica e catódica acarreta o aparecimento de corrente elétrica e, conforme a magnitude da corrente e o acesso de oxigênio, haverá ou não corrosão da armadura.





**Figura 2.2** Esquema simplificado da célula de corrosão (CEB 152, 1984).

Em relação aos produtos de corrosão, HELENE (1993) coloca que a composição dos mesmos depende de uma série de fatores, destacando-se a temperatura e as condições de exposição.

Segundo RINCÓN et al. (1997), as principais fases dos produtos de corrosão reportadas na literatura são goethita ( $\alpha$ -FeOOH), akaganeíta ( $\beta$ -FeOOH), lepidocrocita ( $\gamma$ -FeOOH) e magnetita ( $Fe_3O_4$ ). Em pesquisa realizada para avaliar a natureza dos produtos de corrosão em climas tropicais, os autores verificaram que nas zonas rurais e urbanas predominou a formação da lepidocrocita e goethita e que em ambientes marinhos prevalece a formação de magnetita e, em algumas estações, de magnetita e akaganeíta.

SINGH et al. (1985), ao avaliarem os produtos de corrosão decorrentes de diferentes condições de exposição, concluíram que as amostras de ambientes rurais e urbanos eram compostas por goethita e lepidocrocita. Já para as amostras de ambientes marinhos foi detectada a presença de magnetita e akaganeíta, além dos compostos goethita e lepidocrocita.

Já GLASSER e SAGOE-CRENTSIL (1989), em análise realizada para verificar a microestrutura e composição mineralógica de produtos de corrosão formados sob condições atmosféricas normais, observaram a formação de uma camada dupla, sendo a interna uma fase densa composta basicamente por magnetita e lepidocrocita e a externa, relativamente porosa, constituída principalmente por goethita.

CASCUDO (2000) verificou que o tipo de ataque influencia bastante a natureza dos compostos dos produtos de corrosão, onde em barras atacadas por cloretos foi observada a presença de diversos compostos, tais como goethita, lepidocrocita, hematita, akaganeíta e erithrossiderita. Já nas barras atacadas por carbonatação o autor observou basicamente a presença da goethita.

MEHTA e MONTEIRO (1994) salientam que a transformação do aço metálico em “ferrugem” provoca um aumento no volume o qual, dependendo do grau de corrosão, pode ser de até 600% do metal original, sendo esse fato a principal causa da expansão e fissuração do concreto. CASCUDO (2000) destaca que a formação de magnetita não implica um aumento de volume tão grande como a formação de goethita e a lepidocrocita.

## **2.4 EFEITO DOS ÍONS CLORETO**

A corrosão da armadura desencadeada por íons cloreto é a principal causa da deterioração prematura das estruturas de concreto armado (ACI 222, 1990; ARYA E NEWMAN, 1990; TALIB et al., 1993; ARYA e XU, 1995; NEVILLE, 1995; KURTIS e MEHTA, 1997; JENSEN et al., 1999; PAPADAKIS, 2000).

Segundo KROPP (1995), dentre as diversas condições de exposição que as estruturas de concreto armado possam ser submetidas durante sua vida útil, a presença de cloretos representa um dos mais complexos e perigosos tipos de ataque, causando sério impacto no desempenho da estrutura.

CASTRO et al (1998) colocam que a situação mais agressiva e comum que pode desencadear a corrosão localizada da armadura é a presença de íons cloreto, sendo outros íons despassivantes, como o sulfato, por exemplo, bem menos freqüentes e perigosos. Conforme comentam GONZÁLEZ et al. (1995), para a previsão da vida útil de estruturas atacadas por íons cloreto, onde há perda seção da armadura de forma localizada, a verificação da profundidade dos pites tem mais importância do que a intensidade de corrosão média normalmente determinada.

A presença de cloretos no concreto pode ser decorrente tanto do meio externo, onde os íons penetram nos poros da estrutura por mecanismos de difusão ou absorção capilar, como proveniente da utilização de materiais contaminados ou aditivos aceleradores de pega (adicionados à massa de concreto), conforme ilustrado na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1** Fontes de cloretos no concreto.

<b>Fontes externas</b>	<b>Cloretos adicionados à massa de concreto</b>
Maresia ou névoa de ambiente marinho	Aditivos aceleradores de pega a base de $\text{CaCl}_2$
Água do mar (zonas de respingo e variação de maré)	Uso de água contaminada no amassamento
Sais de degelo	
Processos industriais	Agregados contaminados
Solos contaminados	
Lavagens com ácido muriático	

BROOMFIELD (1997) salienta que o maior problema por ação de cloretos, na maioria dos países, está relacionado aos ambientes marinhos ou sais de degelo (países frios), no entanto o efeito dos cloretos adicionados à mistura não deve ser negligenciado visto que podem desencadear de forma muito rápida o processo corrosivo, causando conseqüências desastrosas.

Os cloretos estão presentes no concreto de maneiras distintas (TUUTTI, 1982; BYFORS, 1987; ARYA e NEWMAN, 1990; TALIB et al., 1994; KROPP, 1995):

- quimicamente combinados → os íons cloreto combinam com o aluminato tricálcico ( $\text{C}_3\text{A}$ ), principalmente, e com o ferroaluminato tetracálcico ( $\text{C}_4\text{AF}$ ) formando, respectivamente, cloroaluminato de cálcio ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ), conhecido como sal de Friedel, e cloroferrato de cálcio ( $3\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ );
- fisicamente adsorvidos → os íons cloreto adsorvem na superfície dos silicatos hidratados (C-S-H) ou combinam com o C-S-H;
- livres na solução dos poros → cloretos efetivamente capazes de influenciar no processo corrosivo, despassivando a armadura<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> A estabilidade do sal de Friedel é dependente do pH da solução dos poros e da temperatura. A redução da alcalinidade do concreto seja por carbonatação ou adições pozolânicas, aumenta a solubilidade desse composto, disponibilizando cloretos livres na solução dos poros (SURYAVANSHI e SWAMY, 1996). Conforme colocam ARYA e NEWMAN (1990), como os cloretos combinados podem ser solubilizados, todos os tipos de cloretos representam um risco para a corrosão das armaduras.

Segundo TUUTTI (1982), o equilíbrio entre as distintas fases sempre predomina, ou seja, por maior que seja a capacidade do concreto de fixar cloretos, sempre permanece na solução dos poros uma certa quantidade de cloretos livres.

Os íons cloreto provenientes de fontes externas penetram no concreto através da rede contínua de poros da matriz cimentante e da zona de transição pasta/agregado, além de ingressarem à estrutura através de eventuais microfissuras (KROPP, 1995). Segundo o CEB (1992), a estrutura dos poros (tamanho e distribuição), a configuração das fissuras e o grau de saturação dos poros são fatores determinantes no transporte de fluidos e íons agressivos.

De acordo com HELENE (1993), o ingresso dos cloretos no concreto ocorre através dos mecanismos clássicos de penetração de água e transporte de íons, tais como: absorção capilar, difusão iônica, permeabilidade e migração iônica.

No entanto, conforme salienta CASCUDO (2000), *“pode-se afirmar que, na grande maioria dos casos, os mecanismos de transporte dos cloretos presentes no concreto são a **absorção capilar** e a **difusão iônica**. A absorção dá-se numa camada superficial do concreto, geralmente onde ocorre a molhagem e secagem do revestimento pela ação das intempéries; mais para o interior do concreto, onde a presença do eletrólito é mais constante, tem-se basicamente a difusão.”*

Segundo ANDRADE (1993), quando o concreto está completamente saturado os íons cloreto penetram puramente por difusão, devido à diferença de concentração. Entretanto, em concretos parcialmente saturados, os cloretos podem penetrar por absorção e forças de capilaridade.

#### **2.4.1 Mecanismo de despassivação por íons cloreto**

A presença de íons cloreto em quantidade suficiente promove a despassivação da armadura mesmo quando a condição de alcalinidade existe. A ruptura do filme passivo ocorre de forma localizada, através de uma dissolução pontual, o que provoca uma corrosão conhecida por “pites” (ANDRADE, 1992).

A corrosão por “pites” é um tipo de corrosão localizada que se caracteriza pelo ataque de pequenas áreas de uma superfície metálica, enquanto o resto do metal permanece intacto. Ocorre em metais que se passivam, em potenciais bem definidos para um determinado metal/meio, chamado potencial de pite (PANOSSIAN, 1993). Segundo GALVELE (1979), o ataque localizado está relacionado com a existência de heterogeneidades microestruturais no filme óxido, sendo necessária para a sua ocorrência a presença de íons agressivos como o cloreto, por exemplo. O autor coloca que o “pite” se

desenvolve como resultado de uma acidificação localizada que ocorre na interface metal/meio: o metal se dissolve ( $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{++} + 2\text{e}$ ), favorecendo a hidrólise ( $\text{Fe}^{++} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})^+ + \text{H}^+$ ) e, conseqüentemente, aumentando a acidez do meio, o que desestabiliza o filme passivo. Se o meio corrosivo contém sais de ácidos fracos, os prótons produzidos na reação com a água se combinam com o sal, sem alteração do pH. No entanto, se o meio estiver contaminado com ânions de ácidos fortes, como os íons cloreto, esses ânions ( $\text{Cl}^-$ ) não capturam os prótons ( $\text{H}^+$ ), formando uma zona de acidificação localizada, que diminui o pH e despassa o metal (GALVELE, 1979).

LIMA (1990) coloca que o íon cloreto, por apresentar um pequeno raio atômico (3,6 Å), penetra com maior facilidade do que outros íons nas falhas da película passiva. A partir de então, os cloretos dissolvem coloidalmente o filme óxido, rompendo a passividade em pequenas áreas, formando os pites.

Diversos pesquisadores (ARYA e NEWMAN, 1990; KITOWSKI e WHEAT, 1997; KURTIS e MEHTA, 1997; entre outros) são unânimes em afirmar que o mecanismo exato através do qual os íons cloreto destroem a camada passivante da armadura ainda não está bem estabelecido.

No entanto, de acordo com o ACI 222 (1990), existem três teorias modernas para explicar os efeitos dos cloretos na corrosão das armaduras:

(a) *Teoria do filme óxido*: postula que os íons cloreto penetram através dos defeitos ou poros do filme óxido passivante da armadura com muito mais facilidade do que outros íons, como o sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), por exemplo. Alternativamente, os íons cloreto podem dispersar coloidalmente o filme passivo, facilitando sua penetração.

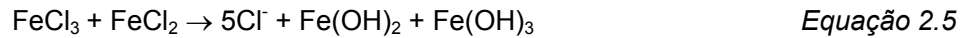
(b) *Teoria da adsorção*: os íons cloreto são adsorvidos na superfície do metal em competição com o oxigênio dissolvido ou com os íons hidroxila. O cloreto promove a hidratação dos íons metálicos facilitando, então, a dissolução do metal.

(c) *Teoria do complexo transitório*: de acordo com esta teoria, os íons cloreto competem com os íons hidroxila para combinarem com os íons ferrosos produzidos pela corrosão. Forma-se então um composto solúvel de cloreto de ferro (complexo transitório), o qual pode se difundir a partir do ânodo, destruindo a camada protetora de  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  e permitindo a continuação do processo de corrosão. A certa distância do eletrodo, o complexo é rompido, precipita-se o hidróxido de ferro e o cloreto fica livre para transportar mais íons ferrosos do ânodo. Como a corrosão não é estancada, mais íons de ferro continuam a migrar dentro do concreto a partir do ponto de corrosão para reagir com o oxigênio e formar óxidos mais altos, que resultam em um aumento de volume quatro vezes

maior, produzindo tensões internas e fissuras no concreto. A formação de cloreto de ferro também leva à fissuração e desagregação do concreto. As Equações 2.4 e 2.5 resumem o fenômeno relatado (HELENE, 1993).



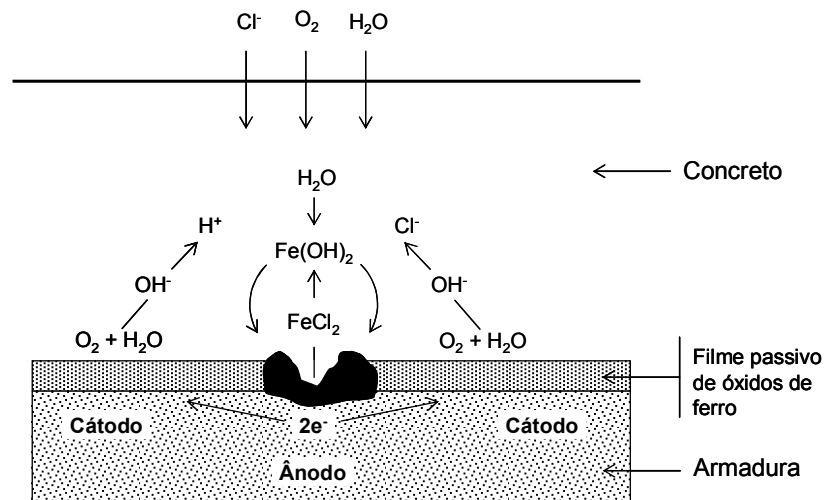
que por hidrólise transforma-se em:



Essas reações continuam sem consumir os íons cloreto, que atuam, dessa forma, como catalisadores do processo (HELENE, 1986).

De acordo com CASCUDO (2000), a primeira teoria parece estar relacionada à iniciação da corrosão enquanto que as outras duas referem-se ao período de propagação. Portanto, o íon cloreto, além de despassivar a armadura, acelera o processo corrosivo visto que participa das reações de corrosão e também aumenta a condutividade do eletrólito. MEHTA e MONTEIRO (1994) ressaltam que quando os cloretos estão presentes, em função da sua higroscopicidade, o concreto tende a conservar mais umidade, diminuindo a resistividade, o que aumenta o risco de corrosão.

A Figura 2.3 mostra uma representação esquemática do processo de corrosão por cloreto.



**Figura 2.3** Esquema do mecanismo de corrosão por cloreto (TREADAWAY, 1988).

Segundo ANDRADE (1992), o tempo necessário para os íons cloreto atingirem a armadura (período de iniciação) depende, principalmente, dos seguintes fatores:

- Concentração de íons cloretos no meio externo;
- Natureza do cátion que acompanha o cloreto;
- Qualidade do concreto – relação água/cimento, tipo de cimento, proporção de aluminato tricálcico, adições minerais, entre outros;
- Temperatura;
- Carbonatação;
- Abertura e quantidade de fissuras.

A influência de tais fatores na capacidade do concreto em resistir ao ingresso de íons cloreto é amplamente abordada por diversos autores (NEPOMUCENO, 1992; HELENE, 1993; FIGUEIREDO, 1994; MONTEIRO, 1996; PETTERSSON e SANDBERG, 1997; PEREIRA, 2001, entre outros). O efeito da sílica ativa, que exerce um papel fundamental no ingresso dos íons cloretos, é colocado no item 3.4.1.1.

#### **2.4.2 Valores críticos de cloretos para a despassivação**

O teor crítico de íons cloreto para despassivar a armadura e desencadear o processo corrosivo depende de vários fatores, tais como tipo de cimento, relação água/cimento, condições de cura, presença de adições, pH da solução dos poros, carbonatação, entre outros. Por esse motivo, muito embora diversas normas ou recomendações estrangeiras apresentem valores de referência para o limite máximo de cloretos, é difícil estabelecer um valor fixo e geral para todos os tipos de concreto (CASTRO et al., 1998).

Diversos autores, relacionados por ALONSO et al. (2000), têm pesquisado o teor crítico de cloretos para despassivar a armadura e, de acordo com os resultados apresentados na Tabela 2.2, parece não haver ainda um consenso no meio científico a respeito desse valor. Segundo os autores, a falta de concordância observada nos vários trabalhos apresentados na literatura é devida, principalmente, aos diversos fatores que influenciam a determinação do teor crítico, tal como afirmado por CASTRO et al., 1998. Além disso, ALONSO et al. (2000) enfatizam que a falta de padronização das técnicas utilizadas para avaliar o teor crítico de cloretos também contribui para a divergência constatada.

GLASS e BUENFELD (1997) verificaram que os valores para o teor limite de cloretos totais, determinados por vários pesquisadores, variam de 0,15 a 2,5 (% em relação à massa de cimento).

Conforme pode ser observado na Tabela 2.2, a maioria dos pesquisadores apresenta os valores limites para a despassivação referentes ao teor de cloretos totais<sup>4</sup> (normalmente em porcentagem em relação à massa de cimento) ou referentes à relação  $Cl^-/OH^-$ <sup>5</sup>. TUUTTI (1982) coloca que, embora os cloretos livres na fase aquosa sejam os potencialmente agressivos para a armadura, é mais conveniente determinar a quantidade de cloretos totais visto que, em função do efeito da carbonatação ou elevação da temperatura, os cloretos combinados podem ficar disponíveis na solução aquosa na forma de cloretos livres, sendo, portanto, mais seguro especificar o valor crítico em relação ao teor de cloretos totais.

REDDY et al. (2002), considerando a relação existente entre o pH e a capacidade de fixação de cloretos, salientam que a melhor forma de expressar o limite de cloretos para despassivar a armadura é sob a forma de cloretos totais. Segundo os autores, com um valor de pH igual a 11, os cloretos combinados passam a ficar disponíveis na solução dos poros, sendo, portanto, um risco para a corrosão da armadura.

Alguns pesquisadores (TANAKA et al., 1981; KAYYALI e HAQUE, 1988; HUSSAIN et al., 1996), considerando o fato de que o teor crítico de cloreto depende do pH da solução dos poros, julgam ser a relação  $Cl^-/OH^-$  um parâmetro mais adequado para determinar o conteúdo crítico de cloretos. Os autores argumentam que o balanço entre a alcalinidade fornecida pelo íon hidroxila e o teor de cloretos livres é o fator que efetivamente controla a manutenção do filme passivante e, portanto, o início do processo corrosivo. ALONSO et al. (2000) argumentam que embora a relação  $Cl^-/OH^-$  pareça ser o parâmetro mais exato a ser considerado na despassivação por cloretos, devido à dificuldade em medir a concentração de íons hidroxila, a determinação do teor de cloretos livres e o teor de cloretos totais é amplamente utilizada para indicar o risco de corrosão.

---

<sup>4</sup> Cloretos totais = cloretos livres + cloretos combinados (ARYA et al., 1990; HUSSAIN et al., 1996, entre outros).

<sup>5</sup> Relação entre o teor de cloretos livres e o teor de íons hidroxila (ARYA e NEWMAN, 1990).

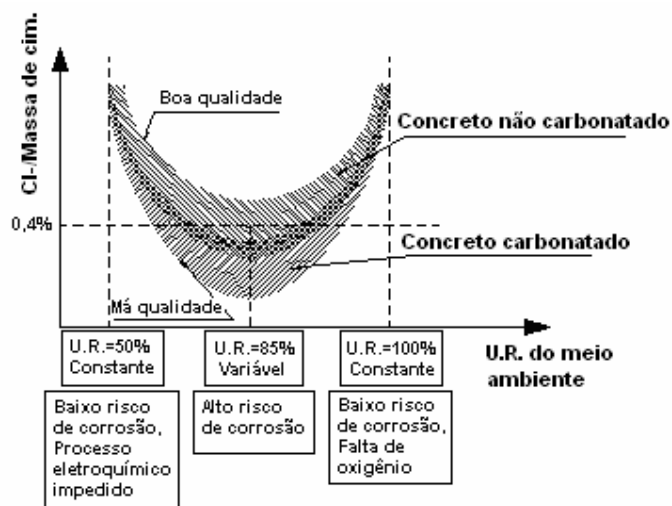


**Tabela 2.2** Valores críticos para a despassivação da armadura por cloretos (ALONSO et al., 2000).

Referência	Valores ou intervalos		
	Cl- livre (%)*	Cl- total (%)*	Cl <sup>-</sup> /OH <sup>-</sup>
Hausmann (1967)			0,60
Gouda (1970)			0,35
Goni e Andrade (1990)			0,25-0,80
Gouda e Halaka (1970)		2,42	
		1,21	
Petersson (1992, 1994, 1996)			2,5-6,0
		0,6-1,8	1,7-2,6
		0,5-1,7	1,7-2,6
			1,8-2,9
Andrade e Page (1986)			0,15-0,69
			0,12-0,44
Hansson e Sorensen (1988)		0,6-1,4	
Lambert et al. (1991)			3,0
Gouda e Halaka (1970)		3,04	
		1,01	
		0,60	
Kayyali e Haque (1995)	1,15		
	0,85		
	0,80		
	0,45		
Hussain et al. (1995)	0,14	0,35	
	0,17	0,62	
	0,22	1,00	
Schiessl e Breit (1996)		0,5-1	
		1-1,5	
		1-1,5	
Thomas et al. (1990)		0,50	
Thomas (1996)		0,70	
		0,65	
		0,50	
		0,20	
Hope e Ip (1987)		0,097-0,19	

\* Porcentagem em relação à massa de cimento.

O CEB (1992) considera que o teor crítico de cloretos depende da qualidade do concreto e da umidade relativa do meio ambiente, conforme apresentado na Figura 2.4.



**Figura 2.4** Variação do teor crítico de cloretos em função da qualidade do concreto e da umidade relativa (CEB, 1992).

Na realidade, diante das inúmeras variáveis que intervêm na despassivação da armadura, a resposta para a questão chave, ou seja, qual a concentração de cloretos livres que efetivamente desencadeará o processo de corrosão ainda não foi estabelecida. HELENE (1993) ainda ressalta que o limite de cloretos para despassivar a armadura não pode ser considerado isoladamente, visto que a resistividade elétrica e a disponibilidade de oxigênio exercem um papel fundamental no processo de corrosão das armaduras.

## 2.5 EFEITO DA CARBONATAÇÃO

A carbonatação do concreto representa um dos principais fatores desencadeantes do processo corrosivo das armaduras, visto que é responsável pela redução da alcalinidade do concreto, o que altera as condições de estabilidade química da película passivante da armadura, propiciando o início de um processo de corrosão generalizada.

O fenômeno da carbonatação consiste na reação do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ )<sup>6</sup> presente na atmosfera com os compostos alcalinos da hidratação do cimento ( $\text{Ca(OH)}_2$ ,

<sup>6</sup> Além do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), outros gases ácidos como o dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) e o gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) podem “carbonatar” o concreto, contribuindo para a redução da alcalinidade (HELENE, 1993; KULAKOWSKI, 2002). Sob o ponto de vista da durabilidade do concreto armado, o  $\text{H}_2\text{S}$  e o  $\text{SO}_2$  não são tão preocupantes, pois apresentam-se em menores quantidades na atmosfera (LOPES, 1999).

NaOH, KOH), resultando, principalmente, a precipitação de carbonato de cálcio, sendo condição essencial para o seu desenvolvimento a presença de umidade. Como resultado dessa reação o pH, originalmente  $\geq 12,5$ , é reduzido para um valor  $\leq 9$  (SCHIESSL, 1987; BAKKER, 1988).

Muitos autores (GOUDA, 1970; GJØRV, 1992; KURTIS e MEHTA, 1997) colocam que quando o pH é maior ou igual a 11,5, o filme passivo mantém-se intacto, garantindo proteção à armadura. Contudo, a redução do pH para um valor inferior a esse limite torna a película instável, ocorrendo a despassivação da armadura.

De acordo com NEVILLE (1997), a ação do  $\text{CO}_2$  ocorre mesmo em ambientes com baixas concentrações desse gás no ar, como, por exemplo, em ambientes rurais onde o teor de  $\text{CO}_2$  é aproximadamente 0,03% em volume. O autor coloca que o fenômeno assume maior importância com o aumento do teor de  $\text{CO}_2$  no ambiente<sup>7</sup>, o que acarreta uma maior velocidade de carbonatação e, portanto, um maior risco de corrosão das armaduras.

Segundo HELENE (1993), como a solubilidade do hidróxido de cálcio depende da concentração dos íons  $\text{OH}^-$  na solução dos poros, a reação de carbonatação começa através dos álcalis NaOH e KOH, que são mais solúveis. Assim, com a redução da concentração de íons  $\text{OH}^-$ , o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) solubiliza-se e passa a ser carbonatado, segundo a reação simplificada apresentada na Equação 2.6.



O ingresso de  $\text{CO}_2$  no concreto ocorre preponderantemente através de um mecanismo de difusão, pela diferença de concentração entre o ambiente e os poros do concreto. De acordo com PAPADAKIS et al. (1991), o mecanismo do processo de carbonatação envolve as seguintes etapas:

- 1) Difusão do  $\text{CO}_2$  na fase gasosa dos poros;
- 2) Dissolução dos cristais de hidróxido de cálcio na solução dos poros, segundo a Equação 2.7;



---

<sup>7</sup> NEVILLE (1997) cita as concentrações de  $\text{CO}_2$  normalmente encontradas em ambientes comuns: em um laboratório não ventilado pode chegar a mais de 0,1% e em grandes cidades pode variar de 0,3% a 1%.

3) Dissolução do  $\text{CO}_2$  na água dos poros, conforme as equações 2.8 e 2.9;

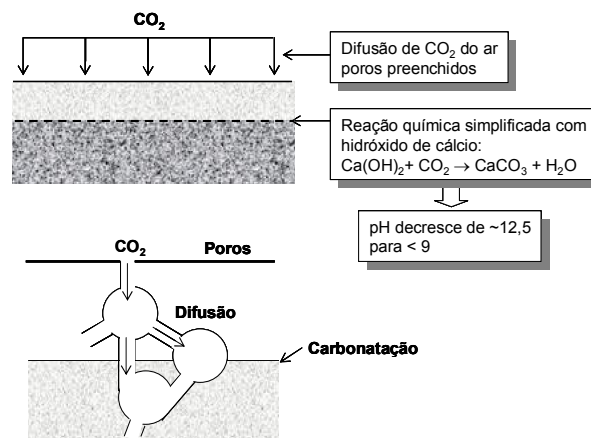


4) Reação do  $\text{CO}_2$  dissolvido com o hidróxido de cálcio dissolvido, formando o carbonato de cálcio, segundo a reação 2.10.



O mecanismo apresentado refere-se à carbonatação do hidróxido de cálcio. No entanto, diversos autores (ANDRADE et al., 1986; TAYLOR, 1997; AL-AMOUDI et al., 1991; PAPADAKIS et al., 1991; NEVILLE, 1997) salientam que também é possível a carbonatação do C-S-H, formando-se, simultaneamente com o carbonato de cálcio, o gel de sílica, com poros maiores do que 100 nm, que facilita a carbonatação subsequente. Entretanto, STEFFENS et al. (2002) afirmam que a reação do C-S-H com o  $\text{CO}_2$  é difícil de ser avaliada, em função da variedade de fases do C-S-H, podendo ser negligenciada por não afetar a alcalinidade do concreto.

A carbonatação ocorre a partir da superfície do concreto formando uma “frente de carbonatação”, que separa duas zonas de pH bastante distintos, sendo uma com pH em torno de 9 (área carbonatada) e outra com pH maior do que 12 (área não carbonatada). A “frente de carbonatação” avança progressivamente para o interior do concreto e, ao atingir a armadura, desestabiliza o filme óxido passivante, promovendo a despassivação). A Figura 2.5 apresenta uma representação esquemática do processo de carbonatação.



**Figura 2.5** Esquema representativo do processo de carbonatação, segundo BAKKER (1988).

Segundo ANDRADE (1992), o avanço da carbonatação é um processo relativamente lento que se atenua com o tempo. Essa tendência ao estacionamento do fenômeno (velocidade decrescente, conforme NEVILLE, 1997) pode ser explicada pela hidratação crescente do cimento que aumenta gradativamente a compacidade do concreto, além do fato dos próprios produtos decorrentes da carbonatação ( $\text{CaCO}_3$ ) que, por colmatarem os poros superficiais, dificultam cada vez mais a penetração do  $\text{CO}_2$  para o interior do concreto (HELENE, 1986).

BAKKER (1988) coloca que, sob o ponto de vista termodinâmico, considerando uma situação de equilíbrio ideal, a frente de carbonatação avançaria até o consumo total do hidróxido de cálcio, carbonatando totalmente o concreto. No entanto, o autor salienta que o processo de carbonatação no concreto está sujeito a uma barreira física, constituída pela rede de poros, que é modificada ao longo do tempo em função da precipitação de carbonatos, limitando a velocidade de carbonatação.

Nesse sentido, MONTEMOR et al. (2002) salientam que a precipitação do carbonato de cálcio “obtura” os poros do concreto, retardando o progresso da frente de carbonatação. STEFFENS et al. (2002) afirmam que, além da redução do pH, a carbonatação resulta na alteração da estrutura física do concreto, proporcionando uma densificação da matriz cimentante, que influencia a difusão subsequente do  $\text{CO}_2$ . Os autores citam que tanto KROPP como BIER verificaram uma redução na porosidade total e no volume de poros, como resultado do fenômeno de carbonatação.

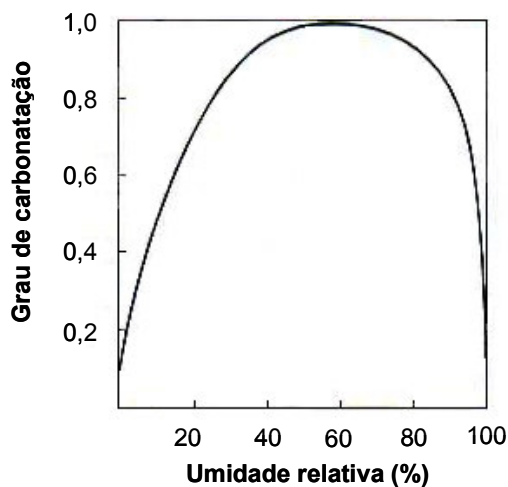
Da mesma forma, CONSTANTINOU e SCRIEVENER (1997) observaram considerável redução na porosidade do concreto devido à formação do carbonato de cálcio decorrente da carbonatação. DIAS (2000) constatou uma menor absorvidade em concretos carbonatados, atribuindo esse fato à redução da porosidade decorrente da precipitação de carbonatos.

STEFFENS et al. (2002) ainda colocam que o volume dos produtos da reação de carbonatação é maior do que o volume inicial dos reagentes e, citando ENCULSCU e CEUKELAIRE e VAN NIEUWENBURG, relatam um aumento de volume de aproximadamente 11% na formação do carbonato de cálcio a partir do hidróxido de cálcio.

Diante das diversas colocações apresentadas na literatura a respeito da precipitação do carbonato de cálcio, observa-se que a carbonatação apresenta influência direta na porosidade do concreto. No entanto, alguns autores, como BUNTE e ROSTÁSY, citados por STEFFENS et al. (2002), observaram que a influência da carbonatação não é significativa na porosidade.

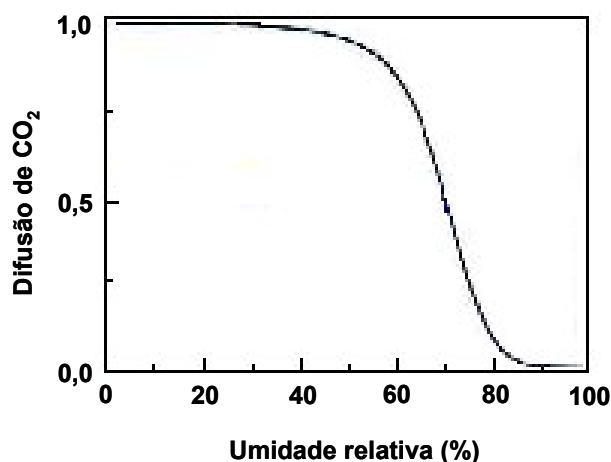
HELENE (1993) ressalta que como a difusão do  $\text{CO}_2$  na água é aproximadamente  $10^4$  vezes mais baixa do que no ar, a velocidade de carbonatação é fortemente influenciada pelo teor de umidade do concreto, o qual está diretamente relacionado à umidade relativa do ambiente. Assim, em concretos saturados a carbonatação será desprezível, em função da baixa difusão do  $\text{CO}_2$  na água. Por outro lado, em concretos secos o  $\text{CO}_2$  difunde-se com facilidade no interior dos poros, mas a carbonatação não ocorre pela inexistência de água, ou seja, o  $\text{CO}_2$  permanece na forma de gás e não reage com o cimento hidratado.

Contudo, em poros parcialmente saturados tem-se a condição mais favorável para o desenvolvimento das reações de carbonatação (Figura 2.6) e, portanto, a situação de maior risco para a despassivação da armadura. Segundo NEVILLE (1997), as maiores velocidades de carbonatação ocorrem a umidades relativas entre 50 e 70%. ROY et al. (1999) avaliaram a carbonatação de concretos com diversas classes de resistência submetidos à carbonatação acelerada, com concentração de  $\text{CO}_2$  6%, em ambientes com umidades relativas de 52%, 64%, 75%, 84% e 92%. Segundo os autores, os resultados obtidos indicaram, para todas as classes de resistência analisadas, uma maior profundidade de carbonatação quando a umidade relativa aumentava de 52% para 75% e, para a umidade relativa de 84%, profundidades de carbonatação menores do que os valores observados na situação intermediária de 75%.



**Figura 2.6** Influência da umidade relativa na velocidade de carbonatação (VENUAT, citado por ROSENBERG et al., 1989).

STEFFENS et al. (2002) colocam que a umidade relativa do ar é um fator preponderante na difusão do  $\text{CO}_2$ . Segundo os autores essa relação, apresentada na Figura 2.7, é crucial no progresso das reações de carbonatação.



**Figura 2.7** Relação entre a difusão de CO<sub>2</sub> a umidade relativa (STEFFENS et al., 2002).

O avanço da frente de carbonatação é também influenciado por uma série de parâmetros relacionados com as características do concreto, que interferem na estrutura interna e/ou na reserva alcalina do mesmo, tais como relação água/cimento, condições de cura, tipo de cimento e adições pozolânicas. A influência desses fatores na carbonatação é amplamente abordada na literatura (PARROT, 1987; BAKKER, 1988; NEPOMUCENO, 1992; HELENE, 1993; FIGUEIREDO, 1994; GUIMARÃES, 1997; VAGHETTI, 1999; KULAKOWSKI, 2002; entre outros). O efeito da adição de sílica ativa, a qual altera as características físicas (densificação da matriz cimentante) e químicas (redução da alcalinidade) do concreto, na carbonatação e, conseqüentemente, na despassivação da armadura, objeto do presente trabalho, é apresentado no item 3.4.1.2.

O processo de corrosão em concretos carbonatados é normalmente considerado como sendo homogêneo e generalizado sobre a superfície da armadura (ANDRADE et al., 1981; PARROT, 1994; CASTRO et al., 1998). Entretanto, CONSTANTINOU e SCRIEVENER (1997) ao analisarem a interface armadura/concreto de corpos-de-prova com corrosão acelerada por carbonatação (100% CO<sub>2</sub>, 65% de umidade relativa e temperatura de 20° C), com relação água/cimento 0,56, observaram uma distribuição dos produtos de corrosão bastante heterogênea sobre a armadura, embora em escala bem menor do que a corrosão por pites desencadeada por íons cloreto.

## 2.6 TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS PARA AVALIAÇÃO DA CORROSÃO DA ARMADURA

As técnicas eletroquímicas para a avaliação da corrosão da armadura, amplamente utilizadas a partir da década de 70, possibilitam a determinação dos valores instantâneos da intensidade de corrosão (taxa de corrosão), sendo esse fato, segundo MACÍAS (1991), a principal vantagem sobre os métodos gravimétricos clássicos, os quais fornecem apenas uma taxa de corrosão média, referente ao período global do ensaio. De acordo com NEPOMUCENO (1992), as técnicas eletroquímicas são bastante atrativas visto que permitem interpretar as variáveis que intervêm no processo eletroquímico no momento em que se desenvolve o fenômeno.

GONZÁLEZ (1989) coloca uma série de benefícios no emprego de métodos eletroquímicos para avaliar a corrosão da armadura, dentre eles:

- a determinação da velocidade de corrosão como densidade de corrente oferece uma sensibilidade muito maior do que procedimentos gravimétricos tradicionalmente utilizados. Segundo o autor, enquanto nos métodos gravimétricos são necessárias variações de massa da ordem de “mg”, nos métodos eletroquímicos, com os equipamentos atuais, é possível detectar intensidades da ordem de nA ( $10^{-9}$ A), permitindo avaliar ataques muito inferiores aos admitidos freqüentemente na prática;
- a obtenção da velocidade instantânea de corrosão em qualquer momento do ensaio, possibilitando caracterizar a evolução do fenômeno da corrosão com o tempo;
- a avaliação da corrosão da armadura em condições mais próximas da realidade, em função da sensibilidade das técnicas eletroquímicas;
- a determinação da velocidade do ataque em períodos relativamente curtos;
- a possibilidade de utilizar técnicas não destrutivas ou perturbativas.

Diversas técnicas eletroquímicas aplicáveis ao estudo da corrosão da armadura em concreto, perturbativas ou não perturbativas, são relacionadas na bibliografia (GONZÁLEZ, 1989; SEHGAL et al., 1992; CIGNA et al., 1993; NAGAYAMA et al., 1993; RODRÍGUEZ et al., 1994; CASCUDO, 1997; GOWERS e MILLARD, 1999; entre outros) tais como resistência de polarização, potencial de eletrodo; impedância eletroquímica, curvas de polarização, ruído eletroquímico, entre outras. No presente trabalho são detalhadas apenas as técnicas relacionadas aos parâmetros avaliados no programa experimental: resistência de polarização e potencial de eletrodo.



### 2.6.1 Resistência de polarização (Rp)

A resistência de polarização é um método de ensaio para avaliar a corrosão da armadura, que representa a inércia que um sistema possui em desenvolver um processo eletroquímico de corrosão mediante uma polarização imposta. No caso do concreto armado o referido sistema é o conjunto aço-eletrólito-concreto e quanto maior for o valor da resistência de polarização, menor a velocidade de corrosão (CASCUDO, 1997). A presente técnica fornece indicação sobre a cinética do processo de corrosão, ou seja, permite obter informações quantitativas da corrosão da armadura.

A técnica de resistência de polarização, originalmente desenvolvida por Stern e colaboradores entre os anos de 1957 e 1959, é a que mais contribuiu ao avanço da ciência da corrosão, sendo uma alternativa amplamente utilizada para obtenção de índices quantitativos de deterioração (RODRÍGUEZ et al., 1994). Entretanto, segundo CASCUDO (1997), somente na década de 70 Andrade e González<sup>8</sup> introduziram a técnica para determinar a velocidade de corrosão de armaduras em concretos e argamassas, sendo a sua utilização, apesar de algumas restrições, cada vez mais difundida, por sua rapidez, sensibilidade e caráter não destrutivo. BAUER (1995) informa que, no Brasil, os primeiros estudos aplicando a técnica de resistência de polarização foram realizados no final da década de 80, na Universidade de Brasília.

O método utiliza o estímulo de uma diferença de potencial externa aplicada à armadura, que exerce uma polarização ao redor do potencial de eletrodo original (E<sub>corr</sub>), o qual é determinado através de um eletrodo de referência. Aplicada a diferença de potencial ( $\Delta E$ ) registra-se a variação de corrente ( $\Delta I$ ) através de um procedimento potencioestático ou potenciodinâmico<sup>9</sup> e o valor da resistência de polarização é definido como o quociente entre os incrementos de potencial e corrente (Equação 2.11).

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I} \quad \text{Equação 2.11}$$

A relação do incremento de potencial ( $\Delta E$ ) com o incremento de corrente ( $\Delta I$ ) na realidade não é linear, entretanto, para que a resistência de polarização seja definida de acordo com a Equação 2.11, é fundamental a condição de linearidade da relação nas

---

<sup>8</sup> ANDRADE, C.; GONZÁLEZ, J. A. Predicción de la corrosividad potencial de los aditivos para hormigón mediante la determinación conjunta de los potenciales de ruptura y de la resistencia de polarización. Madrid, Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y Del Cemento, 1978. 45 p.

<sup>9</sup> A polarização galvanostática também pode ser utilizada, aplicando-se um incremento de corrente e registrando-se a variação no potencial (CASCUDO, 1997).

proximidades do  $E_{corr}$ . Para tanto, é aplicada uma pequena sobretensão ao redor do  $E_{corr}$ , da ordem de  $\pm 10$  mV, garantindo-se a hipótese básica de linearidade da curva de polarização. Assim, após a aplicação do potencial para a determinação da resistência de polarização, o potencial da armadura retorna ao seu valor inicial  $E_{corr}$  e o método pode ser considerado não perturbativo do processo eletroquímico de corrosão, muito importante para o monitoramento de uma estrutura de concreto armado.

Após a determinação da resistência de polarização, a corrente de corrosão instantânea ( $I_{corr}$ ) é obtida através da fórmula proposta por STERN e GEARY (1957), apresentada na Equação 2.12, onde para um dado sistema, as tangentes de Tafel das semi-reações anódica ( $\beta_a$ ) e catódica ( $\beta_c$ ) podem ser consideradas constantes (Figura 2.8).

$$I_{corr} = \frac{\beta_a \times \beta_c}{2,3 \times (\beta_a + \beta_c)} \times \frac{\Delta I}{\Delta E} = \frac{B}{R_p} \quad \text{Equação 2.12}$$

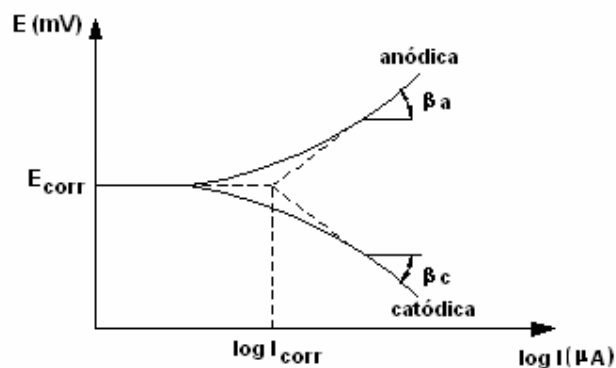
Onde:

$I_{corr}$  = corrente de corrosão ( $\mu A$ );  $\Delta E$  = potencial aplicado (mV);

$R_p$  = resistência de polarização ( $k\Omega$ );  $\Delta I$  = variação da corrente ( $\mu A$ );

$\beta_a$  = constante de Tafel anódica (mV);  $\beta_c$  = constante de Tafel catódica (mV);

$B$  = constante de Stern-Geary (mV), dependente das contribuições das reações anódicas e catódicas.



**Figura 2.8** Curva de Tafel ideal.

O valor da constante 'B' pode ser determinado experimentalmente ou a partir de valores propostos na literatura (GONZÁLEZ et al., 1985; ANDRADE, 1988; PAGE et al., 1991), em função do estado da armadura no interior do concreto.

A determinação experimental do valor de 'B', considerada mais realista em função dos mecanismos de corrosão envolvidos e das características do eletrólito, pode ser

realizada pelo método das curvas de Tafel (*Análise de Tafel*), onde é aplicada uma lenta varredura de -250 a + 250 mV em relação ao potencial de corrosão, ajustando-se os dados de acordo com o modelo de Butler Volmer (BAUER et al., 1999). No entanto, o inconveniente desta técnica são as altas polarizações impostas que perturbam o sistema em caráter definitivo. Conforme coloca CASCUDO (1997), uma alternativa para viabilizar o uso da técnica seria a sua utilização em corpos-de-prova adicionais, com as mesmas características e condições de exposição do concreto a ser analisado.

Dessa forma, diversos pesquisadores (NEPOMUCENO, 1992; BAUER, 1995; MANGAT e MOLLOY, 1992; BROOMFIELD, 1998; HOU e CHUNG, 2000; CABRAL, 2000; entre outros) optam por adotar os valores de 'B' pré-determinados na literatura, obtendo uma correlação considerada aceitável entre a perda de massa obtida eletroquimicamente e a obtida através de ensaios gravimétricos. ANDRADE (1988) e GONZÁLEZ et al. (1985) especificam o valor de  $B = 26$  mV quando a armadura está no estado ativo de corrosão e  $B = 52$  mV quando encontra-se passivada. Já PAGE et al. (1991) sugerem a utilização do valor 26 mV para a constante B, quer a armadura se encontre no estado passivo ou ativo.

Uma vez determinada a corrente de corrosão ( $I_{corr}$ ), a densidade de corrente de corrosão ou taxa de corrosão<sup>10</sup> ( $i_{corr}$ ) é calculada dividindo-se o valor de  $I_{corr}$  pela área efetiva da armadura em estudo.

A resistência ôhmica do concreto, que é a queda potencial provocada pela resistividade elétrica do concreto, deve ser compensada para se evitar a obtenção de um valor de resistência de polarização superestimado e, conseqüentemente, valores de  $i_{corr}$  inferiores aos reais. A compensação da queda ôhmica pode ser efetuada eletronicamente, com a utilização de potenciostatos modernos que a compensam diretamente, ou matematicamente, levando-se em conta a condutividade elétrica do concreto e as correntes medidas (CASCUDO, 1997).

Apesar de ser amplamente utilizada para a avaliação da taxa de corrosão em concretos e argamassas, a técnica de resistência de polarização apresenta algumas limitações, relacionadas por GONZÁLEZ (1989) e resumidas por CABRAL (2000), onde se destacam o desconhecimento das constantes de Tafel ( $\beta_a$  e  $\beta_c$ ), a aproximação linear da diferença entre funções exponenciais, a suposição de constância das constantes de Tafel, o que equivale assumir que a constante 'B' é invariável, o que não é o caso de alguns sistemas reais, dificuldades quanto à queda ôhmica devido aos produtos de corrosão ou devido ao eletrólito (resistividade do meio), entre outras. Contudo, GONZÁLEZ (1989)

---

<sup>10</sup> Também denominada na literatura de velocidade de corrosão ou intensidade de corrosão.

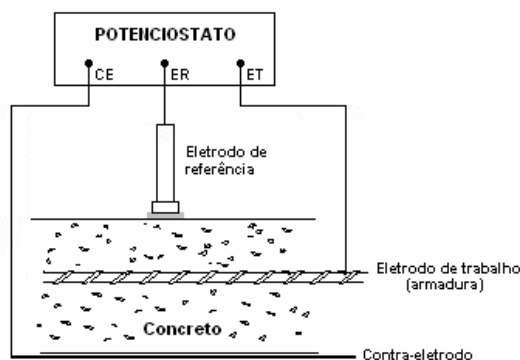
argumenta que as limitações existentes não são suficientes para invalidar a aplicação da técnica para estimar a taxa de corrosão em concretos e argamassas, devendo-se, sobretudo quando se desconhece o valor da constante 'B', prescindir de excessivas pretensões de exatidão.

Diversos pesquisadores (BROOMFIELD, 1998; GOWERS et al., 1999; ANDRADE e ALONSO, 2001; Manual DURAR, citado por FIGUEIREDO, 1994; entre outros) apresentam critérios que relacionam a taxa de corrosão com o grau de deterioração e importância do ataque, muitas vezes com uma certa discordância a respeito do valor de velocidade de corrosão para o qual o processo corrosivo torna-se preocupante. CASCUDO (1997) faz referência aos critérios de avaliação da velocidade de corrosão, sugeridos por ALONSO e ANDRADE (1990), conforme mostra a Tabela 5.3.

**Tabela 5.3** Critérios de avaliação da taxa de corrosão (ALONSO e ANDRADE, 1990).

GRAU DE CORROSÃO	TAXA DE CORROSÃO	
	$\mu\text{A}/\text{cm}^2$	$\mu\text{m}/\text{ano}$
Desprezível	0,1 a 0,2	1,1 a 2,2
Início da corrosão ativa	> 0,2	> 2,2
Ataque importante, mas não severo	~ 1,0	~11,0
Ataque muito importante	> 10,0	> 110,0

O equipamento básico para a realização do ensaio de resistência de polarização, com sistema de três eletrodos, é um eletrodo de trabalho (armadura), um contra-eleto-rodo auxiliar (grafite ou placa de aço inox), um eletrodo de referência (eletrodo de cobre/sulfato de cobre-ESC ou eletrodo de calomelano saturado-ECS) e um potenciostato, preferencialmente com compensação de queda ôhmica entre os eletrodos de referência e de trabalho (Figura 5.9).



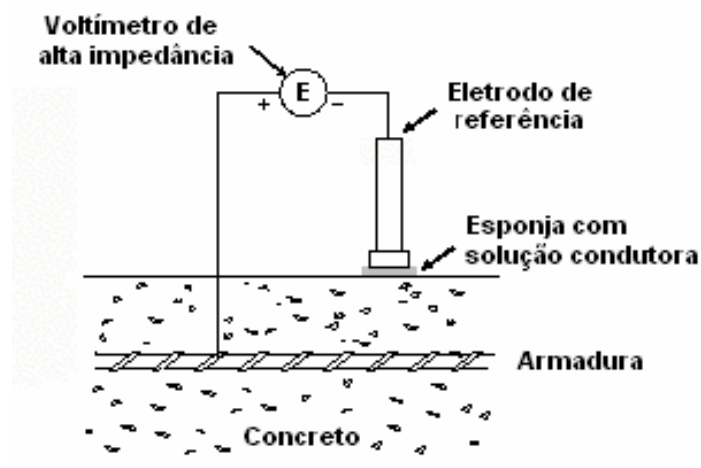
**Figura 2.9** Representação esquemática do sistema para determinação da resistência de polarização.

## 2.6.2 Potencial de corrosão

Por sua simplicidade e facilidade de aplicação, o potencial de corrosão é um dos métodos mais utilizados para monitorar as estruturas de concreto armado e verificar o comportamento de corrosão da armadura, apesar do seu caráter qualitativo. Também chamado de potencial eletroquímico, ou potencial de eletrodo, é normalizado pela ASTM C876 (1991) "Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete".

Trata-se de uma técnica não perturbativa, que consiste no registro da diferença de potencial entre o sistema armadura-concreto (semi-célula) e um eletrodo de referência (semi-célula estável), que é colocado em contato com a superfície do concreto (CASCUDO, 1997).

Para o ensaio de potencial de eletrodo utiliza-se um multímetro de alta impedância interna ( $\geq 10 \text{ M } \Omega$ ) e um eletrodo de referência, sendo os mais utilizados o de cobre/sulfato de cobre (ESC) e o de calomelano saturado (ECS). Um fluxo de elétrons da armadura em direção ao eletrodo de referência, mais nobre e com potencial mais positivo, passa pelo multímetro de alta impedância, que indica a intensidade da diferença de potencial entre as semi-células, quando o circuito é fechado. Uma interface condutiva (esponja saturada em solução de detergente 0,5%, por exemplo) deve ser colocada entre o eletrodo de referência e a superfície do concreto para melhorar a condutividade elétrica entre o eletrodo de referência e a superfície do concreto (Figura 5.10).



**Figura 2.10** Representação esquemática para a medida do potencial de corrosão.

O ensaio de potencial de eletrodo é útil na identificação de áreas com risco de corrosão e também de zonas passivas com pouca probabilidade de apresentar corrosão. Através do seu emprego é possível detectar mudanças no estado superficial da armadura, quando esta passa do estado passivo para o estado ativo de corrosão, pela modificação dos valores de potencial com o tempo.

HANSSON (1984) coloca que o potencial de corrosão é uma medida de maior ou menor facilidade de transferência de carga elétrica entre a armadura e a solução contida nos poros do concreto. No entanto, conforme salienta CASCUDO (1997), a maior ou menor facilidade de transferência não deve ser confundida com dados quantitativos de corrosão (velocidade de corrosão).

A avaliação dos resultados obtidos com a técnica de potencial de corrosão pode ser realizada segundo os critérios propostos pela ASTM C-876 (1991) (Tabela 5.4).

**Tabela 5.4** Critérios de avaliação do potencial de corrosão segundo a ASTM C-876 (1991).

<b>POTENCIAL DE CORROSÃO - ESC (mV)</b>	<b>PROBABILIDADE DE CORROSÃO (%)</b>
mais positivo que -200	10
de -200 a -350	Incerta
mais negativo que -350	90

Como a técnica de potencial aponta dados qualitativos do processo eletroquímico de corrosão, não é indicada para avaliar a cinética do processo de corrosão, por não fornecer dados quantitativos da taxa de corrosão, sendo essa a principal desvantagem da utilização da técnica.

### 3 SÍLICA ATIVA

Devido aos crescentes problemas relacionados à durabilidade do concreto, principalmente danos causados pela corrosão da armadura, existe um forte incentivo ao desenvolvimento de alternativas capazes de contribuir para a consecução de uma maior vida útil das estruturas de concreto armado.

Nesse sentido, a incorporação de sílica ativa, em função de suas características peculiares, pode alterar de maneira considerável as características do concreto, favorecendo a obtenção de concretos com maior qualidade. Segundo SWAMY (1996), concretos com maior qualidade e, conseqüentemente, maior durabilidade e melhor comportamento mecânico, podem ser considerados *“o melhor caminho para a indústria da construção civil”*.

A sílica ativa, que é um subproduto das indústrias de processamento de ligas de silício, até a década de 70 era considerada um material de refugo e de difícil estocagem, devido a sua baixa massa específica. No entanto, os inúmeros estudos realizados (HJORTH, 1982; MEHTA, 1986; DETWILER e MEHTA, 1989; MALHOTRA et al., 1992; SABIR, 1995, entre outros) demonstram as virtudes da sílica ativa, que passou de rejeito industrial a valioso material para a indústria do cimento, refratários e plásticos, e, sobretudo, para a tecnologia do concreto. De acordo com AÏTCIN (2000), os primeiros resultados interessantes do uso da sílica ativa no concreto, obtidos pelos escandinavos, e as intensas pesquisas realizadas no início dos anos 80 em diversos países, levaram a uma rápida aceitação da sílica ativa como um material suplementar diferenciado. O mesmo autor coloca que o reconhecimento da vantagem particular de utilizar a sílica ativa como pozolana no concreto ocorreu de forma tão intensa que muitos tecnólogos acreditam que atualmente o uso da sílica ativa *“é o sine qua non do concreto de alto desempenho”*.

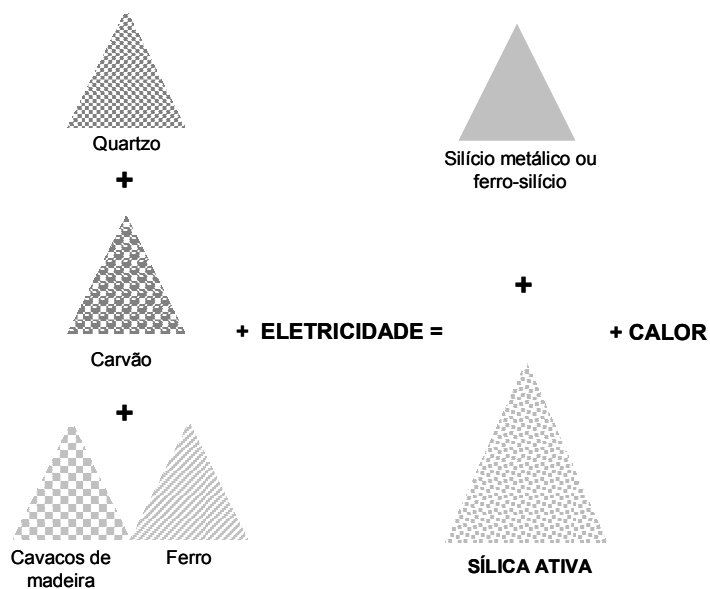
Além das questões técnicas, a crescente preocupação com os aspectos ambientais e ecológicos, em função das exigências sociais e governamentais nas últimas décadas, incentiva cada vez mais a utilização de subprodutos industriais com potencialidade de aplicação, contribuindo para minimizar o impacto ambiental gerado quando não se dispõe um sistema de captação e disposição adequado, como é o caso de muitas empresas produtoras de ligas de silício. Conforme MEHTA e MONTEIRO (1994), fazendo-se uma análise técnica, econômica e ecológica, *“não há melhor alternativa do que o concreto para*

as milhões de toneladas de subprodutos industriais pozolânicos gerados anualmente”, dentre esses a sílica ativa.

### 3.1 OBTENÇÃO DA SÍLICA ATIVA

A sílica ativa é um subproduto resultante da produção do silício metálico (Si) e ligas de ferro-silício, onde o quartzo é reduzido pelo carvão em fornos elétricos de redução, em temperaturas de aproximadamente 2000° C.

A maior parte da demanda do ferro-silício, que representa 86% da produção mundial de ligas de silício, está associada à produção de aços comuns, onde atua como desoxidante. Já o silício metálico é utilizado como insumo na fabricação de silicone, componentes eletrônicos, ligas de alumínio, entre outros, e representa 14% da produção mundial de ligas de silício (ANDRADE et al., 1999). Segundo DASTOL (1984), as matérias-primas envolvidas no processo de produção do silício metálico são o quartzo, carvão e cavacos de madeira, sendo adicionado ferro à mistura no caso da produção de ferro-silício (Figura 3.1).



**Figura 3.1** Princípio da fabricação do silício metálico e do ferro-silício (AÏTCIN, 2000).



A reação química básica que descreve a redução da sílica na produção do silício metálico e ferro silício pode ser representada pela Equação 3.1.



O processo de produção compreende ainda vários estágios intermediários, sendo os dois mais importantes representados pelas Equações 3.2 e 3.3 (VIEIRA et al., 1996).

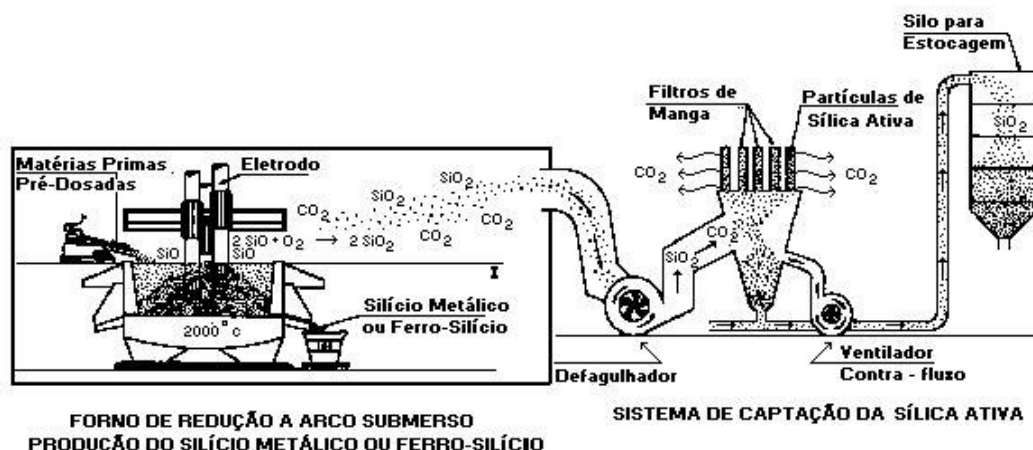


O gás monóxido de silício (SiO) gerado durante a redução do quartzo escapa pela parte superior do forno onde é oxidado pelo ar, formando dióxido de silício que se condensa em partículas extremamente finas denominadas **sílica ativa**.

As partículas ultrafinas (pó), juntamente com o gás carbônico gerado, são muitas vezes lançadas ao meio ambiente, constituindo-se em mais uma fonte poluidora. Entretanto, quando passam por um sistema de captação, além do benefício ambiental, originam material atualmente reconhecido como *“uma adição pozolânica bem estabelecida que pode contribuir de forma ímpar nas propriedades dos produtos de cimento Portland”* (KHAYAT e AITCIN, 1992).

Em alguns sistemas de captação, o pó e os gases gerados são coletados em filtros de tecido denominados filtros de manga, os quais são sensíveis à temperatura, sendo necessário, portanto, que as emissões passem por um resfriador antes de chegarem aos filtros. Quando os filtros são preenchidos, a sílica ativa é coletada através de um fluxo reverso de ar e conduzida a silos de estocagem. A Figura 3.2 apresenta o esquema de produção do silício metálico e da coleta de sílica ativa.

Um forno de produção de silício metálico produz muito mais sílica ativa do que um forno de produção, por exemplo, de FeSi 50% de mesma potência, visto que quanto maior o teor de silício na liga, maiores as perdas de SiO.



**Figura 3.2** Representação esquemática da produção do silício metálico e captação da sílica ativa (DAL MOLIN, 1995).

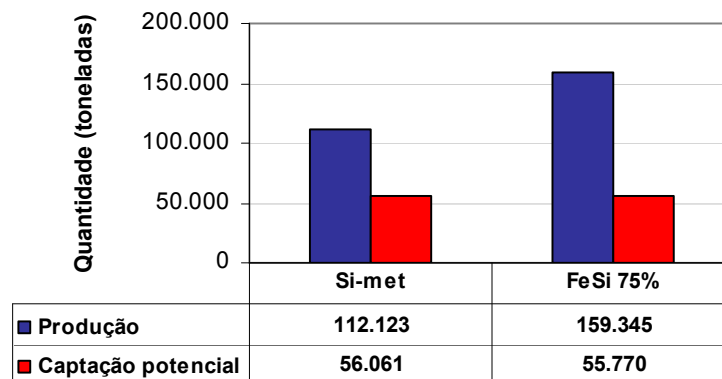
Segundo DAL MOLIN (1995), a quantidade de sílica ativa liberada por tonelada de liga metálica produzida, além de depender do tipo de liga, é função do tipo e modo de operação do forno, das matérias-primas empregadas, entre outros. A Tabela 3.1 apresenta a quantidade de sílica ativa gerada por tonelada de liga produzida.

**Tabela 3.1** Relação entre a produção da liga metálica e captação da sílica ativa (DASTOL, 1984).

LIGA METÁLICA	SÍLICA ATIVA (kg)
1000 kg de silício metálico	550
1000 kg de ferro-silício 75%	350
1000 kg de ferro-silício 50%	90

De acordo com dados do Governo Federal (Ministério de Minas e Energia, 2002) existem no Brasil seis plantas operantes de silício-metálico (uma na Bahia, três em Minas Gerais, uma no Pará e uma em São Paulo) e onze plantas operantes de ferro-silício 75%. Segundo KULAKOWSKI (2002), três fábricas de silício metálico coletam e destinam parte do seu resíduo para a indústria da construção (uma no Pará, uma em Minas Gerais e uma na Bahia).

No ano de 2001, a produção brasileira de silício metálico e ferro-silício 75% foi de 112.123 e 159.345 toneladas, respectivamente (Ministério de Minas e Energia, 2002). Considerando a relação entre produção da liga metálica e captação de sílica ativa, apresentada na Tabela 3.1, pode-se estimar a captação potencial de sílica ativa no Brasil no ano de 2001, conforme apresentado na Figura 3.3.



**Figura 3.3** Produção silício metálico e ligas de ferro-silício 75% e captação potencial de sílica ativa no Brasil, no ano de 2001.

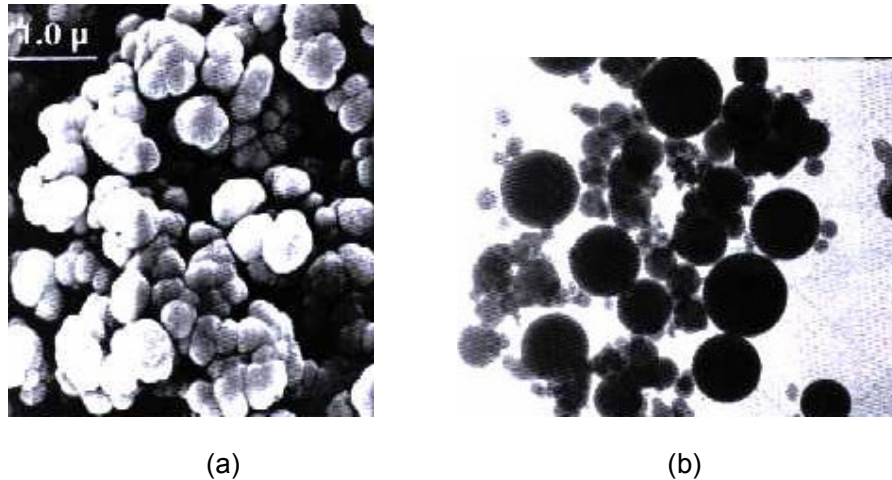
### 3.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E QUÍMICAS DA SÍLICA ATIVA

As características físico-químicas da sílica ativa, determinadas pela composição química, distribuição granulométrica, cor e tamanho dos grãos, entre outras, estão diretamente relacionadas aos aspectos de produção das ligas de silício metálico, tais como:

- tipo de liga;
- tipo de forno;
- composição química das matérias-prima.

#### 3.2.1 Características físicas

A sílica ativa apresenta uma cor que varia do cinza claro ou escuro, sendo que quanto maior o teor de carbono residual, mais escura sua tonalidade. Segundo MALHOTRA et al. (1992), embora em menor proporção, o teor de ferro também influencia na tonalidade da sílica. É composta por partículas esféricas extremamente finas, com superfície específica na faixa de 15000 a 25000 m<sup>2</sup>/kg, determinadas pela técnica de adsorção de nitrogênio, com massa específica em torno de 220 kg/m<sup>3</sup> (AİTCIN, 2000). A Figura 3.4 mostra uma microfotografia das partículas de sílica ativa, apresentada por AİTCIN (2000).



**Figura 3.4** Imagens da sílica ativa obtidas através de microscopia eletrônica (a) de varredura e (b) de transmissão (AÏTCIN, 2000).

De acordo com o comitê 226 do ACI (1987), a distribuição dos tamanhos das partículas da sílica ativa apresenta a maior parte com diâmetro menor que  $1\mu\text{m}$ , com um diâmetro médio de  $0,1\mu\text{m}$ , o que é aproximadamente 100 vezes menor do que o diâmetro médio de uma partícula de cimento.

A sílica ativa proveniente da fabricação do silício metálico é normalmente mais fina do que a proveniente da fabricação do ferro-silício, em função das diferenças nas temperaturas alcançadas pelos fornos, que tendem a diminuir à medida que aumenta a proporção de ferro na liga metálica (MEHTA, 1989).

Do ponto de vista estrutural, a sílica ativa apresenta-se sob forma praticamente amorfa, com grau de cristalização bastante baixo. O resfriamento do vapor de  $\text{SiO}$  e sua oxidação para  $\text{SiO}_2$  acontecem rapidamente, impedindo que o tetraedro do  $\text{SiO}_2$  se organize ordenadamente para constituir a forma de sílica cristalina.

Segundo MEHTA (1986), a estrutura amorfa e o reduzido diâmetro das partículas são as principais razões que contribuem para a excelente atividade pozolânica da sílica ativa.

### 3.2.2 Características químicas

A composição da sílica ativa depende em grande parte das matérias-primas utilizadas na obtenção do produto siderúrgico, sendo determinante tipo de liga de silício produzida. A sílica ativa é composta basicamente por dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) e quanto maior o teor de silício na liga, maior o teor de  $\text{SiO}_2$  da sílica ativa.

Segundo AITCIN (2000), a sílica ativa obtida na produção do silício metálico geralmente contém mais de 90% de SiO<sub>2</sub> e a obtida durante a fabricação de uma liga de FeSi75% apresenta um teor superior a 85%. Quando o teor de silício é de 50%, a sílica ativa gerada terá uma quantidade de SiO<sub>2</sub> muito menor, resultando numa pozolana menos reativa (MEHTA, 1986).

A Tabela 3.2 apresenta a composição química típica da sílica ativa obtida de diferentes ligas de silício.

**Tabela 3.2** Composição química típica da sílica ativa, conforme a liga metálica produzida (AITCIN et al., citados por MEHTA, 1986).

Composição química	Produto Siderúrgico						
	Si-met	FeSi 75%	FeSi 75%*	FeSi 50%	FeCrSi	CaSi	SiMn
SiO <sub>2</sub>	94	89	90	83	83	53,7	25
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,03	0,6	2,9	2,5	1,0	0,7	1,8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,06	0,4	1,0	2,5	2,5	0,9	2,5
CaO	0,5	0,2	0,1	0,8	0,8	23,2	4,0
MgO	1,1	1,7	0,2	3,0	7,0	3,3	2,7
Na <sub>2</sub> O	0,04	0,2	0,9	0,3	1,0	0,6	2,0
K <sub>2</sub> O	0,05	1,2	1,3	2,0	1,8	2,4	8,5
C	1,0	1,4	0,6	1,8	1,6	3,4	2,5
S	0,2	-	0,1	-	-	-	2,5
MnO	-	0,06	-	0,2	0,2	-	36,0
Perda ao fogo	2,5	2,7	-	3,6	2,2	7,9	10,0

\* Forno com sistema de recuperação de calor. Segundo NEVILLE (1997), quando o forno tem um sistema de recuperação de calor eficiente a maior parte do carvão é queimada, o que deixa a sílica ativa liberada com menor teor de carbono e com coloração clara.

### 3.3 PRINCÍPIO DA ATUAÇÃO DA SÍLICA ATIVA NO CONCRETO

A sílica ativa atua na estrutura do concreto tanto através de um efeito químico (efeito pozolânico) como através de um efeito físico (efeito microfíler).

#### 3.3.1 Efeito químico

A sílica ativa, por ser constituída de sílica amorfa e possuir elevada superfície específica, possui ação química como material pozolânico de alta resistividade, reagindo rapidamente com o hidróxido de cálcio - Ca(OH)<sub>2</sub> - formado na hidratação do cimento

(DETWILER e MEHTA, 1989). Essa reação dá origem a um composto resistente de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), semelhante ao formado na hidratação do cimento, que é o maior responsável pela resistência da pasta, por possuir elevadas forças de Van der Waals (VIEIRA et al., 1996).

A reação pozolânica entre a sílica ativa e o hidróxido de cálcio promove uma densificação da zona de transição pasta/agregado e da matriz cimentante, e um conseqüente refinamento da estrutura de poros do concreto.

MEHTA e MONTEIRO (1994) classificam a sílica ativa como uma “pozolana altamente reativa”. Segundo os autores, tanto em função da sua composição química e mineralógica como pelas características das partículas, a sílica ativa reage muito mais rápido do que as pozolanas comuns. Além disso, MEHTA (1984) salienta que a sílica ativa pertence a uma classe superior de pozolanas, pois, mantida a mesma fonte de captação, não sofre variabilidade na composição e heterogeneidade nas características mineralógicas.

Segundo DAL MOLIN (1995), ao contrário das pozolanas naturais, escórias e cinzas volantes, a reação  $\text{Ca(OH)}_2\text{-SiO}_2$  envolvendo a sílica ativa é rápida e pouco variável, possibilitando períodos de cura menores para atingir as resistências ou baixas permeabilidades desejadas.

WOLSIEFER (1991) coloca que a sílica ativa, em função das suas características peculiares, possui elevado índice de atividade pozolânica com o cimento (em torno de 210%), resultando um concreto com estrutura de poros mais densa, com maior resistência mecânica, maior resistência química e menos permeável.

### **3.3.2 Efeito físico**

Os efeitos benéficos da sílica ativa na microestrutura e nas propriedades do concreto são devidos não apenas à elevada reatividade pozolânica, mas também ao efeito físico das pequenas partículas de sílica ativa, conhecido como “efeito microfíler” (AÏTCIN, 2000).

O efeito microfíler é função do reduzido tamanho das partículas de sílica ativa, as quais se introduzem entre os grãos de cimento e se alojam nos interstícios da pasta, reduzindo o espaço para a água e atuando como ponto de nucleação, o que dificulta a orientação preferencial dos cristais de hidróxido de cálcio na interface pasta/agregado (MALE, 1989). A introdução de sílica ativa na pasta de cimento afeta o arranjo físico do sistema, promovendo a homogeneidade da microestrutura da pasta e, principalmente, da zona de transição.

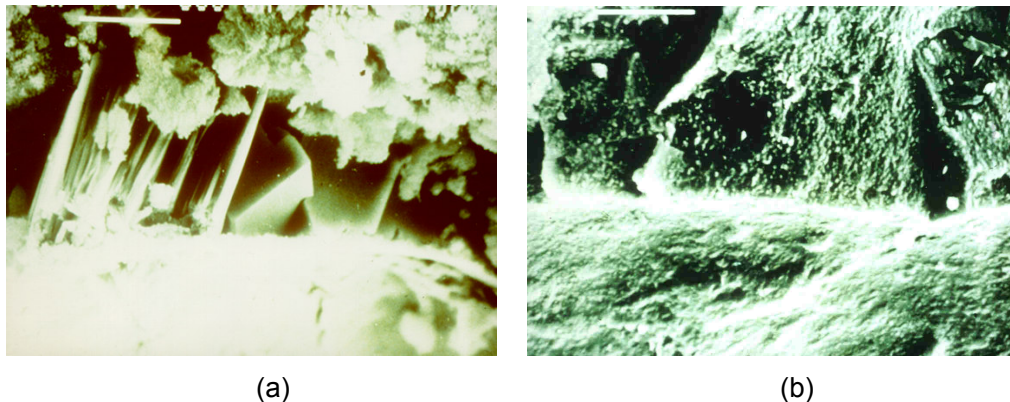
De acordo com AMARAL (1988), a quantidade de partículas de sílica ativa por grão de cimento é da ordem de 50.000, para uma adição de 10% de sílica ativa em relação à

massa de cimento. Já DASTOL (1984) coloca que uma mistura com 10% de sílica ativa apresenta, em média, para cada grão de cimento, cerca de 300.000 a 400.000 partículas de sílica ativa.

Segundo AÏTCIN (2000), devido ao efeito microfíler da sílica ativa, a matriz resultante é “densificada” mesmo antes do desenvolvimento de quaisquer ligações químicas entre as partículas de cimento.

KULAKOWSKI (2002) referencia a pesquisa realizada por KJELLEN e ATASSI, onde a redução da porosidade capilar total e da mudança do diâmetro crítico de poros dos sistemas com sílica ativa é atribuída à formação e preservação dos denominados *hollow-shells* (grãos de Hadley), encontrados mesmo em idades mais avançadas, com incrustações de produtos de hidratação, em função do efeito de nucleação da sílica ativa. A autora coloca que *“a presença dos hollow-shells nos capilares pode estar contribuindo para diminuir a comunicação entre poros, justificando a alta eficiência da sílica ativa na redução de transporte de massa líquida”*.

A combinação dos efeitos químicos e físicos da sílica ativa resulta em benéficas alterações da microestrutura da matriz cimentante e da zona de transição pasta/agregado (Figura 3.5), melhorando significativamente o desempenho do concreto tanto sob o ponto de vista mecânico como de durabilidade.



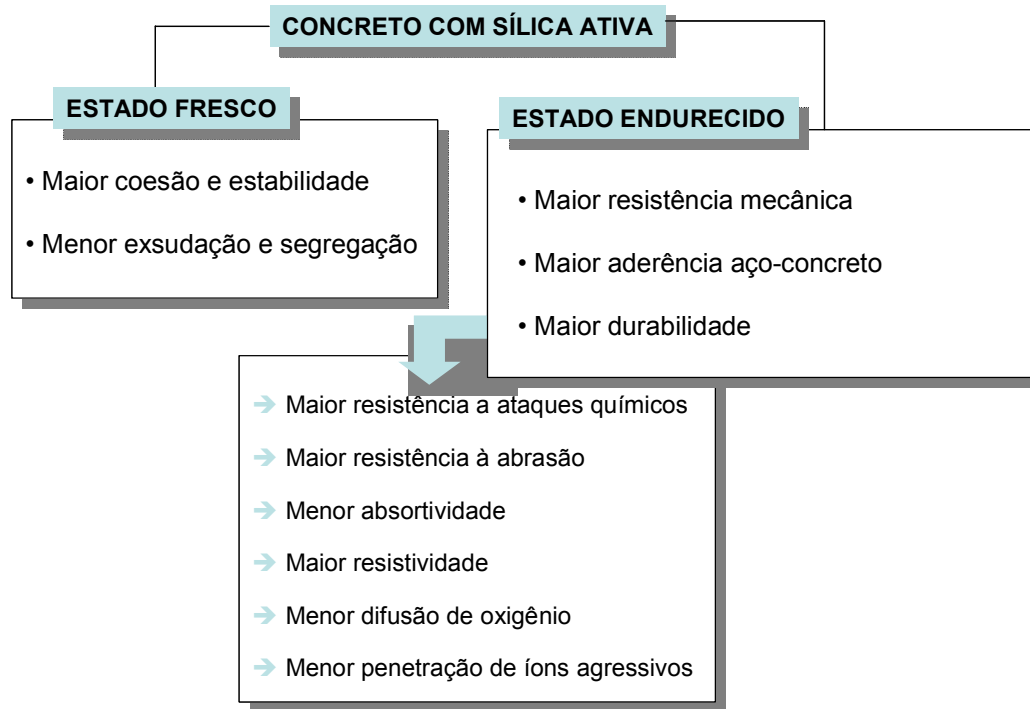
**Figura 3.5** Zona de transição: (a) sem sílica ativa, com grandes cristais de hidróxido de cálcio orientados (b) com sílica ativa, estrutura densa e homogênea (MONTEIRO, 1992<sup>11</sup>).

---

<sup>11</sup> Microfotografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura – elétrons secundários, apresentadas na disciplina “Tecnologia Avançada no Estudo do Comportamento do Concreto”, ministrada pelo Prof. Ph.D. Paulo Monteiro, da Universidade da Califórnia, Berkeley, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS - 1992.

### 3.4 INFLUÊNCIA DA SÍLICA ATIVA NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO

A utilização da sílica ativa modifica as propriedades do concreto tanto no estado fresco como no estado endurecido (MEHTA,1986; SELLEVOLD e NILSEN, 1987; MALHOTRA et al., 1992; DAL MOLIN, 1995; NEVILLE, 1997; AİTCIN, 2000; entre outros). A Figura 3.6 apresenta um resumo dos principais benefícios proporcionados pela sílica ativa ao concreto.



**Figura 3.6** Principais benefícios da utilização da sílica ativa no concreto.

Apesar das inúmeras melhorias no desempenho do concreto com sílica ativa, tanto em relação às propriedades mecânicas como em relação às propriedades diretamente associadas à durabilidade, amplamente relatadas na literatura, a principal questão relacionada à durabilidade dos concretos com sílica ativa, que gera polêmica no meio técnico e motivou a realização do presente trabalho, diz respeito à corrosão das armaduras. O efeito da sílica ativa sobre a alcalinidade do concreto é o principal motivo dos posicionamentos controversos em relação à despassivação da armadura. Essa questão e sua influência no desenvolvimento do processo corrosivo são apresentadas a seguir. No item 3.4.2 apresenta-se uma breve revisão sobre a influência da sílica ativa na resistência à compressão do concreto, propriedade normalmente utilizada como parâmetro de controle.



### 3.4.1 Sílica ativa e a corrosão da armadura

Os problemas mais comuns de durabilidade estão diretamente associados à permeabilidade do concreto. Em geral, quanto maiores os fatores que facilitem o ingresso de agentes agressivos na massa de concreto, maior será a deterioração do material. Assim, a permeabilidade e a porosidade (tamanho e distribuição dos poros) são fatores determinantes na capacidade do concreto suportar o efeito destrutivo de agentes agressivos (água, oxigênio, dióxido de carbono, cloretos, entre outros).

KHAYAT e AITCIN (1993), em um resumo sobre a utilização de sílica ativa, relatam que sua adição em estruturas de concreto melhora consideravelmente as propriedades do concreto, especialmente a durabilidade.

Concretos com adição de sílica ativa normalmente apresentam melhor desempenho frente aos ataques agressivos, em função de uma menor permeabilidade e menor porosidade. WOLF (1991) aponta que o refinamento da estrutura de poros do concreto com adição de sílica ativa e a conseqüente redução da taxa de transferência de íons agressivos ao concreto são fatores determinantes do melhor desempenho quanto à durabilidade dos concretos com sílica ativa.

Segundo MEHTA (1993), uma vez que a água, oxigênio e íons agressivos desempenham um papel fundamental na corrosão da armadura, *"é óbvio que a permeabilidade do concreto é a chave para controlar os vários processos envolvidos no fenômeno"*.

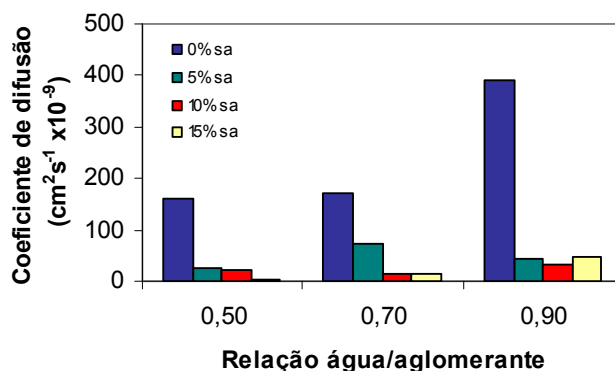
A presença de cloretos e a ação do gás carbônico, que acarreta a diminuição da alcalinidade, são, como abordado anteriormente, os dois principais fatores desencadeantes do processo corrosivo. Uma vez despassivada a armadura e iniciado o processo de corrosão, a velocidade da deterioração, ou seja, a taxa de corrosão da armadura, depende de outros fatores, como disponibilidade de umidade e oxigênio, bem como a resistividade elétrica do concreto (ANDRADE, 1992). Como esses fatores estão diretamente relacionados com a porosidade e permeabilidade do concreto, são, conseqüentemente, beneficiados com a adição de sílica ativa.

Diversos trabalhos de pesquisa demonstram a influência da utilização da sílica ativa na penetração de íons cloretos, na carbonatação do concreto e na corrosão das armaduras, conforme apresentado a seguir.

### 3.4.1.1 Influência da sílica ativa na corrosão desencadeada por íons cloreto

Alguns pesquisadores (PAGE e VENNESLAND, 1983; ARYA et al., 1990; MANGAT e MOLLOY, 1995, entre outros) colocam que a sílica ativa, por diminuir o pH da solução dos poros, em função da reação pozolânica com o hidróxido de cálcio, diminui a capacidade de fixação dos íons cloreto, aumentando a relação  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$ . Como consequência, a sílica ativa, ao disponibilizar uma maior quantidade desses íons na solução dos poros, pode potencializar o risco de corrosão.

No entanto, vários pesquisadores (CABRERA e CLAISSE, 1990; ELLIS et al., 1991; TORII e KAWAMURA, 1992; FUKUTE et al., 1996; HANSSEN, 1993; SWAMY e SURYAVANSHI, 1998; ZHANG et al., 1999; HISADA et al., 1999; RODOLPHO e ISA, 1999; HOFFMANN, 2001; HASSAN et al., 2000; RISOLUTI et al., 2000; entre outros) relatam uma expressiva redução na penetração de cloretos em concretos ou argamassas com sílica ativa. GAUTEFALL e HAVDAHL (1989) estudaram o efeito da sílica ativa na difusão de íons cloretos em pastas de cimento e concluíram que a incorporação de sílica ativa como substituição de 5, 10 e 15% da massa de cimento reduz, em média, 80%, 90% e 91% o coeficiente de difusão de cloretos, respectivamente, conforme mostra a Figura 3.7.



**Figura 3.7** Coeficiente de difusão em concretos com sílica ativa (GAUTEFALL e HAVDAHL, 1989).

BERKE (1989) avaliou a resistência à corrosão das armaduras de concretos com sílica ativa em solução de 3,5% de NaCl e verificou que a adição aumenta o tempo para iniciação da corrosão. Segundo o autor, a sílica ativa reduz o ingresso dos íons cloretos e aumenta a resistividade do concreto, o que explica o maior tempo para despassar a armadura.

Os resultados obtidos por DETWILER et al. (1994) em pesquisa realizada para avaliar a resistência à penetração de íons cloreto em concretos com sílica ativa, em

diferentes condições de cura, indicaram que 5% de sílica ativa reduz 80% a carga passante e diminui 70% o coeficiente de difusão de cloretos.

ISAIA (1995), através do ensaio de penetração de íons cloretos pelo método ASTM C 1202 (1992), constatou que a carga passante, em Coulombs, diminuiu aproximadamente 80% para teores de 10 e 20% de sílica ativa, em concretos com 28 dias de idade.

McGRATH e HOOTON (1997), avaliando a influência de adições minerais na resistência à penetração de cloretos, verificaram que 8% de sílica ativa reduz cerca de 86% a difusão de íons cloreto no concreto.

Da mesma forma, DEJA (1997) observou que o coeficiente de difusão de cloretos em pastas de cimento com 7,5% de sílica ativa, em substituição à massa de cimento, diminui 84% em relação à mistura de referência.

Os resultados obtidos por CHISOLM (1997) indicaram uma redução de aproximadamente 65% tanto na carga passante como no coeficiente de difusão de cloretos de concretos com 10% de sílica ativa, em substituição à massa de cimento.

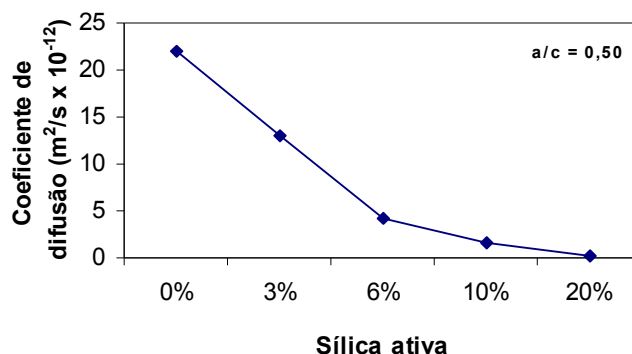
BENTZ (2000), estudando o efeito da sílica ativa em concretos de alta resistência, constatou que o coeficiente de difusão é no mínimo 15 vezes menor para concretos com 10% de adição de sílica ativa, o que, segundo o autor, aumenta substancialmente a vida útil de concretos expostos a ambientes agressivos.

HOFFMANN (2001), ao avaliar o efeito de diversos parâmetros na difusão de íons cloreto, verificou que a adição de 20% de sílica ativa ao concreto reduz em até 60% o coeficiente de difusão de cloretos. ANDRADE e DAL MOLIN (2002), a partir dos resultados obtidos por HOFFMANN (2001), verificaram a influência da sílica ativa na previsão de vida útil de estruturas de concreto armado, através de análise de confiabilidade, e constataram, para um índice de confiabilidade igual a 0,8, que a vida útil de estruturas com 10% e 20% de sílica ativa é, respectivamente, 33% e 47% superior a de uma estrutura construída sem adição.

KHATIB e MANGAT (2002) verificaram a influência de temperaturas elevadas (37° C e 45° C) na penetração de cloretos em concretos com adições minerais, curados em ambiente com 25% de umidade relativa, e concluíram que 9% de sílica ativa diminui em torno de 86% o coeficiente de difusão de íons cloreto.

A avaliação do ingresso de íons cloreto em pastas de cimento com diversos teores de adição de sílica ativa, realizada por JENSEN et al. (1999), demonstrou que o coeficiente de difusão é 75 vezes menor para as misturas com 20% de sílica ativa. A Figura 3.8 ilustra

os resultados obtidos. Os autores ainda verificaram que a capacidade de fixação de íons cloreto não foi afetada pela adição de sílica ativa.



**Figura 3.8** Coeficiente de difusão em pastas com sílica ativa (JENSEN et al., 1999).

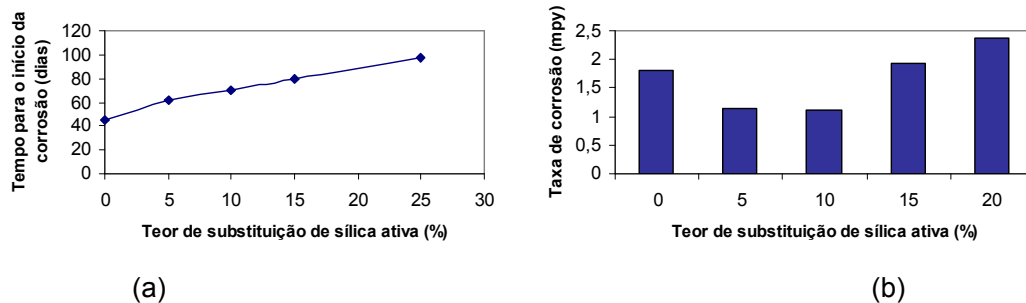
OH et al. (2002), em estudo para verificar a penetração de íons cloreto em concretos de alta resistência, constataram que a carga passante de concretos com 10% e 20% de adição de sílica ativa é, respectivamente, 6 e 19 vezes menor do que para o concreto sem adição.

A pesquisa realizada por ASRAR et al. (1999) para verificar o desempenho de concretos com sílica ativa, em ambientes com íons cloreto, indicou que 10% de sílica ativa reduz 80% a carga passante, em Coulombs. Os resultados obtidos pelos pesquisadores também revelaram que o potencial de corrosão do concreto com sílica ativa foi menos negativo do que o do concreto de referência, durante todo o período de imersão parcial dos corpos-de-prova em solução NaCl 5% (220 dias).

Em relação à polêmica existente a respeito da capacidade de fixação de íons cloreto em concretos com sílica ativa, alguns pesquisadores apresentam um posicionamento contraditório ao relatado anteriormente. BYFORS et al., citado por GJØRV (1995), observou que a quantidade de cloretos combinados em concretos com 10% de sílica ativa é maior do que para os concretos sem adição.

Já TALIB et al. (1994) salientam que a influência da sílica ativa no risco de corrosão parece ser mais complexa devido aos diversos fatores que atuam concomitantemente, tais como a indiscutível densificação da matriz cimentante, a capacidade de fixação de cloretos e a redução da alcalinidade. Segundo os autores a redução da alcalinidade afeta a corrosão de maneiras adversas, aumentando o risco de corrosão em função da redução da concentração de íons  $OH^-$ , ou diminuindo o risco de corrosão pelo aumento da capacidade de fixação de cloretos com a diminuição da alcalinidade. Os autores, avaliando a corrosão

por íons cloreto em concretos com diversos teores de sílica ativa, concluíram que, embora a concentração de íons  $\text{OH}^-$  e o pH diminuam e a relação  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$  aumente, os ensaios de corrosão indicaram que os concretos com 20% de sílica ativa apresentam um desempenho duas vezes superior aos concretos sem adição em relação ao tempo para despassar a armadura, e que a taxa de corrosão é menor para teores de sílica ativa até 10%. No entanto a taxa de corrosão aumenta 25% quando o teor de sílica ativa é 15% ou 20%. A Figura 3.9 (a) e (b) ilustra os resultados relatados.



**Figura 3.9** Tempo para o início da corrosão (a) e Taxa de corrosão (b)  
(TALIB et al., 1994)

Segundo FIDJESTOL (1987) e BEAUDOIN et al. (1990), ao mesmo tempo em que a sílica ativa aumenta a concentração de cloretos livres na solução dos poros, pela diminuição do pH, reduz a difusão desses íons na massa de concreto. FIDJESTOL (1987) ainda coloca que a adição de sílica ativa diminui a taxa de corrosão e, em inúmeros casos, retarda significativamente a iniciação ou até mesmo previne o ataque da corrosão.

PAGE e HAVDAHL (1985), estudando o comportamento eletroquímico em pastas com diferentes teores de substituição de sílica ativa e adição de cloreto de sódio, constataram que o aumento da relação  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$  tende a desestabilizar o filme passivo da armadura nos primeiros estágios da hidratação. Contudo, os pesquisadores verificaram que para pastas com até 30% de sílica ativa e 0,4% de cloretos ocorre uma repassivação do aço após o início de corrosão devido à refinada estrutura de poros do material, que limita a mobilidade dos íons cloreto. Já no caso das misturas com 1% de cloretos a tendência de corrosão foi maior para as pastas com sílica ativa. Os autores salientam que o efeito da sílica ativa na passivação do aço na presença de cloretos não pode ser tratado somente considerando-se as alterações da composição da solução dos poros, sendo determinante na propagação da corrosão a densificação da matriz cimentante proporcionada pela sílica ativa.

RASHEEDUZZAFAR et al. (1992) colocam que em concretos com sílica ativa o efeito deletério do aumento da  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$  é compensado pela densificação e refinamento da estrutura de poros da matriz cimentante, responsável por reduzir significativamente a mobilidade e

difusão dos íons cloreto, além de aumentar a resistividade do concreto, minimizando o desenvolvimento do processo eletroquímico. Os autores constataram, através de ensaios acelerados de corrosão, que a sílica ativa melhora significativamente a resistência à corrosão em termos de tempo de iniciação, concluindo que, em média, concretos com 10 e 20% de sílica ativa apresentaram, respectivamente, um desempenho frente à corrosão da armadura 3,45 e 3,75 vezes melhor do que concretos sem sílica ativa.

Da mesma forma, ARYA e XU (1995) afirmam que apesar da relação  $Cl^-/OH^-$  ser maior em concretos com sílica ativa, a taxa de corrosão é substancialmente menor do que em concretos sem adição. Os autores salientam que esse fato revela que a velocidade de corrosão depende muito mais das características físicas da matriz do que da química da solução dos poros.

DELAGRAVE et al. (1995) concluíram que a utilização da sílica ativa, apesar de diminuir a fixação de cloretos, contribui consideravelmente para aumentar a resistência à penetração desses íons e demonstraram que argamassas com 6% de sílica ativa, em substituição à massa de cimento, apresentam um coeficiente de difusão 50% menor, em média, do que as argamassas sem adição.

A influência da sílica ativa na difusividade de pastas com sílica ativa foi avaliada por BENTZ et (2000), os quais concluíram que se existe alguma tendência da sílica ativa reduzir o limite de íons cloreto para despassivar a armadura, esse efeito é compensado pela significativa redução da difusão de cloretos verificada com a utilização da sílica ativa. Segundo os autores, a difusividade do C-S-H secundário, formado pela reação pozolânica, é 25 vezes menor que do C-S-H original.

PREECE, ARUP e FRØLUND (1983), ao estudarem o comportamento da corrosão da armadura em argamassas com adição de sílica ativa, verificaram que a estrutura de poros ultrafina da matriz de cimento com sílica ativa limita o acesso de água à superfície do aço, promovendo uma elevada proteção à armadura. Os autores colocam que, apesar do fato da sílica ativa reagir com o hidróxido de cálcio e, possivelmente, reduzir o pH da solução dos poros na pasta, a corrosão não foi detectada em corpos-de-prova com sílica ativa, após vários meses expostos em diferentes ambientes agressivos (solução de NaCl, solução de  $H_2CO_3$ , entre outros).

AL-SUGAIR (1994) afirma que a redução do pH devido à reação da sílica ativa com o hidróxido de cálcio é compensada pela redução da permeabilidade do concreto com sílica ativa, e observou em ensaios de corrosão que a adição de 10% de sílica ativa proporciona concretos com desempenho superior aos concretos sem adição, em função do maior tempo

para iniciação da corrosão e das menores taxas de corrosão verificadas com a presença da adição.

Diversos autores (BERKE et al., 1991; BERKE et al., 1992; JARRAH et al., 1995; TÜRKMEN et al. 2002; entre outros) relataram a influência da sílica ativa no processo de corrosão da armadura desencadeada por íons cloreto, concluindo que a sílica ativa reduz a taxa de corrosão, principalmente por refinar a estrutura de poros e densificar a matriz cimentante.

WOLSIEFER (1991) coloca que simplesmente diminuir a permeabilidade do concreto pela redução da relação água/cimento não resolve o problema da corrosão das armaduras em concretos contaminados com cloretos, apontando a utilização da sílica ativa como uma alternativa eficaz na proteção contra a corrosão. Segundo o autor, a sílica ativa, por proporcionar uma permeabilidade extremamente baixa, diminui a quantidade de cloretos no ânodo e a disponibilidade de umidade no concreto. Ainda ressalta, que a proteção irá existir mesmo na presença de fissuras, em função da alta resistividade elétrica do concreto com sílica ativa, que minimiza a corrente de corrosão na presença do íon cloreto.

CAO e SIRIVIVATNANON (1991), estudando o efeito da utilização de sílica ativa no concreto, concluíram que a substituição de 10% de cimento por sílica ativa em concretos de alta resistência provoca uma diminuição na taxa de corrosão. Entretanto, os autores verificaram que com 20% de sílica ativa a taxa de corrosão foi maior do que para o concreto sem adição e sugerem que esse resultado seja decorrente da diminuição do limite de cloretos necessário para despassivar a armadura em concretos com teores elevados de sílica ativa.

Os ensaios conduzidos por SCHIESSL e RAUPACH (1992) demonstraram que a utilização da sílica ativa proporciona um aumento da resistividade elétrica do concreto e uma diminuição da taxa de corrosão da armadura, no caso de despassivação causada por íons cloretos. Os autores argumentam que a principal razão para o efeito favorável da sílica ativa é a modificação da estrutura de poros do concreto, que causa uma restrição à mobilidade dos íons agressivos na solução dos poros.

ANQI ET et al. (1991) avaliaram os fatores que controlam a corrosão da armadura e verificaram que concretos com adição apresentaram excelente resistência à corrosão. Os resultados indicaram que concretos com sílica ativa apresentam menor permeabilidade, maior resistividade, maior resistência à penetração de cloretos e menor profundidade de carbonatação. Os autores apontaram o concreto com sílica ativa como um material “anti-corrosão”, excelente para estruturas marinhas, salientando que a adição é muito mais efetiva do que a redução da relação água/cimento para melhorar a durabilidade do concreto.

Os resultados obtidos por MANGAT et al. (1994) na avaliação do efeito das adições (cinza volante, escória de alto forno e sílica ativa) na corrosão da armadura mostraram que a substituição de 10% de sílica ativa, embora aumente a porosidade total, determinada por intrusão de mercúrio, reduz a penetração de íons cloreto e a taxa de corrosão. Os autores evidenciam que dentre as adições analisadas, a sílica ativa apresentou o melhor desempenho em relação à resistência à corrosão.

AL-AMOUDI et al. (1993), utilizando a técnica de resistência de polarização, mediram a taxa de corrosão da armadura de concretos com relação água/aglomerante 0,5 e diferentes adições minerais. Após a imersão parcial dos corpos-de-prova em solução com 2,1 % de sulfato e 15,7 % de cloreto por 540 dias, a taxa de corrosão do aço em concretos com cinzas volantes, com escória de alto forno e com sílica ativa foi, respectivamente, 2,5; 10,5 e 28 vezes menor do que a taxa observada para os concretos de referência, evidenciando o efeito benéfico da sílica ativa na proteção às armaduras.

De acordo com NEVILLE (1997), a sílica ativa reduz significativamente a “penetrabilidade” do concreto e aumenta sua resistividade, reduzindo, portanto, a velocidade de corrosão. O autor explica que mesmo com a redução do pH, decorrente da reação pozolânica com o hidróxido de cálcio, o efeito da sílica ativa na corrosão da armadura é positivo devido ao refinamento da estrutura de poros da pasta de cimento endurecida que proporciona um aumento da resistividade elétrica, determinante na propagação do fenômeno.

Com base nas colocações e conclusões dos diversos autores referenciados, pode-se dizer que o efeito da redução do pH na tolerância aos íons cloretos parece ser insignificante frente à diminuição da porosidade do concreto proporcionada pela ação física e química da sílica ativa, evidenciando que concretos com sílica ativa podem conferir uma excelente proteção às armaduras em relação à corrosão desencadeada por cloretos.

#### **3.4.1.2 Influência da sílica ativa na corrosão desencadeada por carbonatação**

Alguns autores discutem a influência da sílica ativa na carbonatação do concreto e apresentam posicionamentos adversos. VENNESLAND (1981), ROBERTS-SEYMOUR (1987), ANQI et al. (1991); SWAMY e SURYAVANSHI, 1998 e RISOLUTI et al. (2000) verificaram que a utilização de sílica ativa reduz a profundidade de carbonatação do concreto. Segundo RISOLUTI et al. (2000), a redução da carbonatação é decorrente da menor porosidade do concreto proporcionada pela sílica ativa. TORII et al. (1994) constatou que 10% de sílica ativa não alterou a profundidade de carbonatação de corpos-de-prova de concreto, com relação água/cimento 0,55, submetidos por cinco anos à carbonatação natural.



De acordo com MORANVILLE-REGOURD (1992), a profundidade de carbonatação em concretos com sílica ativa é igual ou superior à profundidade em concretos convencionais. Entretanto, segundo o autor a resistividade elétrica dos concretos com adições é superior e pode prevenir a corrosão da armadura mesmo que o aço esteja despassivado.

Já YAMATO et al. (1989), GRIMALDI et al. (1989); TORII e KAWAMURA (1992), SCISLEWSKI e WÓJTOWICZ (1996) e KULAKOWSKI (2002) observaram uma maior profundidade de carbonatação em concretos com sílica ativa. Os resultados obtidos por KHAN e LYNSDALE (2002) revelaram que a sílica ativa aumentou a profundidade de carbonatação. Porém, os autores ressaltam que a diferença detectada não é significativa.

Conforme SCISLEWSKI e WÓJTOWICZ (1996), a densificação da estrutura de poros em concretos com sílica ativa não é determinante na taxa de carbonatação, a qual depende, também, da facilidade do concreto em “combinar” o  $\text{CO}_2$ , que está diretamente relacionada ao teor de hidróxido de cálcio. Como a sílica ativa, em função da reação pozolânica, diminui a quantidade de hidróxido de cálcio, a difusão do  $\text{CO}_2$  é favorecida. Segundo os autores, o efeito do consumo do hidróxido de cálcio é maior que o efeito da densificação da matriz cimentante, o que justifica a maior profundidade de carbonatação em concretos com sílica ativa.

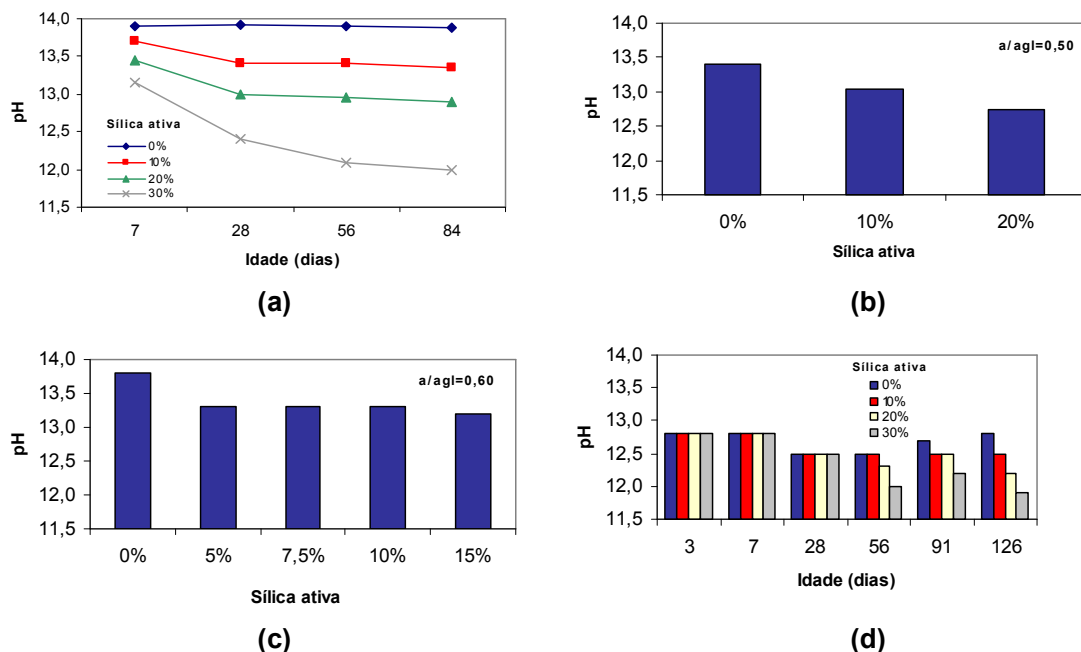
HELENE (1993) explica esse fato pelo conceito de reserva alcalina: *“À medida que na solução intersticial do concreto há uma maior concentração de hidróxido de cálcio,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , o gás carbônico,  $\text{CO}_2$ , não penetra com a mesma velocidade pois necessita primeiro rebaixar o pH e depois reagir com todo o hidróxido de cálcio presente para então seguir penetrando e precipitando o carbonato de cálcio na solução dos poros”*. O autor ressalta, no entanto, que a aparente desvantagem de concretos com adições (com menor reserva alcalina devido à reação pozolânica), pode ser minimizada com uma cura úmida adequada de forma a reduzir a porosidade e permeabilidade superficial do concreto e retardar o acesso do  $\text{CO}_2$ .

Segundo PAPADAKIS (2000), a constatação normalmente relatada na literatura de que as adições minerais reduzem a quantidade de hidróxido de cálcio e, portanto, aumentam a profundidade de carbonatação, é válida somente quando utilizadas como substituição de cimento. FIDJESTOL (1987) coloca que quando a sílica ativa é utilizada como substituição de cimento, a redução da alcalinidade pode ser considerada significativa, porém, quando utilizada como adição, a reserva alcalina mantém-se relativamente elevada, sem ser afetada pela reação pozolânica. O autor salienta, ainda, que para avaliar o efeito da carbonatação na corrosão de concretos com sílica ativa, além da medida da profundidade

de carbonatação, é indispensável a determinação da taxa de corrosão, que efetivamente quantifica o efeito da sílica ativa na corrosão da armadura.

MALHOTRA et al. (1992) afirmam que a sílica ativa, por um lado, reduz a quantidade de hidróxido de cálcio do concreto, aumentando a taxa de carbonatação. Por outro lado, a carbonatação pode ser minimizada pela natureza menos permeável dos concretos com sílica ativa, que tende a impedir o ingresso do  $\text{CO}_2$ . O balanço entre esses dois efeitos é variável e depende de vários fatores, tais como teor de sílica ativa, relação água/aglomerante, condições de cura e proporcionamento dos materiais, os quais possuem uma influência determinante no conteúdo de hidróxido de cálcio e/ou na permeabilidade do concreto.

De acordo com KHAYAT e AİTCIN (1992), a redução do pH da solução dos poros associada aos concretos com sílica ativa não representa, isoladamente, um risco à proteção da armadura visto que mesmo com teores de 30% de sílica ativa o pH não é menor do que 12, ou seja, não atinge o valor de 11,5, considerado o limite para manter a passivação da armadura (GJØRV, 1992). Diversos autores confirmam esse fato (PAGE e VENNESLAND, 1983; BYFORS, 1987; HAVDAHL e JUSTNES, 1993; ISAIA, 1995; SCISLEWSKI e WÓJTOWICZ, 1996; EL-SAYED et al., 1997; SEIDLER, 1999; KULAKOWSKI, 2002, entre outros). A Figura 3.10 (a), (b), (c) e (d) mostra os resultados de pH obtidos por alguns pesquisadores.



**Figura 3.10** pH em concretos com sílica ativa (a) PAGE e VENNESLAND (1983), (b) BYFORS (1987), (c) EL-SAYED et al. (1997) e (d) SEIDLER (1999).

O fato de a sílica ativa diminuir a alcalinidade e facilitar o ingresso de CO<sub>2</sub>, aumentando a profundidade de carbonatação, tal como relatado por alguns pesquisadores acima referenciados, favorece a despassivação da armadura. No entanto o desenvolvimento do processo corrosivo (propagação da corrosão) é determinado por parâmetros como a disponibilidade de oxigênio e a resistividade do concreto, os quais também são influenciados pela presença da sílica ativa.

Diversos autores (VENNESLAND, 1981; MEHTA, 1986; SELLEVOLD e NILSEN, 1987; ROBERTS-SEYMOUR, 1987; BERKE, 1989; ANQI et al., 1991; WOLSIEFER, 1991; GJØRV, 1992; SHIESSL E RAUPACH, 1992; ABREU, 1997; HOU, 2000; entre outros) colocam que a sílica ativa, por densificar a matriz cimentante, aumenta consideravelmente a resistividade elétrica do concreto.

HASSAN et al. (2000) verificaram que a difusão de oxigênio é menor em concretos com sílica ativa.

Diante dessas considerações, pode-se dizer que a melhor maneira de avaliar a influência da sílica ativa na corrosão da armadura desencadeada por carbonatação é através da determinação da taxa de corrosão. Considerando-se a cinética do processo é possível, efetivamente, identificar o efeito da sílica ativa na corrosão desencadeada por carbonatação, tal como colocado por FIDJESTOL (1987).

Salienta-se, entretanto, que os estudos referentes à velocidade de corrosão desencadeada por carbonatação de concretos com sílica ativa são bastante escassos na literatura, justificando a realização do presente trabalho.

### **3.4.2 Resistência à compressão**

É consenso no meio técnico que a adição de sílica ativa causa uma melhora notável na resistência à compressão do concreto (DETWILER e MEHTA, 1989; MALHOTRA et al., 1992; NAGATAKI, 1994; NEVILLE, 1997; AİTCIN, 2000; entre outros).

Segundo MONTEIRO e MEHTA (1986), o aumento da resistência à compressão dos concretos com sílica ativa é atribuído ao processo de refinamento dos poros e dos cristais presentes na pasta de cimento que exerce um papel fundamental no aumento das resistências mecânicas, na medida que aumenta a resistência da matriz na zona de transição.

MEHTA (1989) salienta que a capacidade da sílica ativa de reagir com o hidróxido de cálcio da pasta de cimento e formar silicato de cálcio hidratado adicional (C-S-H) provoca uma pronunciada redução na porosidade e na quantidade de microfissuras da matriz e da zona de transição, elevando a resistência à compressão do concreto.

Na opinião de MONTEIRO, citado por VIEIRA (1994), a sílica ativa, que tem partículas médias de 1/100 dos grãos de cimento, quando introduzida na pasta afeta o arranjo físico do sistema, principalmente próximo ao agregado, onde existe uma maior porosidade. O autor afirma que a reação pozolânica da sílica ativa com o hidróxido de cálcio parece introduzir “pontos de solda” na interface pasta/agregado, provocando uma densificação da matriz e conseqüente redução da porosidade que existe na zona de transição, o que explica o aumento da resistência quando a sílica ativa é utilizada.

Em resumo, MONTEIRO (1985) coloca que o efeito da sílica ativa na zona de transição e no conseqüente aumento da resistência à compressão pode ser explicado pelos seguintes pontos:

- Reação pozolânica da sílica ativa, que reduz a quantidade de  $\text{Ca(OH)}_2$  e forma C-S-H adicional;
- Menor acúmulo de água livre na interface pasta/agregado;
- Aumento da densidade da matriz, o que reduz o tamanho dos cristais e provoca refinamento da estrutura de poros;
- Formação de novos pontos de nucleação que dificultam a orientação preferencial dos cristais de hidróxido de cálcio na interface pasta/agregado.

DAL MOLIN (1995), ao avaliar a influência da sílica ativa nas propriedades mecânicas de concretos de alta resistência, constatou que a adição de 10% de sílica ativa promove um aumento de 7% a 16% na resistência à compressão, conforme a relação água/aglomerante.

ZHANG et al. (1999) verificaram, para concretos com relação água/aglomerante 0,32, que a utilização de 10% de sílica ativa, em substituição à massa de cimento, aumenta aproximadamente 21% a resistência à compressão aos 28 dias.

Já HASSAN et al. (2000), ao estudarem o efeito de adições minerais em concretos de alto desempenho, constataram que com 10% de sílica ativa, como substituição da massa de cimento, a resistência à compressão do concreto foi 9% maior do que a do concreto de referência. Os autores atribuem o pequeno incremento na resistência às condições de cura utilizadas no programa experimental ( $T=20^\circ\text{C}$  e  $UR=65\%$ ).

ASAVAPISIT et al. (2001) observaram, para concretos com relação água/aglomerante 0,45, que a substituição de 10% da massa de cimento por sílica ativa aumenta a resistência à compressão em 25%, aos 28 dias, em relação ao concreto de referência. No entanto, os autores verificaram que o concreto com 20% de sílica ativa

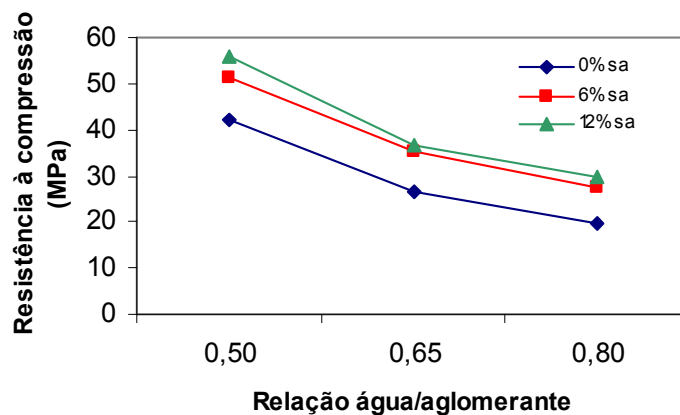
apresentou resistência inferior ao de referência e atribuem esse fato ao excesso de finos decorrente da utilização de 20% de sílica ativa que ocupam os poros, reduzindo o espaço disponível para o desenvolvimento das reações de hidratação, o que prejudica o desenvolvimento da resistência.

Os resultados obtidos por KHAN e LYNSDALE (2002), em pesquisa realizada para avaliar diversas propriedades de concretos de alto desempenho com relações água/aglomerante 0,27; 0,40 e 0,50, indicaram que a resistência à compressão aos 28 dias dos concretos com 10% de sílica ativa, em substituição à massa de cimento, aumenta em média 12% em relação ao concreto sem sílica ativa.

KULAKOWSKI (2002) verificou um aumento de 10% e 21% na resistência à compressão de concretos com 10% e 20% de adição de sílica ativa, respectivamente.

OH et al. (2002) concluíram que a resistência à compressão de concretos com relação água/aglomerante 0,43 e teores de 10 e 20% de adição de sílica ativa aumenta, respectivamente, 22% e 46% aos 28 dias.

Recentemente, DOTTO et al. (2003), ao avaliarem concretos com diferentes relações água/aglomerante (0,50; 0,65 e 0,80), com 6% e 12% de adição de sílica ativa, verificaram um aumento médio na resistência à compressão, em relação ao concreto sem adição, de 32% e 41% para os teores 6% e 12% de sílica ativa, respectivamente, conforme mostra a Figura 3.11.



**Figura 3.11** Resistência à compressão de concretos com sílica ativa (DOTTO et al., 2003).

## **4 PROGRAMA EXPERIMENTAL**

Tendo em vista os objetivos propostos no presente trabalho, o programa experimental foi elaborado de maneira que possibilitasse a avaliação do efeito da adição de sílica ativa ao concreto, em relação à sua influência no fenômeno da corrosão das armaduras.

Dessa forma, foram estudados concretos com diferentes relações água/aglomerante e teores de adição de sílica ativa, através de ensaios acelerados de corrosão desencadeada por íons cloreto e por carbonatação, empregando-se a técnica de resistência de polarização para o monitoramento eletroquímico do fenômeno ao longo de um determinado período de tempo.

Além disso, para maior entendimento do comportamento de concretos com sílica ativa frente à corrosão da armadura, foram planejados ensaios complementares que possibilitam avaliar o efeito das adições minerais ao concreto, tanto sob o ponto de vista físico, através da determinação da resistência à compressão e da absorvidade, como sob o ponto de vista químico, no aspecto de alteração da alcalinidade ou capacidade de fixação de íons agressivos.

A concepção do programa experimental foi baseada em um planejamento estatístico, objetivando uma maior segurança nos resultados obtidos ao final da realização dos experimentos, bem como a obtenção de modelos estatísticos de desempenho que representem com confiabilidade o comportamento em estudo.

Assim, este capítulo apresenta as variáveis analisadas, o planejamento dos experimentos, os materiais e traços de concreto utilizados, bem como a descrição dos procedimentos e métodos adotados na realização dos ensaios.

### **4.1 VARIÁVEIS**

A seguir são relacionadas as variáveis independentes e as variáveis dependentes estabelecidas para a realização do presente trabalho.

#### **4.1.1 Definição das variáveis independentes**

O enfoque principal do programa experimental proposto é avaliar de forma comparativa a influência da sílica ativa na corrosão da armadura desencadeada por íons cloreto e por carbonatação. Essa avaliação deve ser realizada de maneira suficientemente

ampla, que possibilite verificar o desempenho da adição de sílica ativa em concretos com diferentes características microestruturais, visto que a porosidade e estrutura interna do concreto influenciam os mecanismos de transporte relativos à iniciação da corrosão e as propriedades que controlam a propagação do fenômeno.

Dessa forma, considerando que a **relação água/aglomerante** é um parâmetro que influencia diretamente a porosidade do concreto, optou-se por estabelecer uma faixa de variação da relação água/aglomerante de 0,40 a 0,70, contemplando diferentes condições microestruturais e resistências à compressão de 20 a 60 MPa. A variação da relação água/aglomerante possibilitou um entendimento mais amplo e, portanto, mais seguro da influência na sílica ativa na corrosão da armadura.

Para avaliação do efeito da adição de **sílica ativa**, que altera significativamente a microestrutura do concreto através de efeitos de natureza física e química, foram estabelecidas porcentagens que variaram de 0 a 20% de adição. A faixa de variação escolhida teve como base dados indicados na literatura (MALHOTRA et al., 1992; MEHTA e MONTEIRO, 1993; KHAN e LYNDSDALE, 2002; TÜRKMEN et al., 2002), que apontam como teores ótimos de adição valores em torno de 10%, permitindo verificar, dessa forma, a influência de teores usualmente utilizados em concreto, bem como valores de referência (0%) e valores extremos de adição (20%).

Assim, para a realização dos ensaios propostos foram definidas as variáveis independentes e seus níveis, conforme apresentado na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1** Variáveis independentes.

<b>Variável controlável</b>	<b>Níveis</b>		
• Relação água/ aglomerante	0,40	0,55	0,70
• Teor de sílica ativa	0%	10%	20%

A escolha de três níveis para as variáveis foi considerada suficiente tendo em vista o planejamento estatístico adotado, o qual previu o tratamento estatístico dos resultados obtidos, através de modelos de comportamento.

#### **4.1.2 Definição das variáveis dependentes**

As variáveis dependentes, que medem ou caracterizam a resposta do experimento, estão associadas aos ensaios realizados para avaliar o efeito das variáveis independentes na corrosão da armadura. Dessa forma, foram definidas as variáveis de resposta, relacionadas a seguir:

- Potencial de corrosão ( $E_{corr}$ );
- Intensidade de corrosão ( $i_{corr}$ );
- Perda de massa eletroquímica;
- Perda de massa e taxa de corrosão gravimétrica;
- Tempo para despassivação da armadura.

Em relação aos ensaios realizados para complementar a pesquisa, e obter dados que subsidiem a interpretação dos resultados de corrosão, foram definidas as seguintes variáveis de resposta:

- Resistência à compressão ( $f_c$ )
- Profundidade de carbonatação ( $p_c$ )
- Teor de íons cloreto livres (% Cl<sup>-</sup>)
- Taxa de absorção (S);
- Resistência capilar (M)

## 4.2 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

A concepção do projeto de um experimento deve considerar diversos aspectos, tais como, a seleção das variáveis independentes (fatores controláveis), a definição e caracterização dos níveis para cada variável independente, o número de repetições, além de restrições originadas pelas condições experimentais, como limitações de tempo e recursos financeiros.

Quando um projeto, que nesse caso refere-se ao planejamento do experimento, é adequadamente conduzido obtém-se, a um custo mínimo, a maior quantidade de informações acerca das características dos fatores estudados. Além disso, um planejamento estatístico adequado facilita a avaliação da significância do efeito de um ou vários fatores sobre uma variável dependente, assegurando confiabilidade e respaldo científico dos resultados finais (NANNI e RIBEIRO, 1992).

Levando em consideração as questões acima referidas, bem como a definição dos parâmetros e objetivos da pesquisa, optou-se pela realização de um Projeto Fatorial Cruzado, considerado eficiente quando se deseja avaliar o efeito de um ou mais fatores independentes e o efeito da interação entre os fatores.

O Projeto Fatorial Cruzado foi realizado de forma completa, com duas repetições para cada combinação de variáveis ( $n=2$ ). A fim de evitar a interferência de alguma variável



não controlável, decorrente do processo de moldagem (“efeito betonada”), os experimentos foram realizados em dois blocos, obtendo-se uma repetição de cada bloco, conforme apresentado na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2** Planejamento do experimento.

Relação água/aglomerante			
Sílica ativa (%)	0,40	0,55	0,70
0	x	x	x
	x	x	x
10	x	x	x
	x	x	x
20	x	x	x
	x	x	x

Bloco 1
Bloco 2

Para acelerar a corrosão foram adotados os métodos de corrosão desencadeada por **íons cloreto** e por **carbonatação** do concreto, por serem esses os principais mecanismos de despassivação das armaduras de concreto armado.

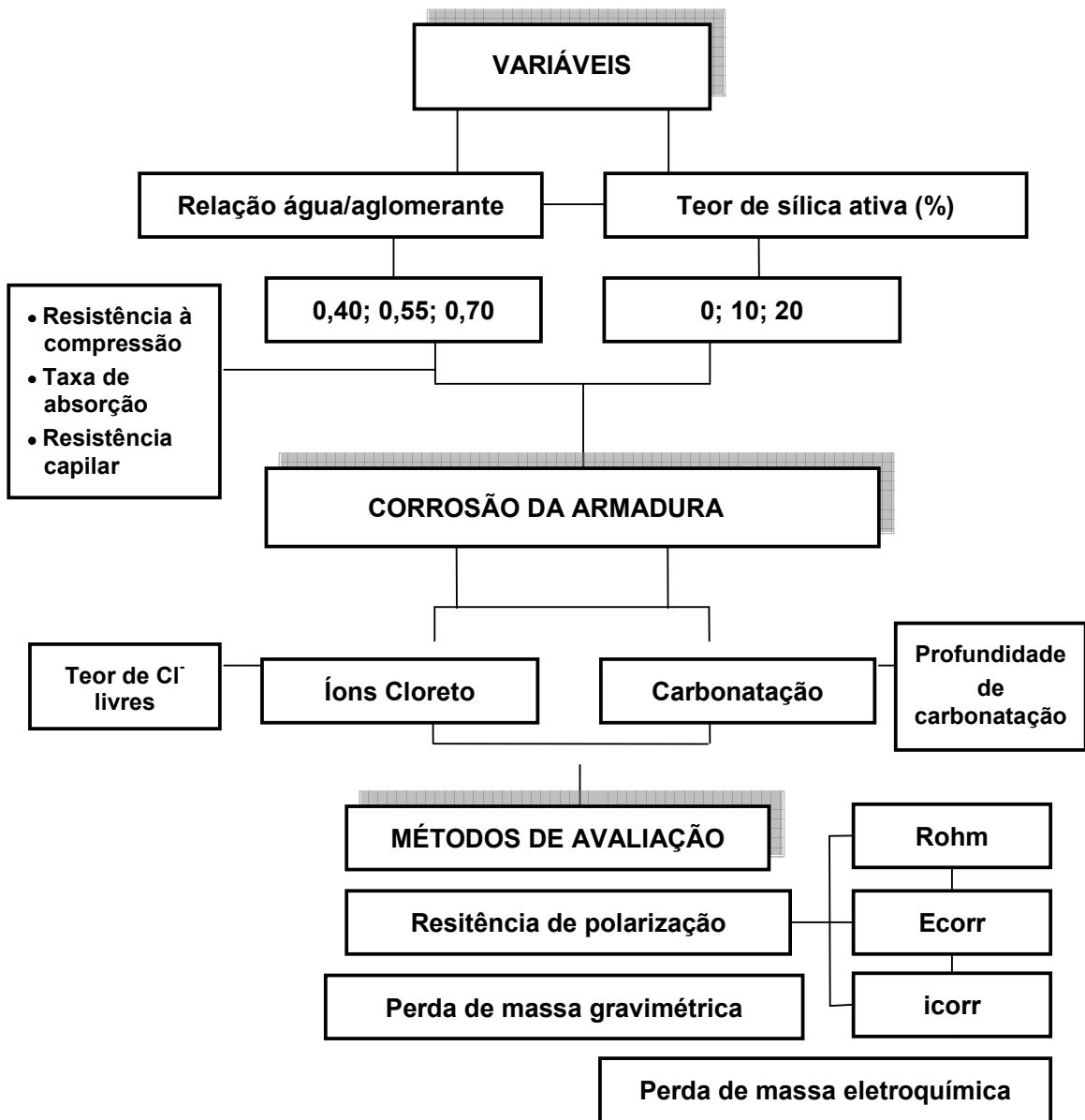
Os ensaios de corrosão foram realizados em câmara climatizada, com temperatura e umidade relativa controladas ( $T= 25 \pm 2^\circ \text{C}$  e  $UR= 70 \pm 5\%$ ), com a finalidade de eliminar quaisquer efeitos ou influências decorrentes da falta de controle sobre esses parâmetros na análise e interpretação dos resultados obtidos, além de se proporcionar um ambiente adequado ao desenvolvimento das reações de corrosão.

O condicionamento do ambiente para a realização dos ensaios de corrosão justifica-se pelo fato do teor de umidade ser um dos fatores que mais influencia na velocidade de corrosão, tanto por ser necessária para que ocorra a reação anódica e a reação catódica de redução do oxigênio, como por influenciar na resistividade do concreto. Em baixas umidades relativas, a resistividade é muito elevada e o processo de corrosão fica muito dificultado. Por outro lado, em condições de saturação, ainda que a resistividade seja a menor possível, facilitando as reações de corrosão, o oxigênio encontra maior dificuldade para chegar até a armadura, resultando em uma velocidade de corrosão insignificante. Na faixa de umidade definida para a realização dos ensaios ( $70 \pm 5\%$ ) a difusão de oxigênio até a armadura ocorre com facilidade e a resistividade é suficientemente baixa para permitir o desenvolvimento das reações de corrosão (NEVILLE, 1995).

Além disso, em baixas temperaturas, onde a mobilidade iônica é reduzida, a velocidade de corrosão também é reduzida. No entanto, a escolha de temperaturas mais elevadas, que promovem aumento da mobilidade iônica e um conseqüente aumento na

velocidade de corrosão, inviabilizaria a realização dos ensaios na sala, por desconforto térmico. Sendo assim a temperatura foi definida em  $(25\pm 2)^\circ\text{C}$ , também por estar próxima à temperatura média de muitas cidades brasileiras.

A Figura 4.1 apresenta um esquema simplificado do programa experimental proposto na presente pesquisa, para avaliar o desempenho de concretos com sílica ativa frente à corrosão da armadura.



**Figura 4.1** Esquema simplificado dos ensaios realizados.

## 4.3 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

### 4.3.1 Cimento

Para a produção dos concretos foi utilizado Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI), oriundo de um mesmo lote de fabricação. A opção pela utilização desse tipo de cimento deveu-se ao fato do mesmo não apresentar adições pozolânicas, possibilitando evitar a influência de qualquer outra adição reativa nos resultados obtidos.

As características químicas e físico-mecânicas do cimento utilizado estão apresentadas, respectivamente, nas Tabelas 4.3 e 4.4, conforme os dados fornecidos pelo fabricante.

**Tabela 4.3** Características químicas do cimento CP V-ARI.

Determinação	Resultados (%)	Limites da NBR5733 (1991)
SiO <sub>2</sub>	18,20	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,10	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,90	-
CaO	61,30	-
MgO	1,46	≤ 6,5%
SO <sub>3</sub>	3,47	≤ 3,5%
Na <sub>2</sub> O	0,20	-
K <sub>2</sub> O	0,89	-
C <sub>3</sub> A	6,78	-
Perda ao fogo	2,36	≤ 4,5%
CaO livre	1,16	-
Resíduo Insolúvel	0,45	≤ 1,0%

**Tabela 4.4** Características físico-mecânicas do cimento CP V-ARI.

Determinação		Resultados	Limites da NBR5733 (1991)
Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )		3,11	-
Finura – peneira nº 325 (%)		1,8	-
Superfície específica Blaine (cm <sup>2</sup> /g)		4650	≥ 3000 cm <sup>2</sup> /g
Tempos de pega	Início	4h00min	≥ 1 h
	Fim	5h30min	≤ 10 h
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	23,7	≥ 14,0 MPa
	3 dias	37,6	≥ 24,0 MPa
	7 dias	42,7	≥ 34,0 MPa
	28 dias	49,2	-

#### 4.3.2 Agregado miúdo

Foi utilizada areia natural quartzosa proveniente do leito do rio Jacuí-RS, comercializada no mercado local como “areia regular”, cuja composição granulométrica e massa específica estão apresentadas na Tabela 4.5.

**Tabela 4.5** Características do agregado miúdo.

Composição Granulométrica – NBR7217 (1987)		
Abertura da peneira (mm)	% Retida	% Retida acumulada
4,8	0	0
2,4	8	8
1,2	15	23
0,6	34	57
0,3	30	87
0,15	12	99
< 0,15	1	1
Dimensão máxima característica		4,8 mm
Módulo de finura		2,75
Graduação (zona)		Média (3)
<b>Massa específica – NBR9776 (1987)</b>		2,62 kg/dm <sup>3</sup>

#### 4.3.3 Agregado graúdo

Para a moldagem dos corpos-de-prova foi utilizado agregado graúdo britado, de origem basáltica, passante na peneira com abertura 19 mm. A Tabela 4.6 apresenta as características do agregado graúdo utilizado.

**Tabela 4.6** Características do agregado graúdo.

<b>Composição Granulométrica – NBR7217 (1987)</b>		
Abertura da peneira (mm)	% Retida	% Retida acumulada
19	0	0
12,5	54	54
9,5	32	86
6,3	13	99
4,8	1	100
< 4,8	0	100
Dimensão máxima característica		19 mm
Módulo de finura		6,86
Graduação		Brita 1
<b>Massa específica - NBR 9937 (1987)</b>		2,80 kg/dm <sup>3</sup>
<b>Absorção de água - NBR 9937 (1987)</b>		0,6%

#### 4.3.4 Sílica ativa

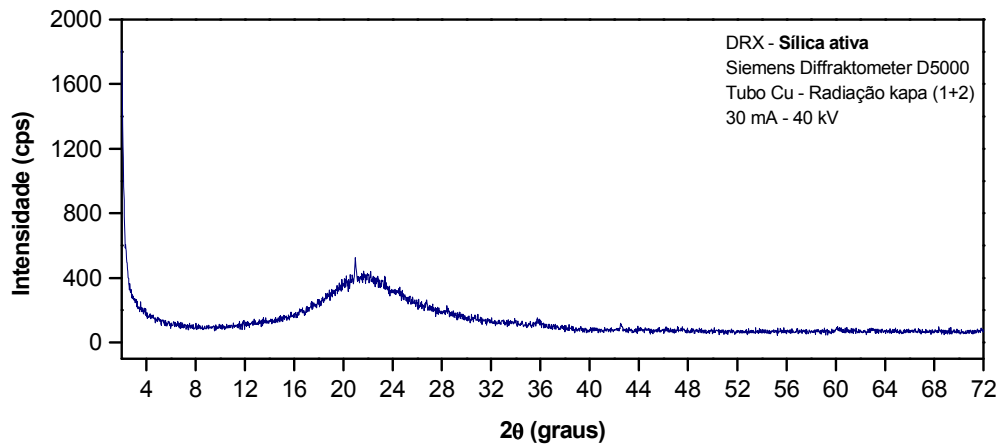
No presente trabalho foi utilizada sílica ativa não densificada, fornecida por empresa nacional na forma de pó, oriunda de um único lote de produção. A composição química e as características físicas da sílica ativa, fornecidas pelo fabricante, estão apresentadas na Tabela 4.7.

**Tabela 4.7** Composição química e características físicas da sílica ativa.

<b>Composição química (%)</b>		<b>Características físicas</b>	
SiO <sub>2</sub>	94,00	Umidade	0,90
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,07	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05	Densidade aparente	0,34
CaO	0,33	pH	7,9
MgO	0,55	% resíduo na peneira 45 µm	2,78
Na <sub>2</sub> O	0,20	Superfície específica - BET (m <sup>2</sup> /kg) <sup>12</sup>	20780
K <sub>2</sub> O	1,28		
Perda ao fogo	3,01		

<sup>12</sup> A determinação da superfície específica por adsorção de nitrogênio foi realizada no Laboratório de Materiais Cerâmicos – LACER – da Escola de Engenharia da UFRGS.

A caracterização da estrutura morfológica da sílica ativa foi obtida pela técnica de análise por difração de raios-X (DRX), realizada no Laboratório de Difração de raios-X do Instituto de Geociências da UFRGS, com um Difratômetro marca SIEMENS, modelo D5000, tipo KRISTALOFLEX de radiação  $\text{CuK}\alpha$ , corrente de 30 mA e voltagem de 40kV. A Figura 4.2 apresenta o difratograma obtido, onde se verifica o halo amorfo, caracterizando o espectro da sílica ativa com estrutura amorfa.



**Figura 4.2** Difratograma da sílica ativa.

#### 4.3.5 Aditivo Superplastificante

Em determinados traços foi necessária a utilização de aditivo superplastificante para obtenção da consistência pré-fixada ( $70 \pm 10$  mm). Nesses casos foi utilizado aditivo superplastificante a base de naftaleno sulfonado, cujas propriedades, fornecidas pelo fabricante, estão apresentadas na Tabela 4.8.

**Tabela 4.8** Propriedades do aditivo superplastificante.

Propriedade	Resultado
Massa específica	1,21 g/cm <sup>3</sup>
Teor de cloreto	Zero
Ar incorporado	< 2%
Teor de álcalis	< 72,0 g de Na <sub>2</sub> O/l

#### 4.3.6 Água

Para a produção dos concretos ensaiados foi utilizada água potável, proveniente da rede de abastecimento local.

#### 4.3.7 Barras de aço

Para a confecção dos corpos-de-prova foram utilizadas barras de aço do tipo CA-60, com 5 mm de diâmetro. A Tabela 4.9 apresenta as propriedades mecânicas da armadura utilizada, fornecidas pelo fabricante.

**Tabela 4.9** Propriedades mecânicas da armadura utilizada.

Bitola (mm)	Lote	Propriedades mecânicas				
		Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência (MPa)	Lr/Le	Alongamento (%)	Dobramento 5 x $\phi$ - 180°
5,00	Amostra 1	751	836	1,11	6,07	Ok
5,00	Amostra 2	740	838	1,13	6,03	Ok

#### 4.4 PROPORCIONAMENTO DOS MATERIAIS

A determinação dos traços de concreto foi realizada com base no método de dosagem desenvolvido pelo IPT/EPUSP, descrito por HELENE e TERZIAN (1993), através do qual foi fixado o teor de argamassa em 50%. Como parâmetro de controle foi pré-estabelecida uma consistência de  $70 \pm 10$  mm, determinada pelo abatimento do tronco de cone, segundo a NBR NM 67 (1998).

A partir dos resultados da resistência à compressão nas idades 1, 3, 7 e 28 dias foi elaborado o diagrama de dosagem, apresentado na Figura 4.3.

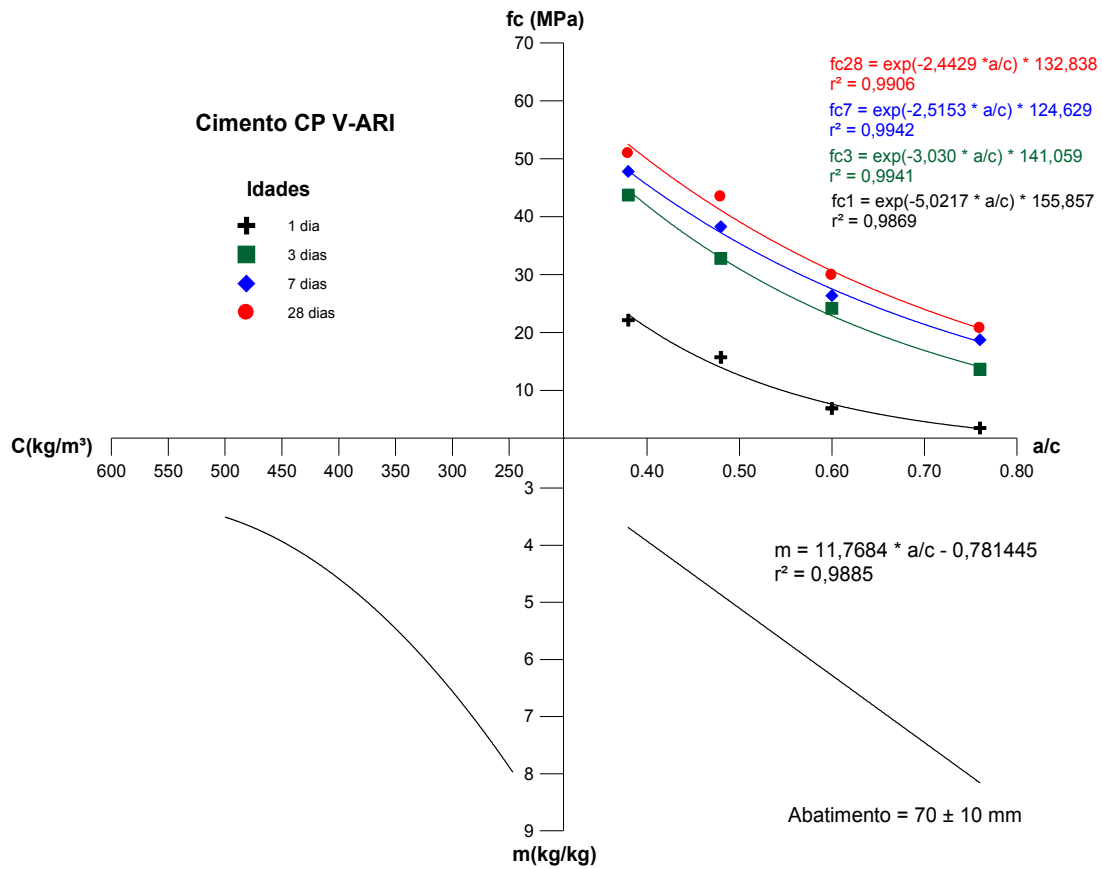


Figura 4.3 Diagrama de dosagem do concreto.



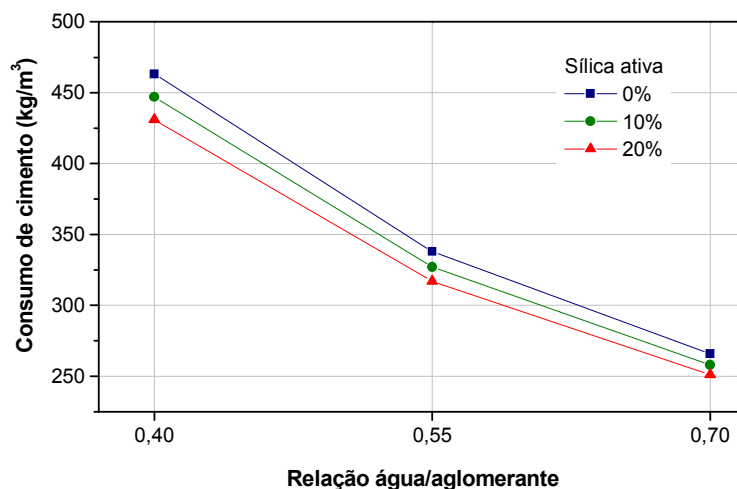
A sílica ativa foi incorporada ao concreto como adição, nos teores de 10% e 20% em relação à massa de cimento, utilizando-se para a obtenção da consistência prevista aditivo superplastificante na proporção de 0,2% a 1,3% em relação à massa de cimento.

A Tabela 4.10 apresenta os traços, em massa, utilizados no desenvolvimento do trabalho e a Figura 4.4 apresenta o consumo de cimento para as relações água/aglomerante e teores de sílica ativa.

**Tabela 4.10** Traços utilizados para a produção dos concretos (em massa).

Traço	Relação a/agl	Sílica ativa (%)	Consumo cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Aditivo (%)		Abatimento (mm)	
				Bloco 1	Bloco 2	Bloco 1	Bloco 2
1:1,47:2,46	0,40	0	463	0,2	0,2	70	60
1:2,35:3,34	0,55	0	338	-	-	75	70
1:3,23:4,23	0,70	0	266	-	-	75	80
1:1,47:2,46	0,40	10	447	0,7	0,8	65	80
1:2,35:3,34	0,55	10	327	0,5	0,6	65	80
1:3,23:4,23	0,70	10	258	0,3	0,2	70	70
1:1,47:2,46	0,40	20	431	1,3	1,3	65	70
1:2,35:3,34	0,55	20	317	1,0	0,7	80	75
1:3,23:4,23	0,70	20	251	0,6	0,4	70	65

Relação a/agl = Relação água/aglomerante



**Figura 4.4** Consumo de cimento dos traços ensaiados.

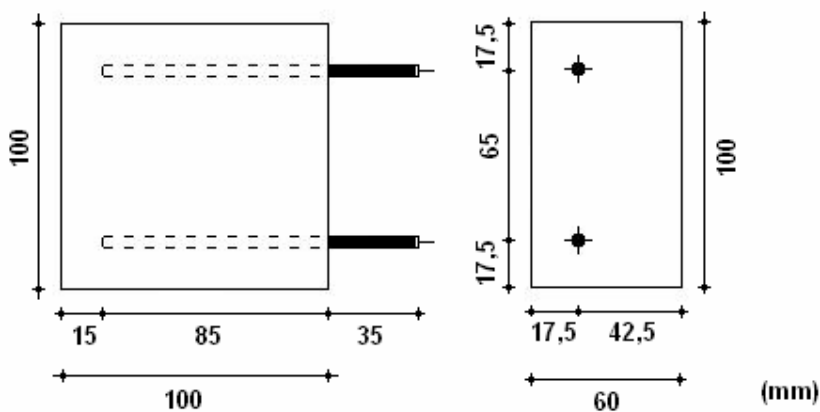
## 4.5 PREPARO E CONFECÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA

### 4.5.1 Geometria e dimensões dos corpos-de-prova

Para a realização dos ensaios de corrosão foram confeccionados corpos-de-prova similares aos utilizados em diversos estudos relacionados à corrosão de armadura (GONZÁLEZ et al., 1992; BAUER, 1995; MONTEIRO, 1996; CABRAL, 2000; entre outros), adotando-se alterações necessárias à adequação ao tipo de material avaliado.

No presente trabalho foram moldados corpos-de-prova prismáticos de dimensões nominais (100 x 100 x 60) mm, com duas barras de 5,0 mm de diâmetro e 120 mm de comprimento, conforme apresentado na Figura 4.5. A espessura do concreto de cobrimento foi definida em 15 mm para todas as misturas analisadas e a área da barra imersa no concreto não foi delimitada.

As dimensões do corpo-de-prova adotado satisfazem as exigências da NBR 6118 (1978) em relação à dimensão máxima característica do agregado graúdo empregado na moldagem dos concretos.



**Figura 4.5** Geometria e dimensões nominais dos corpos-de-prova.

Para a realização do ensaio de resistência à compressão foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, conforme estabelecido na NBR 5738 (1994).

#### **4.5.2 Preparação das barras de aço**

As barras de aço utilizadas para a moldagem dos corpos-de-prova foram cortadas com 120 mm de comprimento. Após o corte as barras foram preparadas conforme o procedimento descrito a seguir:

- em um dos topos de cada barra foi feito um orifício com torno mecânico, onde foi fixado um fio de cobre que possibilitava a conexão elétrica para a realização do ensaio. O fio de cobre foi fixado ao orifício através de solda de estanho;
- para a remoção dos óxidos superficiais procedeu-se a decapagem mecânica das barras através da limpeza com escova de aço giratória sob alta rotação, obtendo-se superfícies padronizadas na condição de “metal branco”;
- após a limpeza as barras foram identificadas e pesadas em balança com resolução de 0,01 g para obtenção da massa inicial;
- a área da barra projetada para fora do corpo-de-prova foi protegida através da pintura com fita isolante líquida “Plastfilm”, com a finalidade de evitar a corrosão nessa área, o que poderia mascarar o resultado da perda de massa gravimétrica e dificultar a comparação com a perda de massa eletroquímica.

#### **4.5.3 Moldagem e cura dos corpos-de-prova**

Seguindo o planejamento proposto, a moldagem dos corpos-de-prova foi realizada em dois blocos idênticos, identificados como “bloco 1” e “bloco 2”. Em cada qual, foram executados nove traços de concreto, resultantes da combinação de variáveis estudadas, obtendo-se um total de 18 betonadas.

Para cada mistura realizada foram moldados quatro corpos-de-prova, destinados aos ensaios de corrosão acelerada por íons cloreto e por carbonatação, bem como dois corpos-de-prova para o ensaio de resistência à compressão axial, conforme apresentado na Tabela 4.11.

**Tabela 4.11** Corpos-de-prova moldados nas misturas de concreto realizadas.

Mistura	Aceleração da corrosão		Ensaio
	Íons cloreto	Carbonatação	
Combinação Água/aglomerante Teor de sílica ativa	• Um corpo-de-prova com armadura	• Um corpo-de-prova com armadura	Eletroquímicos
	• Um corpo-de-prova sem armadura <sup>13</sup>	• Um corpo-de-prova sem armadura	Complementares
	Resistência à compressão		
	• Dois corpos-de-prova cilíndricos 100 x 200 mm		

Em cada bloco as misturas foram realizadas com ordem aleatória, previamente determinada por sorteio. A Tabela 4.12 apresenta a programação da realização das misturas, onde a letra refere-se à semana e o número à ordem de moldagem.

**Tabela 4.12** Programação da realização das misturas.

Bloco 1	Relação água/aglomerante			Bloco 2	Relação água/aglomerante		
Sílica ativa	0,40	0,55	0,70	Sílica ativa	0,40	0,55	0,70
0%	A - 5	A - 1	A - 6	0%	B - 11	B - 18	B - 10
10%	A - 2	A - 3	A - 4	10%	B - 14	B - 13	B - 12
20%	A - 8	A - 7	A - 9	20%	B - 17	B - 15	B - 16

As misturas foram realizadas em betoneira de eixo vertical, com capacidade de 32 litros, seguindo-se sempre a mesma ordem de colocação dos materiais, conforme relacionado a seguir:

- 100% do agregado graúdo + 40% da água;
- 100% do cimento + 40% da água;
- 100% da sílica ativa;
- 100% do aditivo superplastificante + 20% da água;
- 100% da areia.

A temperatura e a umidade relativa do laboratório no momento das moldagens foram registradas, permanecendo na faixa de 19°C a 23°C e entre 70% e 80%, respectivamente.

<sup>13</sup> Os corpos-de-prova sem armadura, destinados aos ensaios complementares, foram confeccionados com as mesmas dimensões dos corpos-de-prova para o ensaio de corrosão.

O concreto foi manualmente colocado nas fôrmas, com auxílio de uma colher de pedreiro, em direção perpendicular ao posicionamento das barras de armadura, com adensamento realizado com vibrador por imersão.

Os corpos-de-prova cilíndricos foram moldados de acordo com as especificações da NBR 5738 (1994).

Após a moldagem os corpos-de-prova foram cobertos com sacos plásticos, a fim de evitar a evaporação prematura de água, permanecendo no laboratório por 24 horas até a desforma. A partir de então, foram armazenados na câmara úmida, com temperatura igual a  $(23 \pm 2)^\circ \text{C}$  e umidade relativa maior do que 95%, por um período de 28 dias.

#### **4.6 CORROSÃO ACELERADA POR ÍONS CLORETO**

O procedimento de despassivação da armadura e aceleração da corrosão por ação de íons cloreto adotado no presente trabalho teve como referência o método utilizado por BAUER (1995) em sua tese de doutoramento, através da utilização de ciclos alternados de imersão parcial e secagem.

Ensaio cíclicos (imersão/secagem) têm sido amplamente utilizados por diversos pesquisadores (MANGAT e MOLLOY, 1992; NEPOMUCENO, 1992; MONTEIRO, 1996; HONG e HOOTON, 1999; CASCUDO, 2000; EL-DEBS e VAREDA, 2002), tendo-se obtido resultados satisfatórios para acelerar a corrosão.

Após a cura em câmara úmida ( $UR \geq 95\%$  e  $T = 23 \pm 2^\circ \text{C}$ ) por 28 dias, os corpos-de-prova<sup>14</sup> foram armazenados em sala climatizada com umidade relativa igual a  $(70 \pm 5)\%$  e temperatura igual a  $(25 \pm 2)^\circ \text{C}$  por um período de 14 dias, com o objetivo de atingir a idade estabelecida para o início da realização do ensaio acelerado (42 dias).

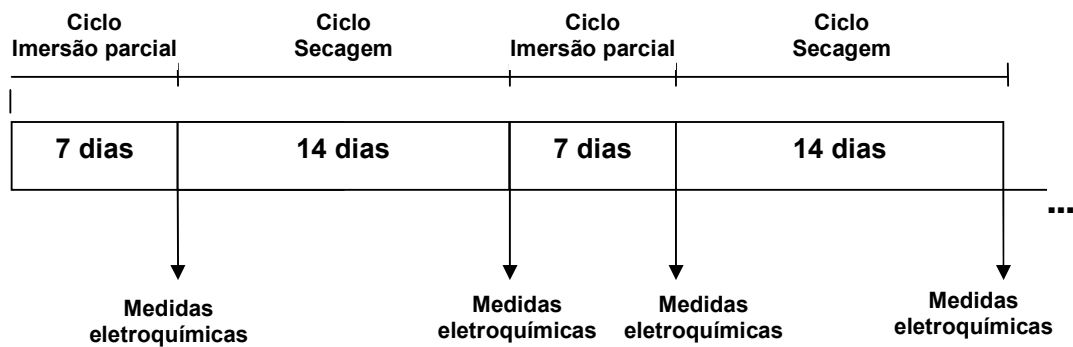
Aos 42 dias, após o período de cura em câmara úmida e armazenamento na sala climatizada, os corpos-de-prova foram pesados e foram realizadas as primeiras medidas eletroquímicas (medidas de referência) utilizando a técnica de resistência de polarização, segundo o procedimento descrito no item 4.8.1.1, que possibilita a determinação da resistência ôhmica, do potencial de corrosão, da resistência de polarização e da intensidade de corrosão.

---

<sup>14</sup> A face ortogonal às barras de armadura dos corpos-de-prova destinadas ao ensaio de corrosão desencadeada por íons cloreto foram seladas com resina à base de epóxi. Tal procedimento foi adotado com a finalidade de evitar o ingresso do agente agressivo pela interface barra/concreto.

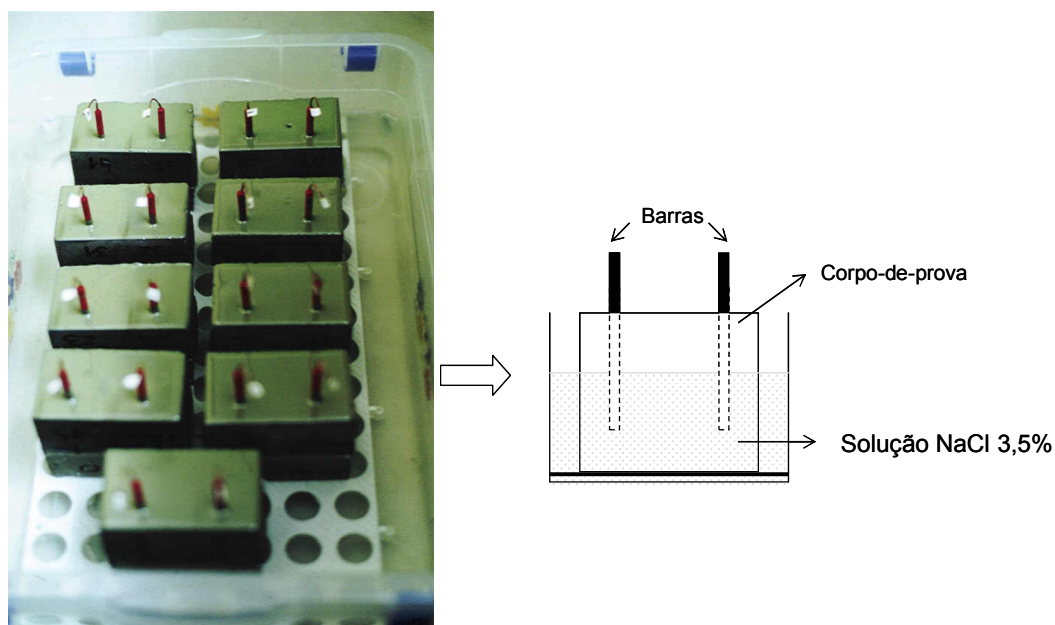
A partir de então, os corpos-de-prova foram submetidos a ciclos alternados de imersão parcial em solução de NaCl 3,5%, por 7 dias, e secagem em estufa a 50°C, por 14 dias. O período de tempo maior para a etapa de secagem do que para a etapa de umedecimento foi estabelecido considerando que em concreto a taxa de evaporação é mais lenta do que taxa de absorção de água (ANDRADE, 1992; HONG e HOOTON, 1999). Ao final de cada ciclo de imersão parcial e de secagem, foram realizadas as medidas eletroquímicas, dentro da sala climatizada.

A Figura 4.6 apresenta o esquema dos ciclos de agressão.



**Figura 4.6** Ciclos de imersão parcial e secagem.

Na etapa de imersão parcial os corpos-de-prova foram mantidos em recipientes preenchidos com solução NaCl 3,5% até o nível correspondente à metade da porção da barra imersa no concreto, conforme pode ser visualizado na Figura 4.7. Os recipientes com os corpos-de-prova em imersão parcial permaneceram na sala climatizada até o final da realização dos ensaios. A cada novo ciclo de imersão parcial a solução era renovada, garantindo-se sempre a mesma concentração da solução agressiva.



**Figura 4.7** Imersão parcial dos corpos-de-prova em solução NaCl 3,5%.

O teor 3,5% de NaCl foi adotado tomando-se como referência a salinidade dos oceanos, que é praticamente constante, estando na faixa de 3,49% a 3,54% (GENTIL, 1996). De acordo com o CEB (1992), as concentrações dos sais que constituem a água do mar podem variar de mar para mar, mas normalmente o conteúdo total de sais é aproximadamente 35 g/l.

No ciclo de secagem os corpos-de-prova foram colocados em estufa, tal como pode ser verificado na Figura 4.8, com temperatura de 50° C.



**Figura 4.8** Secagem dos corpos-de-prova em estufa a 50° C.

Os ciclos de agressão (imersão parcial e secagem) foram realizados por um período de 24 semanas, totalizando oito ciclos completos.

Segundo BAUER (1995), no ciclo de imersão parcial ocorre o mecanismo de transporte por absorção capilar e por difusão dos íons cloreto, podendo também ocorrer o ingresso de cloreto por difusão da solução, visto que nas faces expostas ao ar ocorre evaporação.

HONG e HOOTON (1999) colocam que os ciclos de molhagem e secagem aceleram a corrosão, pois no período de secagem a evaporação da água aumenta a concentração dos íons cloreto que penetraram, por absorção ou difusão, no período de umedecimento. Além disso, a etapa de secagem aumenta a disponibilidade de oxigênio necessário para a corrosão da armadura, visto que na etapa de imersão a difusão do oxigênio é substancialmente lenta.

Ainda, CASCUDO (2000) salienta que os ciclos aceleram a corrosão, pois asseguram um teor ótimo de umidade para a difusão do oxigênio, facilitando o processo. Na etapa de secagem o oxigênio pode se difundir rapidamente pelos poros preenchidos com ar e no período de molhagem dissolve-se no eletrólito já próximo às armaduras. Além disso, o autor coloca que com o decorrer dos ciclos há um acúmulo cada vez maior de sais nos poros do concreto no período de secagem, aumentando a concentração de cloretos na solução dos poros, facilitando a despassivação da armadura.

#### **4.7 CORROSÃO ACELERADA POR CARBONATAÇÃO**

O ensaio acelerado de corrosão por carbonatação consistiu em submeter os corpos-de-prova<sup>15</sup> à ação de CO<sub>2</sub>, em câmara de carbonatação acelerada com concentração de CO<sub>2</sub> ≥ 50%. Ensaio de carbonatação acelerada vêm sendo utilizados sistematicamente por diversos pesquisadores (NEPOMUCENO, 1992; FIGUEIREDO, 1994; BAUER, 1995; KASMIERCZAK, 1995; PAPADAKIS, 2000; KULAKOWSKI, 2002; MONTEMOR et al., 2002; entre outros).

Os corpos-de-prova para o ensaio acelerado de carbonatação foram curados em câmara úmida (UR ≥ 95% e T = 23 ± 2°C), por 28 dias, tal como realizado para o ensaio acelerado por íons cloreto.

---

<sup>15</sup> Além dos corpos-de-prova para a realização dos ensaios eletroquímicos, foram submetidos à agressão por carbonatação corpos-de-prova “irmãos”, sem armadura, para monitoramento da profundidade de carbonatação.



Considerando que a difusão de CO<sub>2</sub> em poros saturados é praticamente nula, fez-se necessário um condicionamento dos corpos-de-prova, a fim de estabilizar as condições de umidade dos mesmos e favorecer o processo de carbonatação.

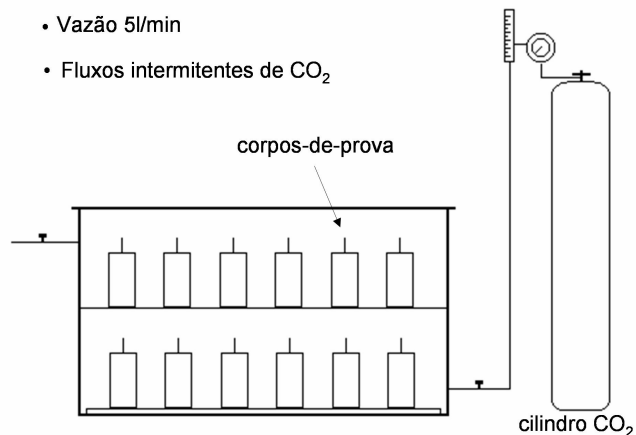
Dessa forma, os corpos-de-prova foram colocados em estufa a 50° C por sete dias e permaneceram por um período de 14 dias em sala climatizada com temperatura igual a (25 ± 2)°C e umidade relativa igual a (70 ± 5)%.

Diversos autores (HELENE, 1986; ROPER e BAWEJA, 1991; ANDRADE, 1992; BAUER, 1995; NEVILLE, 1997) concordam que a faixa de umidade relativa entre 50 e 70% corresponde a uma maior velocidade de carbonatação, visto que o processo de carbonatação por ocorrer em fase aquosa exige um certo grau de umidade nos poros e que em poros saturados a difusão de CO<sub>2</sub> é dificultada.

Salienta-se que a manutenção dos corpos-de-prova em ambiente climatizado, por um determinado período, teve como objetivo somente estabilizar as condições de umidade dos poros em uma faixa considerada ideal para o ingresso de CO<sub>2</sub>, sem a preocupação de uniformizar o grau de umidade dos concretos com diferentes relações água/aglomerante.

Aos 49 dias, após o período de cura em câmara úmida, secagem em estufa e armazenamento na sala climatizada, os corpos-de-prova foram pesados e foram realizadas as primeiras medidas eletroquímicas (medidas de referência) utilizando a técnica de resistência de polarização, segundo o procedimento descrito no item 4.8.1.1, que possibilita a determinação da resistência ôhmica, do potencial de corrosão, da resistência de polarização e da intensidade de corrosão.

A partir de então os corpos-de-prova foram colocados na câmara de carbonatação acelerada, localizada dentro da sala climatizada, garantindo-se assim um teor ótimo de umidade para o desenvolvimento das reações de carbonatação. A Figura 4.9 mostra uma representação esquemática da câmara de carbonatação utilizada.



**Figura 4.9** Representação esquemática da câmara de carbonatação acelerada.

O ensaio foi realizado através da aplicação diária de fluxos intermitentes de CO<sub>2</sub> na câmara de carbonatação, com vazão de 5l/min e duração de 20 min. Como o volume total da câmara era de 200 l, a cada fluxo aplicado injetava-se um volume de CO<sub>2</sub> correspondente a aproximadamente 50% do volume total da câmara.

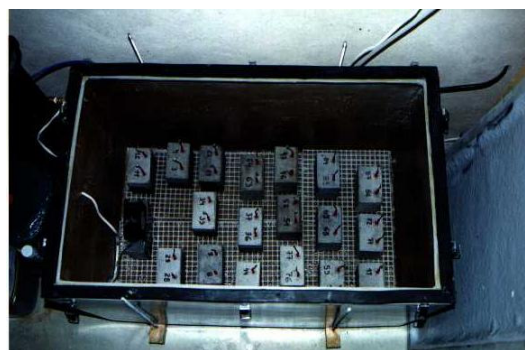
As medidas eletroquímicas, para determinação da resistência ôhmica, potencial de corrosão e resistência de polarização, foram realizadas após 24 horas e após 96 horas de permanência dos corpos-de-prova na câmara de carbonatação, sendo posteriormente realizadas a cada semana. Antes da realização das medidas eletroquímicas os corpos-de-prova eram pesados para monitoramento de massa ao longo do desenvolvimento do ensaio.

O ensaio acelerado de corrosão por carbonatação foi realizado por um período de 23 semanas, definido a partir da avaliação das medidas determinadas.

A Figura 4.10 (a) e (b) ilustra a câmara de carbonatação acelerada e a disposição dos corpos-de-prova na realização do ensaio.



(a)



(b)

**Figura 4.10** Câmara de carbonatação acelerada.

## 4.8 MÉTODOS DE ENSAIO

### 4.8.1 Ensaio de corrosão

#### 4.8.1.1 Resistência de polarização

A avaliação da corrosão da armadura foi realizada através da técnica eletroquímica de resistência de polarização, utilizando-se um potenciostato (*Gill AC*<sup>16</sup>) marca *ACM Instruments*, com compensação automática da queda ôhmica entre o eletrodo de referência e o eletrodo de trabalho. O potenciostato foi acoplado a um computador e através do software de aquisição (*Sequencer*) e análise dos dados, (*V4 Analysis*), foram registradas as medidas eletroquímicas.

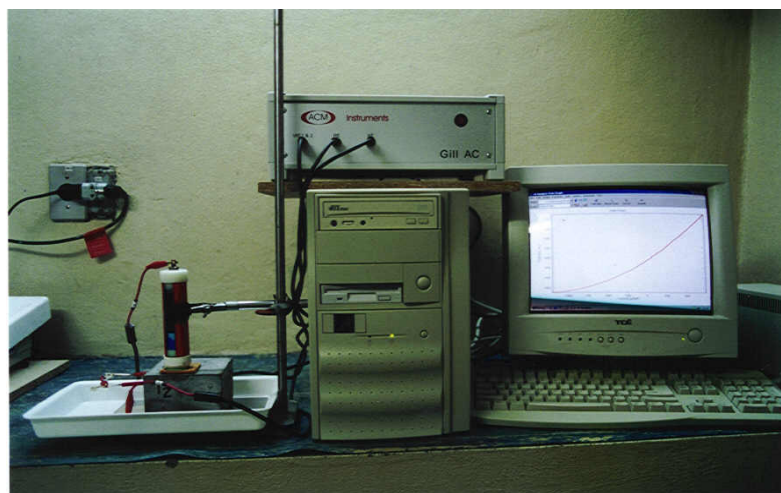
A célula eletroquímica foi composta pelo eletrodo de referência de Cu/CuSO<sub>4</sub> (marca MC Miller), pelo eletrodo de trabalho, que corresponde à armadura do corpo-de-prova e por um contra-eletrodo, constituído de uma placa de aço inoxidável disposta sob o corpo-de-prova. A Figura 4.11 ilustra o equipamento utilizado e a disposição da célula eletroquímica.

Para a realização do ensaio foram colocadas esponjas umedecidas entre o eletrodo de referência e o corpo-de-prova, bem como entre o contra-eletrodo e o corpo-de-prova, de modo a facilitar o contato elétrico entre as referidas partes.

O ensaio foi realizado através de um procedimento potenciodinâmico aplicando-se uma polarização de -10 a +10 mV ao redor do potencial de corrosão ( $E_{\text{corr}}$ ), no sentido anódico, com uma velocidade de 10mV/min. Esses parâmetros foram definidos com base em vários trabalhos relacionados ao estudo da corrosão de armaduras em concreto (GONZÁLEZ et al., 1985; BAUER, 1995; CASCUDO, 2000; CABRAL, 2000, entre outros).

---

<sup>16</sup> Gill AC é um equipamento para monitoramento de medidas eletroquímicas constituído por um potenciostato e um analisador de frequências. A queda ôhmica é compensada automaticamente: primeiramente é determinada a resistência da solução dos poros com um sinal alternado (10<sup>3</sup> Hz) e então durante a polarização é realizada a compensação, em tempo real.



**Figura 4.11** Equipamento utilizado e célula eletroquímica.

As medidas eletroquímicas determinadas no desenvolvimento do ensaio são relacionadas a seguir:

- a) **Potencial de corrosão –  $E_{corr}$  (mV):** avalia os aspectos termodinâmicos associados à corrosão da armadura, sendo possível detectar mudanças no estado superficial da armadura pela modificação dos valores de potencial quando essa passa do estado passivo para o estado ativo. O ensaio de potencial de corrosão fornece resultados que podem ser associados à probabilidade de corrosão, onde, segundo a ASTM C876 (1991), existe uma probabilidade de 95% de ocorrência de corrosão para valores de potenciais menores que -350 mV (eletrodo de referência de  $Cu/CuSO_4$ ).
- b) **Resistência ôhmica – IR ( $\Omega$ ):** está diretamente relacionada à resistividade do concreto, depende do teor de umidade do corpo-de-prova e possibilita avaliar interferências na intensidade de corrosão decorrentes de alterações nas condições de exposição.
- c) **Resistência de polarização –  $R_p$  ( $\Omega$ ):** representa a inércia que o sistema aço-eletrólito-concreto possui em desenvolver um processo eletroquímico de corrosão, mediante uma polarização imposta em torno do potencial de corrosão, como descrito no item 2.6.1. A resistência de polarização é definida como o quociente entre os incrementos de potencial e corrente ( $R_p = \Delta E/\Delta I$ ) e possibilita a determinação da intensidade de corrosão, que é o principal indicador da cinética do processo de corrosão.

A partir da determinação da resistência de polarização, a **intensidade de corrosão –  $i_{corr}$  ( $\mu A/cm^2$ )** foi obtida através da equação proposta por STERN e GEARY (1957), representada pela Equação 4.1:

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p \times A} \quad \text{Equação 4.1}$$

Onde:

$i_{corr}$  = intensidade de corrosão ( $\mu A/cm^2$ );

B = constante de Stern-Geary<sup>17</sup>;

$R_p$  = Resistência de polarização ( $k\Omega$ );

A = Área de exposição da armadura inserida no corpo-de-prova ( $cm^2$ )<sup>18</sup>.

A partir dos valores da intensidade de corrosão obtidos ao longo do tempo de ensaio, foi determinada a intensidade de corrosão total ( $i_T$ ) conforme a equação apresentada a seguir:

$$i_T = \int i_{corr} \times dt \quad \text{Equação 4.2}$$

O valor de  $i_T$  foi aplicado na fórmula de Faraday, obtendo-se a perda de massa eletroquímica, apresentada em mg.

#### 4.8.1.2 Perda de massa gravimétrica e taxa de corrosão gravimétrica

Ao final da realização dos ensaios de corrosão desencadeada por íons cloreto e por carbonatação os corpos-de-prova foram rompidos para retirada das barras de aço, com a finalidade de determinar a perda de massa gravimétrica e a taxa de corrosão gravimétrica.

Para tanto, as barras de aço foram preparadas segundo um procedimento de limpeza padronizado, especificado na ASTM G1 (1990), a fim de se obter a completa remoção dos óxidos formados dos resíduos remanescentes de concreto.

As barras foram imersas em uma solução de ácido clorídrico 1:1, com 3,5 g de hexametileno tetramina, a qual remove somente os óxidos formados na corrosão, sem atacar a superfície íntegra do metal.

---

<sup>17</sup> No presente trabalho foi adotado um valor de B = 26 mV, segundo a especificação de PAGE et al. (1991).

<sup>18</sup> Área de exposição da armadura = 13,35  $cm^2$ .

Foram estabelecidos quatro banhos de 10 minutos de imersão na solução, e ao final de cada banho as barras eram lavadas em água corrente e escovadas com escova de cerdas plásticas para remoção dos óxidos. Após o último banho as barras foram imersas em acetona por dois minutos, sendo posteriormente secas com jato de ar quente.

No final do procedimento acima descrito foi determinada a massa final de cada barra, através da mesma balança utilizada para a determinação da massa inicial das barras (subitem 4.5.2).

A perda de massa gravimétrica percentual foi calculada dividindo-se a diferença entre a massa inicial e a massa final pela massa inicial e multiplicando-se por cem.

A taxa de corrosão gravimétrica foi determinada em milímetros de penetração por ano, segundo a expressão indicada na ASTM G1 (1990):

$$i_{corr} = \frac{8,76 \times 10^4 \times W}{A \times t \times d} \quad \text{Equação 4.3}$$

Onde:

$i_{corr}$  = taxa de corrosão (mm/ano);

W = perda de massa (g);

A = área lateral exposta (cm<sup>2</sup>);

t = tempo de exposição (h);

d = massa específica do aço (g/cm<sup>3</sup>).

## **4.8.2 Ensaio complementares**

### **4.8.2.1 Resistência à compressão axial**

O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado de acordo com a NBR 5739 (1994), na idade de 28 dias. Previamente à execução do ensaio, os corpos-de-prova foram capeados com enxofre, a fim de regularizar as superfícies de aplicação da carga. Para a realização do ensaio foi utilizada uma prensa universal marca SHIMADZU, modelo Autograph UH 2000 KNG, com capacidade de 2000 kN, aplicando-se uma velocidade de carregamento de 0,5 MPa/s.

### **4.8.2.2 Profundidade de carbonatação**

A avaliação da profundidade de carbonatação foi realizada nas idades de 4, 28, 70 e 161 dias, utilizando-se a técnica de aspersão com solução à base de

fenolftaleína<sup>19</sup>, amplamente utilizada em pesquisas relacionadas à carbonatação (NEPOMUCENO, 1992; FIGUEIREDO, 1994, ISAIA, 1995; SEIDLER; 1999; MOURA, 2000; KULAKOWSKI, 2002).

Nas idades determinadas os corpos-de-prova prismáticos, moldados exclusivamente para a realização do ensaio de carbonatação, foram retirados da câmara de carbonatação e fraturados em uma prensa, retirando-se uma fatia para a aspensão da solução. A superfície fraturada foi limpa para remoção de poeira e resíduos decorrentes da fratura, sendo imediatamente aspergida com a solução de fenolftaleína.

Após um período, estabelecido em 20 minutos para todos os corpos-de-prova, foi realizada a medida da profundidade carbonatada nas quatro faces da fatia, com paquímetro de resolução 0,01 mm. A profundidade de carbonatação de cada fatia foi considerada como sendo a média ponderada da profundidade carbonatada de cada face, considerando a dimensão de cada face.

Após retirada cada fatia, nas idades pré-determinadas, a superfície fraturada do corpo-de-prova foi selada com parafina antes de ser recolocado na câmara de carbonatação, com a finalidade de evitar que o fluxo de CO<sub>2</sub> penetrasse com maior facilidade pela superfície fraturada.

#### **4.8.2.3 Determinação do teor de cloretos livres**

Para a realização do ensaio de determinação do teor de cloretos livres foram utilizados os corpos-de-prova moldados sem barras, conforme citado anteriormente. Ao final do ensaio acelerado por íons cloreto foi retirada uma porção de concreto da superfície do corpo-de-prova com espessura de aproximadamente 15 mm, definida a partir da espessura do concreto de cobertura utilizado. A porção retirada foi moída e peneirada, obtendo-se a amostra para a determinação do teor de cloretos livres.

O ensaio para determinação do teor de cloretos livres foi realizado pelo Laboratório de Química Inorgânica da Fundação de Ciência e Tecnologia – CIENTEC. A extração foi efetuada segundo a NBR 9917 (1988) e a determinação do teor de cloretos livres foi realizada por volumetria, através do método de Mohr. O método de Mohr consiste na titulação da solução contendo cloreto com uma solução de nitrato de prata, em presença do indicador químico cromato de potássio.

---

<sup>19</sup> A Solução foi formulada com 70% de álcool etílico, 30% de água deionizada e 1% de fenolftaleína, conforme recomendação da RILEM – CPC 18 (1988).

#### **4.8.2.4 Difração de raios-X**

A análise por difração de raios-X (DRX) foi realizada com objetivo de avaliar qualitativamente a influência da adição da sílica ativa no consumo de hidróxido de cálcio decorrente da reação pozolânica.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Difração de raios-X do Instituto de Geociências da UFRGS<sup>20</sup>, em amostras de concretos com relação água/aglomerante igual a 0,55, com teores de 0%, 10% e 20% de adição de sílica ativa, aos 91 dias de idade, visto que o objetivo proposto foi apenas comparar o efeito pozolânico da adição.

As amostras foram obtidas dos corpos-de-prova utilizados no ensaio para determinação da resistência à compressão, tendo sido preparadas através de moagem, com gral e pistilo, e peneiramento na peneira com abertura de 75 µm (nº 200).

#### **4.8.2.5 Avaliação da absorção de água – Método de Kelham**

Considerando que a durabilidade do concreto está diretamente associada à facilidade com a qual os fluidos podem ingressar e se deslocar no seu interior, foi avaliada a absorção de água por capilaridade dos concretos com e sem adição de sílica ativa. A absorção capilar é um fenômeno relacionado à corrosão da armadura, visto que para o seu desenvolvimento estão envolvidos mecanismos de transporte, seja do eletrólito necessário para ocorrência do fenômeno, ou mesmo de substâncias agressivas que desencadeiam ou aceleram o processo, como por exemplo, os íons cloreto.

A absorção de água por capilaridade foi avaliada pelo método de KELHAM (1988), através de ensaios realizados no projeto de pesquisa no qual o presente trabalho está inserido (DAL MOLIN et al., 1997).

Em virtude da amplitude do projeto de pesquisa (DAL MOLIN et al., 1997), os níveis das variáveis utilizadas no ensaio de absorção de água e o planejamento do experimento são diferentes dos estabelecidos para a realização dos ensaios de corrosão. Apresenta-se, a seguir, a matriz experimental do ensaio de absorção, que engloba a matriz de execução dos experimentos de corrosão, bem como a descrição do método de ensaio.

##### **4.8.2.5.1 Variáveis e planejamento do experimento**

A Tabela 4.13 relaciona os níveis estabelecidos para as variáveis independentes analisadas e a Tabela 4.14 apresenta as variáveis de resposta obtidas na realização do experimento.

---

<sup>20</sup> A análise por DRX foi realizada com um Difratômetro marca SIEMENS, modelo D5000, tipo KRISTALOFLEX de radiação CuK $\alpha$ , corrente de 30 mA e voltagem de 40kV.



**Tabela 4.13** Variáveis independentes e seus níveis – ensaio de absorção de água.

Variável independente	Níveis				
Relação água aglomerante	0,30	0,35	0,45	0,60	0,80
Teor de sílica ativa (%)	0	5	10	15	20

**Tabela 4.14** Variáveis de resposta – ensaio de absorção de água.

Variável de resposta
Taxa de absorção de água – S – (mm/h <sup>1/2</sup> )
Resistência capilar – M – (h/m <sup>2</sup> )

Visto que as variáveis independentes foram definidas em cinco níveis, conforme apresentado na Tabela 4.13, o ensaio de absorção de água foi realizado através de um projeto estatístico fatorial cruzado fracionado. O projeto fracionado permite verificar a influência das variáveis com a mesma representatividade de projetos completos, com redução de recursos financeiros e tempo para a execução de experimentos (NANNI e RIBEIRO, 1992).

Na Tabela 4.15 é apresentada a matriz experimental (5 x 5), onde apenas as combinações assinaladas foram executadas, com duas repetições por combinação de variáveis, em dois blocos aleatorizados.

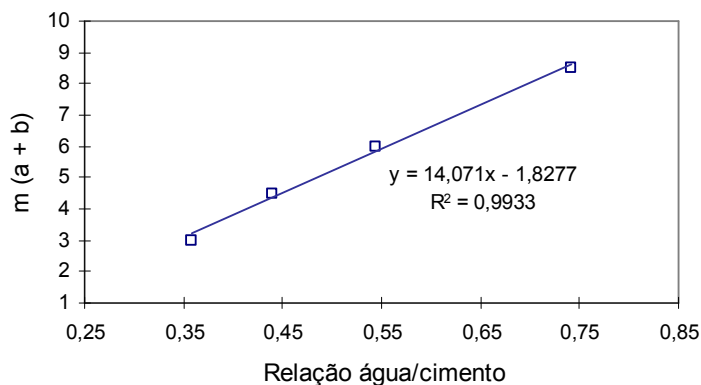
**Tabela 4.15** Matriz experimental para o ensaio de absorção de água.

Sílica ativa (%)	Relação água/aglomerante				
	0,30	0,35	0,45	0,60	0,80
0	x x		x x		x x
5		x x		x x	
10	x x		x x		x x
15		x x		x x	
20	x x		x x		x x

#### 4.8.2.5.2 Proporcionalamento dos materiais

Para a execução do ensaio de absorção de água foram utilizados os mesmos tipos de materiais empregados no programa experimental adotado para investigação da corrosão da armadura (item 4.3), porém provenientes de outro lote fabricação ou remessa.

A obtenção dos traços, isto é, do proporcionamento dos materiais constituintes do concreto, foi realizada com base no método de dosagem desenvolvido pelo IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1993), através da qual foi fixado um teor de argamassa de 46%. A curva de ajuste dos traços executados na dosagem, para a determinação da relação entre a quantidade de agregados secos totais “m” (agregado miúdo e agregado graúdo) e a relação água/cimento, é apresentada na Figura 4.12.



**Figura 4.12** Relação entre os agregados totais secos e a relação água/cimento.

A Tabela 4.16 apresenta os traços de concreto obtidos para as relações água/aglomerante e teores de sílica ativa utilizados.

**Tabela 4.16** Traços de concreto para o ensaio de absorção de água.

Traço	Relação a/agl*	Sílica ativa (%)	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Aditivo (%)		Abatimento (mm)	
				Bloco 1	Bloco 2	Bloco 1	Bloco 2
1:0,56:1,83	0,30	0	700	0,6	0,8	60	80
1:0,56:1,83	0,30	10	669	1,1	0,9	60	60
1:0,56:1,83	0,30	20	637	1,4	1,3	65	60
1:0,88:2,21	0,35	5	569	0,6	0,5	75	70
1:0,88:2,21	0,35	15	543	0,8	0,7	70	60
1:1,53:2,97	0,45	0	431	-	-	65	60
1:1,53:2,97	0,45	10	416	0,5	0,4	65	75
1:1,53:2,97	0,45	20	402	0,6	0,8	60	60
1:2,50:4,11	0,60	5	308	0,4	0,2	80	60
1:2,50:4,11	0,60	15	297	0,2	0,2	60	60
1:3,80:5,63	0,80	0	227	-	-	65	60
1:3,80:5,63	0,80	10	222	0,3	0,4	70	65
1:3,80:5,63	0,80	20	215	0,2	0,2	80	60

\* relação água/aglomerante

#### 4.8.2.5.3 Método de ensaio

O método de KELHAM (1988) baseia-se no monitoramento, ao longo do tempo, do acréscimo na massa aparente de um corpo-de-prova submerso em água, permitindo a determinação da taxa de penetração de água (S), a resistência capilar (M) e a porosidade efetiva ( $p_{ef}$ ).

Para a execução do ensaio foi utilizado um dispositivo composto por uma caixa plástica contendo água deionizada e uma balança hidrostática (Figura 4.13), o qual possibilitou monitorar a massa dos corpos-de-prova por um período de tempo, até a saturação.



**Figura 4.13** Dispositivo utilizado para a execução do ensaio de absorção de água (KULAKOWSKI, 2002).

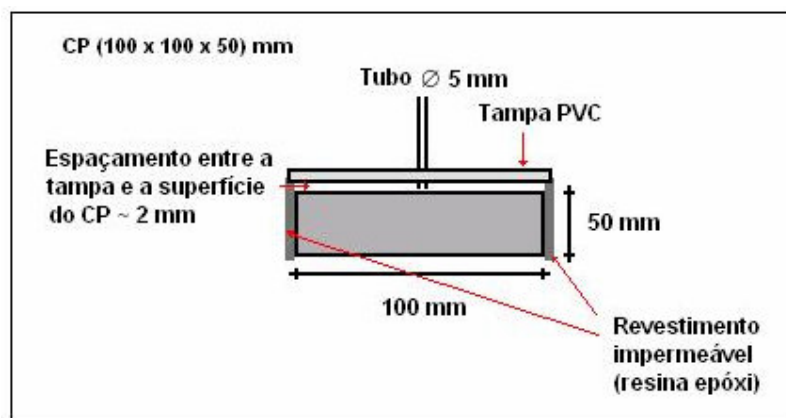
Foram utilizados corpos-de-prova prismáticos com dimensões de (100 x 100 x 50) mm, obtidos com auxílio de uma serra de corte diamantada de prismas de concreto, com dimensões de (100 x 100 x 300) mm, moldados com os traços a serem ensaiados. Salienta-se que o ensaio de absorção por capilaridade pelo método de KELHAM, apresentado no presente trabalho, foi o primeiro a ser desenvolvido no NORIE/UFRGS, adotando-se a espessura de 50 mm para o corpo-de-prova. No entanto, com o aprimoramento do método, diversos pesquisadores (MOURA, 2000; GONÇALVES, 2000; MASUERO, 2001) já utilizaram corpos-de-prova com espessuras de 25 mm, seguindo a sugestão de GOPALAN (1996), reduzindo consideravelmente o tempo de execução do ensaio.

O procedimento para a realização do ensaio de absorção de água pelo método de KELHAM é descrito a seguir:

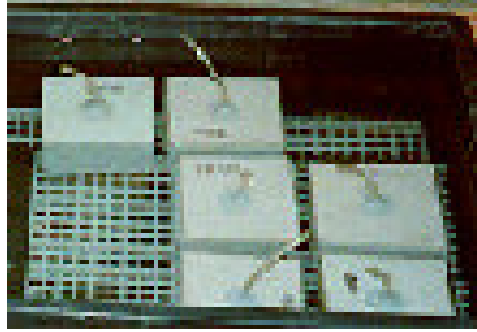
- Após a cura em câmara úmida por 28 dias, foi serrada uma fatia de (100 x 100 x 50) mm da extremidade do prisma de concreto moldado (100 x 100 x 300 mm) para obtenção do corpo-de-prova a ser ensaiado. O segmento restante do prisma (100 x 100 x 250) mm foi empregado para a

realização de ensaios propostos no projeto de pesquisa no qual a presente tese está inserida (DAL MOLIN et al., 1997). A face que ficou em contato direto com a água corresponde à face oposta à face serrada (topo do corpo-de-prova);

- A fatia serrada foi mantida ao ar durante aproximadamente 1 hora para que perdesse a água decorrente do processo de serragem. Em seguida foi determinada a espessura média e a área do corpo-de-prova, o qual, posteriormente, foi pesado em balança digital com 0,01 g de precisão;
- O corpo-de-prova foi colocado em estufa a temperatura de  $110 \pm 10^\circ\text{C}$ , sendo pesado a cada 24 horas até a constância de massa (definida como uma alteração de massa inferior a 0,1 %, sobre a massa menor, em um período de 24 horas);
- Após atingir a constância de massa o corpo-de-prova foi retirado da estufa e colocado em um dessecador com sílica gel para que resfriasse até atingir a temperatura ambiente sem absorver umidade;
- Depois de resfriados, as laterais do corpo-de-prova (faces de 50 x 100 mm) foram seladas com resina epóxi e foi acoplada na face superior do corpo-de-prova uma tampa constituída por uma placa de PVC com uma mangueira de 5 mm de diâmetro no centro, com a função de fazer contato com a atmosfera e garantir o equilíbrio de pressão entre a atmosfera e o espaço (aproximadamente 2 mm) entre a superfície do corpo-de-prova e a placa (Figura 4.14). A tampa de PVC foi colada ao topo do corpo-de-prova com borracha de poliuretano (mastique);
- O corpo-de-prova foi colocado em imersão total (Figura 4.15), monitorando-se a massa nos tempos estabelecidos: 2, 5, 15 e 30 minutos e 1, 2, 3, 6, 8, 24, 48, 72, 96 e 120 horas.

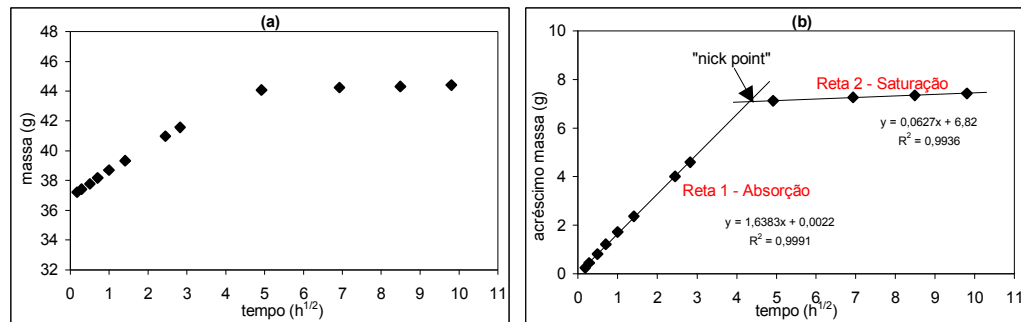


**Figura 4.14** Representação esquemática do corpo-de-prova preparado para o ensaio de absorção de água.



**Figura 4.15** Corpos-de-prova preparados, colocados em imersão.

Os valores da massa determinada ao longo do ensaio e do acréscimo acumulado de massa são plotados em gráficos em função da raiz quadrada do tempo, conforme o exemplo apresentado na Figura 4.16.



**Figura 4.16** Exemplo dos gráficos obtidos na realização do ensaio – (a) massa em função da raiz quadrada do tempo; (b) acréscimo de massa em função da raiz quadrada do tempo.

Verifica-se no gráfico (b) da Figura 4.16 duas fases distintas de absorção de água, onde são ajustadas por regressão linear simples duas retas: uma na fase de absorção inicial (reta 1) e a outra na fase de saturação (reta 2). O ponto de inflexão observado, denominado “nick point”, corresponde ao início da saturação do corpo-de-prova.

A **taxa de absorção de água**, denominada de absortividade –  $S$  ( $\text{g}/\text{cm}^2\text{h}^{1/2}$  ou  $\text{mm}/\text{h}^{1/2}$ ), é determinada através da inclinação da reta 1, ajustada para a fase de absorção, dividida pela área da superfície em contato com a água ( $100 \text{ cm}^2$ ).

A **resistência capilar** –  $M$  ( $\text{h}/\text{m}^2$ ) é obtida pelo quadrado do valor da abscissa do “nick point” dividido pela espessura do corpo-de-prova, conforme apresentado na Equação 4.4.

$$M = \left( \frac{t_{\text{cap}}}{e} \right)^2$$

*Equação 4.4*

Onde:

M = resistência capilar (h/m<sup>2</sup>);

t<sub>cap</sub> = abscissa do “nick point” (h<sup>1/2</sup>);

e = espessura do corpo-de-prova (m).

A **porosidade efetiva** – p<sub>ef</sub> (%) é determinada pela diferença entre a massa saturada (em t=120h) e a massa inicial seca (t=0). Como a massa no tempo t=0 não pode ser determinada, pois não existe possibilidade de equilibrar a balança em um tempo muito curto, calcula-se a massa inicial pela extrapolação da reta referente à fase de absorção inicial, originada na determinação da massa do corpo-de-prova ao longo da raiz quadrada do tempo (gráfico (a) da Figura 4.16). A porosidade efetiva é determinada em porcentagem, em relação ao volume do corpo-de-prova ou em relação à massa seca da amostra, conforme a Equação 4.5 (a) e (b).

$$p_{\text{ef}} = \frac{[M_{\text{sat}}(t = 120\text{h}) - M_{\text{s}}(t = 0)]}{V} \times 100 \text{ ou} \quad \text{Equação 4.5 (a)}$$

$$p_{\text{ef}} = \frac{[M_{\text{sat}}(t = 120\text{h}) - M_{\text{s}}(t = 0)]}{M_{\text{s}}} \times 100 \quad \text{Equação 4.5 (b)}$$

Onde:

p<sub>ef</sub> = porosidade efetiva (%);

M<sub>sat</sub> = massa saturada, calculada para t= 120 h;

M<sub>s</sub> = massa seca, calculada para t=0;

V = volume do corpo-de-prova.

## **5 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados para avaliação da corrosão da armadura em concretos com adição de sílica ativa, bem como as análises estatísticas e os modelos matemáticos que estimam o comportamento das propriedades analisadas.

A análise estatística dos resultados foi realizada utilizando-se a regressão linear múltipla ou a regressão não-linear múltipla, conforme a propriedade avaliada. A regressão múltipla representa a relação, linear ou não, entre uma variável dependente e duas ou mais variáveis independentes, originando um modelo matemático que explica, para um determinado nível de significância, o efeito das variáveis independentes e as possíveis interações na variável de resposta.

Através da análise foi possível estabelecer a significância dos fatores independentes e das interações sobre a variável de resposta, determinada a partir da análise de variância (ANOVA) dos termos dos modelos obtidos.

Também são apresentadas, quando existentes, as correlações entre as variáveis de resposta analisadas na presente pesquisa.

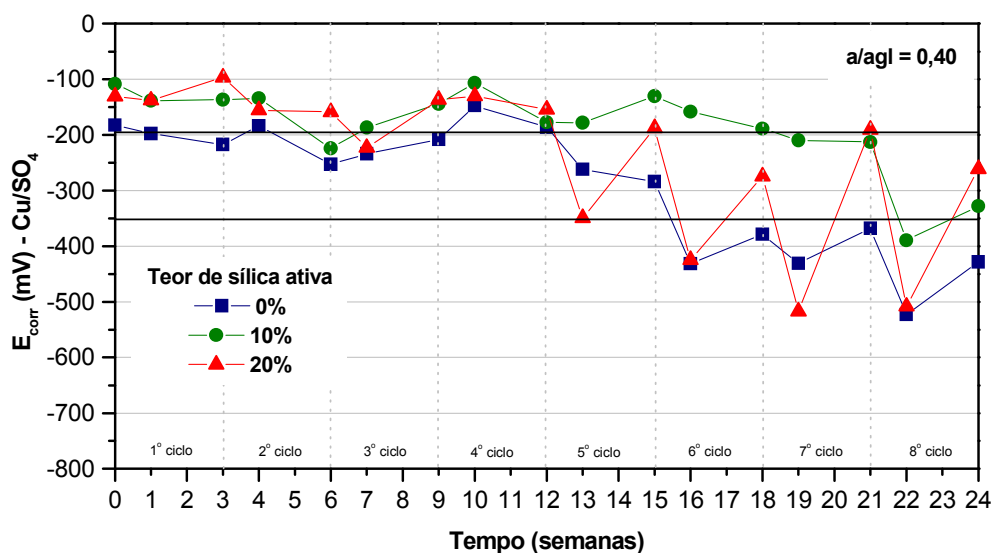
Convém salientar que as expressões obtidas da análise dos dados são gerais, ou seja, revelam a natureza dos efeitos relação água/aglomerante e teor de sílica ativa sobre a variável de resposta a partir das condições experimentais específicas do presente programa experimental (tipo de cimento, agregados, tipo das barras de aço, condições de cura, tipo de adensamento, entre outros).

## 5.1 ENSAIOS DE CORROSÃO DESENCADEADA POR ÍONS CLORETO

Os resultados das grandezas eletroquímicas avaliadas, apresentados a seguir, representam a média dos valores obtidos para as quatro barras de aço<sup>21</sup> ensaiadas em cada combinação das variáveis independentes – relação água/aglomerante e teor de sílica ativa.

### 5.1.1 Potencial de corrosão

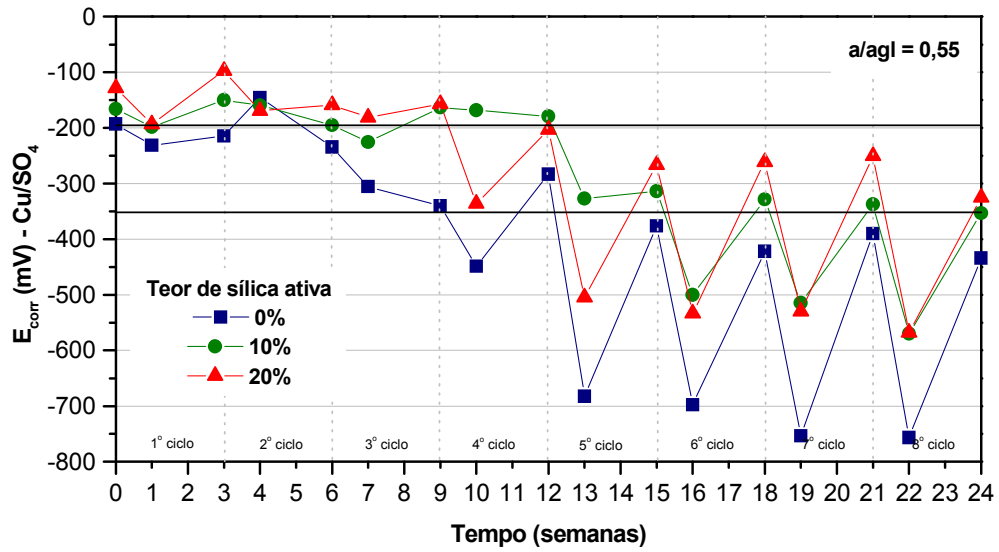
As Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 apresentam a evolução do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) ao longo do tempo de ensaio, para as relações água/aglomerante ( $a/agl$ ) 0,40; 0,55 e 0,70, respectivamente. Em cada figura estão representados os resultados para 0%, 10% e 20% de adição de sílica ativa.



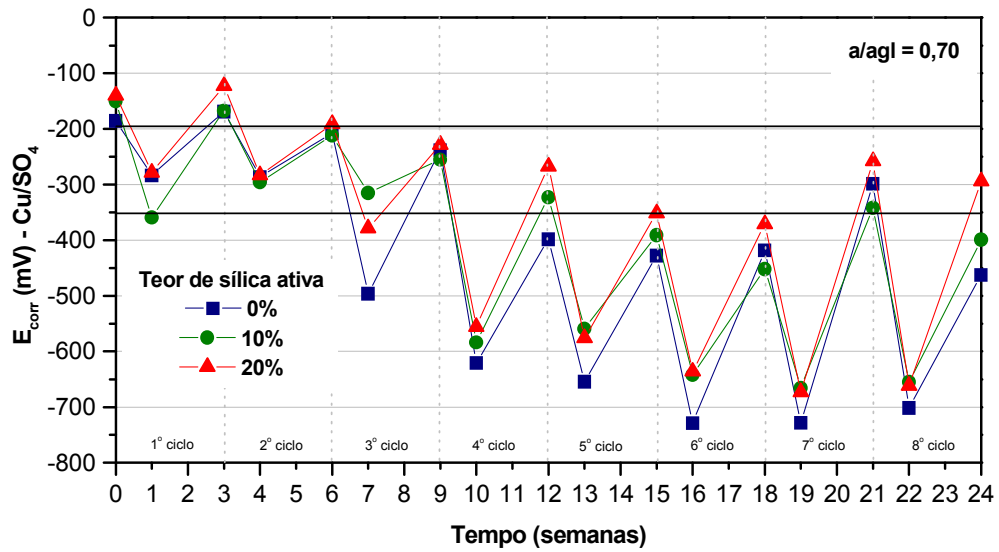
**Figura 5.1** Evolução do potencial de corrosão - relação água/aglomerante 0,40, corrosão por cloreto.

<sup>21</sup> Sendo duas barras do corpo-de-prova moldado no bloco 1 e duas barras do corpo-de-prova moldado no bloco 2.





**Figura 5.2** Evolução do potencial de corrosão - relação água/aglomerante 0,55, corrosão por cloreto.



**Figura 5.3** Evolução do potencial de corrosão - relação água/aglomerante 0,70, corrosão por cloreto.

Nas Figuras 5.1 a 5.3 observa-se a variação dos valores do potencial de corrosão, determinados ao final dos semiciclos alternados de imersão parcial e secagem do ensaio acelerado de corrosão por cloreto, a qual apresenta maior amplitude com o aumento da relação água/aglomerante. Na etapa de imersão parcial obtêm-se valores mais negativos para o potencial de corrosão em função da maior disponibilidade de eletrólito nos poros do concreto.

Os resultados obtidos indicam nitidamente a influência da relação água/aglomerante na probabilidade de corrosão da armadura. Verifica-se, na etapa de imersão parcial, que ao aumentar a relação água/aglomerante de 0,40 para 0,70 os valores finais médios do potencial de corrosão diminuem da ordem de -450 mV para -750 mV, aproximadamente, indicando a maior probabilidade de corrosão para maiores relações água/aglomerante. Em relação ao tempo para despassivação da armadura pode-se observar que quanto maior a relação água/aglomerante menor o tempo necessário para a modificação do potencial de corrosão para valores mais negativos, que revelam a mudança do estado superficial da armadura de passivo para ativo.

A adição de sílica ativa apresenta um efeito preponderante para relações água/aglomerante menores, conforme pode ser observado nas Figuras 5.1 e 5.2, onde se verifica que os potenciais obtidos em concretos com sílica ativa são menos suscetíveis à corrosão da armadura (valores menos negativos). Também se observa que a adição de sílica ativa aumenta o tempo necessário para o potencial atingir valores mais negativos, com maior probabilidade de corrosão.

A fim de confirmar as tendências observadas para a evolução do potencial de corrosão nos ensaios com corrosão acelerada por íons cloreto, bem como verificar a significância da relação água/aglomerante e do teor de sílica ativa, foi realizada a análise estatística dos resultados obtidos, conforme apresentado a seguir.

A análise estatística dos resultados de potencial de corrosão<sup>22</sup> para corrosão acelerada por íons cloreto foi realizada através de regressão não linear múltipla, com objetivo de obter modelos matemáticos que representam o efeito da relação água/aglomerante e do teor de sílica ativa nos parâmetros a seguir relacionados:

- Tempo de início da despassivação da armadura<sup>23</sup>, em semanas, e

---

<sup>22</sup> Para a realização da análise estatística dos resultados obtidos foram considerados os valores referentes ao ciclo de imersão parcial, visto que a probabilidade de corrosão é maior nessa etapa, em função da quantidade de eletrólito disponível nos poros do concreto.

<sup>23</sup> Refere-se ao tempo de duração da fase de iniciação.

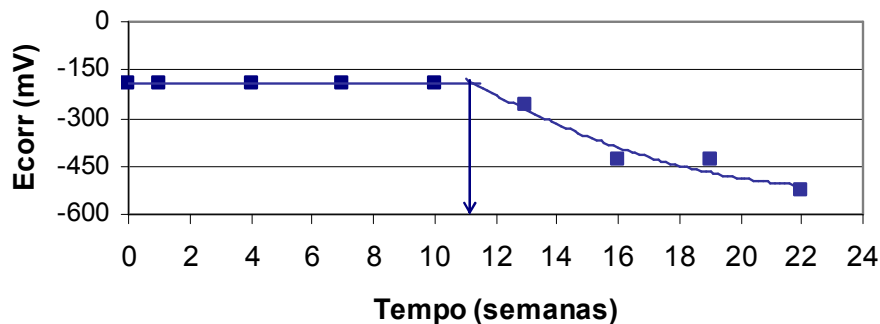
- Variação do potencial de corrosão em função do tempo, em mV.

Os modelos propostos esclarecem a relação entre os fatores estudados e as variáveis de resposta, tendo sido definidos de maneira a fornecerem um bom ajuste dos dados e sustentarem-se tecnicamente.

#### 5.1.1.1 Tempo de início da despassivação da armadura – avaliação através do potencial de corrosão

Os resultados da evolução do potencial de corrosão com o tempo, obtidos nos ciclos de imersão parcial para as relações água/aglomerante e teores de sílica ativa avaliados (Figuras 5.1 a 5.3), evidenciam nitidamente o início da despassivação da armadura. Até um determinado momento o potencial mantém-se aproximadamente constante, onde, a partir de então, verifica-se a ocorrência do fenômeno de corrosão<sup>24</sup> pela significativa diminuição dos valores de potencial (mais negativos).

O tempo de início da despassivação foi determinado a partir do valor correspondente à interseção da linha que representa o potencial médio inicial (constante) com a linha que representa a variação (redução) do potencial ao longo do ensaio, considerando-se os resultados da etapa de imersão parcial, conforme pode ser visualizado na Figura 5.4.



**Figura 5.4** Determinação do tempo de início de despassivação da armadura – potencial de corrosão.

Sendo assim, é proposto um modelo de regressão que relaciona o tempo de início da despassivação e as variáveis relação água/aglomerante e teor de sílica ativa, conforme apresentado na Equação 5.1.

<sup>24</sup> Salienta-se, mais uma vez, que o potencial de corrosão é uma propriedade que possibilita inferir sobre a probabilidade de ocorrência da corrosão.

$$t_i = [b_0 \times (1/aag)^{b_1}] + [b_2 \times (1/aag)^{b_1} \times (sa-10)^2] \quad \text{Equação 5.1}$$

Onde:

$t_i$  = tempo de início da despassivação (semanas);

aag = relação água/aglomerante;

sa = teor de adição de sílica ativa (%);

$b_0$ ,  $b_1$  e  $b_2$  = parâmetros dos fatores considerados no modelo.

A Tabela 5.1 apresenta os parâmetros dos fatores considerados no modelo proposto, estimados para os dados do presente programa experimental, bem como os parâmetros estatísticos calculados para os fatores analisados.

**Tabela 5.1** Parâmetros obtidos para o modelo do tempo de início da despassivação.

Fator	Parâmetro	Estimativa	Erro Padrão	Teste t	Significância "p-value"
Constante	$b_0$	4,40	0,204	21,57	0,000
aag	$b_1$	1,50	0,180	8,33	0,000
$aag \times sa^{25}$	$b_2$	-0,015	0,003	5,84	0,000

De acordo com os resultados indicados na Tabela 5.1, os fatores relação água/aglomerante (aag) e a interação entre a relação água/aglomerante e o teor de sílica ativa são estatisticamente significativos em um nível de confiança de 95%, visto que apresentam valores de "p-value" menor do que 0,05.

A Tabela 5.2 apresenta a análise de variância (ANOVA) do modelo proposto, o qual apresentou um coeficiente de determinação ( $r^2$ ) igual a 0,947.

**Tabela 5.2** Análise de variância do modelo obtido para o tempo de início da despassivação.

Fonte	GDL	SQ	MQ	$F_{\text{calc.}}$	Significância p-value
Modelo	3	897,60	299,20	251,43	0,000
Resíduo	6	7,12	1,19	-	-
Total	9	904,72	-	-	-
Total corrigido	8	135,58	-	-	-

GDL = Graus de Liberdade

SQ = Soma Quadrada

MQ = Média Quadrada = SQ/GDL

$F_{\text{calc.}} = MQ_{\text{modelo}}/MQ_{\text{resíduo}}$

<sup>25</sup> O termo de interação entre a relação água/aglomerante e o teor de sílica ativa apresentado no modelo proposto é simplificada e representado por  $aag \times sa$ .

O valor de 'p-value' menor do que 0,01 indica que a relação entre as variáveis é estatisticamente significativa a um nível de confiança de 99%. O coeficiente de determinação  $r^2$  igual a 0,947 indica que o modelo explica 94,7% da variabilidade dos valores observados para o tempo de início da despassivação da armadura.

Dessa forma, o modelo de regressão que explica a relação entre o tempo de início para a despassivação e os fatores analisados é apresentado na Equação 5.2.

$$ti = [4,40 \times (1/aag)^{1,5}] - [0,015 \times (1/aag)^{1,5} \times (sa-10)^2] \quad \text{Equação 5.2}$$

$r^2 = 0,947$

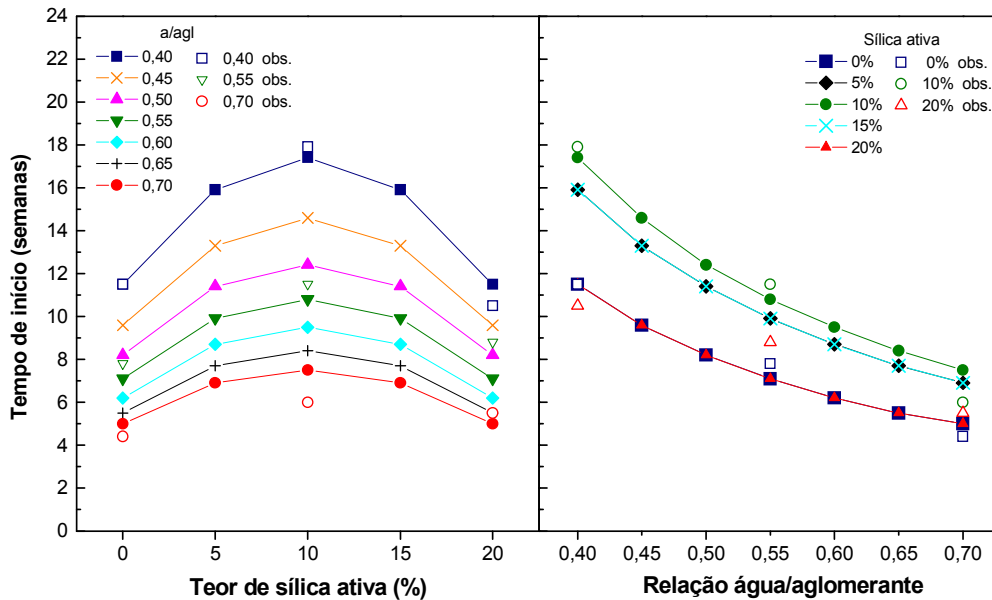
Onde:

ti = tempo de início da despassivação (semanas);

aag = relação água/aglomerante;

sa = teor de adição de sílica ativa (%);

A Figura 5.5 apresenta as curvas de comportamento obtidas a partir do modelo proposto, bem como os valores observados para o tempo de início da despassivação.



**Figura 5.5** Tempo de início da despassivação – avaliação pelo  $E_{corr}$ .

Na Figura 5.5 pode ser visualizada a influência da relação água/aglomerante e do teor de sílica ativa no tempo de início da despassivação, avaliado pelo potencial de corrosão. As curvas de comportamento indicam que a redução da relação água/aglomerante aumenta significativamente o tempo para despassivação da armadura por íons cloreto, para todos os teores de adição de sílica ativa considerados. Verifica-se que ao reduzir a relação água/aglomerante de 0,70 para 0,40 tem-se um aumento médio de aproximadamente 130% no tempo para despassivar a armadura.

BAWEJA et al. (1992), em estudo realizado para avaliar a corrosão da armadura acelerada por íons cloreto, verificaram que a redução da relação água/cimento de 0,65 para 0,45 aumenta aproximadamente 165% o tempo para despassivação da armadura para cimentos Portland com 8% de C<sub>3</sub>A.

De acordo com os resultados obtidos, a adição de até 15% de sílica ativa aumenta o tempo para despassivar a armadura. Observa-se que para relações água/aglomerante menores a influência do teor de adição no tempo de despassivação é mais significativa, evidenciando a interação entre os dois fatores.

A adição de sílica ativa contribui para retardar o início da corrosão por íons cloreto, visto que a densificação da matriz de cimento, decorrente do efeito fíler e pozolânico, diminui a mobilidade iônica e, conseqüentemente, a difusão de íons cloreto, além de proporcionar uma maior resistividade elétrica (RASHEEDUZZAFAR et al., 1992; SCHIESSL e RAUPACH, 1992; GJØRV, 1995).

BAI et al. (2002) colocam que a sílica ativa, por ser um material ultrafino, com elevada atividade pozolânica, reduz sensivelmente a absorvidade do concreto, diminuindo o ingresso de íons agressivos.

TALIB et al. (1993), avaliando o potencial de corrosão em ensaios acelerados por íons cloreto, verificaram um melhor desempenho de concretos com sílica ativa em relação ao tempo de início da corrosão da armadura, concluindo que a utilização de cimentos com 10% de sílica ativa, por promover uma maior densificação da matriz cimentícia, aumenta em 56% o tempo para despassivar a armadura.

O estudo realizado por AL-SUGAIR (1994) para verificar o efeito da sílica ativa na corrosão da armadura por íons cloreto demonstrou que a adição de 10% de sílica ativa em relação à massa de cimento retarda o tempo de início da corrosão em 62,5%. O autor justifica a escolha do teor 10% de adição para a realização do estudo considerando os resultados obtidos por RASHEEDUZZAFAR et al. (1992), os quais indicaram um acréscimo de 184% no tempo para o início da corrosão em concretos com 10% de sílica ativa, em

comparação com o concreto de referência, mas um reduzido benefício em aumentar de 10% para 20% o teor de sílica ativa em relação ao tempo de início para corrosão.

JARRAH et al. (1995), ao estudarem o comportamento eletroquímico de concretos com sílica ativa em solução agressiva de cloreto, verificaram que 10% de sílica ativa, em substituição à massa de cimento, aumentou o tempo de início de corrosão de 175 dias (concreto de referência) para 631 dias.

As curvas de comportamento obtidas revelam um teor ótimo de adição de 10% de sílica ativa, onde para as relações água aglomerante 0,40; 0,55 e 0,70 obtêm-se, respectivamente, um incremento médio de 5,9; 3,7 e 2,5 semanas no tempo de início da corrosão. EL-SAYED e EL-SABBAGH (1997), estudando o efeito da sílica ativa no concreto, em relação à proteção da armadura, concluíram que 10% de substituição de sílica ativa em relação à massa de cimento representa um “teor ótimo” de incorporação, capaz de proporcionar uma menor difusão de íons cloreto, a mais elevada resistividade e um menor tempo para atingir a passivação, comparando-se com os teores de 0, 5, 7,5 e 15%. Segundo os autores, teores mais elevados de substituição de sílica ativa podem conduzir, em função da possível redução do pH da solução dos poros decorrente da reação pozolânica, a um aumento no teor de cloretos livres, aumentando a relação  $Cl^-/OH^-$  e, conseqüentemente, o risco de comprometer a passividade. No entanto, os mesmos autores salientam que a redução do pH em concretos com 15% de substituição de sílica ativa não atinge valores suficientes para desestabilizar o filme passivo.

Da mesma forma, CAO e SIRIVIVATNANON (1991) concluíram que o uso de 10% de sílica ativa, como substituição em relação à massa de cimento, apresenta um efeito superior em termos de proteção à armadura, comparando-se com o teor 20%, mesmo considerando a elevada resistividade elétrica proporcionada por 20% de sílica ativa. Os autores justificam tal fato em função do menor teor de cloretos livres necessário para despassivar a armadura em concretos com 20% de sílica ativa, devido ao consumo de íons hidroxila na reação pozolânica.

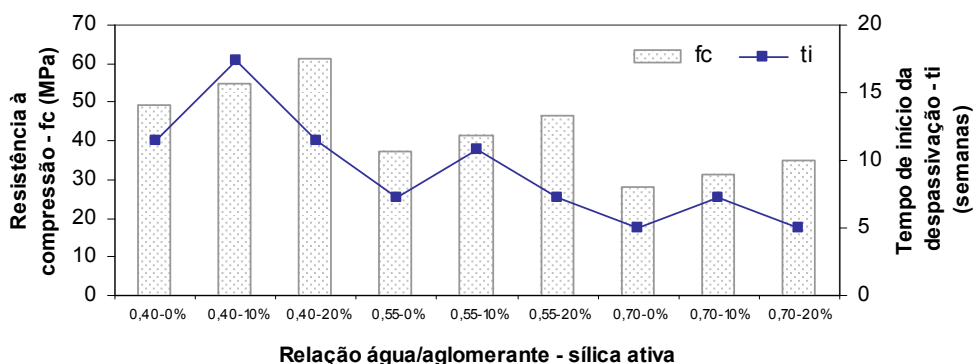
No presente estudo, o teor de 20% de adição de sílica ativa não contribui para retardar a despassivação, quando avaliado pelo potencial de corrosão. No entanto, conforme pode ser observado na Figura 5.5, concretos com 20% de adição não apresentam efeito deletério no tempo de início da corrosão, visto que apresentam um comportamento equivalente aos concretos de referência, sem adição. O efeito inócuo do teor 20% de adição pode estar associado a menor capacidade de fixação de íons cloreto em função da redução do pH, decorrente da reação pozolânica da sílica ativa com o hidróxido de cálcio. Alguns pesquisadores (AL-SUGAIR, 1994; ARYA e XU, 1995) sustentam que se por um lado a

diminuição do pH aumenta a relação  $Cl^-/OH^-$ , por outro o efeito físico de refinamento da estrutura dos poros diminui a permeabilidade do concreto, compensando qualquer efeito deletério de redução do pH na corrosão da armadura por cloreto. Ainda, FIDJESTOL (1987) coloca que embora em concretos com sílica ativa o limite de cloretos para despassivar a armadura seja menor, em função da redução do pH, a difusão dos íons cloreto é significativamente menor, devido ao refinamento da estrutura de poros do concreto proporcionado pela ação da sílica ativa.

Dessa forma, uma hipótese a ser considerada para esclarecer a não contribuição do teor de 20% de adição no tempo de despassivação é que em teores elevados pode haver um “empate” entre o efeito físico<sup>26</sup> (refinamento da estrutura de poros e densificação da matriz cimentante) e a ação deletéria da diminuição do pH (efeito químico<sup>27</sup>), obtendo-se concretos com maior resistividade e resistência mecânica, porém sem efeito significativo no tempo de início da corrosão.

Diante desses fatos e considerando os resultados obtidos na avaliação do potencial de corrosão, pode-se inferir que para teores de até 15% de sílica ativa o efeito físico é predominante, aumentando a resistência à corrosão.

A Figura 5.6 ilustra o tempo de início de despassivação, determinado pelo potencial de corrosão, e a resistência à compressão dos concretos analisados. Verifica-se que embora o teor 20% de sílica ativa seja eficiente no aumento da resistência à compressão, não apresenta contribuição em relação ao início do fenômeno de corrosão.



**Figura 5.6** Tempo de início da despassivação x resistência à compressão.

<sup>26</sup> **Efeito físico** refere-se ao refinamento da estrutura de poros e conseqüente densificação da matriz cimentante proporcionado pela ação física (microfiller) e química (reação pozolânica com o hidróxido de cálcio) da sílica ativa no concreto.

<sup>27</sup> **Efeito químico** refere-se à redução do pH da solução dos poros, decorrente da reação pozolânica da sílica ativa com o hidróxido de cálcio do concreto.



### 5.1.1.2 Variação do potencial de corrosão em função do tempo

O modelo de regressão não linear proposto para relacionar a variação do potencial de corrosão com o tempo é apresentado na Equação 5.3.

$$\Delta E_{\text{corr}} = [b_0 + (b_1 \times \text{aag}) + (b_2 \times (\text{sa}-15)^2)] \times (\Delta t)^{b_3} \quad \text{Equação 5.3}$$

Onde:

$\Delta E_{\text{corr}}$  = variação do potencial com o tempo (mV);

aag = relação água/aglomerante;

sa = teor de adição de sílica ativa (%);

$\Delta t$  = variação do tempo (semanas);

$b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  e  $b_3$  = parâmetros dos fatores considerados no modelo.

A Tabela 5.3 apresenta os parâmetros dos fatores considerados no modelo de variação do potencial proposto, estimados para os dados do presente programa experimental, bem como os parâmetros estatísticos calculados para os fatores analisados.

**Tabela 5.3** Parâmetros obtidos para o modelo da variação de potencial com o tempo.

Fator	Parâmetro	Estimativa	Erro Padrão	Teste t	Significância "p-value"
Constante	b0	-112,4	25,41	4,42	0,000
aag	b1	-80,1	46,41	1,73	0,046
sa	b2	-0,109	0,051	2,14	0,019
$\Delta t$	b3	0,367	0,050	7,34	0,000

De acordo com os resultados indicados na Tabela 5.3, os fatores relação água/aglomerante (aag), teor de sílica ativa (sa) e a variação do tempo ( $\Delta t$ ) são estatisticamente significativos em um nível de confiança de 95%, visto que apresentam valores de "p-value" menor do que 0,05.

Na Tabela 5.4 é apresentada a análise de variância (ANOVA) do modelo proposto, o qual apresentou um coeficiente de determinação ( $r^2$ ) igual a 0,748.

**Tabela 5.4** Análise de variância do modelo obtido para a variação do potencial com o tempo.

Fonte	GDL	SQ	MQ	F <sub>calc.</sub>	Significância p-value
Modelo	4	5307468	1326867	339,0	0,000
Resíduo	37	144832	3914,4	-	-
Total	41	5452300	-	-	-
Total corrigido	40	574207	-	-	-

GDL = Graus de Liberdade

SQ = Soma Quadrada

MQ = Média Quadrada = SQ/GDL

F<sub>calc.</sub> = MQ<sub>modelo</sub>/MQ<sub>resíduo</sub>

O valor de 'p-value' do modelo, menor do que 0,01, indica que a relação entre as variáveis é estatisticamente significativa em um nível de confiança de 99%. O coeficiente de determinação  $r^2$  igual a 0,748 indica que o modelo explica 74,8% da variabilidade dos valores observados para a variação do potencial de corrosão. Tendo em vista a variabilidade inerente a experimentos que contemplam a variação de tempo, o coeficiente de determinação obtido é considerado um valor razoável para representar o comportamento observado.

Assim, o modelo de regressão, que explica a relação entre a variação do potencial de corrosão e os fatores analisados, é apresentado na Equação 5.4.

$$\Delta E_{\text{corr}} = [-112,4 - (80,1 \times \text{aag}) - (0,109 \times (\text{sa}-15)^2)] \times (\Delta t^{0,367}) \quad \text{Equação 5.4}$$

$$r^2 = 0,748$$

Onde:

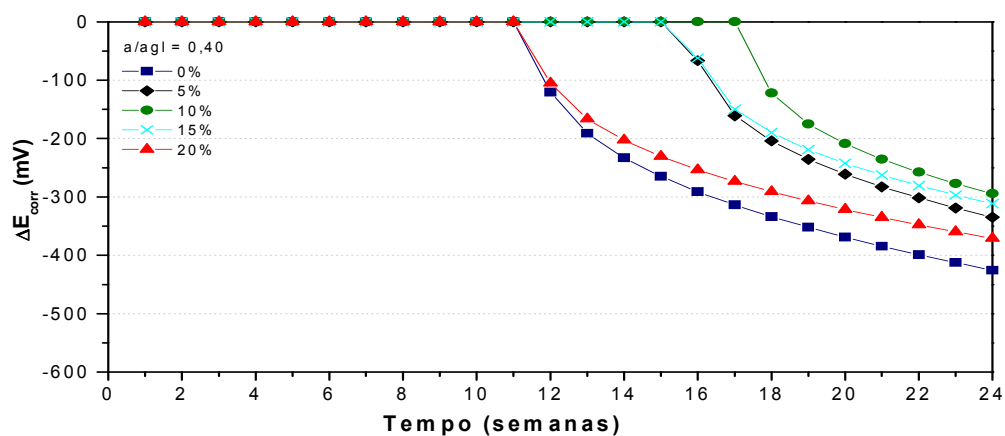
$\Delta E_{\text{corr}}$  = variação do potencial com o tempo (mV);

aag = relação água/aglomerante;

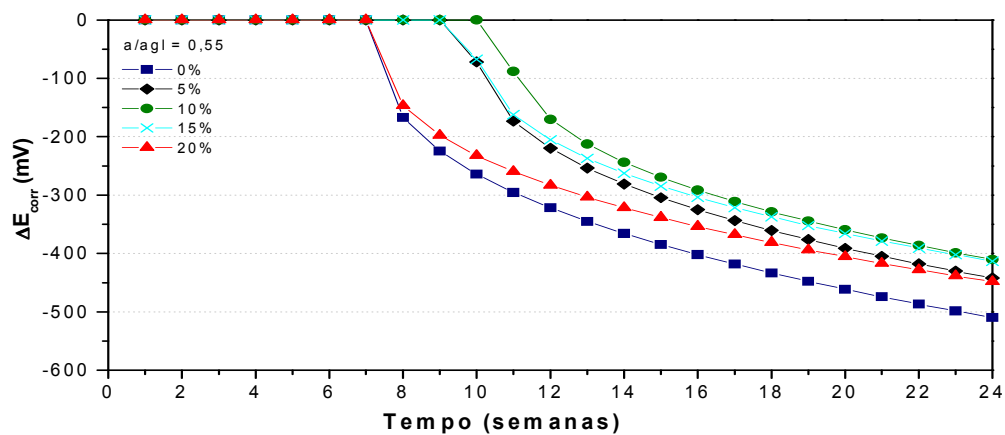
sa = teor de adição de sílica ativa (%);

$\Delta t$  = variação do tempo (semanas).

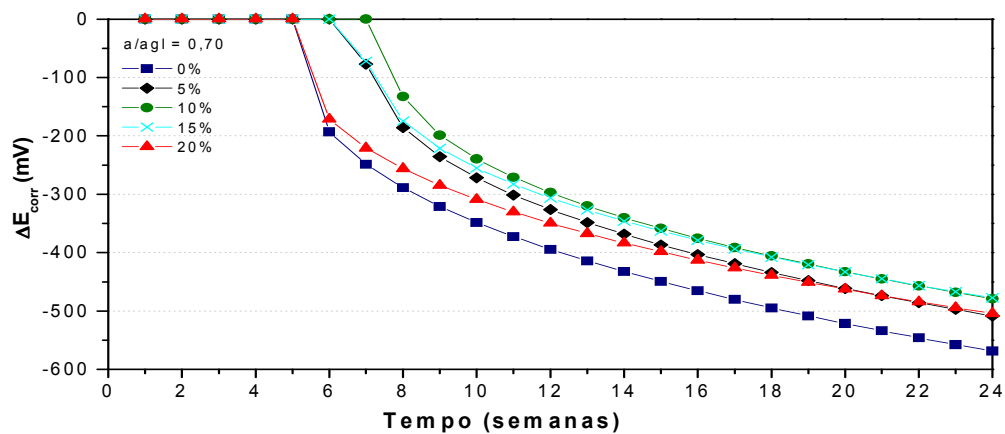
A Figura 5.7 (a), (b) e (c) apresenta as curvas de variação do potencial de corrosão, obtidas a partir do modelo ajustado, para as relações água/aglomerante 0,40; 0,55 e 0,70, respectivamente.



(a)



(b)



(c)

**Figura 5.7** Variação do potencial de corrosão – corrosão por cloreto - (a) relação água/aglomerante 0,40 (b) relação água/aglomerante 0,55 (c) relação água/aglomerante 0,70.

A variação do potencial em função do tempo indica o início da despassivação da armadura e o desempenho dos concretos analisados, ao longo do tempo de ensaio. Com base nos resultados obtidos na análise estatística, tanto a relação água/aglomerante como o teor de adição de sílica ativa e o tempo de ensaio apresentam influência significativa na variação do potencial de corrosão.

Conforme esperado, as curvas de variação do potencial de corrosão evoluem para valores mais negativos em função da alteração do estado superficial das barras ao longo do ensaio acelerado por íons cloreto. CASCUDO (2000), citando BROWNE et al., salienta que a simples presença de cloreto no sistema, por diminuir muito a resistividade do concreto, tende a alterar os potenciais para valores mais negativos.

Como pode ser visualizado na Figura 5.7, concretos com maior relação água/aglomerante apresentam uma condição termodinâmica mais favorável à ocorrência do fenômeno de corrosão, visto que atingem valores mais negativos de potencial ao longo do tempo. Verifica-se uma variação média do potencial com o tempo de -363,6 mV; -456,1 mV e -517,3 mV para as relações água/aglomerante 0,40; 0,55 e 0,70, respectivamente.

Em estudo realizado para avaliar a corrosão da armadura em concretos submetidos a ciclos alternados em câmara salina e secagem ao ar, MANGAT e MOLLOY (1992) obtiveram valores de potencial de corrosão de até -400 mV, -550 mV e -600 mV para relações água/aglomerante 0,45; 0,58 e 0,76, respectivamente.

Conforme descrito no item 2.6.2, o potencial de corrosão é uma medida da maior ou menor facilidade da transferência de carga elétrica entre o aço e a solução contida nos poros do concreto, sendo, portanto, diretamente influenciada pela qualidade do concreto. Concretos com menor relação água/aglomerante apresentam uma estrutura mais densa, com menos eletrólito e, conseqüentemente, com maior resistividade, o que dificulta a mobilidade iônica. Além disso, a diminuição da porosidade, decorrente de relações água/aglomerante menores, diminui a difusividade de íons cloreto.

Em relação ao efeito da adição de sílica ativa no potencial de corrosão, as curvas de comportamento indicam um desempenho superior do teor de adição 10% para todas as relações água/aglomerante analisadas. Pode-se observar um maior tempo para o início da despassivação, conforme anteriormente discutido, e uma evolução para potenciais menos negativos ao longo do tempo de ensaio, em relação ao concreto de referência (0% de sílica ativa) e ao concreto com 20% de adição. Os modelos de comportamento obtidos, considerando o tempo para despassivação e a variação de potencial, prevêem que depois de 10% de adição, os teores 15%, 5% e 20% apresentam, nessa ordem, um superior desempenho em relação ao concreto sem adição.

Conforme verificado previamente (item 5.1.1.1), os teores 0% e 20% de adição apresentam o mesmo tempo para despassivar a armadura. No entanto, como pode ser visualizado na Figura 5.7, na evolução do fenômeno o teor 20% apresenta potenciais menos negativos do que os concretos sem adição, conferindo à armadura uma condição menos favorável à ocorrência da corrosão. Dessa forma, embora o teor 20% de adição apresente um desempenho inferior ao teor 10%, apresenta efeito benéfico na variação do potencial com o tempo, em relação ao concreto de referência.

Da mesma forma como colocado no item 5.1.1.1, para o tempo de início da despassivação, salienta-se que a adição de sílica ativa contribui sobremaneira para o refinamento dos poros do concreto, obtendo-se uma microestrutura mais densa e menos permeável. Contudo, teores mais elevados de adição, por apresentarem um limite menor no teor de  $\text{Cl}^-$  para despassivar a armadura, em função da diminuição do pH, tendem a ter uma menor eficácia do que teores médios, onde a diminuição do pH não é reduzida a ponto de diminuir o teor limite de cloretos. Além disso, conforme será discutido no item 5.3.5, a absorção capilar, que é o principal mecanismo de transporte que rege o ingresso de cloretos em meios parcialmente saturados, não diminui significativamente a partir de 10% de sílica ativa.

Ainda que a interação entre os fatores relação água/aglomerante e sílica ativa não seja estatisticamente significativa, verifica-se que o efeito da sílica ativa é mais pronunciado em relações água/aglomerante menores. Ao aumentar de 0% para 10% a adição de sílica ativa obtém-se uma diferença na variação do potencial de 31%, 20% e 16% para as relações água/aglomerante 0,40; 0,55 e 0,70, respectivamente.

Os resultados obtidos para o teor 10% de adição estão de acordo com os dados observados por MANGAT et al. (1994), em estudo realizado para avaliação da corrosão da armadura em concretos com 10% de substituição de cimento por sílica ativa submetidos à exposição em câmara salina, o qual indicou ao final do ensaio valores menos negativos de potencial de corrosão para o concreto com sílica ativa. Da mesma forma, AL-SUGAIR (1994), avaliando a proteção da armadura em concreto, verificou potenciais de corrosão mais nobres decorrentes da adição de 10% de sílica ativa.

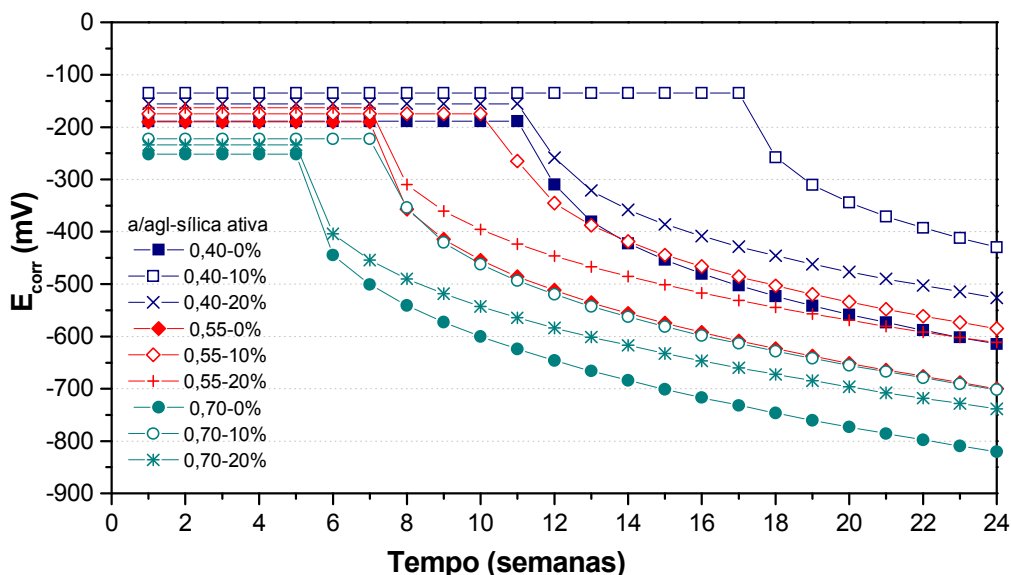
AL-AMOUDI et al. (1992), estudando o efeito de soluções agressivas com íons cloreto e sulfato na deterioração da armadura de concretos com adições minerais, concluíram que com 10% de sílica ativa os potenciais de corrosão são significativamente mais nobres, quando comparados com os valores obtidos para o concreto de referência. JARRAH et al. (1995) observaram que ao longo de 631 dias de exposição em solução agressiva de 15,7% de  $\text{Cl}^-$  a utilização de 10% de sílica ativa no concreto, em substituição à

massa de cimento, conduz a valores de potenciais de corrosão significativamente menos negativos do que os observados para o concreto sem sílica ativa.

Em recente estudo, EL DEBS e VAREDA (2002) verificaram favorável influência no potencial de corrosão da armadura de corpos-de-prova de microconcreto com 10% de sílica ativa, submetidos a ciclos alternados de imersão em banho salino e emersão em ambiente aquecido com lâmpadas de infravermelho.

A Figura 5.8 apresenta uma comparação da evolução do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ), em função do tempo ( $t$ ), para as relações água/aglomerante e teores de sílica ativa analisados. Os valores do potencial de corrosão foram obtidos a partir dos valores previstos no modelo de regressão proposto para a variação do potencial ( $\Delta E_{corr}$ ) acrescidos dos valores iniciais médios de potencial ( $E_{corri}$ ), observados anteriormente à despassivação da armadura, conforme apresentado na Equação 5.5.

$$\begin{aligned} \Delta t &= t - t_i \\ \Delta E_{corr} &= 0 \text{ se } t < t_i \\ \Delta E_{corr} &= f(aag, sa, \Delta t) \\ E_{corr} &= \Delta E_{corr} + E_{corri} \end{aligned} \qquad \text{Equação 5.5}$$

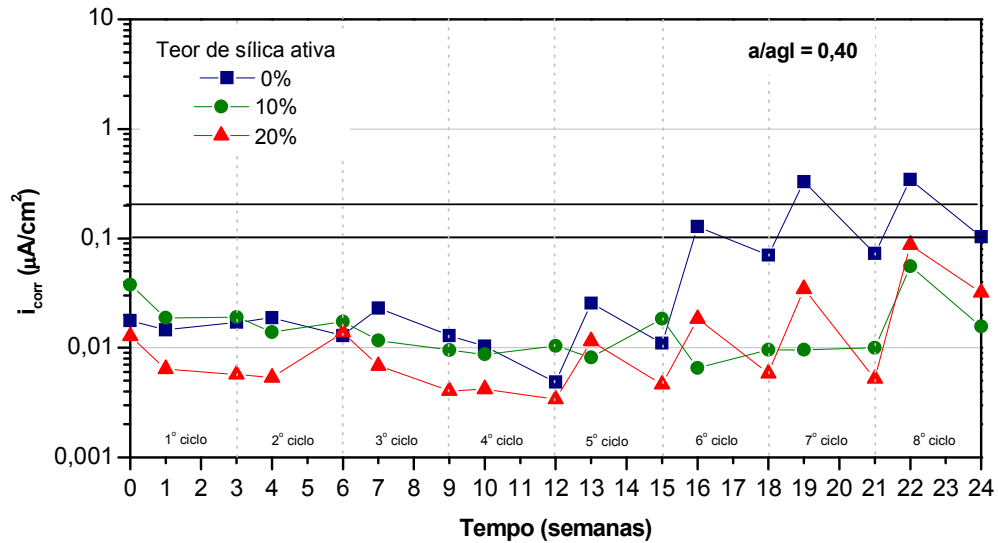


**Figura 5.8** Evolução do potencial de corrosão – corrosão por cloreto.

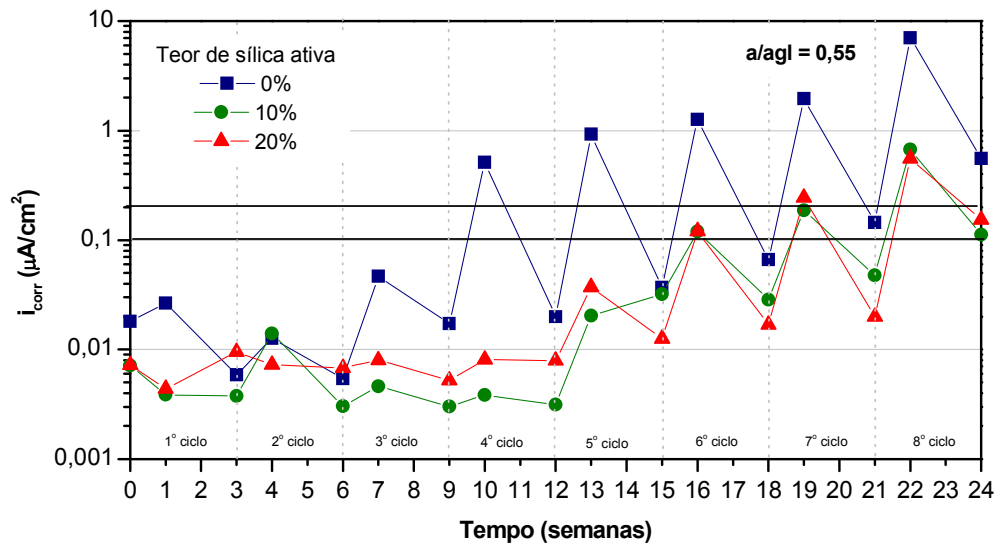
Como pode ser visualizado na Figura 5.8, em relação ao potencial de corrosão, o desempenho do concreto com relação água/aglomerante 0,70 com 10% de adição de sílica ativa equivale ao comportamento do concreto com relação água/aglomerante 0,55 sem adição.

### 5.1.2 Intensidade de corrosão

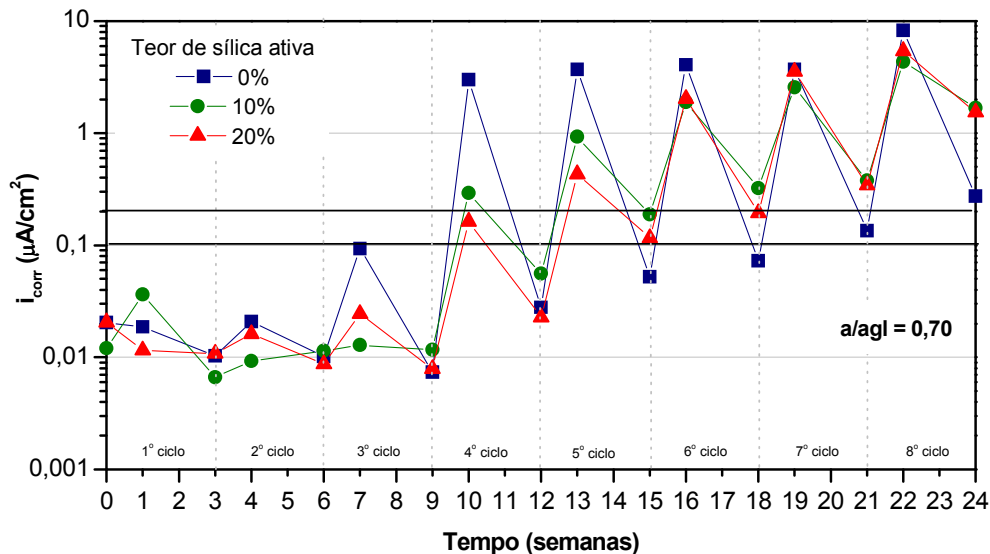
As Figuras 5.9, 5.10 e 5.11 apresentam a evolução da intensidade de corrosão ( $i_{corr}$ ) ao longo do tempo de ensaio, para as relações água/aglomerante 0,40, 0,55 e 0,70, respectivamente. Em cada figura estão representados os resultados para 0%, 10% e 20% de adição de sílica ativa.



**Figura 5.9** Evolução da intensidade de corrosão - relação água/aglomerante 0,40, corrosão por cloreto.



**Figura 5.10** Evolução da intensidade de corrosão - relação água/aglomerante 0,55, corrosão por cloreto.



**Figura 5.11** Evolução da intensidade de corrosão - relação água/aglomerante 0,70, corrosão por cloreto.

Tal como evidenciado para o potencial de corrosão, observa-se nas Figuras 5.9 a 5.11 a variação dos valores da intensidade de corrosão quando determinada no semiciclo de imersão parcial ou no semiciclo secagem, em função da maior ou menor disponibilidade de eletrólito nos poros do concreto.

Ao comparar os resultados obtidos verifica-se, para todos os teores de adição de sílica ativa, que quanto maior a relação água/aglomerante maiores são os valores observados para a intensidade de corrosão ao longo do período de ensaio. Na etapa de imersão parcial do ciclo final do ensaio pode-se observar que enquanto para a relação água/aglomerante 0,40 a intensidade de corrosão média foi da ordem de  $0,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , para as relações água/aglomerante 0,55 e 0,70 atingiu valores de  $2,8 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  e  $6,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , respectivamente.

Como pode ser visualizado nas Figuras 5.9 a 5.11, o efeito benéfico da adição de sílica ativa na intensidade de corrosão parece ser coincidente com o efeito observado para o potencial de corrosão, sendo mais pronunciado para menores relações água/aglomerante.

Os resultados observados indicam que tanto a relação água/aglomerante como o teor de sílica ativa apresentam efeito no tempo para despassivação da armadura. Observa-se que o tempo para o início da despassivação é inversamente proporcional à relação água/aglomerante, visto que quanto maior a relação água/aglomerante menor o tempo observado para uma alteração acentuada da intensidade de corrosão, que evidencia o início do fenômeno.

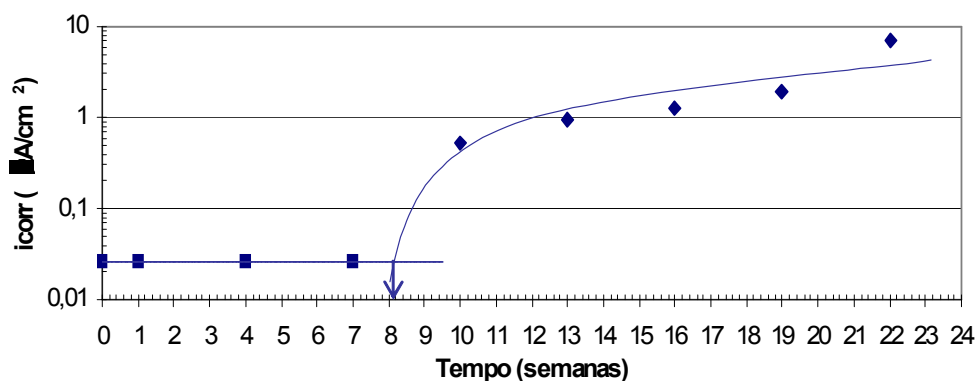


A avaliação da evolução da intensidade de corrosão com o tempo revela que a adição de sílica ativa aumenta o tempo de início para corrosão, principalmente nas relações água/aglomerante 0,40 e 0,55. Esse fato pode evidenciar um incremento na vida útil de concretos com adição de sílica ativa.

A análise estatística dos resultados obtidos para a intensidade de corrosão foi conduzida tal como para o potencial de corrosão (item 5.1.1), através de regressão não linear múltipla, com a obtenção de modelos matemáticos que possibilitam estimar o tempo de início da despassivação da armadura e avaliar a variação da intensidade de corrosão com o tempo, bem como verificar a significância dos fatores analisados.

### 5.1.2.1 Tempo de início da despassivação da armadura – avaliação através da intensidade de corrosão

Os resultados obtidos, conforme pode ser observado nas Figuras 5.9 a 5.11, apresentam em um determinado tempo uma significativa alteração na magnitude dos valores observados para a intensidade de corrosão, sendo um indicativo da despassivação da armadura. Dessa forma, é possível avaliar o tempo de início da despassivação da armadura sob o ponto de vista cinético e, assim, comparar os concretos estudados quanto à possível vida útil. O tempo de início da despassivação foi determinado a partir do valor correspondente à interseção da linha que representa a intensidade de corrosão média inicial (constante) com a linha que representa a variação da intensidade de corrosão ao longo do ensaio, considerando-se os resultados da etapa de imersão parcial, conforme mostra a Figura 5.12.



**Figura 5.12** Determinação do tempo de início de despassivação da armadura – intensidade de corrosão.

Para a avaliação do tempo de início da despassivação, obtido a partir dos resultados da intensidade de corrosão nos ciclos de imersão parcial, tomou-se como referência o modelo proposto na Equação 5.1, fazendo-se as alterações necessárias para obtenção de um ajuste que represente com significância os dados observados.

Dessa forma, o modelo de regressão proposto para a análise é apresentado na Equação 5.6.

$$t_i = [b_0 \times (1/aag)^{b_1}] + [b_2 \times (1/aag)^{b_1} \times (sa-15)^2] \text{ Equação 5.6}$$

Onde:

$t_i$  = tempo de início da despassivação (semanas);

aag = relação água/aglomerante;

sa = teor de adição de sílica ativa (%);

$b_0$ ,  $b_1$  e  $b_2$  = parâmetros dos fatores considerados no modelo.

A Tabela 5.5 apresenta os parâmetros dos fatores considerados no modelo proposto, estimados para os dados do presente programa experimental, bem como os parâmetros estatísticos calculados para os fatores analisados.

**Tabela 5.5** Parâmetros obtidos para o modelo do tempo de início da despassivação.

Fator	Parâmetro	Estimativa	Erro Padrão	Teste t	Significância "p-value"
Constante	$b_0$	4,61	0,189	24,39	0,000
aag	$b_1$	1,65	0,050	33,00	0,000
$aag \times sa^{28}$	$b_2$	-0,0064	0,0005	12,80	0,000

Com base nos resultados indicados na Tabela 5.5, pode-se verificar que tanto a relação água/aglomerante (aag) como a interação entre a relação água/aglomerante e o teor de sílica ativa ( $aag \times sa$ ) são estatisticamente significativas a um nível de confiança de 95%, visto que apresentam valores de "p-value" menor do que 0,05.

A Tabela 5.6 apresenta a análise de variância (ANOVA) do modelo proposto, o qual apresentou um coeficiente de determinação ( $r^2$ ) igual a 0,996.

<sup>28</sup> O termo de interação entre a relação água/aglomerante e o teor de sílica ativa apresentado no modelo proposto é simplificadaamente representado por  $aag \times sa$ .

**Tabela 5.6** Análise de variância do modelo obtido para o tempo de início da despassivação.

Fonte	GDL	SQ	MQ	F <sub>calc.</sub>	Significância p-value
Modelo	3	1553,94	517,98	3407,76	0,000
Resíduo	6	0,91	0,152	-	-
Total	9	1554,85	-	-	-
Total corrigido	8	225,02	-	-	-

GDL = Graus de Liberdade

SQ = Soma Quadrada

MQ = Média Quadrada = SQ/GDL

F<sub>calc.</sub> = MQ<sub>modelo</sub>/MQ<sub>resíduo</sub>

O valor de 'p-value' menor do que 0,01 indica que a relação entre as variáveis é estatisticamente significativa a um nível de confiança de 99%. O coeficiente de determinação  $r^2$  igual a 0,996 indica que o modelo explica 99,6% da variabilidade dos valores observados para o tempo de início da despassivação da armadura, avaliado pela intensidade de corrosão, podendo ser um bom indicador da vida útil dos concretos avaliados.

Assim, o modelo de regressão adotado para representar a relação entre o tempo de início para a despassivação e os fatores analisados é apresentado na Equação 5.7.

$$t_i = [4,61 \times (1/aag)^{1,65}] - [0,0064 \times (1/aag)^{1,65} \times (sa-15)^2] \quad \text{Equação 5.7}$$

$r^2 = 0,996$

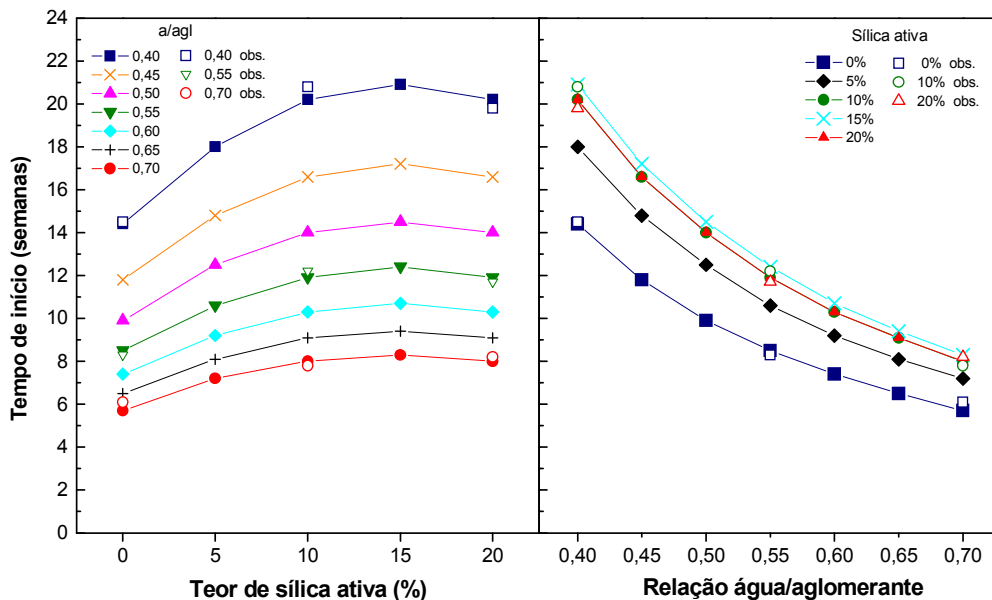
Onde:

$t_i$  = tempo de início da despassivação (semanas);

aag = relação água/aglomerante;

sa = teor de adição de sílica ativa (%);

Na Figura 5.13 são apresentadas as curvas de comportamento obtidas a partir do modelo proposto, que estimam o tempo de início da despassivação a partir dos resultados obtidos para a intensidade de corrosão, bem como os valores observados no ensaio.



**Figura 5.13** Tempo de início da despassivação – avaliação pela  $i_{corr}$ .

Da mesma forma como observado para tempo de despassivação avaliado pelo potencial de corrosão, a relação água/aglomerante e a sua interação com o teor de sílica ativa apresentam influência significativa no tempo para despassivação da armadura determinado pela intensidade de corrosão.

As curvas de comportamento observadas na Figura 5.13 mostram que o tempo para despassivação da armadura por íons cloreto aumenta significativamente com a redução da relação água/aglomerante, para todos os teores de sílica ativa analisados. Observa-se que a redução da relação água/aglomerante de 0,70 para 0,40 proporciona um incremento médio de aproximadamente 154% no tempo para despassivar a armadura. Os resultados obtidos mostram que quanto menor a relação água/aglomerante maior a influência da sílica ativa, indicando a interação entre os dois fatores.

Ao aumentar o teor de sílica ativa de 0% para 15%, verifica-se que o tempo para despassivar a armadura aumenta, em média, 45%.

A avaliação do tempo de despassivação através da intensidade de corrosão apontou para o teor 20% de adição de sílica ativa um comportamento análogo ao concreto com 10% de adição, evidenciando como teor ótimo 15% de sílica ativa. É interessante salientar que sob o ponto de vista do potencial de corrosão, o efeito da adição de 20% de sílica ativa no tempo de despassivação é coincidente com concretos sem adição, conforme comentado no item 5.1.1.1.

Deve-se considerar, no entanto, que a grandeza eletroquímica potencial de corrosão é uma determinação qualitativa, através da qual obtém-se apenas uma probabilidade de corrosão, onde as condições catódicas do fenômeno não são consideradas na avaliação. Esse fato é evidenciado, por exemplo, ao se determinar potenciais de corrosão em concretos submersos, onde são obtidos potenciais eletronegativos suficientes para inferir sobre a existência de corrosão, sem considerar que em tal condição de exposição não há difusão de oxigênio para sustentar a reação catódica. Segundo RODRÍGUEZ et al. (1994), a avaliação da corrosão da armadura pelo potencial de corrosão, além de ser meramente qualitativa, apresenta limitações que devem ser consideradas na correta interpretação dos resultados obtidos.

CASCUDO (1997) salienta que embora a técnica de potencial apresente boa sensibilidade para detectar o momento da despassivação do aço, pode-se obter potenciais mais negativos independentemente da intensidade com que se processa o fenômeno de corrosão. Segundo SARRÍA (1997) o fato de muitas vezes o potencial de corrosão não corresponder à intensidade de corrosão é decorrente de que o potencial medido é, na verdade, um potencial misto, ou seja, aquele para o qual se equilibram os processos anódicos e catódicos.

Tais constatações, associadas ao fato da sílica ativa diminuir a disponibilidade de oxigênio no concreto, podem explicar as diferenças obtidas no tempo de despassivação quando da avaliação pelo potencial ou pela intensidade de corrosão. Segundo GJØRV (1995), a utilização de sílica ativa reduz significativamente a permeabilidade do concreto, sendo aceitável assumir, portanto, que o aumento do teor de adição diminui substancialmente a disponibilidade de oxigênio. Ainda, PETERSSON (1996) argumenta que quanto maior a densidade da microestrutura do concreto, menor a difusão de oxigênio, resultando, por controle catódico do fenômeno, menores taxas de corrosão. Em estudo mais recente, HASSAN et al. (2000) concluíram que 10% de substituição de sílica ativa ao concreto, em relação à massa de cimento, reduz a permeabilidade ao oxigênio em aproximadamente 80%, comparando-se com o concreto de referência, além de reduzir a difusão de oxigênio.

Dessa forma, pode-se inferir que, para uma mesma relação água/aglomerante, concretos com adição de sílica ativa apresentam, em função da menor difusão de oxigênio, um certo controle catódico da corrosão da armadura, não detectado pela medida do potencial de corrosão pela natureza dessa propriedade, conforme colocado anteriormente. Isso pode explicar o fato de concretos com adição de 20% de sílica ativa apresentarem um pior desempenho do que concretos com 10% de sílica ativa, quando avaliados pelo potencial de corrosão. Ou seja, o possível efeito benéfico do teor 20% de adição de sílica

ativa em relação à difusão de oxigênio, por não ser detectado na determinação do potencial de corrosão, faz com que o efeito decorrente da densificação da matriz cimentante e do refinamento dos poros “empate” com o efeito resultante da diminuição no pH da solução dos poros. Contudo, pela avaliação da intensidade de corrosão, onde a menor difusão de oxigênio é considerada na resistência à corrosão (favorece a obtenção de menor taxa de corrosão), fica evidenciado que concretos com 20% de adição não são tão prejudicados pela redução do pH, que pode aumentar a concentração de cloretos livres, facilitando a despassivação da armadura, visto que apresentam um desempenho coincidente aos concretos com 10% de adição de sílica ativa, em relação ao tempo de despassivação.

Conclui-se, portanto, que para a adição de até 15% de sílica ativa não há influência da diminuição da alcalinidade na resistência à corrosão, sendo predominante o efeito da densificação da microestrutura, o qual proporciona, o refinamento da estrutura de poros, com conseqüente redução na penetração de íons cloreto, além de maior resistividade e menor disponibilidade de oxigênio.

HASSAN et al. (2000) colocam que os benefícios nas propriedades de transporte, resultantes da utilização de sílica ativa, estão relacionados à finura de suas partículas e elevada atividade pozolânica, que proporcionam um melhor empacotamento da matriz cimentícia e da interface com o agregado, resultando em uma estrutura mais densa, com maior refinamento de poros, mais resistente aos ambientes agressivos. HISADA et al. (1999), ao avaliarem a migração de cloretos em argamassas com adições minerais em argamassas, verificaram que a sílica ativa diminui significativamente a mobilidade dos íons cloreto.

A Figura 5.14 apresenta a relação entre o tempo de despassivação avaliado pelo potencial de corrosão e pela intensidade de corrosão para os concretos estudados, onde verifica-se que o tempo estimado para despassivação pela intensidade de corrosão é maior do que o estimado pelo potencial de corrosão. Ou seja, para uma mesmo tempo de ensaio, o potencial de corrosão atinge valores mais negativos, que indicam a despassivação da armadura, enquanto a intensidade de corrosão correspondente, ainda apresenta valores não significantes em termos de despassivação.

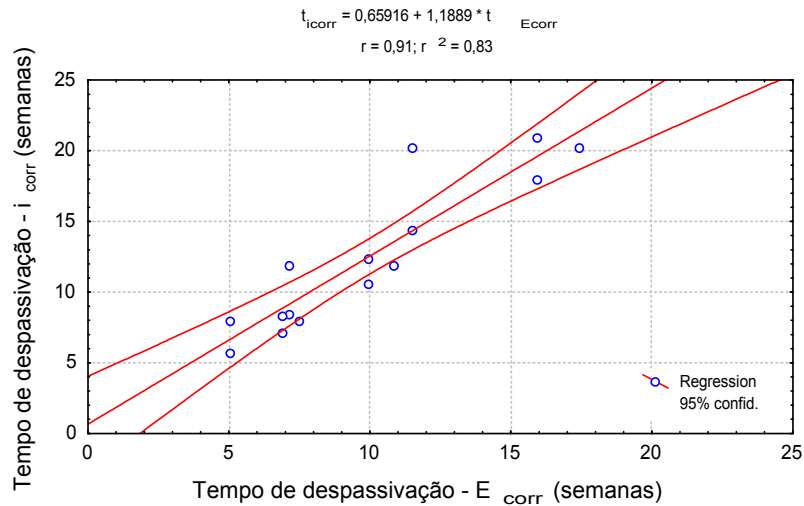


Figura 5.14 Tempo de despassivação por E<sub>corr</sub> x tempo de despassivação por i<sub>corr</sub>.

### 5.1.2.2 Variação da intensidade de corrosão em função do tempo

O modelo de regressão não linear proposto para representar a variação da intensidade de corrosão com o tempo é apresentado na Equação 5.8.

$$\Delta i_{\text{corr}} = [(b1 \times \text{aag}^2) + (b2 \times (\text{sa}-15)^2)] \times (\Delta t)^{b3} \quad \text{Equação 5.8}$$

Onde:

$\Delta i_{\text{corr}}$  = variação da intensidade de corrosão com o tempo ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ );

aag = relação água/aglomerante;

sa = teor de adição de sílica ativa (%);

$\Delta t$  = variação do tempo (semanas);

b1, b2 e b3 = parâmetros dos fatores considerados no modelo.

A Tabela 5.7 apresenta os parâmetros dos fatores considerados no modelo de variação da intensidade de corrosão, estimados para os dados do presente programa experimental, bem como os parâmetros estatísticos calculados para os fatores analisados.

**Tabela 5.7** Parâmetros obtidos para o modelo da variação da intensidade de corrosão com o tempo.

Fator	Parâmetro	Estimativa	Erro Padrão	Teste t	Significância "p-value"
aag	b1	0,156	0,0193	8,08	0,000
sa	b2	0,00021	0,00005	4,20	0,000
$\Delta t$	b3	1,5	0,2291	6,55	0,000

Os resultados apresentados na Tabela 5.7 indicam que os fatores relação água/aglomerante (aag), sílica ativa (sa) e a variação do tempo ( $\Delta t$ ) apresentam efeito significativo na variação da intensidade de corrosão, a um nível de confiança de 95%, visto que os valores de “p-value” são menores do que 0,05.

A Tabela 5.8 apresenta a análise de variância (ANOVA) do modelo proposto, o qual apresentou um coeficiente de determinação ( $r^2$ ) igual a 0,831.

**Tabela 5.8** Análise de variância do modelo obtido para o tempo de início da despassivação.

Fonte	GDL	SQ	MQ	F <sub>calc.</sub>	Significância p-value
Modelo	3	226,76	75,59	91,07	0,000
Resíduo	31	25,70	0,83	-	-
Total	34	252,46	-	-	-
Total corrigido	33	151,87	-	-	-

GDL = Graus de Liberdade

SQ = Soma Quadrada

MQ = Média Quadrada = SQ/GDL

F<sub>calc.</sub> = MQ<sub>modelo</sub>/MQ<sub>resíduo</sub>

O valor de ‘p-value’ do modelo, menor do que 0,01, indica que a relação entre as variáveis é estatisticamente significativa a um nível de confiança de 99%. O coeficiente de determinação  $r^2$  igual a 0,831 indica que o modelo explica 83,1% da variabilidade dos valores observados para a variação da intensidade de corrosão. Da mesma forma como colocado para o potencial de corrosão, salienta-se que o coeficiente de determinação obtido é considerado um valor bastante razoável para representar o comportamento observado, tendo em vista a variabilidade inerente às análises que consideram a evolução do tempo.

O modelo de regressão que explica a relação entre a variação da intensidade de corrosão e os fatores analisados no presente programa experimental é apresentado na Equação 5.9.

$$\Delta i_{\text{corr}} = [(0,156 \times \text{aag}^2) + (0,00021 \times (\text{sa}-15)^2)] \times (\Delta t^{1,5}) \quad \text{Equação 5.9}$$

$r^2 = 0,831$

Onde:

$\Delta i_{\text{corr}}$  = variação da intensidade de corrosão com o tempo ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ );

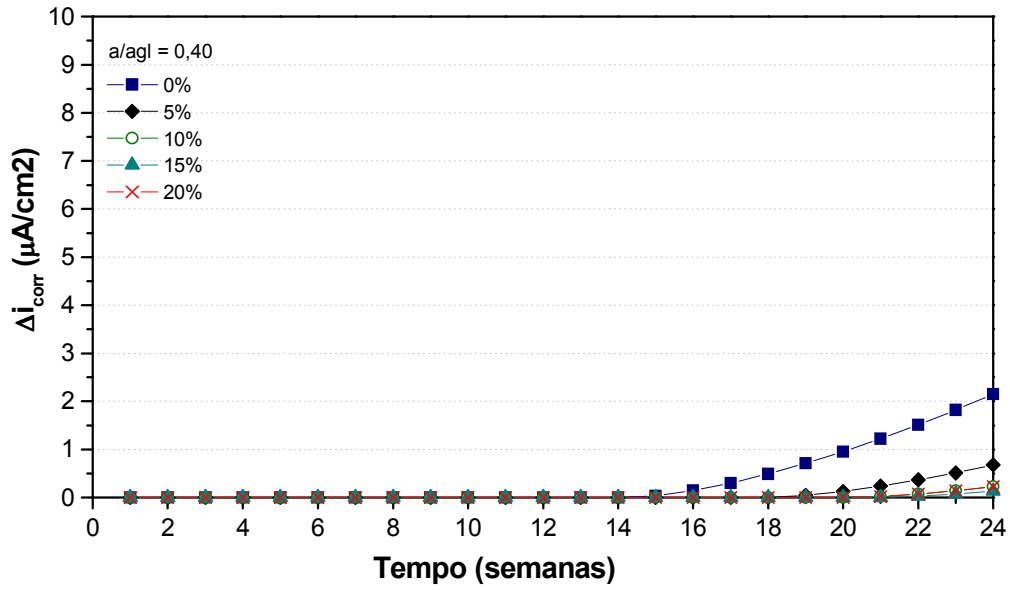
aag = relação água/aglomerante;

sa = teor de adição de sílica ativa (%);

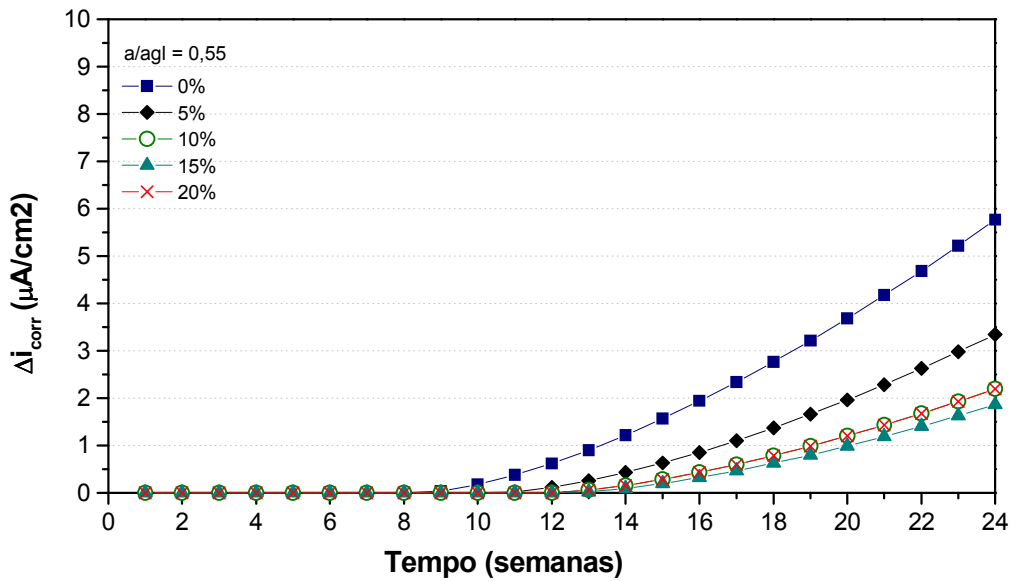
$\Delta t$  = variação do tempo (semanas);



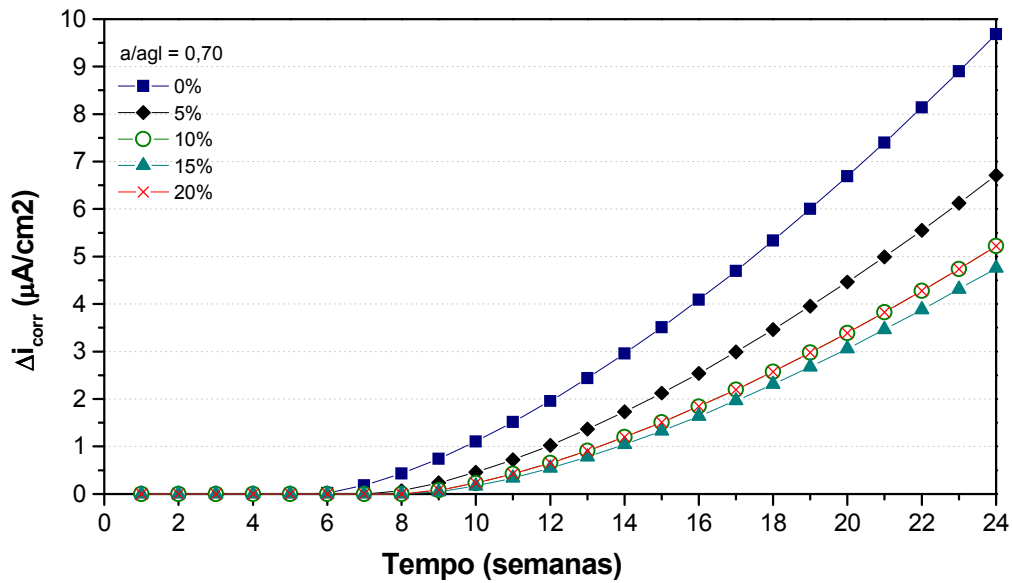
A Figura 5.15 (a), (b) e (c) apresenta as curvas que representam o modelo ajustado para variação da intensidade de corrosão, para as relações água/aglomerante 0,40; 0,55 e 0,70, respectivamente.



(a)



(b)



(c)

**Figura 5.15** Variação da intensidade de corrosão – corrosão por cloreto (a) relação água/aglomerante 0,40 (b) relação água/aglomerante 0,55 (c) relação água/aglomerante 0,70.

A análise estatística dos resultados obtidos identificou que a relação água/aglomerante, bem como o teor de adição de sílica ativa e o tempo de ensaio apresentam influência significativa na variação da intensidade de corrosão.

Como pode ser observado nas curvas de comportamento da Figura 5.15, o aumento da relação água/aglomerante acarreta em maiores valores de intensidade de corrosão. Verifica-se que ao aumentar a relação água/aglomerante de 0,40 para 0,70 a variação final média da intensidade de corrosão aumenta de 0,68  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  para 6,32  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Ou seja, para a relação água/aglomerante 0,70 obtém-se uma variação final média 9,3 vezes maior do que a observada para os concretos com relação água/aglomerante 0,40.

Sendo a relação água/aglomerante um parâmetro determinante da porosidade, influencia diretamente as propriedades de transporte no concreto e, conseqüentemente, o grau de proteção às armaduras. Assim, com o aumento da porosidade e da quantidade de poros interconectados, devido ao aumento da relação água/aglomerante, é de se esperar uma maior absorção capilar, maior penetração de íons cloreto e maior difusão de oxigênio, além de uma menor resistividade, pela maior disponibilidade de eletrólito nos poros, o que facilita as reações de corrosão.

TÜRKMEN et al. (2002), em estudo da corrosão da armadura de concretos de alta resistência, curados em solução de NaCl 5%, verificaram que o aumento da relação água/aglomerante resulta em maiores intensidades de corrosão, e que 10% de sílica ativa no concreto reduz a intensidade de corrosão.

Os resultados obtidos indicam que a adição de sílica ativa ao concreto apresenta favorável influência na variação da intensidade de corrosão com o tempo. Nota-se, ao final do ensaio, que a utilização de 15% de sílica ativa promove, em relação ao concreto de referência, uma redução média de 70% na variação da intensidade de corrosão.

Diversos pesquisadores (SCHIESSL e RAUPACH,1992; KHAYAT e AİTCIN, 1992; ANQI et al., 1991; WOLSIEFER, 1991) concordam que a utilização da sílica ativa, por refinar a estrutura de poros, aumenta a resistividade do concreto e restringe a mobilidade iônica, ocasionando menores taxas de corrosão.

CABRERA et al. (1995) observaram significativa redução na corrente de corrosão de corpos-de-prova de argamassa com 20% de sílica ativa, em substituição à massa de cimento, submetidos à exposição de cloretos.

BERKE et al. (1991) constataram que concretos com adição de sílica ativa, após a imersão parcial em solução NaCl 3,5% por 3 anos, apresentam maior resistência à corrosão, principalmente em relações água/cimento menores. Os autores atribuem o melhor desempenho à redução da porosidade, principalmente na zona de transição com o agregado.

Já MANGAT et al. (1994), em pesquisa realizada para avaliar a corrosão da armadura em concretos com adições minerais, concluíram que embora a porosidade total de pastas com sílica ativa seja maior, a difusão de cloreto, assim como a concentração de íons cloreto em concreto, é significativamente reduzida com a utilização da sílica ativa, o que proporciona taxas de corrosão bastante reduzidas em relação ao concreto de referência.

HOU e CHUNG (2000), estudando o efeito das adições minerais na corrosão da armadura em soluções de NaCl, verificaram que com 15% de substituição da massa de cimento por sílica ativa obtêm-se intensidades de corrosão muito menores do que em concretos de referência, devido principalmente à significativa redução da absorvidade, proporcionada pela sílica ativa.

É interessante salientar que alguns pesquisadores (PAGE e VENNESLAND, 1983; MONTEIRO et al.; 1985) colocam que a sílica ativa, por ocasionar uma redução no pH da solução dos poros, em função da reação pozolânica, pode diminuir a capacidade de fixação de íons cloreto, reduzindo o limite desses íons para despassivar a armadura, assim como pode aumentar a relação  $Cl^-/OH^-$ . Segundo BEAUDOIN et al. (1990), a adição de sílica ativa diminui significativamente a difusão de íons cloreto no concreto, mas por reduzir o pH, aumenta a solubilidade dos cloroaluminatos (sal de Friedel), elevando a concentração de cloretos nos poros.

BYFORS (1987) verificou que a redução do pH, promovida pela utilização da sílica ativa, não apresenta efeito negativo na capacidade de fixação de cloretos e ainda ressalta que a adição de sílica ativa reduz consideravelmente a difusão de íons cloreto, minimizando o risco de corrosão. No entanto, o autor salienta que a redução do pH provocada pelo fenômeno da carbonatação reduz sensivelmente a fixação de cloreto.

No entanto, conforme argumentam RASHEEDUZAFAR e HUSSAIN (1991), independente de qualquer alteração na química dos poros, a sílica ativa modifica a estrutura física do concreto, refinando a estrutura de poros e aumentando a densidade da matriz cimentícia, o que retarda o transporte de agentes agressivos no concreto.

Ainda, BENTZ et al. (2000) colocam que se existe alguma tendência da sílica ativa reduzir o teor de cloreto para despassivar a armadura, esse efeito pode ser compensado pela menor difusão de cloreto observada quando se utiliza a sílica ativa.

No presente trabalho, conforme pode ser visualizado na Figura 5.15, o teor de 20% de adição de sílica ativa revelou um desempenho inferior ao teor 15% de adição. Diante desse fato, e considerando as colocações acima referenciadas, infere-se que a partir de um determinado teor de sílica ativa possa ocorrer uma redução do limite de cloreto para despassivar a armadura, onde as favoráveis alterações da estrutura física não consigam compensar o efeito negativo da diminuição do pH. Ou seja, acima de 15% de adição a densificação proporcionada pela sílica ativa passa a não ser totalmente preponderante, ocasionando um acréscimo na intensidade de corrosão, pela diminuição do teor de cloretos para despassivar a armadura. No entanto, conforme pode ser observado na Figura 5.15, mesmo com 20% de adição de sílica ativa ainda obtém-se um desempenho superior ao concreto de referência, equivalente ao teor 10% de adição.

A Figura 5.16 apresenta a evolução da intensidade de corrosão ( $i_{corr}$ ), em função do tempo (t), para as relações água/aglomerante e teores de sílica ativa analisados. Os valores da intensidade de corrosão foram obtidos a partir dos valores previstos no modelo proposto para a variação da intensidade de corrosão ( $\Delta i_{corr}$ ) acrescidos dos valores iniciais médios da

intensidade de corrosão ( $i_{corr}$ ), observados anteriormente à despassivação da armadura, conforme apresentado na Equação 5.10. Conforme pode ser visualizado, concretos com relação água/aglomerante 0,70 e 10% ou 20% de adição de sílica ativa apresentam, em relação à corrosão da armadura, um desempenho superior ao concreto com relação água/aglomerante 0,55, sem adição.

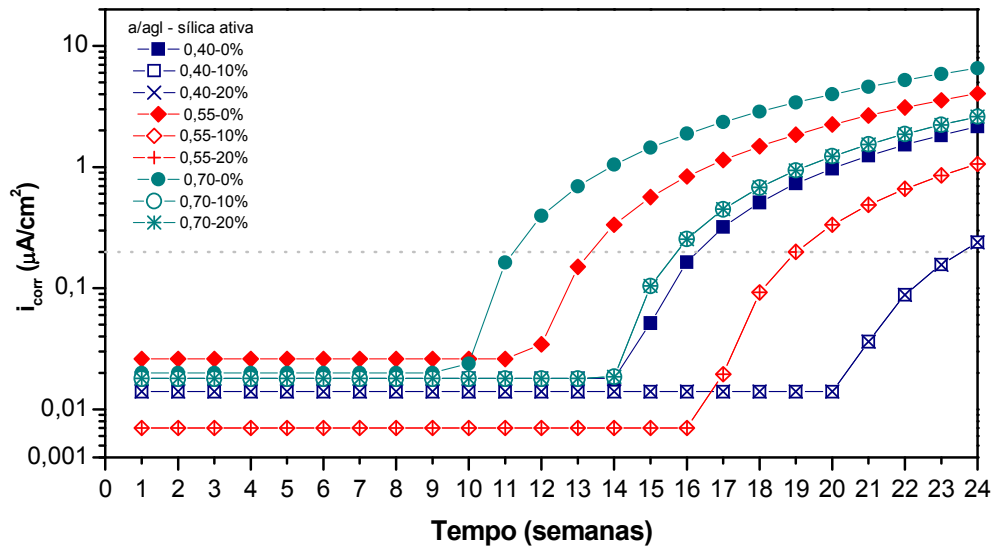
$$\Delta t = t - t_i$$

$$\Delta i_{corr} = 0 \text{ se } t < t_i$$

$$\Delta i_{corr} = f(a_{ag}, s_a, \Delta t)$$

$$i_{corr} = \Delta i_{corr} + i_{corri}$$

Equação 5.10



**Figura 5.16** Evolução da intensidade de corrosão – corrosão por cloreto.

A partir do comportamento observado na Figura 5.16 foi plotado o gráfico apresentado na Figura 5.17, que relaciona a intensidade de corrosão com o grau de deterioração e a importância do ataque, considerando os critérios de avaliação da intensidade de corrosão propostos por ALONSO e ANDRADE (1990).

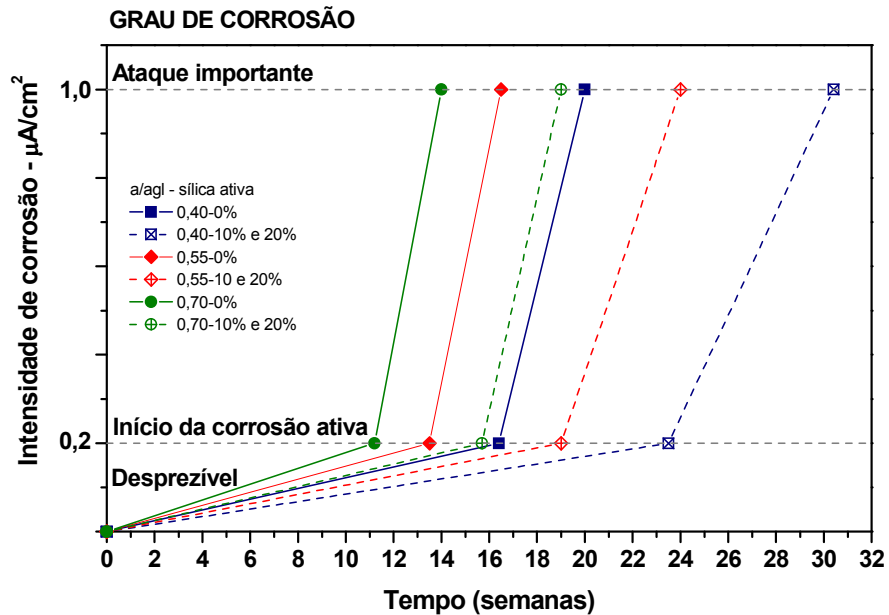


Figura 5.17 Grau de corrosão x tempo.

Conforme a Figura 5.17, pode-se observar que tanto a diminuição da relação água/aglomerante, como a adição de sílica ativa ao concreto, aumenta consideravelmente o tempo para atingir o início da deterioração. A Tabela 5.9 apresenta, em relação ao concreto de referência, o acréscimo de tempo para atingir o início da corrosão ativa e para atingir o grau de corrosão considerado como ataque importante, proporcionado pela adição de sílica ativa.

Tabela 5.9 Acréscimo no tempo de deterioração proporcionado pela sílica ativa.

Relação a/agl com 10% ou 20% de sílica ativa	Tempo para atingir o grau de corrosão (semanas)	
	Início da corrosão ativa	Ataque importante
0,40	+ 7,1	+ 9,9
0,55	+ 5,5	+ 7,5
0,70	+ 4,5	+ 5,0

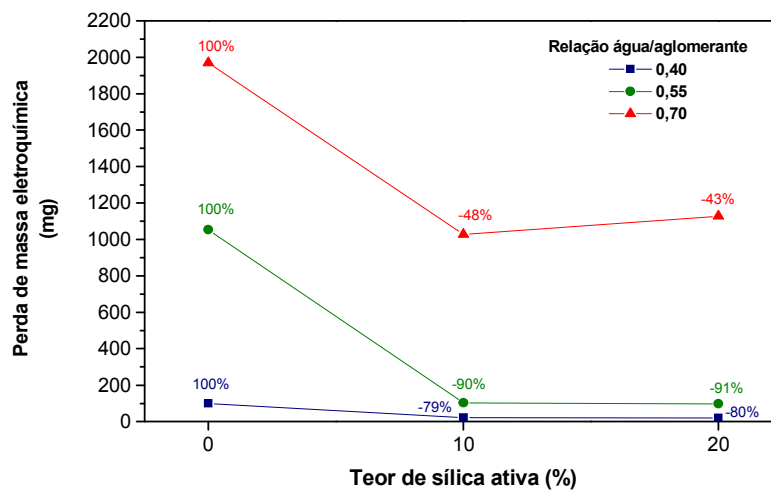
### 5.1.2.3 Perda de massa eletroquímica

Após a conclusão do ensaio acelerado por íons cloreto foi determinada a perda de massa eletroquímica das barras para as relações água/aglomerante e teores de sílica ativa analisados, conforme descrito no final do item 4.8.1.1. A Tabela 5.10 apresenta a média dos resultados obtidos para as quatro barras de aço ensaiadas.

**Tabela 5.10** Perda de massa eletroquímica – corrosão acelerada por cloreto.

Perda de massa eletroquímica (mg)		Relação água/aglomerante		
		0,40	0,55	0,70
Sílica ativa (%)	0	99	1053	1970
	10	21	103	1026
	20	20	98	1127

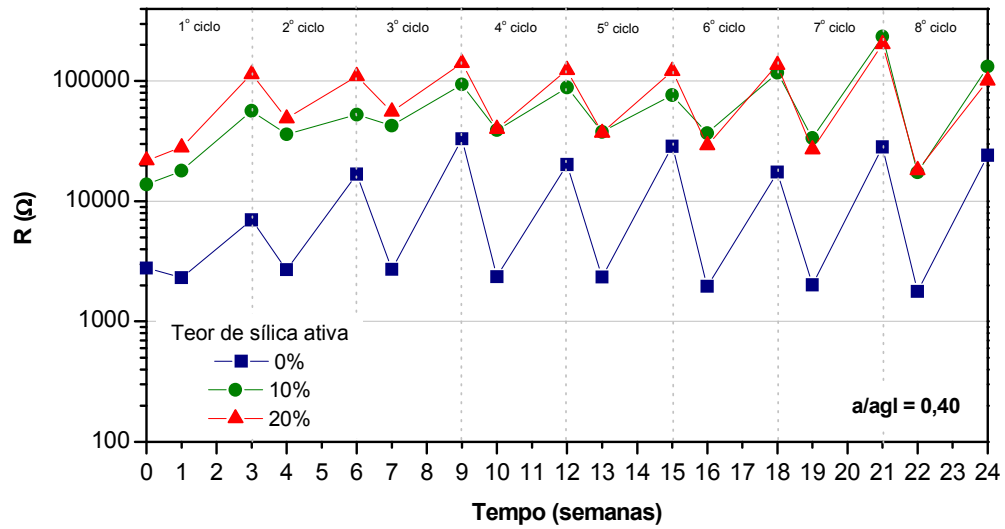
Na Figura 5.18 podem ser observados os valores da perda de massa eletroquímica das barras, para as relações água/aglomerante e teores de sílica ativa analisados. Verifica-se a favorável influência da utilização de sílica ativa e da redução da relação água/aglomerante na proteção da armadura, conforme discutido anteriormente. No item 5.1.6 será apresentada a correlação entre a perda de massa eletroquímica e a perda de massa gravimétrica das barras.



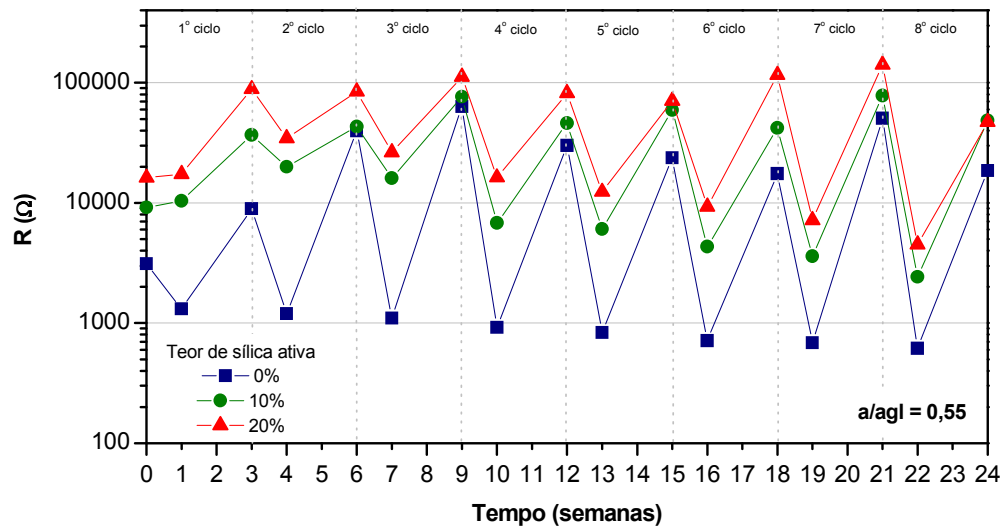
**Figura 5.18** Perda de massa eletroquímica – corrosão por cloreto.

### 5.1.3 Resistência ôhmica

As Figuras 5.19, 5.20 e 5.21 apresentam a evolução da resistência ôhmica (R) ao longo do tempo de ensaio, para as relações água/aglomerante 0,40, 0,55 e 0,70, respectivamente. Em cada figura estão representados os resultados para 0%, 10% e 20% de adição de sílica ativa.

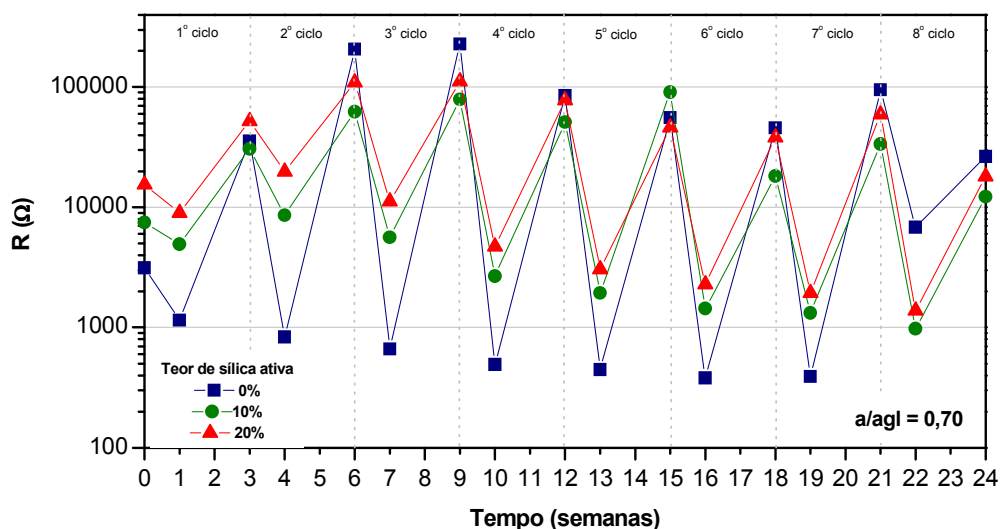


**Figura 5.19** Evolução da resistência ôhmica - relação água/aglomerante 0,40, corrosão por cloreto.



**Figura 5.20** Evolução da resistência ôhmica - relação água/aglomerante 0,55, corrosão por cloreto.





**Figura 5.21** Evolução da resistência ôhmica - relação água/aglomerante 0,70, corrosão por cloreto.

A resistência ôhmica, a qual foi obtida através da compensação da queda ôhmica no ensaio de resistência de polarização, está diretamente relacionada à porosidade, ao grau de saturação dos poros, à concentração iônica da solução dos poros, à espessura de cobertura da armadura, entre outros fatores.

Conforme pode ser observado nas Figuras 5.19 a 5.21, os valores da resistência ôhmica oscilam conforme os semiciclos alternados do ensaio acelerado de corrosão por cloreto, obtendo-se menores valores na etapa de imersão parcial, em função do maior grau de saturação dos poros, e maiores valores na etapa de secagem. A resistência ôhmica é inversamente proporcional ao teor de umidade dos poros, ou seja, aumentando-se a disponibilidade de eletrólito, diminui a resistência ôhmica e vice-versa.

Verifica-se, principalmente para as relações água/aglomerante 0,55 e 0,70, que na etapa de imersão parcial a resistência ôhmica diminui gradativamente ao longo da evolução do ensaio. Já na etapa de secagem os valores apresentam uma maior oscilação durante a evolução do ensaio.

A influência da adição de sílica ativa na resistência ôhmica é claramente identificada, para todas as relações água/aglomerante analisadas, onde se pode observar que a sílica ativa aumenta consideravelmente a resistência ôhmica, principalmente para relações água/aglomerante menores. Desse fato decorre a menor amplitude de variação entre os valores determinados na etapa de imersão parcial e na etapa de secagem, verificada para os concretos com adição de sílica ativa.

O significativo efeito da adição de sílica ativa na resistência ôhmica está associado à densificação da matriz cimentícia, proporcionada pelo refinamento da estrutura de poros, e à conseqüente redução da permeabilidade do concreto e da concentração iônica da solução dos poros.

Os resultados obtidos estão de acordo com os dados observados por CABRAL (2000), o qual verificou que argamassas com 10% de adição de sílica ativa apresentam maior resistência ôhmica, em relação às argamassas de referência.

#### **5.1.4 Variação percentual da massa do corpo-de-prova**

Os resultados da variação percentual da massa do corpo-de-prova referem-se à média dos valores obtidos dos dois corpos-de-prova ensaiados para cada combinação de variáveis independentes – relação água/aglomerante e teor de adição de sílica ativa.

As figuras 5.22 a 5.24 apresentam a variação de massa percentual dos corpos-de-prova com 0%, 10% e 20% de sílica ativa para as relações água/aglomerante 0,40, 0,55 e 0,70, respectivamente. Conforme os resultados obtidos, verifica-se que os concretos com maior relação água/aglomerante apresentam uma maior variação de massa na evolução do ensaio. Tal fato evidencia, em função do aumento da porosidade, a maior capacidade de concretos com maior relação água/aglomerante de absorver ou perder água. Os resultados observados, ou seja, a maior absorção de água com o aumento da relação água/aglomerante, estão de acordo com o comportamento verificado nos ensaios eletroquímicos, onde concretos com relação água/aglomerante maior apresentam maior intensidade de corrosão.

A tendência de ganho de massa, tanto na etapa de imersão parcial como na etapa de secagem, observada principalmente para a relação água/aglomerante 0,70 (Figura 5.24), está provavelmente associada a maior higroscopicidade decorrente do aumento do teor de sais nos poros do concreto ao longo dos ciclos.

O efeito da adição de sílica ativa é evidenciado para relações água/aglomerante menores (Figuras 5.22 e 5.23), onde verifica-se a menor potencialidade de absorção dos concretos com 10% e 20% de adição de sílica ativa. Pode-se observar que os resultados obtidos na variação de massa dos corpos-de-prova com sílica ativa são coerentes com os resultados observados nos ensaios eletroquímicos, visto que concretos com sílica ativa apresentam menor absorção de água e menor intensidade de corrosão.

Além disso, salienta-se que os resultados obtidos na variação da massa dos corpos-de-prova estão de acordo com os resultados observados no ensaio de absorvidade (item

5.3.5), onde os concretos com menor relação água/aglomerante e com adição de sílica ativa apresentam menor taxa de absorção de água.

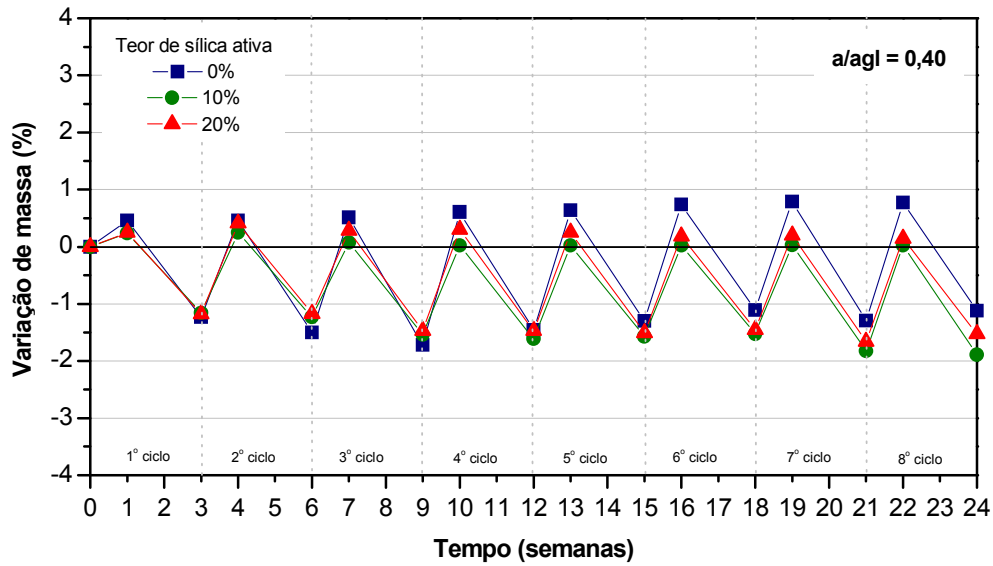


Figura 5.22 Evolução da variação de massa - relação água/aglomerante 0,40, corrosão por cloreto.

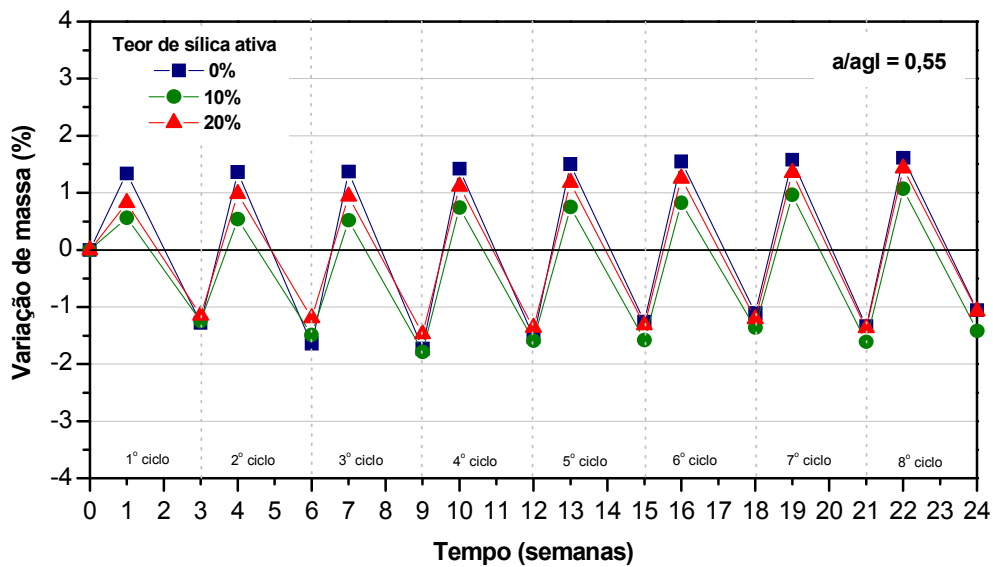
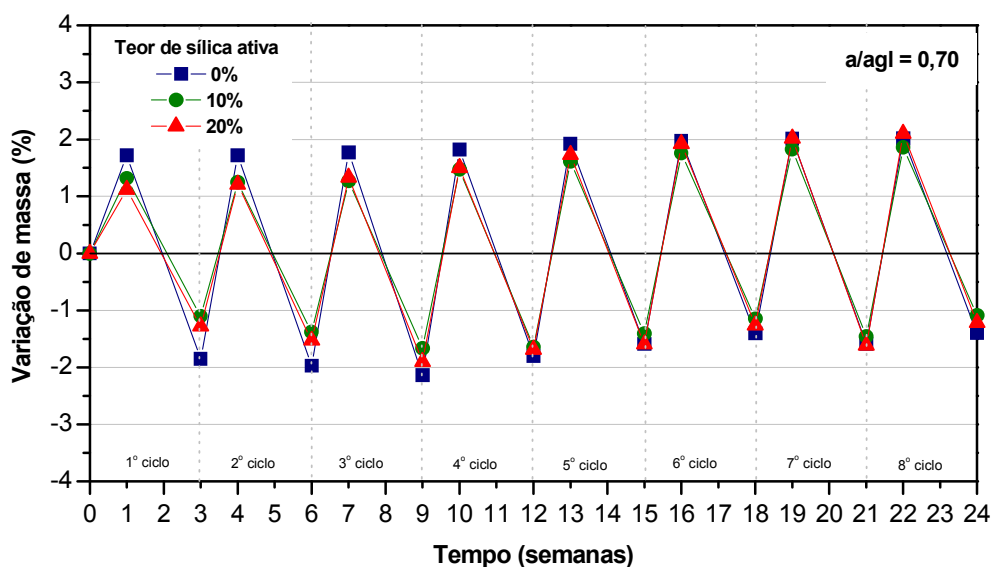


Figura 5.23 Evolução da variação de massa - relação água/aglomerante 0,55, corrosão por cloreto.



**Figura 5.24** Evolução da variação de massa - relação água/aglomerante 0,70, corrosão por cloreto.

### 5.1.5 Perda de massa gravimétrica e taxa de corrosão gravimétrica

A Tabela 5.11 apresenta os resultados médios da perda de massa gravimétrica, calculados em mg e porcentagem, bem como a taxa média de corrosão gravimétrica, calculada em milímetros de penetração por ano.

**Tabela 5.11** Perda de massa e taxa de corrosão gravimétrica.

Relação a/agl	Teor de sílica ativa (%)	Perda de massa gravimétrica		Taxa de corrosão (mm/ano)
		mg	%	
0,40	0	130	0,70	0,027
	10	80	0,43	0,017
	20	100	0,54	0,021
0,55	0	555	2,85	0,114
	10	168	0,90	0,035
	20	215	1,14	0,045
0,70	0	1075	5,73	0,223
	10	743	3,92	0,154
	20	820	4,36	0,170

A partir dos resultados individuais da perda de massa gravimétrica, que geraram a Tabela 5.11, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) com objetivo de verificar a influência da relação água/aglomerante e do teor de sílica ativa na perda de massa gravimétrica, cujo resultado é apresentado na Tabela 5.12. A análise foi realizada com auxílio do software “Statistica – versão 5.0”.

**Tabela 5.12** Análise de variância (ANOVA) para perda de massa gravimétrica.

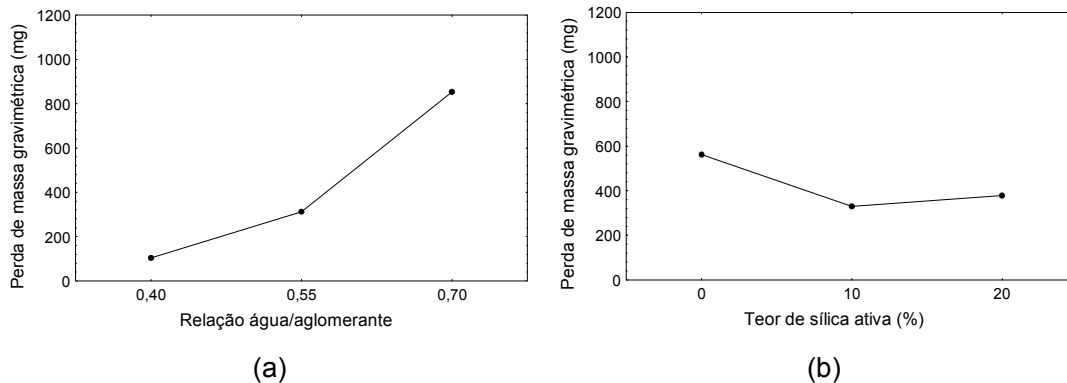
<b>Fator</b>	<b>GDL</b>	<b>MQ</b>	<b>Teste F</b>	<b>Significância p-value</b>
Relação a/agl (A)	2	1801808	226,12	0,0000
Teor de sílica ativa (B)	2	179233	22,49	0,0000
Interação A x B	4	35892	4,50	0,0064
Erro	27	7968,52	-	

Quando p-value é menor do que 0,05, o fator em questão é considerado significativo sobre a variável de resposta, a um nível de confiança de 95%.

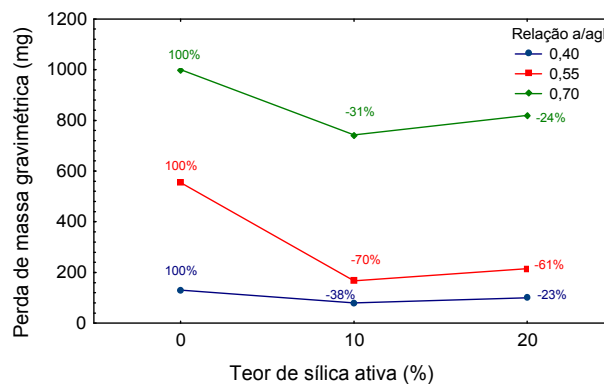
Os resultados obtidos na análise de variância (Tabela 5.12) indicam que tanto a relação água/aglomerante como o teor de sílica ativa, bem como a interação entre os dois fatores, apresentam influência significativa na perda de massa gravimétrica das barras.

A Figura 5.25 (a) e (b) ilustra a influência isolada da relação água/aglomerante e do teor de sílica ativa na perda de massa gravimétrica. Verifica-se que ao diminuir a relação água/aglomerante de 0,70 para 0,55 e para 0,40 obtém-se, respectivamente, uma redução de 63% e 88% na perda de massa. Com a adição de sílica ativa a redução da perda de massa em relação ao concreto de referência resultou em 46% e 36% para os teores de 10% e 20%, respectivamente.

O efeito da interação entre as variáveis analisadas pode ser visualizado na Figura 5.26, a qual evidencia que a influência da sílica ativa na perda de massa gravimétrica é mais pronunciada para a relação água/aglomerante 0,55.



**Figura 5.25** Efeito isolado da relação água/aglomerante (a) e do teor de sílica ativa (b) na perda de massa gravimétrica.



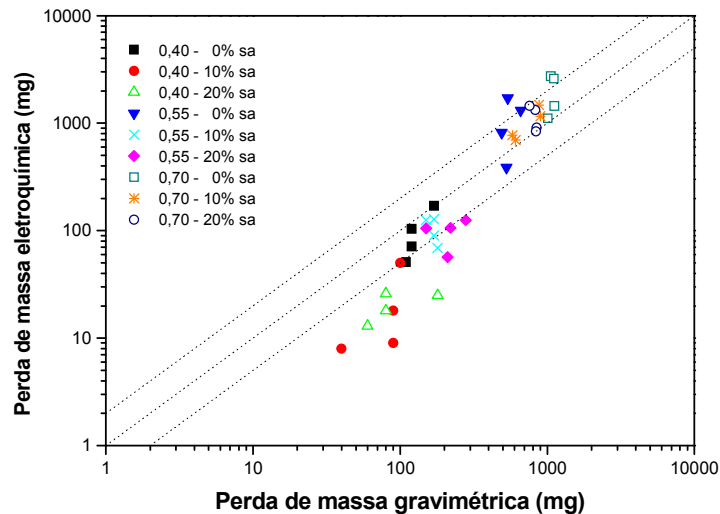
**Figura 5.26** Efeito da interação entre a relação água/aglomerante e o teor de sílica ativa na perda de massa gravimétrica.

Conforme pode ser observado na Figura 5.26, os resultados obtidos para a perda de massa gravimétrica apresentam a mesma tendência de comportamento verificada na determinação da perda de massa eletroquímica (Figura 5.18). Contudo, comparando-se as duas figuras (5.18 e 5.26), verifica-se uma diferença na magnitude dos valores observados para a perda de massa eletroquímica e gravimétrica, a qual será discutida no item 5.1.6.

DEJA et al. (1991), ao estudarem a corrosão da armadura desencadeada por íons cloreto em argamassas com adições, verificaram que 10% de sílica ativa diminui em 78% a perda de massa gravimétrica das barras.

### 5.1.6 Perda de massa gravimétrica versus perda de massa eletroquímica

A Figura 5.27 apresenta a relação entre a perda de massa gravimétrica e a perda de massa eletroquímica para as variáveis analisadas. As linhas diagonais representam o fator de erro 2 associado à técnica de resistência de polarização para a determinação da intensidade de corrosão, segundo colocado por GONZÁLEZ et al. (1985).



**Figura 5.27** Perda de massa gravimétrica x Perda de massa eletroquímica – corrosão por cloreto.

Considerando a natureza da corrosão por íons cloreto, a qual se manifesta na barra sob a forma de pites, com regiões intensamente atacadas e outras não corroídas, pode-se admitir uma relação razoável entre a perda de massa gravimétrica e eletroquímica. A corrosão localizada, com desenvolvimento não uniforme sobre a armadura, pode ocasionar distorções na comparação das duas grandezas (BAUER, 1995).

Como pode ser visualizado na Figura 5.27, alguns valores apresentam-se fora do limite considerado satisfatório. No caso das barras que apresentam maior perda de massa gravimétrica, observada para as relações água/aglomerante 0,40 e 0,55 com adição de sílica ativa, as quais apresentaram menores perdas eletroquímicas (~ 20 a 100 mg), o erro pode estar associado à dificuldade em se remover apenas os produtos de corrosão. Desse modo, no procedimento de limpeza das barras pode ter sido removido parte do metal íntegro da barra, contribuindo para o aumento da perda de massa gravimétrica. A maior perda de massa eletroquímica, verificada para uma barra do concreto com relação água/aglomerante 0,55 sem adição e duas barras do concreto com relação água/aglomerante 0,70 sem adição, pode ser justificada pela dificuldade na perfeita remoção dos produtos de corrosão dentro dos pites, visto que o procedimento de limpeza das barras foi padronizado, com o mesmo

número de ciclos para todas as barras (quatro ciclos com 10 min de imersão). Assim, para algumas barras o número de ciclos estabelecidos para limpeza parece não ter sido suficiente, embora tenha-se constatado a constância de massa da barra ao final do procedimento.

Diante do fato de terem sido obtidos alguns resultados fora do limite satisfatório, supõe-se que o número de ciclos para a limpeza das barras com corrosão por cloretos deve ser proporcional à intensidade do fenômeno de corrosão, levando-se em consideração as diferenças peculiares das variáveis analisadas. Além disso, a completa remoção dos produtos de corrosão no interior dos pites pode ser confirmada através da análise com microscópio (7x a 30x), conforme recomenda a ASTM G1 (1990).

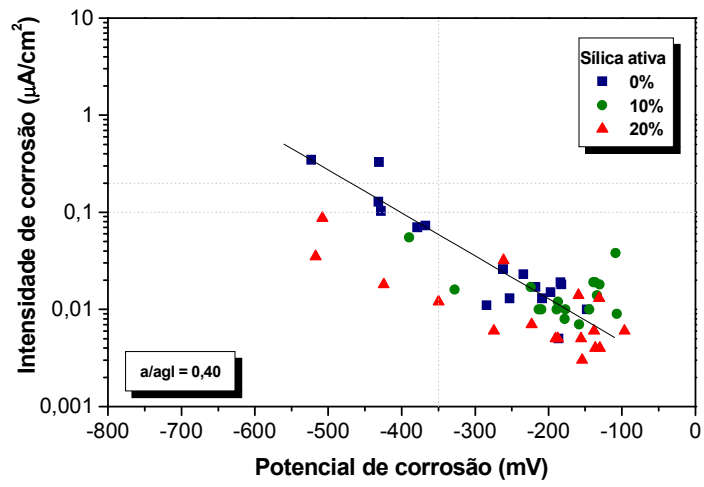
Um outro aspecto que deve ser levado em consideração, que pode estar associado às diferenças obtidas na determinação da perda de massa gravimétrica e eletroquímica, é o valor da constante de Stern-Geary (B) recomendado para o cálculo da intensidade de corrosão. O valor da constante "B" normalmente adotado na literatura é considerado por HANSSON (1984) como uma das limitações da técnica de resistência de polarização. BAUER et al. (1999) verificaram que a intensidade de corrosão, calculada a partir dos valores de "B" obtidos através da análise de Tafel e a partir dos valores relatados na literatura, variou de apenas 7,2% a 120%, para corpos-de-prova com relação água/cimento 0,6, após o segundo ciclo do ensaio acelerado por íons cloreto.

CABRAL (2000), ao avaliar a eficiência de sistemas de reparo na corrosão do aço induzida por cloretos, obteve em algumas barras uma perda de massa gravimétrica superior à eletroquímica. O autor justifica esse fato devido à corrosão observada sob a fita que delimitava a área de ensaio e à dificuldade no processo de limpeza das barras em remover somente os produtos de corrosão, no caso de barras com pequenas perdas eletroquímicas.

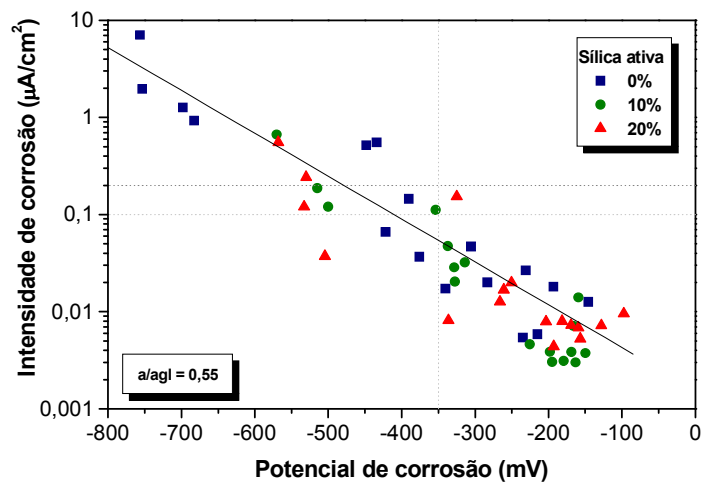
#### **5.1.7 Relação entre a intensidade de corrosão ( $i_{corr}$ ) e o potencial de corrosão ( $E_{corr}$ )**

Com o objetivo de verificar a relação entre as grandezas eletroquímicas determinadas no presente trabalho, foram plotados os gráficos apresentados na Figura 5.28 (a), (b) e (c), que apresenta os valores observados de  $i_{corr}$  e  $E_{corr}$ , relativos à etapa de imersão parcial e à etapa de secagem, para as relações água/aglomerante e teores de sílica ativa analisados.

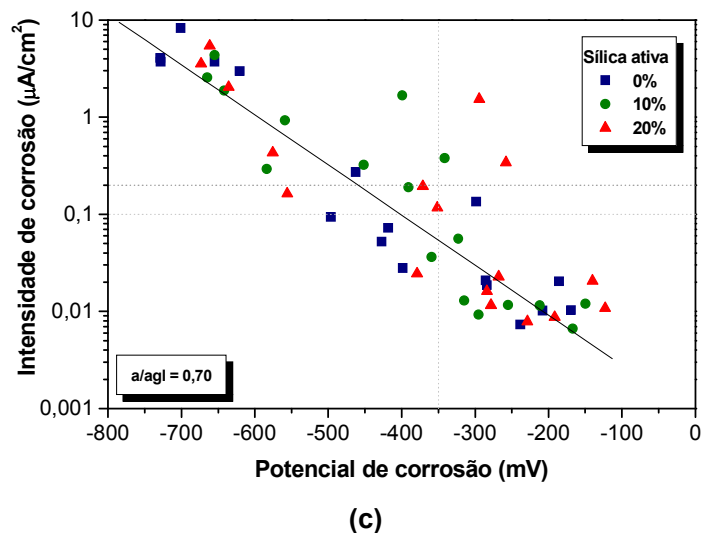




(a)



(b)



**Figura 5.28** Relação entre a intensidade de corrosão e o potencial de corrosão para as relações água/aglomerante (a) 0,40; (b) 0,55 e (c) 0,70 – corrosão por cloreto.

Os resultados apresentados na Figura 5.28 mostram, de forma geral, que um mesmo potencial de corrosão pode corresponder a diferentes valores de intensidade de corrosão.

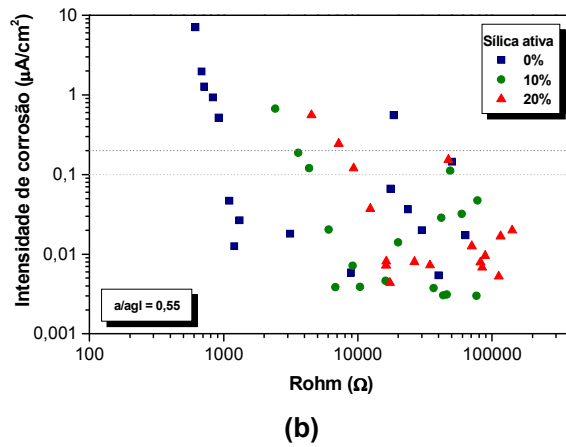
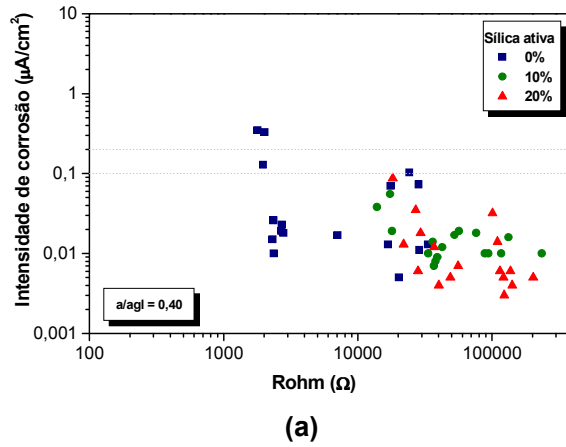
Entretanto, quanto maior a relação água/aglomerante e quanto menor o teor de adição de sílica ativa, melhor a relação entre a intensidade de corrosão e o potencial de corrosão. Ou seja, pode-se observar uma certa coerência na evolução dos valores observados, onde a  $i_{corr}$  aumenta proporcionalmente à diminuição do  $E_{corr}$ , caracterizando um estado ativo de corrosão. Por outro lado, no caso, por exemplo, do concreto com relação 0,40 e 20% de sílica ativa observa-se que enquanto os valores de potencial atingem valores negativos que evidenciam um estado ativo de corrosão, os valores da intensidade mantêm-se em níveis considerados desprezíveis. A fraca relação observada pode ser atribuída à imprecisão dos valores de  $E_{corr}$  quando a armadura ainda esteja passivada.

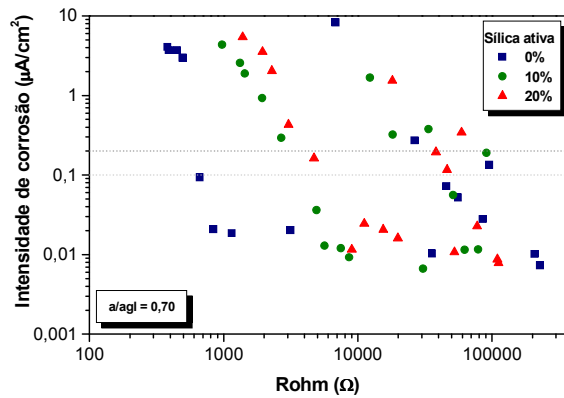
Esses fatos evidenciam que o potencial de corrosão, isoladamente, não seria um parâmetro adequado para avaliar o desempenho do concreto na proteção à armadura. Conforme colocam ANDRADE e GONZÁLEZ, citados por CASCUDO (1997), *os potenciais de corrosão devem ser considerados orientativos e de validade estritamente qualitativa*.

Os resultados obtidos estão de acordo com os dados observados por VIEIRA (2003), a qual verificou que um mesmo valor de potencial de corrosão corresponde a diferentes valores de taxa de corrosão.

### 5.1.8 Relação entre a intensidade de corrosão ( $i_{corr}$ ) e a resistência ôhmica ( $R_{ohm}$ )

A Figura 5.29 (a), (b) e (c) mostra a relação entre os valores observados de  $i_{corr}$  e  $R_{ohm}$ , relativos à etapa de imersão parcial e à etapa de secagem, para as relações água/aglomerante e teores de sílica ativa analisados.





(c)

**Figura 5.29** Relação entre a intensidade de corrosão e a resistência ôhmica para as relações água/aglomerante (a) 0,40; (b) 0,55 e (c) 0,70 - corrosão por cloreto.

De acordo com a Figura 5.29, observa-se, de uma forma geral, que os resultados obtidos para as relações água/aglomerante e teores de adição de sílica ativa estão dispostos em dois grupos, relativos à etapa de imersão parcial e à etapa de secagem, não sendo possível estabelecer uma relação linear entre as variáveis  $i_{corr}$  e  $R_{ohm}$ .

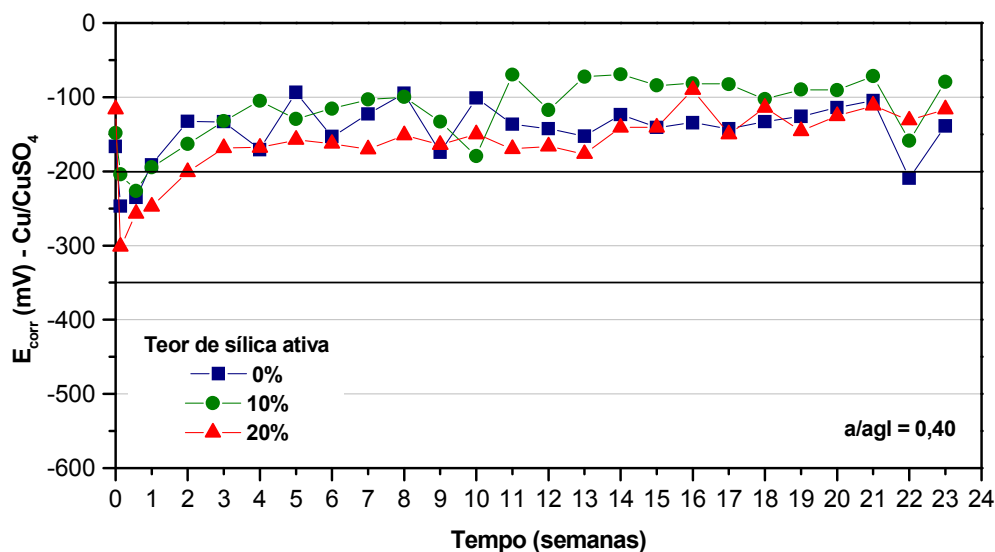
Os resultados obtidos são coincidentes com os dados apresentados por CABRAL (2000), o qual, ao avaliar a eficiência de diferentes sistemas de reparo no combate à corrosão por íons cloreto, constatou que a velocidade de corrosão não apresentou um comportamento inversamente proporcional à resistência ôhmica.

## 5.2 ENSAIOS DE CORROSÃO DESENCADEADA POR CARBONATAÇÃO

Da mesma forma como para a corrosão desencadeada por íons cloreto, os resultados das grandezas eletroquímicas avaliadas no ensaio acelerado de carbonatação, apresentados a seguir, representam a média dos valores obtidos para as quatro barras de aço<sup>29</sup> ensaiadas em cada combinação das variáveis independentes – relação água/aglomerante e teor de sílica ativa.

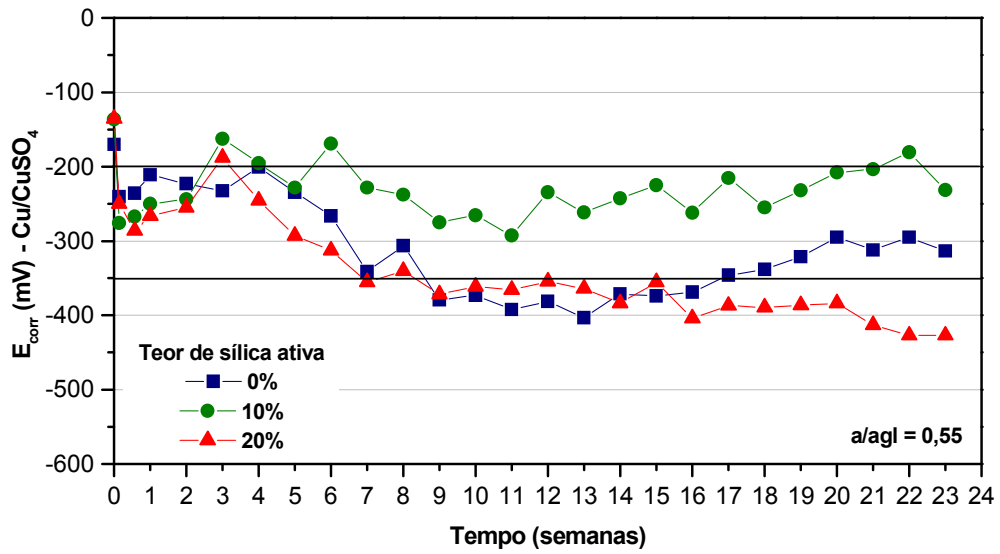
### 5.2.1 Potencial de corrosão

Nas Figuras 5.30, 5.31 e 5.32 são apresentados os resultados referentes à evolução do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) ao longo do tempo de ensaio, para as relações água/aglomerante 0,40, 0,55 e 0,70, respectivamente. Em cada figura estão representados os resultados obtidos para 0%, 10% e 20% de adição de sílica ativa.

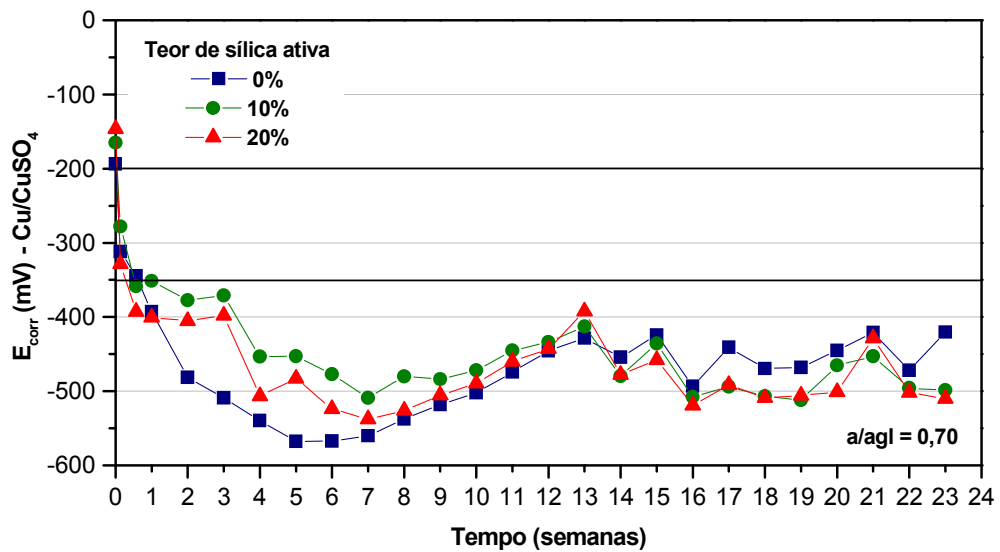


**Figura 5.30** Evolução do potencial de corrosão - relação água/aglomerante 0,40, corrosão por carbonatação.

<sup>29</sup> Sendo duas barras do corpo-de-prova moldado no bloco 1 e duas barras do corpo-de-prova moldado no bloco 2.



**Figura 5.31** Evolução do potencial de corrosão - relação água/aglomerante 0,55, corrosão por carbonatação.



**Figura 5.32** Evolução do potencial de corrosão - relação água/aglomerante 0,70, corrosão por carbonatação.

Os resultados apresentados nas Figuras 5.30 a 5.32 mostram nitidamente que quanto maior a relação água/aglomerante, mais negativos são os valores de potencial de corrosão na evolução do ensaio de carbonatação acelerada.

Para a relação água/aglomerante 0,40 (Figura 5.30) verifica-se que tanto o concreto sem adição como os concretos com 10% e 20% de sílica ativa apresentam nas primeiras determinações (24 e 96 horas) uma redução nos valores do potencial de corrosão, os quais são gradativamente restabelecidos a partir da primeira semana, atingindo, no decorrer do ensaio, valores equivalentes ao potencial inicial, indicando a não existência de condição favorável para ocorrência de corrosão.

Já para a relação água/aglomerante 0,55 (Figura 5.31), a partir da terceira semana do ensaio, o potencial de corrosão evolui para valores mais negativos. Pode-se observar que o concreto com 10% de sílica ativa apresenta valores de potencial superiores aos valores verificados para o concreto sem adição ou com 20% de sílica ativa.

No caso da relação água/aglomerante 0,70 (Figura 5.32) observa-se uma significativa redução nos valores de potencial à medida que o processo de carbonatação evolui. No entanto, a partir da sétima semana de ensaio constata-se um enobrecimento dos valores de potencial, os quais são novamente reduzidos no decorrer do ensaio. ANDRADE et al. (1988), avaliando a corrosão da armadura em argamassas carbonatadas, verificaram um comportamento semelhante. Os autores colocam que o enobrecimento do potencial de corrosão pode estar associado à redução do teor de umidade decorrente da evaporação da água liberada no processo de carbonatação.

BRANCA et al. (1992), avaliando a corrosão da armadura em concretos carbonatados, observaram que para concretos com menor porosidade, com relação água/cimento entre 0,35 e 0,50, os potenciais de corrosão determinados ao longo do ensaio de carbonatação tendem a valores menos negativos, e atribuem esse fato a menor disponibilidade de água nos poros. Já para concretos com maior porosidade (relação água/cimento 0,65), os autores verificaram que o potencial de corrosão atinge inicialmente valores mais negativos, os quais na evolução do processo de carbonatação tendem a valores menos negativos devido à evaporação da água dos poros, facilitada em concretos com maiores relações água/cimento.

De forma geral pode-se verificar que os resultados de potencial de corrosão nos ensaios acelerados por carbonatação não evidenciam nitidamente o tempo para despassivação da armadura, tal como observado para o ensaio acelerado por íons cloreto. Assim, não foi possível obter um modelo matemático que represente com confiabilidade a evolução do potencial de corrosão ao longo do tempo de ensaio de carbonatação.

Dessa forma, a análise estatística dos resultados de potencial de corrosão para corrosão acelerada por carbonatação foi realizada com objetivo de obter um modelo matemático que represente o efeito da relação água/aglomerante e do teor de sílica ativa na variação final do potencial de corrosão<sup>30</sup>. O modelo matemático proposto, apresentado na Equação 5.11, foi obtido através da análise por regressão não linear múltipla.

Tendo em vista os resultados observados na Figura 5.30, na análise dos resultados foi considerado que não houve variação do potencial de corrosão de concretos com relação água/aglomerante 0,40, com ou sem adição de sílica ativa.

$$\Delta E_{\text{corr}} = [b1 \times (\text{aag}-0,30)^2] + [b2 \times (\text{aag}-0,30) \times (\text{sa}-5)^2] \quad \text{Equação 5.11}$$

Onde:

$\Delta E_{\text{corr}}$  = variação final do potencial de corrosão (mV);

aag = relação água/aglomerante;

sa = teor de adição de sílica ativa (%);

b1 e b2 = parâmetros dos fatores considerados no modelo.

A Tabela 5.13 apresenta os parâmetros dos fatores considerados no modelo proposto, estimados para os dados do presente programa experimental, bem como os parâmetros estatísticos calculados para os fatores analisados.

**Tabela 5.13** Parâmetros obtidos para o modelo da variação final do potencial de corrosão.

Fator	Parâmetro	Estimativa	Erro Padrão	Teste t	Significância "p-value"
aag	b1	-1645	135,19	12,17	0,000
aag × sa <sup>31</sup>	b2	-1,392	0,367	3,79	0,000

Os resultados apresentados na Tabela 5.13 indicam que tanto a relação água/aglomerante (aag) como a interação entre a relação água/aglomerante e o teor de sílica ativa são estatisticamente significativos a um nível de confiança de 95%, visto que apresentam valores de "p-value" menor do que 0,05.

<sup>30</sup> Para fins de representatividade estatística, a variação final do potencial de corrosão para os fatores analisados foi determinada a partir da diferença entre a média das cinco últimas medidas observadas e o potencial inicial.

<sup>31</sup> O termo de interação entre a relação água/aglomerante e o teor de sílica ativa apresentado no modelo proposto é simplificada e representado por aag × sa.



A Tabela 5.14 apresenta a análise de variância (ANOVA) do modelo proposto, o qual apresentou um coeficiente de determinação ( $r^2$ ) igual a 0,830.

**Tabela 5.14** Análise de variância do modelo obtido para a variação final do potencial de corrosão.

Fonte	GDL	SQ	MQ	F <sub>calc.</sub>	Significância p-value
Modelo	2	1461312	730656	208,0	0,000
Resíduo	34	119457	3513	-	-
Total	36	1580769	-	-	-
Total corrigido	35	703112	-	-	-

GDL = Graus de Liberdade

SQ = Soma Quadrada

MQ = Média Quadrada = SQ/GDL

F<sub>calc.</sub> = MQ<sub>modelo</sub>/MQ<sub>resíduo</sub>

O valor de 'p-value' menor do que 0,01 indica que a relação entre as variáveis é estatisticamente significativa a um nível de confiança de 99%. O coeficiente de determinação  $r^2$  igual a 0,830 indica que o modelo explica 83,0% da variabilidade dos valores observados para a variação final do potencial de corrosão.

Considerando os resultados obtidos nas Tabelas 5.13 e 5.14, o modelo de regressão que explica a relação entre os fatores analisados e a variação final do potencial é apresentado na Equação 5.12.

$$\Delta E_{\text{corr}} = [-1645 \times (\text{aag}-0,30)^2] - [1,392 \times (\text{aag}-0,30) \times (\text{sa}-5)^2] \quad \text{Equação 5.12}$$

$$r^2 = 0,830$$

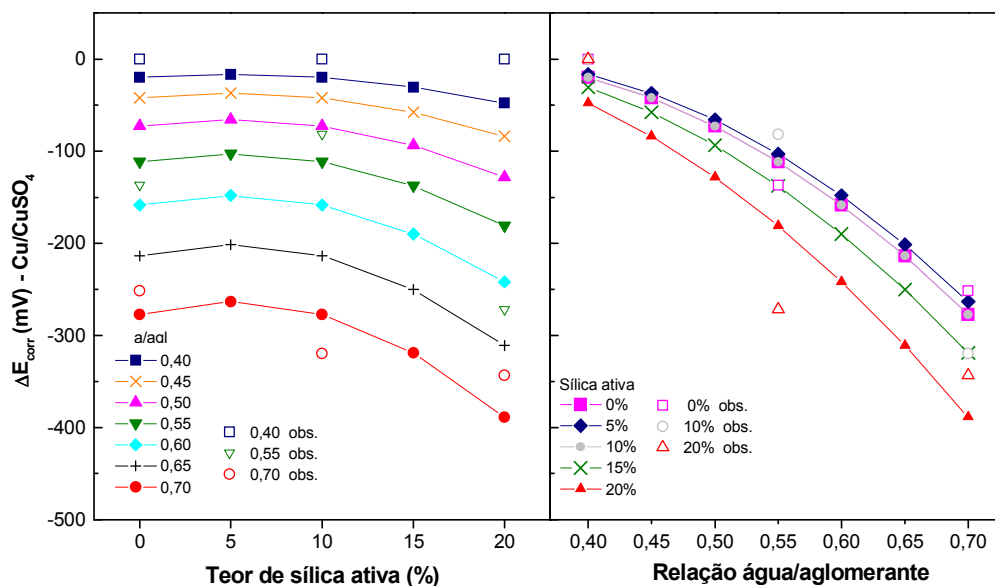
Onde:

$\Delta E_{\text{corr}}$  = variação final do potencial de corrosão (mV);

aag = relação água/aglomerante;

sa = teor de adição de sílica ativa (%);

A Figura 5.33 apresenta as curvas de comportamento obtidas a partir do modelo proposto, bem como os valores observados para a variação final do potencial de corrosão.



**Figura 5.33** Variação final do potencial de corrosão - corrosão por carbonatação.

As curvas de comportamento apresentadas na Figura 5.33 indicam, como esperado, que quanto maior a relação água/aglomerante, maior a variação do potencial de corrosão. Pode-se observar que enquanto para a relação água/aglomerante 0,40 a variação média na evolução do ensaio de carbonatação acelerada é de 29,2 mV, para a relação água/aglomerante 0,70 a variação é de 314,2 mV, aproximadamente 11 vezes maior.

A relação água/aglomerante, uma vez que está diretamente relacionada à porosidade do concreto, influencia a maior ou menor difusão de CO<sub>2</sub> nos poros do concreto, sendo o principal fator que controla a velocidade de carbonatação (TUUTTI, 1982; HO e LEWIS, 1987; PARROT, 1987).

BAUER (1995) verificou, em ensaios de corrosão acelerada por carbonatação, que concretos com maior relação água/cimento apresentam uma diminuição mais brusca nos valores do potencial de corrosão. O autor, citando GONZÁLEZ e ANDRADE, coloca que para relações água/cimento elevadas a frente de carbonatação é mais difusa, onde o CO<sub>2</sub> alcança maiores profundidades sem carbonatar inteiramente as regiões mais próximas à superfície. BRANCA et al. (1992), ao estudarem a corrosão da armadura por carbonatação, verificaram que concretos com menor relação água/aglomerante apresentam potenciais de corrosão mais nobres.

A interação entre a relação água/aglomerante e o teor de sílica ativa pode ser observada na Figura 5.33, onde o efeito da sílica ativa na variação final do potencial de corrosão é mais pronunciado para relações água/aglomerante maiores.

Os resultados apresentados na Figura 5.33 mostram que a adição de 10% de sílica ativa não altera a variação do potencial de corrosão. Pode-se observar, ainda, que o modelo de comportamento proposto indica uma pequena redução na variação final do potencial de corrosão para os concretos com 5% de sílica ativa em relação ao concreto sem adição e ao concreto com 10% de sílica ativa, principalmente em relações água/aglomerante maiores.

TORII et al. (1994), em pesquisa realizada para avaliar o efeito das adições minerais na corrosão da armadura em corpos-de-prova submetidos à carbonatação natural, observaram que após cinco anos de exposição concretos com 10% de sílica ativa, em substituição à massa de cimento, e relação água/aglomerante 0,55, apresentaram potenciais de corrosão mais nobres e mais estáveis do que os concretos de referência.

No entanto, conforme pode ser visualizado na Figura 5.33, teores mais elevados de adição (> 10%) apresentam uma maior variação no potencial de corrosão, principalmente em relações água/aglomerante maiores, onde a porosidade é maior, evidenciando a interação entre os dois fatores.

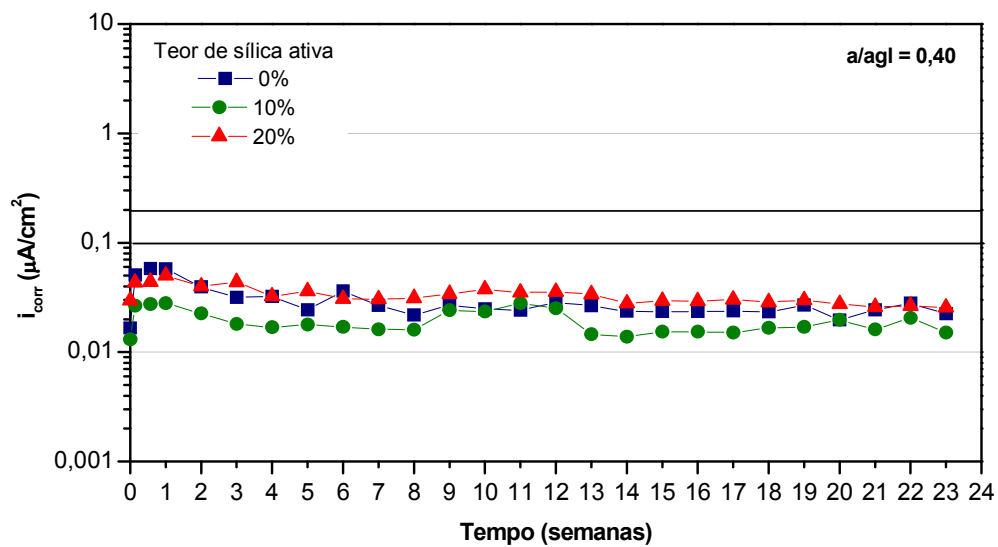
Diversos pesquisadores (BYFORS, 1987; KHAYAT e AİTCIN, 1992; GJØRV, 1995; EL-SAYED et al., 1997) argumentam que a diminuição da alcalinidade, decorrente da reação pozolânica da sílica ativa com o hidróxido de cálcio, não é suficiente para despassivar a armadura. Ocorre que a sílica ativa, por diminuir o pH da solução dos poros, favorece a cinética da difusão do CO<sub>2</sub>, aumentando a velocidade de carbonatação, conforme será discutido no item 5.3.2. Em decorrência desse fato, pode-se obter uma condição mais favorável à despassivação da armadura.

De acordo com os resultados observados, pode-se dizer que a partir de um certo teor de adição o efeito da redução do pH é preponderante sobre a densificação da matriz cimentante proporcionada pela sílica ativa, ou seja, o efeito do consumo de Ca(OH)<sub>2</sub> é maior do que o refinamento da estrutura de poros, que poderia dificultar a difusão do CO<sub>2</sub>. Ainda, no caso de concretos com maior relação água/aglomerante o efeito da redução da alcalinidade é mais pronunciado, em função da maior porosidade, a qual favorece uma maior difusão do CO<sub>2</sub>. Quando a porosidade é menor, a influência da redução do Ca(OH)<sub>2</sub> não é tão significativa, conforme pode ser observado na Figura 5.33, para as relações água/aglomerante menores.

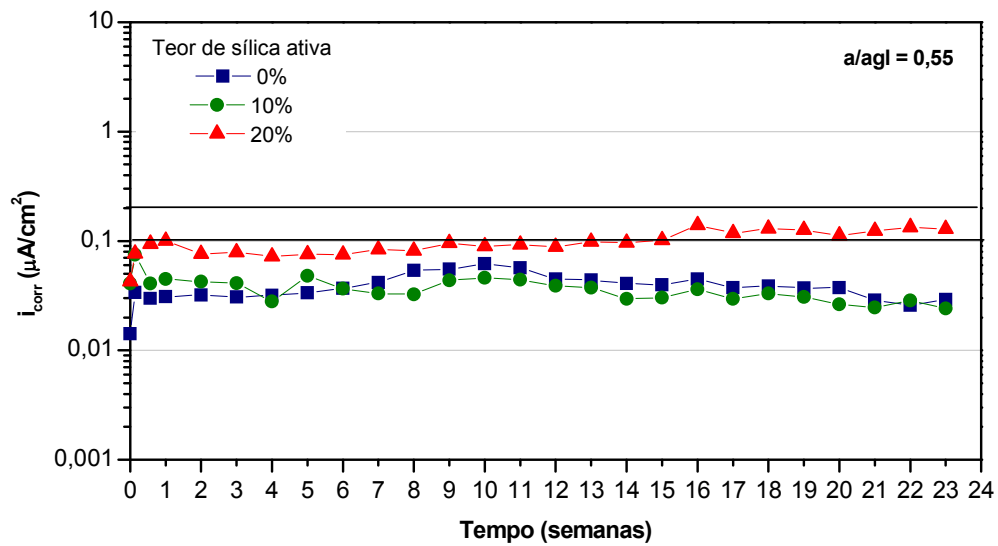
Contudo, com base nos resultados obtidos na avaliação do potencial de corrosão pode-se inferir que a adição de até 10% de sílica ativa ao concreto não oferece risco à proteção da armadura. Isto é, com o emprego de até 10% de sílica ativa, teor normalmente utilizado em concretos de alto desempenho, o refinamento da estrutura de poros pode compensar o efeito da redução da alcalinidade e da maior velocidade de difusão do  $\text{CO}_2$ , sem comprometer a durabilidade das estruturas de concreto armado.

### 5.2.2 Intensidade de corrosão

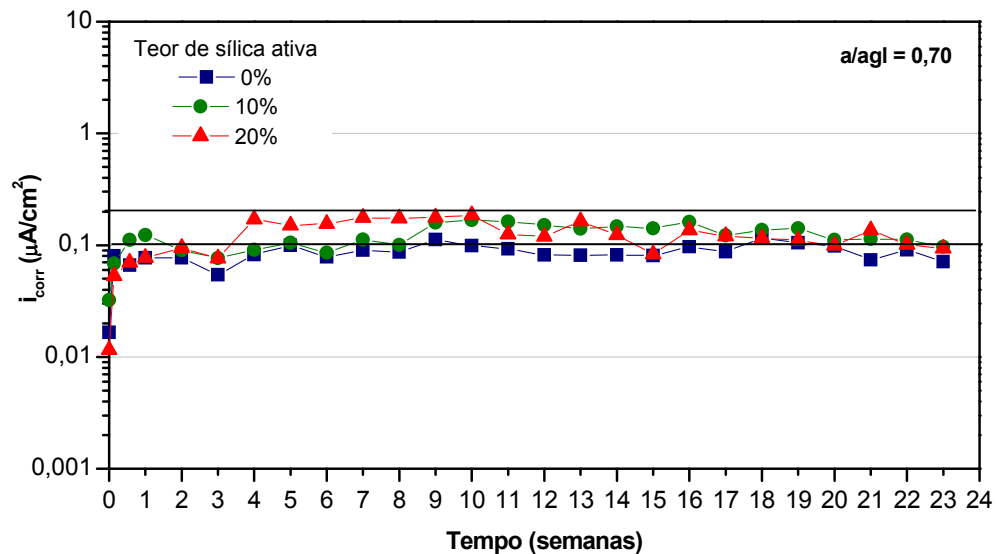
Os resultados referentes à evolução da intensidade de corrosão ( $i_{\text{corr}}$ ) ao longo do ensaio de corrosão por carbonatação são apresentados nas Figuras 5.34, 5.35 e 5.36, para as relações água/aglomerante 0,40, 0,55 e 0,70, respectivamente. Em cada figura estão representados os resultados para 0%, 10% e 20% de adição de sílica ativa.



**Figura 5.34** Evolução da intensidade de corrosão – relação água/aglomerante 0,40, corrosão por carbonatação.



**Figura 5.35** Evolução da intensidade de corrosão – relação água/aglomerante 0,55, corrosão por carbonatação.



**Figura 5.36** Evolução da intensidade de corrosão – relação água/aglomerante 0,70, corrosão por carbonatação.

Pode-se observar nas Figuras 5.34 a 5.36 que nas primeiras idades do ensaio ocorre um incremento nos valores da intensidade de corrosão, os quais, de forma geral, praticamente se estabilizam na evolução do ensaio de carbonatação, sem ultrapassar o valor  $0,2 \mu A/cm^2$ , considerado na literatura como o limite a partir do qual a armadura encontra-se despassivada. No entanto, os resultados obtidos indicam claramente a influência da relação água/aglomerante na intensidade de corrosão, sendo possível verificar

que concretos com maior relação água/aglomerante atingem maiores valores de intensidade de corrosão.

O efeito da adição de sílica ativa parece ser coincidente para as relações água/aglomerante 0,40 e 0,55. Observa-se que com 10% de adição os valores da intensidade de corrosão são menores do que os valores obtidos para o concreto de referência. Já para os concretos com 20% de sílica ativa a intensidade de corrosão atinge valores um pouco mais elevados do que o concreto sem adição, principalmente para a relação água/aglomerante 0,55 (Figura 5.35).

No entanto, para a relação água/aglomerante 0,70, o comportamento observado indica que os concretos com 10% ou 20% de adição de sílica ativa apresentam intensidades de corrosão um pouco mais elevadas do que o concreto de referência.

O tratamento estatístico dos resultados obtidos para a evolução da intensidade de corrosão foi realizado por regressão não linear múltipla, com o objetivo de avaliar a significância dos fatores relação água/aglomerante e teor de sílica ativa na corrosão da armadura por carbonatação, bem como obter um modelo matemático que represente a influência desses fatores na intensidade de corrosão.

Considerando que para a corrosão acelerada por carbonatação o tempo de despassivação da armadura nos concretos analisados não é claramente identificado, optou-se por apresentar um modelo matemático que represente o efeito das variáveis analisadas na variação final da intensidade de corrosão<sup>32</sup>, conforme apresentado na Equação 5.13.

$$\Delta i_{\text{corr}} = [b1 \times (\text{aag}-0,30)^3] + [b2 \times (\text{aag}-0,30) \times (\text{sa}-5)^2] \quad \text{Equação 5.13}$$

Onde:

$\Delta i_{\text{corr}}$  = variação final da intensidade de corrosão ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ );

aag = relação água/aglomerante;

sa = teor de adição de sílica ativa (%);

b1 e b2 = parâmetros dos fatores considerados no modelo.

A Tabela 5.15 apresenta os parâmetros dos fatores considerados no modelo proposto, estimados para os dados do presente programa experimental, bem como os parâmetros estatísticos calculados para os fatores analisados.

---

<sup>32</sup> A variação final da intensidade de corrosão para os fatores analisados foi determinada a partir da diferença entre a média das cinco últimas medidas observadas para a intensidade de corrosão e a intensidade inicial.

**Tabela 5.15** Parâmetros obtidos para o modelo da variação final da intensidade de corrosão.

Fator	Parâmetro	Estimativa	Erro Padrão	Teste t	Significância "p-value"
aag	b1	1,122	0,0755	14,86	0,000
aag × sa <sup>33</sup>	b2	0,00033	0,00008	4,13	0,000

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 5.15, a relação água/aglomerante (aag) e a interação entre a relação água/aglomerante e o teor de sílica ativa apresentam influência significativa na intensidade de corrosão a um nível de confiança de 95%, visto que apresentam valores de "p-value" menor do que 0,05.

Na Tabela 5.16 apresenta-se a análise de variância (ANOVA) do modelo proposto, o qual indicou um coeficiente de determinação ( $r^2$ ) igual a 0,888.

**Tabela 5.16** Análise de variância do modelo obtido para a variação final da intensidade de corrosão.

Fonte	GDL	SQ	MQ	F <sub>calc.</sub>	Significância p-value
Modelo	2	0,09224	0,04612	279,51	0,000
Resíduo	32	5,29 × 10 <sup>-3</sup>	1,65 × 10 <sup>-4</sup>	-	-
Total	34	0,09753	-	-	-
Total corrigido	33	0,04713	-	-	-

GDL = Graus de Liberdade

SQ = Soma Quadrada

MQ = Média Quadrada = SQ/GDL

F<sub>calc.</sub> = MQ<sub>modelo</sub>/MQ<sub>resíduo</sub>

O valor de 'p-value' menor do que 0,01 indica que a relação entre as variáveis é estatisticamente significativa a um nível de confiança de 99%. O coeficiente de determinação  $r^2$  igual a 0,888 indica que o modelo explica 88,8% da variabilidade dos valores observados para a variação final da intensidade de corrosão.

Considerando os resultados obtidos nas Tabelas 5.15 e 5.16, o modelo de regressão que explica a relação entre os fatores analisados e a variação final da intensidade de corrosão é apresentado na Equação 5.14.

$$\Delta i_{\text{corr}} = [1,122 \times (\text{aag}-0,30)^2] + [3,3 \times 10^{-4} \times (\text{aag}-0,30) \times (\text{sa}-5)^2] \quad \text{Equação 5.14}$$

$$r^2 = 0,888$$

<sup>33</sup> O termo de interação entre a relação água/aglomerante e o teor de sílica ativa apresentado no modelo proposto é simplificada representado por aag × sa.

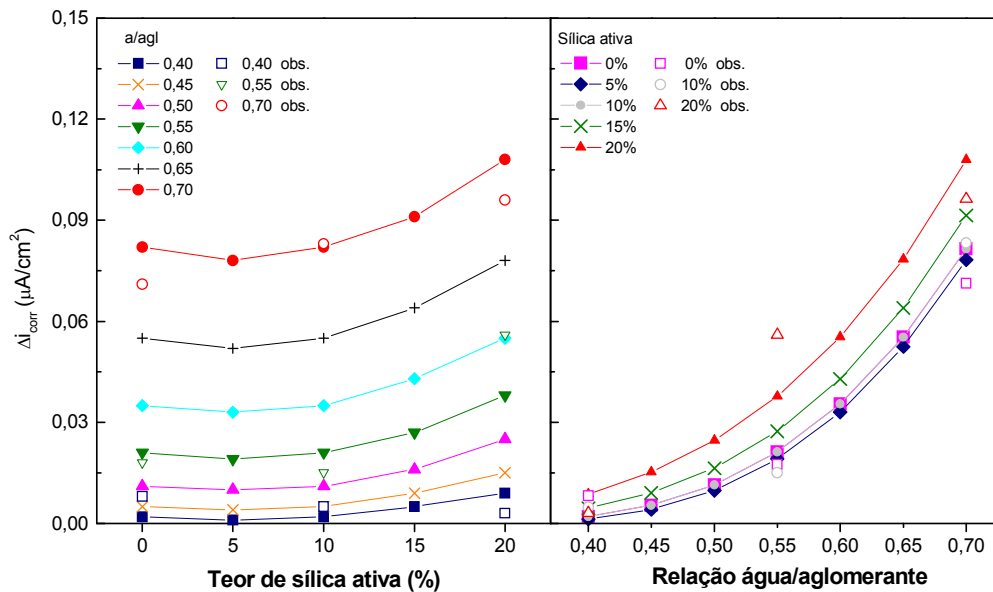
Onde:

$\Delta i_{\text{corr}}$  = variação final da intensidade de corrosão ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ );

aag = relação água/aglomerante;

sa = teor de adição de sílica ativa (%);

A Figura 5.37 apresenta as curvas de comportamento obtidas a partir do modelo proposto, bem como os valores observados para a variação final da intensidade de corrosão.



**Figura 5.37** Variação final da intensidade de corrosão - corrosão por carbonatação.

Nas curvas de comportamento apresentadas observa-se claramente a influência da relação água/aglomerante na intensidade de corrosão. Os resultados obtidos indicam que a variação final média da intensidade de corrosão para a relação água/aglomerante 0,70 é aproximadamente 20 vezes maior do que a verificada para a relação água/aglomerante 0,40. Esse fato está relacionado à maior porosidade dos concretos com maior relação água/aglomerante, que além de facilitar a difusão do  $\text{CO}_2$ , favorece o desenvolvimento das reações de corrosão, conforme anteriormente discutido.

O comportamento observado coincide com os resultados obtidos por diversos pesquisadores (BAUER, 1995; MONTEIRO, 1996; CASCUDO, 2000; entre outros) que, ao avaliarem a corrosão acelerada por carbonatação, verificaram maiores intensidades de corrosão com o aumento da relação água/cimento.

A influência da sílica ativa na variação da intensidade de corrosão é mais pronunciada para as relações água/aglomerante maiores. Pode-se observar que as curvas



que representam a variação final da intensidade de corrosão (Figura 5.37) confirmam o comportamento verificado através da análise da variação do potencial de corrosão (item 5.2.1). Ou seja, o desempenho dos concretos com 10% de adição de sílica ativa é equivalente ao desempenho observado para o concreto de referência e a adição de teores mais elevados de sílica ativa implica em uma maior variação da intensidade de corrosão, principalmente em relações água/aglomerante maiores. Além disso, também foi observada uma pequena redução na variação final da intensidade de corrosão em concretos com 5% de sílica ativa.

Tal como colocado no item 5.2.1, a sílica ativa, por reagir com o hidróxido de cálcio e diminuir o pH da solução dos poros, pode facilitar o processo de carbonatação. Entretanto, BRANCA et al. (1992) consideram que a redução da alcalinidade, tanto por carbonatação ou pela reação pozolânica, é uma condição necessária, mas não suficiente para promover a corrosão da armadura, e argumentam que a permeabilidade e a porosidade são fatores determinantes no processo de corrosão. Essa constatação está de acordo com os resultados obtidos na variação da intensidade de corrosão, onde até 10% de adição a diminuição da porosidade, decorrente do refinamento da estrutura de poros proporcionada pela sílica ativa, compensa o efeito do consumo do hidróxido de cálcio, sem oferecer risco à proteção da armadura. O refinamento da estrutura de poros acarreta uma maior resistividade e menor difusão de oxigênio no concreto, dificultando o desenvolvimento das reações de corrosão. Por outro lado, para teores mais elevados de adição, a redução da porosidade proporcionada pela sílica ativa parece não ser determinante na corrosão, prevalecendo o efeito da redução da alcalinidade, o que aumenta a variação da intensidade de corrosão.

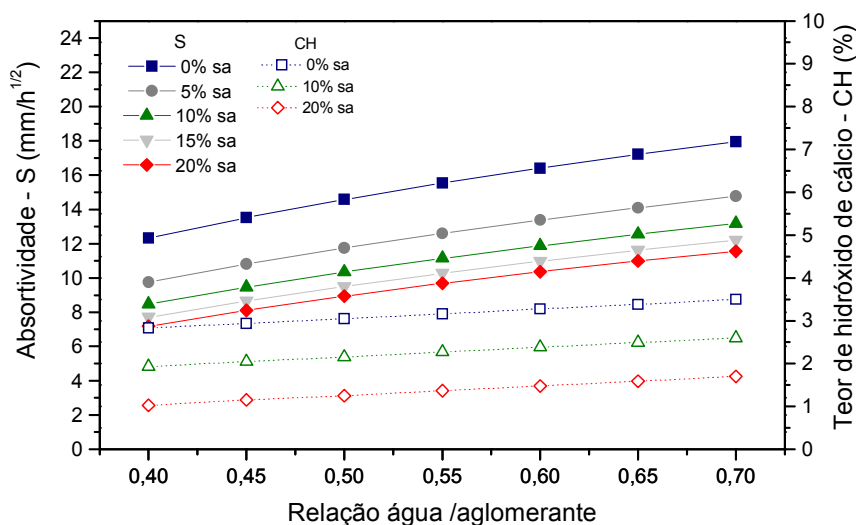
O gráfico da Figura 5.38, na qual são apresentados os resultados do ensaio de absorvidade<sup>34</sup> (item 5.3.5) e os resultados obtidos por KULAKOWSKI (2002)<sup>35</sup> na determinação do teor de hidróxido de cálcio através de análise termogravimétrica diferencial, em argamassas com adição de sílica ativa, vem reforçar a hipótese considerada. Verifica-se que a partir de 10% de adição de sílica ativa, a redução da absorvidade, que está diretamente relacionada à porosidade do concreto e, conseqüentemente, à difusividade dos gases, não é tão pronunciada e que o teor de hidróxido de cálcio para 20% de adição

---

<sup>34</sup> Embora a penetração do gás carbônico no concreto ocorra por um mecanismo de difusão, a avaliação da absorvidade foi considerada por estar relacionada à porosidade que, por sua vez, influencia a difusividade dos gases no concreto e a resistividade.

<sup>35</sup> Os experimentos executados por KULAKOWSKI (2002) fazem parte do mesmo projeto de pesquisa no qual a presente tese está inserida, tendo sido realizados dentro de um programa experimental com a mesma concepção e materiais adotados no presente trabalho.

diminui na mesma proporção verificada para o teor 10% em relação ao concreto de referência. Esses fatos evidenciam que em teores mais elevados de adição pode haver uma maior possibilidade de corrosão em função da redução da porosidade não ser tão significativa como a diminuição do teor de hidróxido de cálcio. Os resultados apresentados na Figura 5.38 podem justificar a maior variação da intensidade de corrosão verificada para teores mais elevados de sílica ativa no ensaio de corrosão acelerada por carbonatação.



**Figura 5.38** Relação entre o teor de hidróxido de cálcio determinado por KULAKOWSKI (2002) e a absorvidade determinada no presente trabalho.

Da mesma forma como colocado para o potencial de corrosão, pode-se inferir pelos resultados verificados na variação da intensidade de corrosão que mesmo que a sílica ativa facilite a carbonatação do concreto, o refinamento da estrutura de poros proporcionado pela adição de até 10% de sílica ativa contribui para minimizar o efeito negativo do consumo do hidróxido de cálcio, obtendo-se um desempenho equivalente ao concreto sem adição.

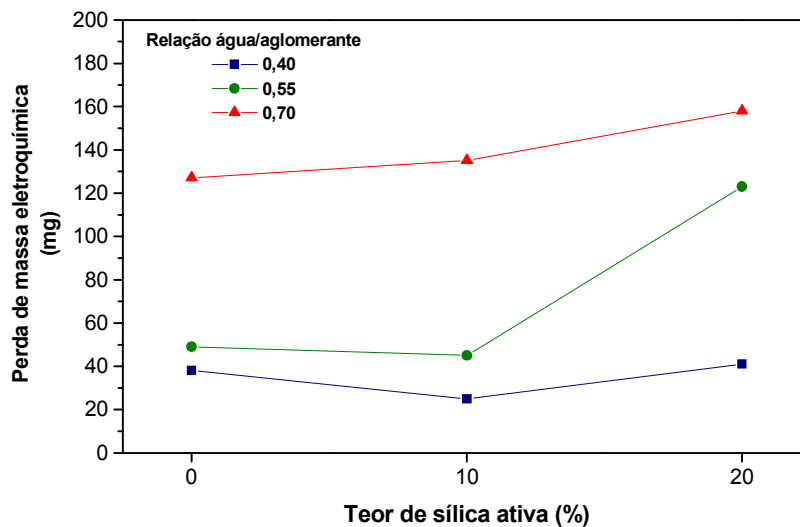
### 5.2.2.1 Perda de massa eletroquímica

Após a conclusão do ensaio acelerado por carbonatação foi determinada a perda de massa eletroquímica das barras, conforme descrito no final do item 4.8.1.1, para as relações água/aglomerante e teores de sílica ativa analisados. A Tabela 5.17 apresenta a média dos resultados obtidos para as quatro barras de aço ensaiadas.

**Tabela 5.17** Perda de massa eletroquímica – corrosão acelerada por carbonatação.

Perda de massa eletroquímica (mg)		Relação água/aglomerante		
		0,40	0,55	0,70
Sílica ativa (%)	0	38	49	127
	10	25	45	135
	20	41	123	158

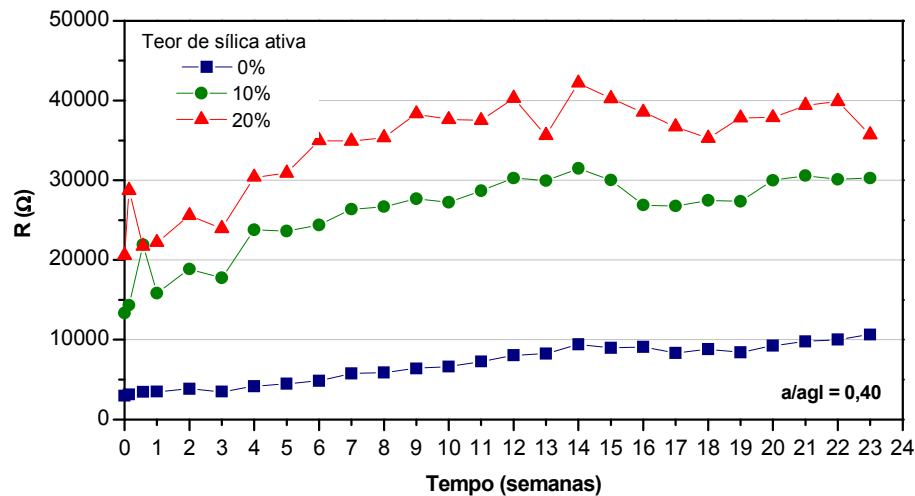
Na Figura 5.39 são apresentados os valores da perda de massa eletroquímica das barras, para as relações água/aglomerante e teores de sílica ativa analisados. Pode-se observar que, em relação ao concreto de referência, a adição de 10% de sílica ativa praticamente não altera os valores da perda de massa eletroquímica. Entretanto, com 20% de adição verifica-se uma maior perda de massa eletroquímica, conforme discutido anteriormente. No item 5.2.6 será apresentada a correlação entre a perda de massa eletroquímica e a perda de massa gravimétrica das barras.



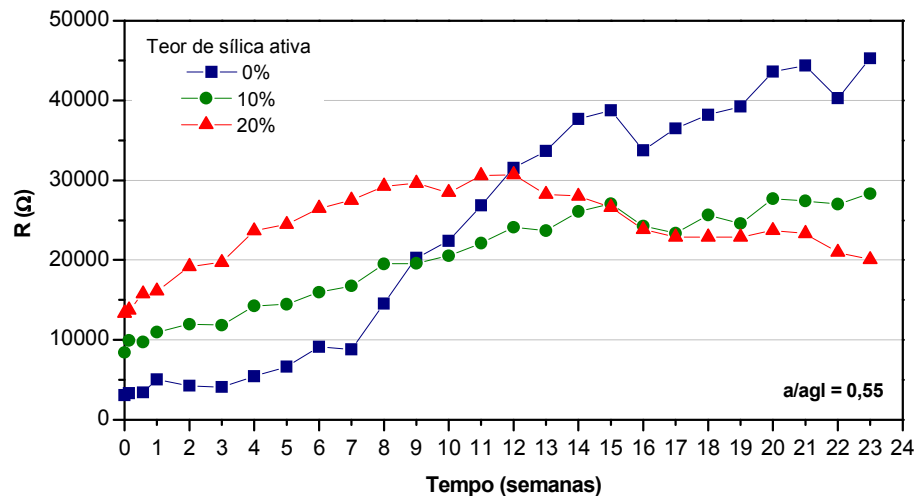
**Figura 5.39** Perda de massa eletroquímica – corrosão por carbonatação.

### 5.2.3 Resistência ôhmica

As Figuras 5.40, 5.41 e 5.42 apresentam a evolução da resistência ôhmica ( $R$ )<sup>36</sup> ao longo do tempo de ensaio de carbonatação acelerada, para as relações água/aglomerante 0,40, 0,55 e 0,70, respectivamente. Em cada figura estão representados os resultados para 0%, 10% e 20% de adição de sílica ativa.

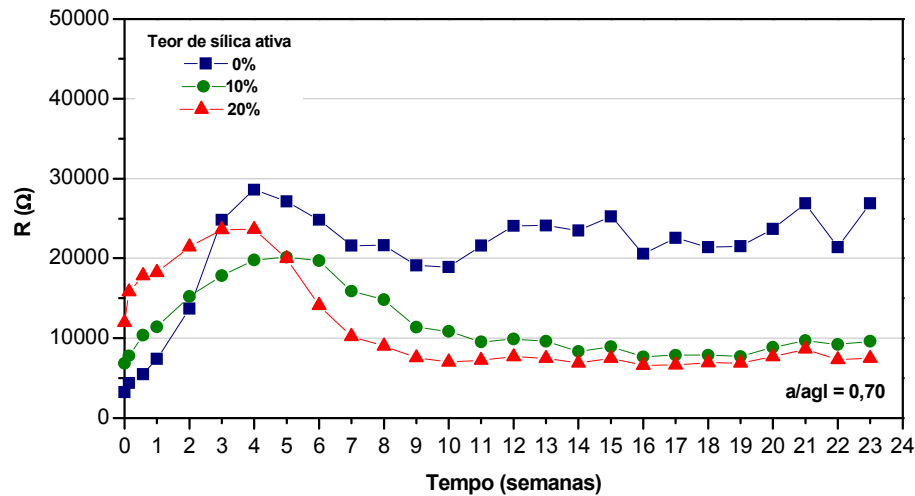


**Figura 5.40** Evolução da resistência ôhmica - relação água/aglomerante 0,40, corrosão por carbonatação.



**Figura 5.41** Evolução da resistência ôhmica - relação água/aglomerante 0,55, corrosão por carbonatação.

<sup>36</sup> A resistência ôhmica foi obtida através da compensação da queda ôhmica no ensaio de resistência de polarização.



**Figura 5.42** Evolução da resistência ôhmica - relação água/aglomerante 0,70, corrosão por carbonatação.

Conforme pode ser visualizado nas Figuras 5.40 a 5.42 a resistência ôhmica é fortemente influenciada pela relação água/aglomerante e pelo teor de sílica ativa. Observe-se, de forma geral, a tendência de aumento dos valores iniciais da resistência ôhmica no ensaio de carbonatação acelerada.

Para a relação água/aglomerante 0,40 a adição de sílica ativa aumenta consideravelmente a resistência ôhmica. Já para as relações água/aglomerante 0,55 e 0,70 verifica-se uma inversão no comportamento, onde a partir de uma determinada idade de ensaio o concreto sem adição apresenta maior resistência.

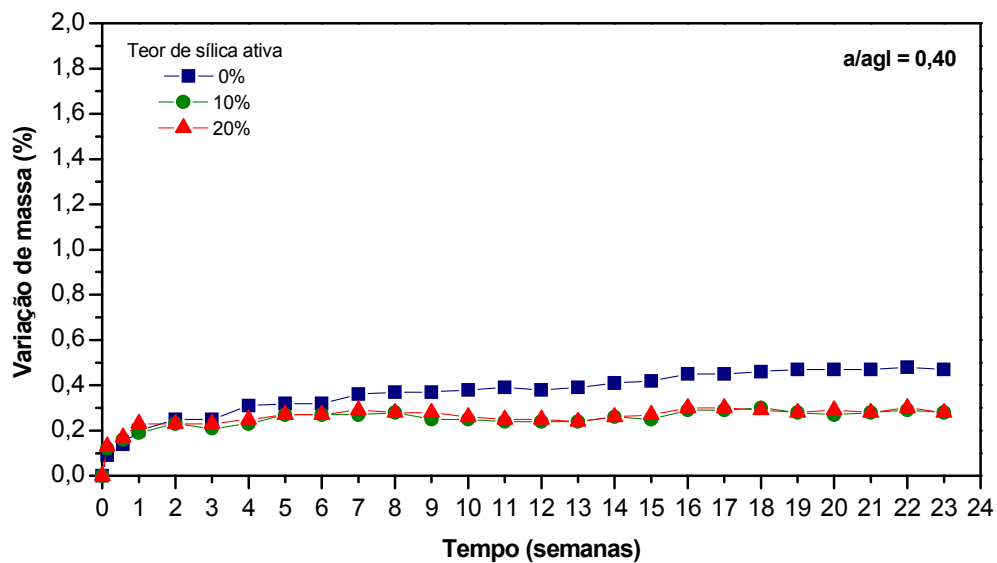
Segundo ALONSO et al. (1988), para corpos-de-prova carbonatados o aumento da resistência ôhmica pode ser atribuído à precipitação de carbonato de cálcio e outros compostos decorrentes da carbonatação, que reduz a permeabilidade do concreto. BAUER (1995), no entanto, verificou que a tendência de comportamento da resistência ôhmica com o processo de carbonatação acelerada é de diminuição dos valores, em função da água produzida durante o processo.

Considerando que os corpos-de-prova com relação água/aglomerante 0,40 não carbonataram durante a evolução do ensaio, o aumento da resistência ôhmica observado, tanto para o concreto sem adição como para os concretos com sílica ativa, pode estar associado às reações de hidratação ao longo do tempo ou, ainda, a uma possível perda de umidade do concreto. Para as relações água/aglomerante 0,55 e 0,70 a inversão do comportamento, anteriormente mencionada, pode estar associada ao fato de que os concretos com adição de sílica ativa, por apresentarem maior carbonatação do que os

concretos de referência, tornam-se menos resistivos em função da liberação de água decorrente do processo de carbonatação.

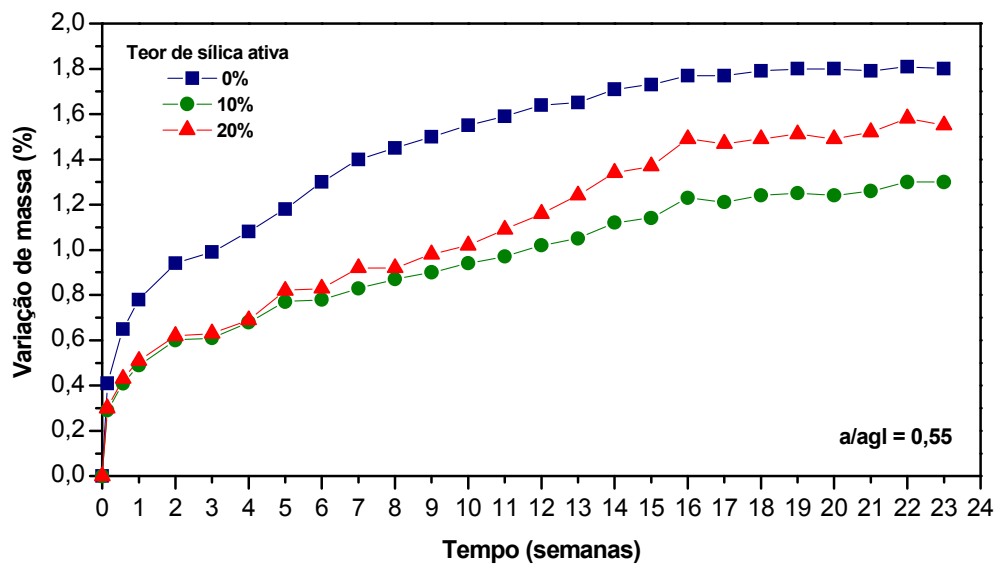
#### 5.2.4 Variação percentual da massa do corpo-de-prova

Os resultados da variação percentual da massa<sup>37</sup> dos corpos-de-prova, referem-se à média dos valores obtidos dos dois corpos-de-prova ensaiados para cada combinação de variáveis independentes – relação água/aglomerante e teor de adição de sílica ativa. As Figuras 5.43 a 5.45 apresentam a variação de massa percentual dos corpos-de-prova com 0%, 10% e 20% de sílica ativa para as relações água/aglomerante 0,40, 0,55 e 0,70, respectivamente.

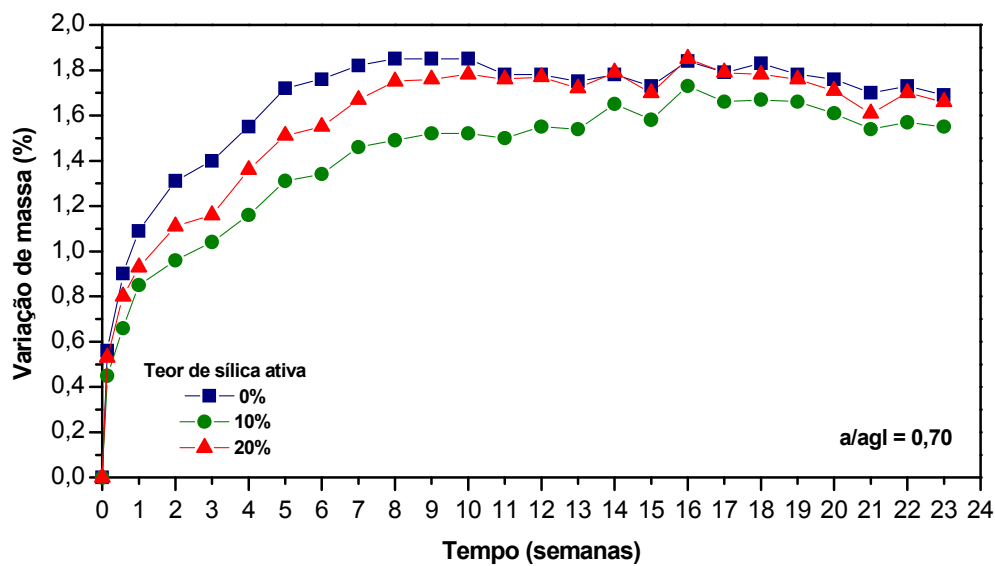


**Figura 5.43** Evolução da variação de massa - relação água/aglomerante 0,40, corrosão por carbonatação.

<sup>37</sup> No decorrer do ensaio de carbonatação, os corpos-de-prova eram pesados assim que retirados da câmara de carbonatação, antes da realização das medidas eletroquímicas.



**Figura 5.44** Evolução da variação de massa - relação água/aglomerante 0,55, corrosão por carbonatação.



**Figura 5.45** Evolução da variação de massa - relação água/aglomerante 0,70, corrosão por carbonatação.

Os resultados obtidos indicam um acréscimo na massa dos corpos-de-prova na evolução do ensaio de carbonatação para todas as relações água/aglomerante e teores de adição analisados. Verifica-se, no entanto, que para a relação água/aglomerante 0,40 a variação de massa é significativamente menor do que a observada para as relações água/aglomerante 0,55 e 0,70. Em relação ao teor de adição, pode-se observar que os concretos com 10% e 20% de sílica ativa apresentam uma menor variação de massa, em comparação aos concretos sem adição, devido, provavelmente, a menor quantidade de Ca (OH)<sub>2</sub>.

Segundo ALONSO (1986), o acréscimo de massa dos corpos-de-prova no ensaio acelerado de carbonatação é devido à transformação do hidróxido de cálcio em carbonato de cálcio no processo de carbonatação.

O acréscimo de massa observado está de acordo com o comportamento verificado por BAUER (1995), FIGUEIREDO (1994), MONTEIRO (1996).

### 5.2.5 Perda de massa gravimétrica e taxa de corrosão gravimétrica

Na Tabela 5.18 são apresentados os resultados médios da perda de massa gravimétrica após o ensaio acelerado por carbonatação, calculados em mg e percentagem, bem como a taxa média de corrosão gravimétrica, calculada em milímetros de penetração por ano.

**Tabela 5.18** Perda de massa e taxa de corrosão gravimétrica – corrosão acelerada por carbonatação.

Relação a/agl	Teor de sílica ativa (%)	Perda de massa gravimétrica		Taxa de corrosão (mm/ano)
		mg	%	
0,40	0	58	0,31	0,013
	10	55	0,29	0,012
	20	53	0,28	0,011
0,55	0	98	0,52	0,021
	10	78	0,42	0,017
	20	118	0,62	0,026
0,70	0	175	0,93	0,038
	10	193	1,03	0,042
	20	198	1,05	0,043



A Figura 5.46 (a), (b) e (c) mostra o aspecto das barras após o ensaio de corrosão desencadeada por carbonatação, antes da realização da limpeza para a determinação da perda de massa gravimétrica.



(a)



(b)



(c)

**Figura 5.46** Aspecto das barras após o ensaio acelerado de carbonatação para as relações água/aglomerante (a) 0,40, (b) 0,55 e (c) 0,70.

A partir dos resultados individuais da perda de massa que geraram a Tabela 5.18, foi realizada a análise de variância (ANOVA) com objetivo de verificar a influência da relação água/aglomerante e do teor de sílica ativa na perda de massa gravimétrica. O resultado da ANOVA é apresentado na Tabela 5.19.

**Tabela 5.19** Análise de variância (ANOVA) para perda de massa gravimétrica.

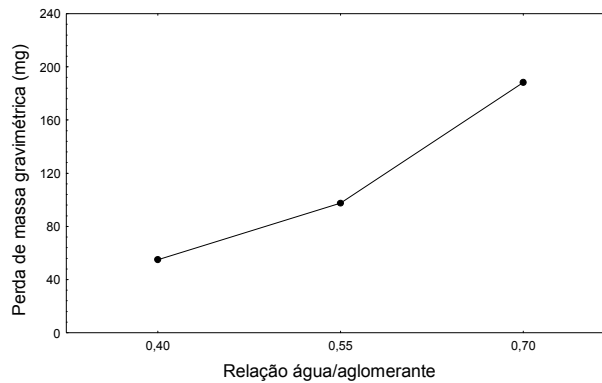
Fator	GDL	MQ	Teste F	Significância p-value
Relação a/agl (A)	2	55669	81,14	0,0000
Teor de sílica ativa (B)	2	719,44	1,05	0,3643
Interação A x B	4	731,94	1,07	0,3921
Erro	27	686,11	-	-

GDL = Graus de Liberdade      MQ = Média Quadrada

Quando p-value é menor do que 0,05, o fator em questão é considerado significativo sobre a variável de resposta, em um nível de confiança de 95%.

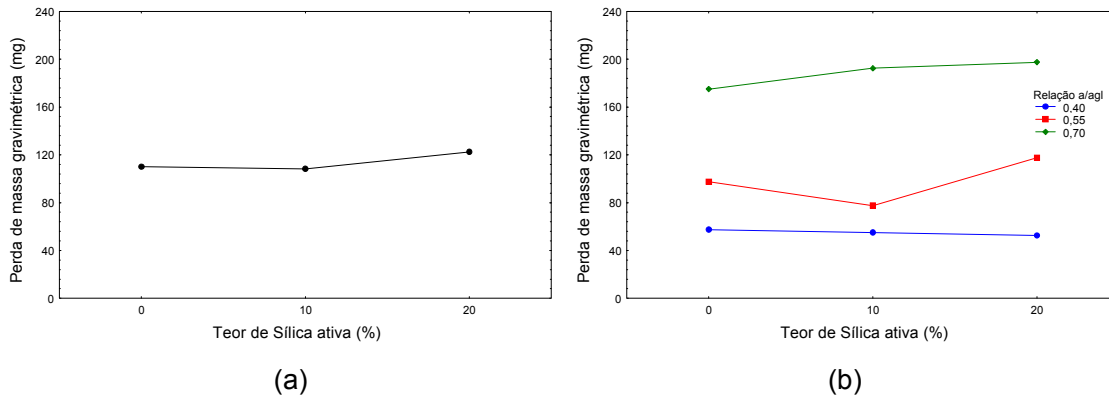
A análise estatística resultante mostra que somente a relação água/aglomerante apresenta influência significativa na perda de massa gravimétrica do ensaio acelerado por carbonatação.

A Figura 5.47 ilustra a influência da relação água/aglomerante sobre a perda de massa gravimétrica, onde se observa que para as relações água/aglomerante 0,40 e 0,55 a perda de massa é, respectivamente, 71% e 48% menor do que a verificada para a relação água/aglomerante 0,70



**Figura 5.47** Efeito da relação água/aglomerante na perda de massa gravimétrica.

Embora somente o efeito da relação água/aglomerante seja significativo na perda de massa gravimétrica, a Figura 5.48 (a) e (b) apresenta, respectivamente, os resultados obtidos para o teor de sílica ativa e para a interação entre as variáveis analisadas, com objetivo de comparar o comportamento verificado com os resultados obtidos pela avaliação eletroquímica.



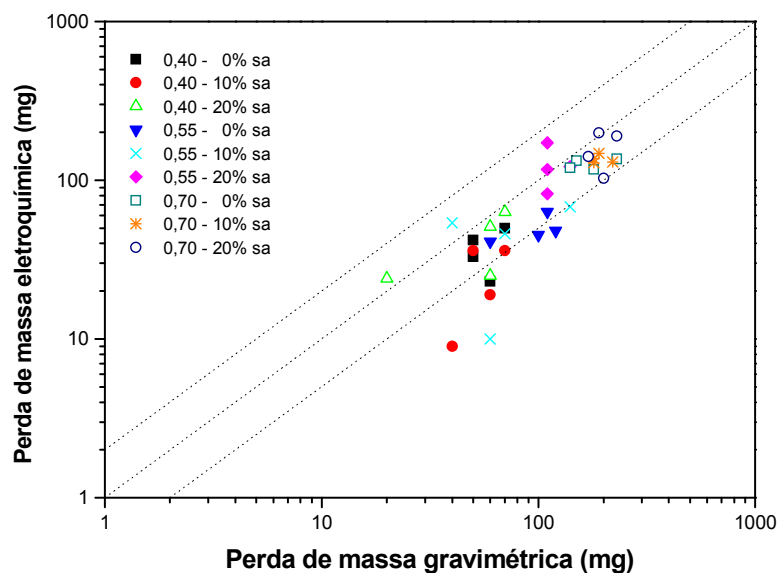
**Figura 5.48** Efeito da interação entre a relação água/aglomerante e o teor de sílica ativa na perda de massa gravimétrica.

Como pode ser visualizado na Figura 5.48 (a), a qual representa a média dos resultados obtidos para as três relações água/aglomerante analisadas, a influência da sílica ativa, pela avaliação da perda de massa gravimétrica, é insignificante na corrosão da armadura. Verifica-se, no entanto, a mesma tendência observada na análise eletroquímica, onde com 20% de sílica ativa a perda de massa é mais elevada.

Comparando-se a Figura 5.39, que representa a perda de massa eletroquímica para as variáveis em questão, com a Figura 5.48 (b), observa-se, além da mesma tendência de comportamento, que a magnitude dos valores da perda de massa gravimétrica é levemente superior à verificada para a perda de massa eletroquímica. No item 5.2.6, a seguir, será apresentada a relação entre a perda de massa gravimétrica e a perda de massa eletroquímica.

### 5.2.6 Perda de massa gravimétrica versus perda de massa eletroquímica

A Figura 5.49 apresenta a relação entre a perda de massa gravimétrica e a perda de massa eletroquímica para as variáveis analisadas. As linhas diagonais representam o fator de erro 2 associado à técnica de resistência de polarização para a determinação da intensidade de corrosão, segundo colocado por GONZÁLEZ et al. (1985).



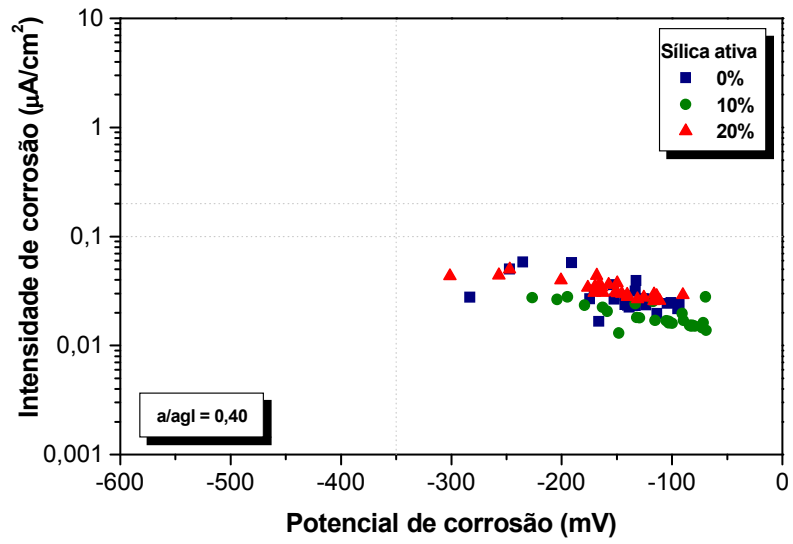
**Figura 5.49** Perda de massa gravimétrica x Perda de massa eletroquímica – corrosão por carbonatação.

De acordo com os resultados obtidos, onde a maioria dos valores situa-se dentro da faixa de validade da técnica, pode-se admitir uma satisfatória relação entre as perdas de massa gravimétrica e eletroquímica verificadas no ensaio acelerado de carbonatação. Segundo BAUER (1995), em função da corrosão por carbonatação ocorrer de forma generalizada, as distorções entre as massas gravimétrica e eletroquímica são menores. O autor verificou em ensaio acelerado por carbonatação uma excelente relação entre as duas grandezas, com todos os valores dentro do limite satisfatório.

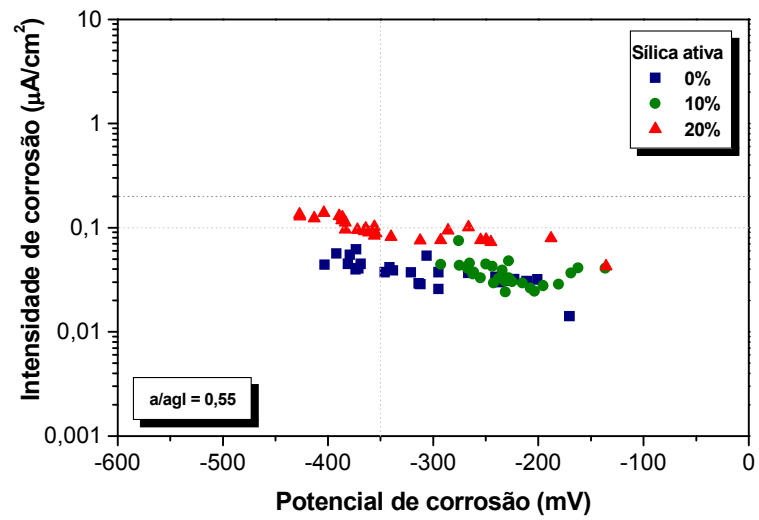
Contudo, a maior perda de massa gravimétrica observada em algumas barras com pequena perda de massa eletroquímica (~10 mg), pode ser atribuída à dificuldade em se remover apenas os produtos de corrosão no procedimento de limpeza, onde pode ter sido removido parte do metal íntegro da barra, aumentando a perda de massa gravimétrica.

### 5.2.7 Relação entre a intensidade de corrosão ( $i_{corr}$ ) e o potencial de corrosão ( $E_{corr}$ )

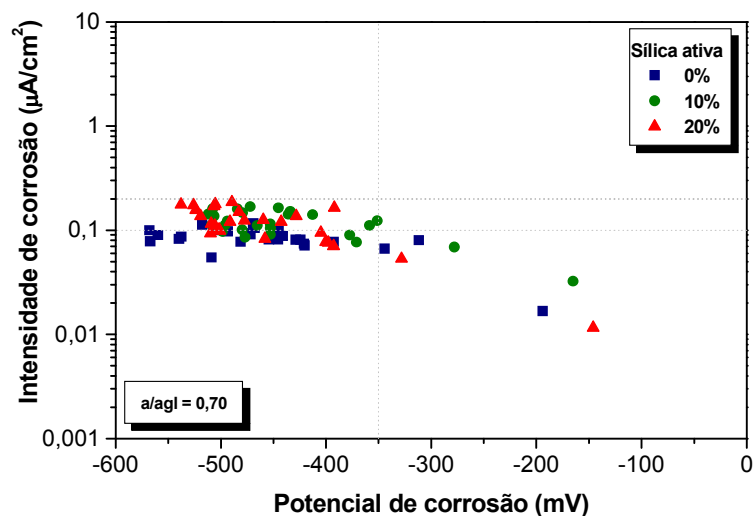
A relação entre as grandezas eletroquímicas  $i_{corr}$  e  $E_{corr}$  é apresentada na Figura 5.50 (a), (b) e (c), para as relações água/aglomerante e teores de sílica ativa analisados.



(a)



(b)



(c)

**Figura 5.50** Relação entre a intensidade de corrosão e o potencial de corrosão para as relações água/aglomerante (a) 0,40; (b) 0,55 e (c) 0,70 - corrosão por carbonatação.

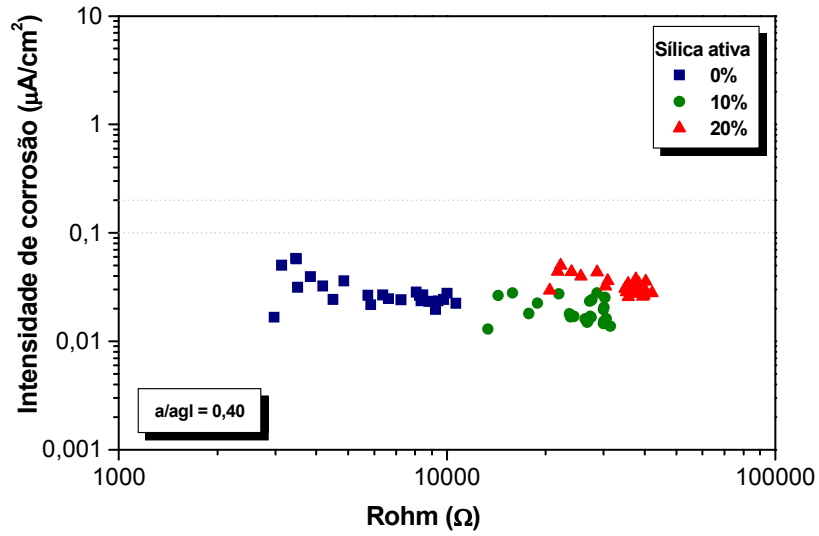
Os gráficos apresentados na Figura 5.50 indicam que para as séries que menos corroeram sob efeito da carbonatação, referentes à relação água/aglomerante 0,40, os valores encontram-se agrupados na região onde potenciais menos negativos correspondem a menores valores da intensidade de corrosão. Já para as barras mais corroídas, correspondentes aos concretos com relação água/aglomerante 0,55 e 0,70, verifica-se que enquanto o potencial atingiu valores mais negativos, a intensidade de corrosão não ultrapassou o valor  $0,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ .

Diante dos resultados obtidos, observa-se que não existe uma relação linear entre o potencial de corrosão e a intensidade de corrosão. A fraca relação observada entre o potencial de corrosão e a intensidade de corrosão mais uma vez reitera o fato de que, isoladamente, o potencial de corrosão não seria um parâmetro adequado para caracterizar o comportamento da corrosão das armaduras, sendo um dado meramente qualitativo na avaliação do fenômeno.

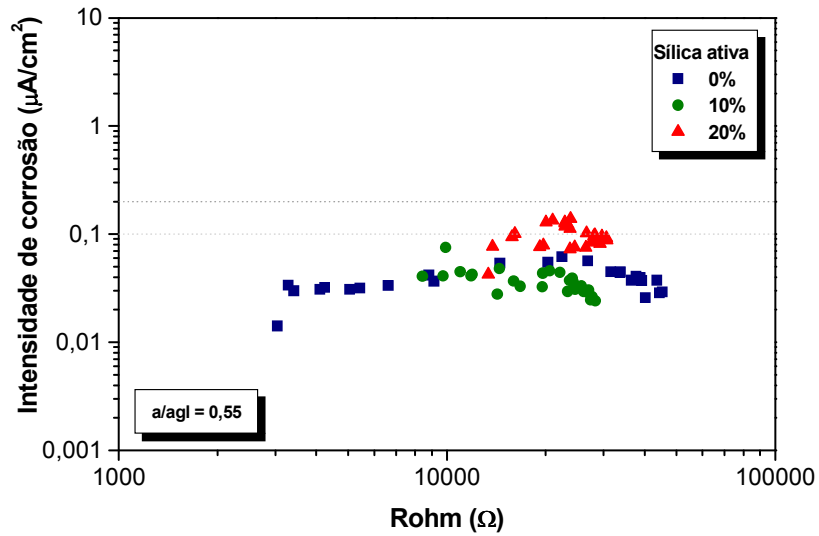
Os resultados observados no presente trabalho não estão de acordo com os apresentados por NEPOMUCENO (1992) e BAUER (1995) os quais, de uma forma geral, verificaram que a relação entre a intensidade de corrosão e o potencial de corrosão segue uma função semi-logarítmica.

### 5.2.8 Relação entre a intensidade de corrosão ( $i_{corr}$ ) e a resistência ôhmica ( $R_{ohm}$ )

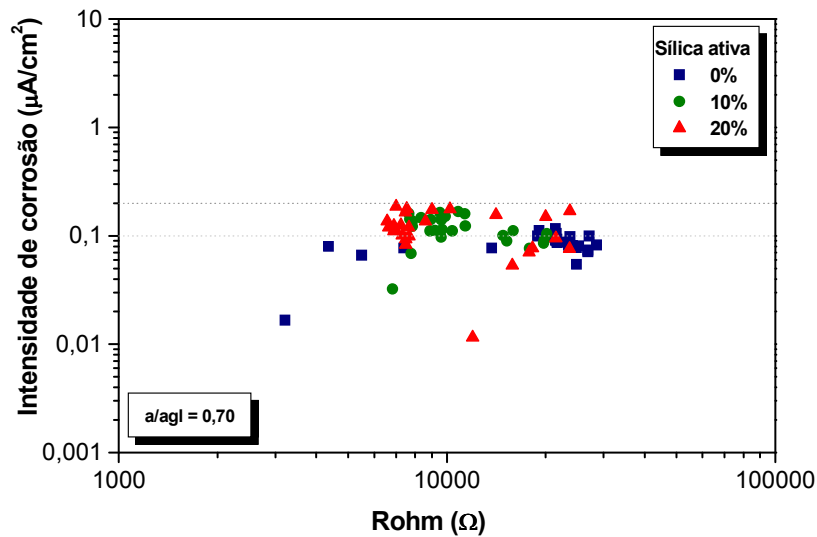
A Figura 5.51 (a), (b) e (c) mostra a relação entre os valores observados de  $i_{corr}$  e  $R_{ohm}$  para as relações água/aglomerante e teores de sílica ativa analisados.



(a)



(b)



(c)

**Figura 5.51** Relação entre a intensidade de corrosão e a resistência ôhmica para as relações água/aglomerante (a) 0,40; (b) 0,55 e (c) 0,70 - corrosão por carbonatação.

Conforme os resultados observados, verifica-se que, para as condições de ensaio<sup>38</sup> do presente trabalho, não há uma relação linear entre as grandezas  $i_{corr}$  e  $R_{ohm}$ . Observa-se, de forma geral, uma acentuada variação da resistência ôhmica, com pequena variação nos valores da intensidade de corrosão. Pode-se notar, principalmente para as relações água/aglomerante 0,40 e 0,55, que os valores apresentam-se em três grupos distintos, referentes ao concreto sem adição e aos concretos com 10% e 20% de sílica ativa.

<sup>38</sup> No presente trabalho os corpos-de-prova, após o ensaio de carbonatação acelerada, não foram colocados em imersão parcial, que favorece o desenvolvimento da corrosão.



### 5.3 ENSAIOS COMPLEMENTARES

#### 5.3.1 Resistência à compressão

A Tabela 5.20 apresenta os resultados<sup>39</sup> obtidos no ensaio de resistência à compressão, aos 28 dias, para as relações água/aglomerante e teores de sílica ativa analisados.

**Tabela 5.20** Resultados de resistência à compressão aos 28 dias.

Relação a/agl	Teor de Sílica ativa (%)		
	0	10	20
0,40	55,2	50,4	60,5
	50,2	54,4	59,5
0,55	32,8	43,3	46,9
	34,9	40,8	47,2
0,70	26,3	34,4	36,3
	24,8	33,2	33,4

A análise estatística dos resultados foi realizada através de regressão não linear múltipla, a qual possibilitou ajustar um modelo matemático que representa a relação entre os fatores analisados e a resistência à compressão, bem como verificar a significância da relação água/aglomerante e do teor de adição na propriedade em questão. O modelo de regressão proposto é apresentado na Equação 5.15.

$$f_c = \exp [b_0 + (b_1 \times aag) + (b_2 \times sa)] \quad \text{Equação 5.15}$$

Onde:

$f_c$  = resistência à compressão aos 28 dias (MPa);

$aag$  = relação água/aglomerante;

$sa$  = teor de adição de sílica ativa (%);

$b_0$ ,  $b_1$  e  $b_2$  = parâmetros dos fatores considerados no modelo.

Na Tabela 5.21 são apresentados os parâmetros dos fatores considerados no modelo proposto e os parâmetros estatísticos obtidos.

<sup>39</sup> Para cada combinação de variáveis os valores apresentados referem-se ao valor potencial da resistência à compressão determinada no bloco 1 e no bloco 2 (item 4.5.3).

**Tabela 5.21** Parâmetros obtidos para o modelo de resistência à compressão.

Fator	Parâmetro	Estimativa	Erro Padrão	Teste t	Significância "p-value"
Constante	b0	4,64	0,072	64,44	0,0000
aag	b1	-1,86	0,134	-13,88	0,0000
sa	B2	0,011	0,0019	5,79	0,0000

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 5.21 tanto a relação água/aglomerante como o teor de sílica ativa apresentam efeito significativo sobre a resistência à compressão, a um nível de confiança de 95% ("p-value" < 0,05). A análise de variância (ANOVA) do modelo proposto é apresentada na Tabela 5.22.

**Tabela 5.22** Análise de variância do modelo obtido para a resistência à compressão.

Fonte	GDL	SQ	MQ	F <sub>calc.</sub>	Significância p-value
Modelo	3	34433,29	11477,76	1432,93	0,000
Resíduo	15	120,22	8,01	-	-
Total	18	34553,51	-	-	-
Total corrigido	17	2083,50	-	-	-

GDL = Graus de Liberdade

SQ = Soma Quadrada

MQ = Média Quadrada = SQ/GDL

F<sub>calc.</sub> = MQ<sub>modelo</sub>/MQ<sub>resíduo</sub>

O valor de 'p-value' menor do que 0,01 indica que a relação entre as variáveis é estatisticamente significativa a um nível de confiança de 99%. O modelo proposto indicou um coeficiente de determinação  $r^2$  igual a 0,942, o que significa que 94,2% da variabilidade dos valores obtidos para resistência á compressão é representada pelo ajuste. A Equação 5.16 apresenta o modelo de regressão, que representa a relação entre os fatores analisados e a resistência à compressão.

$$fc = \exp [4,64 - (1,86 \times aag) + (0,011 \times sa)]$$

*Equação 5.16*

$$r^2 = 0,942$$

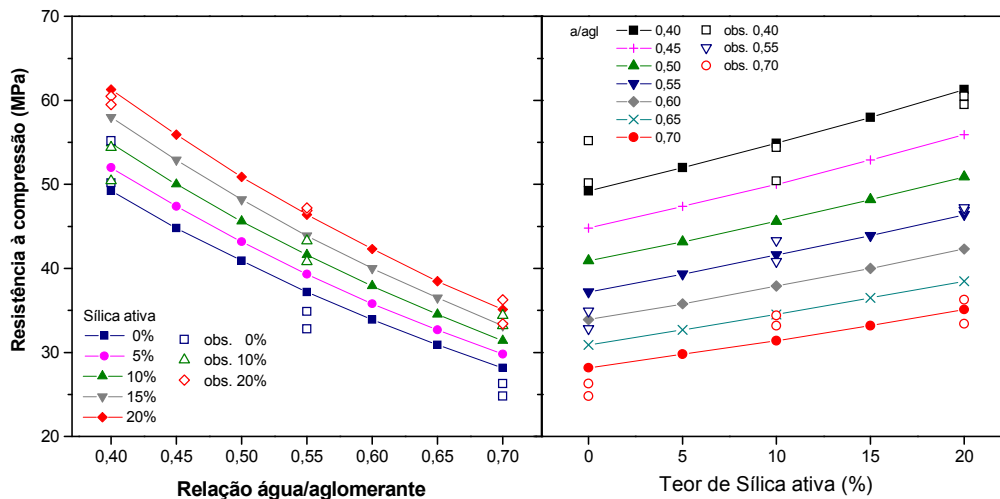
Onde:

fc = resistência à compressão aos 28 dias (MPa);

aag = relação água/aglomerante;

sa = teor de adição de sílica ativa (%);

A Figura 5.52 apresenta as curvas que representam o modelo ajustado, bem como os valores observados para a resistência à compressão.



**Figura 5.52** Resistência à compressão.

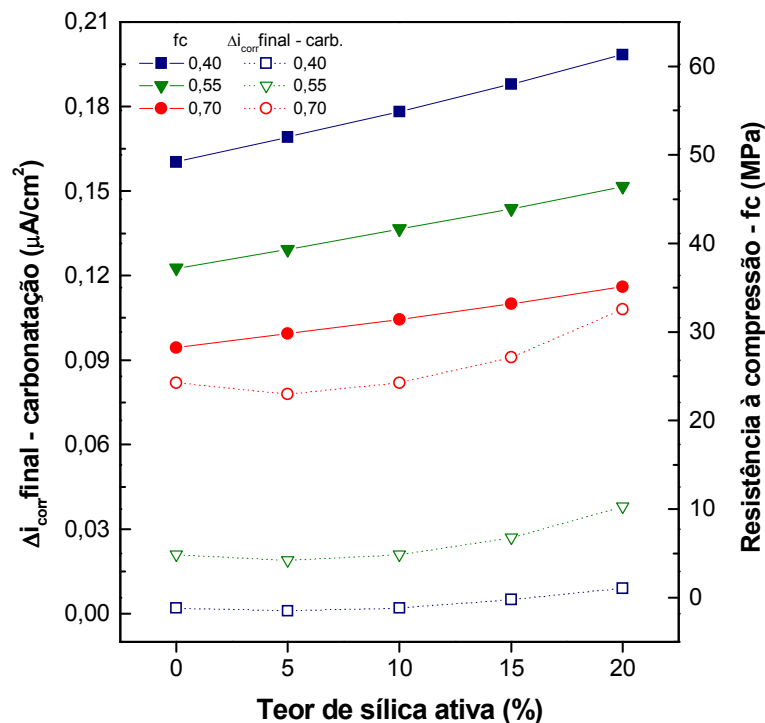
Como esperado, os resultados obtidos indicam que tanto a relação água/aglomerante como o teor de sílica ativa são significativos na resistência à compressão do concreto. Ao se reduzir a relação água/aglomerante de 0,70 para 0,40 obtém-se um aumento médio de 75% na resistência à compressão. De acordo com a análise estatística dos resultados, a interação entre a relação água/aglomerante e teor de sílica ativa não é significativa, ou seja, as adições de sílica ativa são efetivas no aumento da resistência à compressão em todos os níveis de relação água/aglomerante.

A adição de 10% e 20% de sílica ativa promove um incremento médio de 12% e 25%, respectivamente, na resistência à compressão. O desempenho observado era esperado uma vez que a presença da sílica ativa, pelo efeito físico e pozolânico, afeta a morfologia e a microestrutura da matriz cimentante e da zona de transição pasta/agregado, reduzindo a porosidade.

Os resultados obtidos estão em consonância com os dados apresentados por KULAKOWSKI (2002), a qual verificou um aumento médio de 10% e 21% na resistência à compressão de concretos com 10% e 20% de adição de sílica ativa, respectivamente.

DAL MOLIN (1995), ao avaliar a influência da sílica ativa nas propriedades mecânicas de concretos de alta resistência, constatou que a adição de 10% de sílica ativa promove um aumento médio de 11% na resistência à compressão.

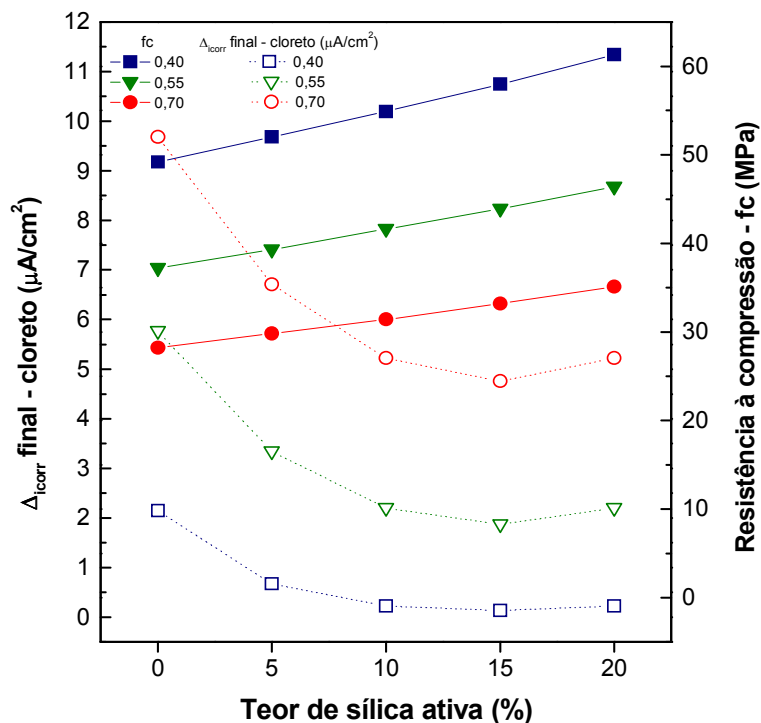
A Figura 5.53 apresenta a relação entre a resistência à compressão e a variação final da intensidade de corrosão desencadeada por carbonatação.



**Figura 5.53** Relação entre a resistência à compressão e a variação final da intensidade de corrosão desencadeada por carbonatação.

Conforme a Figura 5.53, pode ser observado que embora os teores de sílica ativa maiores do que 10% sejam eficientes no aumento da resistência à compressão, não apresentam contribuição para reduzir a intensidade de corrosão. Ou seja, os resultados de resistência à compressão comprovam a densificação da estrutura de poros, decorrente da reação pozolânica e do efeito microfíler das reduzidas partículas de sílica ativa. Contudo, os resultados da intensidade de corrosão indicam que para teores de sílica ativa superiores a 10% o efeito da redução da alcalinidade, decorrente da reação pozolânica da sílica ativa com o hidróxido de cálcio, predomina sobre o efeito da densificação da estrutura de poros, aumentando o risco de corrosão da armadura por carbonatação do concreto.

Na Figura 5.54 apresenta-se a relação entre a resistência à compressão e a variação da intensidade de corrosão no final do ensaio acelerado por íons cloreto. Verifica-se que para teores de até 15% de sílica ativa o aumento da resistência à compressão corresponde a uma menor variação da intensidade de corrosão. No entanto, embora o aumento do teor de sílica ativa de 10% para 20% seja significativo na resistência à compressão, não contribui para reduzir a variação da intensidade de corrosão.



**Figura 5.54** Relação entre a resistência à compressão e a variação da intensidade de corrosão no final do ensaio acelerado por cloretos.

### 5.3.2 Profundidade de carbonatação

Na Tabela 5.23 são apresentados os resultados da profundidade média de carbonatação para as variáveis analisadas, determinada segundo o item 4.8.2.2, nas idades de 4, 28, 70 e 161 dias.

**Tabela 5.23** Profundidade de carbonatação.

Relação a/agl	Sílica ativa (%)	Profundidade carbonatada (mm)			
		4 dias	28 dias	70 dias	161 dias
0,40	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0
	20	0	0	0	0
0,55	0	0	0,6	1,4	2,7
	10	0,1	0,8	1,1	6,2
	20	0,2	1,6	4,7	12,6
0,70	0	1,8	5,3	13,0	37,5
	10	1,3	5,6	12,8	37,5
	20	1,9	6,5	27,0	37,5

Percebe-se claramente, pela observação dos valores da Tabela 5.23, que as variáveis relação água/aglomerante e teor de sílica ativa têm influência sobre a profundidade de carbonatação. Para comprovar o efeito das variáveis analisadas, bem como verificar se existe interação entre elas, foi realizada a análise estatística dos resultados, através de regressão não linear múltipla. A análise possibilitou a obtenção de um modelo matemático que representa o comportamento observado, apresentado na Equação 5.17.

$$p_{\text{carb}} = \exp [b_0 + (b_1 \times \text{aag}) + (b_2 \times \text{aag} \times \text{sa})] \times t^{b_3} \quad \text{Equação 5.17}$$

Onde:

$p_{\text{carb}}$  = profundidade de carbonatação (mm);

aag = relação água/aglomerante;

sa = teor de adição de sílica ativa (%);

t = tempo (dias);

$b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  e  $b_3$  = parâmetros dos fatores considerados no modelo.

Conforme pode ser observado na Tabela 5.24, a relação água/aglomerante, a interação entre o teor de adição de sílica ativa e a relação água/aglomerante, bem como o tempo de ensaio apresentam influência significativa na profundidade de carbonatação, a um nível de significância de 95%.

**Tabela 5.24** Parâmetros obtidos para o modelo de carbonatação.

Fator	Parâmetro	Estimativa	Erro Padrão	Teste t	Significância "p-value"
Constante	$b_0$	-11,70	0,94	-12,44	0,0000
Aag	$b_1$	12,86	1,06	12,13	0,0000
aag x sa	$b_2$	0,035	0,006	5,83	0,0000
T	$b_3$	1,26	0,098	12,86	0,0000

A análise de variância do modelo proposto, apresentada na Tabela 5.25, indicou que a relação entre as variáveis é estatisticamente significativa a um nível de confiança de 99% ('p-value' < 0,01). O coeficiente de determinação ( $r^2$ ) revela que 96,5% da variabilidade dos valores observados para a profundidade de carbonatação é representada pelo modelo proposto.

**Tabela 5.25** Análise de variância do modelo obtido para a carbonatação.

Fonte	GDL	SQ	MQ	F <sub>calc.</sub>	Significância p-value
Modelo	4	5473,13	1368,28	289,89	0,000
Resíduo	32	151,19	4,72	-	-
Total	36	5624,32	-	-	-
Total corrigido	35	4284,52	-	-	-

GDL = Graus de Liberdade

SQ = Soma Quadrada

MQ = Média Quadrada = SQ/GDL

F<sub>calc.</sub> = MQ<sub>modelo</sub>/MQ<sub>resíduo</sub>

Considerando os resultados obtidos nas Tabelas 5.24 e 5.25, a expressão matemática que relaciona os fatores analisados e a profundidade de carbonatação é apresentado na Equação 5.18.

$$p_{\text{carb}} = \exp [-11,70 + (12,86 \times \text{aag}) + (0,035 \times \text{aag} \times \text{sa})] \times t^{1,26} \quad \text{Equação 5.18}$$

$$r^2 = 0,965$$

Onde:

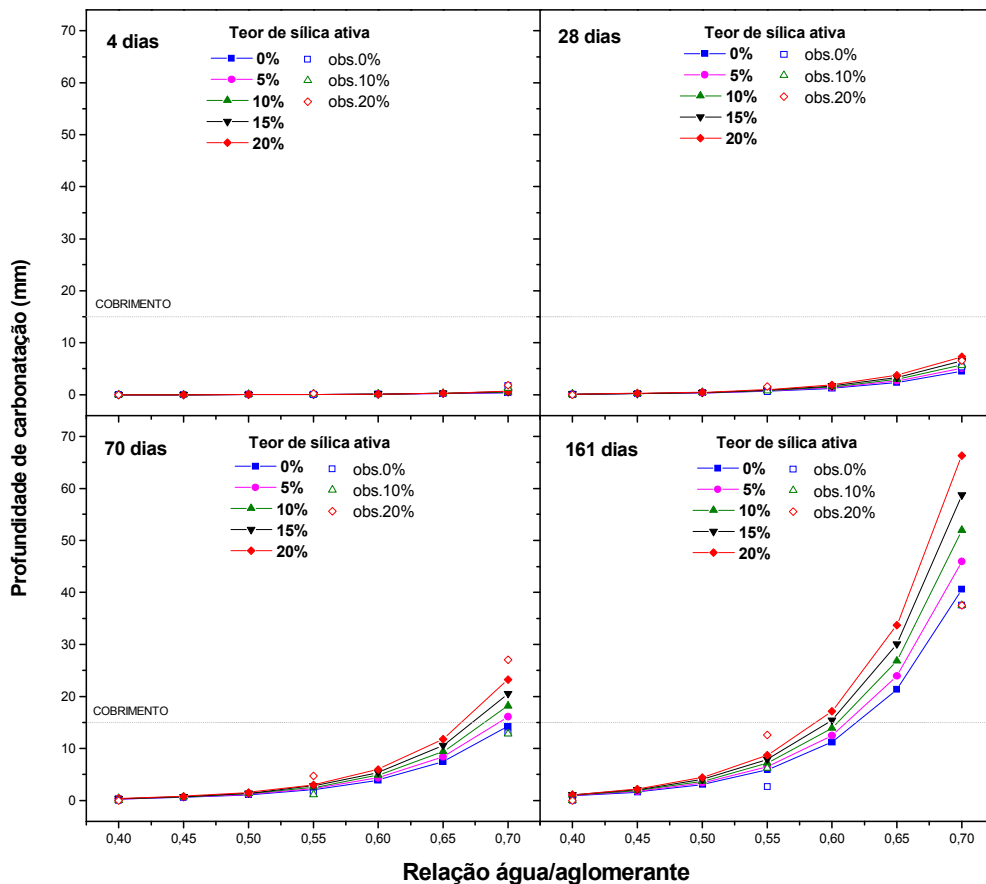
$p_{\text{carb}}$  = profundidade de carbonatação (mm);

aag = relação água/aglomerante;

sa = teor de adição de sílica ativa (%);

t = tempo (dias).

A Figura 5.55 apresenta as curvas que representam o modelo ajustado, bem como os valores observados para a profundidade de carbonatação, nas idades de 4, 28, 70 e 161 dias.



**Figura 5.55** Profundidade de carbonatação para as idades 4, 28, 70 e 161 dias.

As curvas de comportamento apresentadas na Figura 5.55 mostram a influência da relação água/aglomerante e da interação entre o teor de adição de sílica ativa e a relação água/aglomerante na profundidade de carbonatação. Os resultados retratam o comportamento já consagrado na literatura, onde a profundidade de carbonatação é diretamente proporcional à relação água/aglomerante. Pode-se observar que para a relação água/aglomerante 0,40 a profundidade de carbonatação é, em média, aproximadamente 50 vezes menor do que para a relação água/aglomerante 0,70.

A análise estatística dos resultados indica que isoladamente a sílica ativa não apresenta efeito significativo, sendo a sua influência na profundidade de carbonatação determinada pela relação água/aglomerante. Em concretos com baixa relação água/aglomerante o efeito da adição não é tão evidenciado, em função da reduzida porosidade inerente a esses concretos. Já para relações água/aglomerante acima de 0,50-0,55 o efeito da sílica ativa é mais acentuado. Observa-se para a relação água/aglomerante 0,70, aos 161 dias, que a profundidade de carbonatação com a adição 20% de sílica ativa é aproximadamente 60% maior do que a verificada para o concreto sem adição.



Alguns autores apresentam posicionamentos contraditórios em relação à influência da sílica ativa na carbonatação. YAMATO et al. (1989), MORANVILLE-REGOURD (1992), ISAIA (1995), SCISLEWSKI e WÓJTOWICZ (1996) constataram que a sílica ativa aumenta a profundidade de carbonatação. GRIMALDI et al. (1989) atribuem a maior profundidade de carbonatação, verificada com a adição de sílica ativa, à diminuição do pH, resultante da reação pozolânica, que facilita a difusão do CO<sub>2</sub>. Por outro lado, ROBERTS-SEYMOUR (1987), ANQI et al. (1991), SWAMY e SURYAVANSHI (1998) concluíram que a profundidade de carbonatação é menor em concretos com sílica ativa. Da mesma forma, RISOLUTI et al. (2000) verificaram uma redução na profundidade de carbonatação com o emprego da sílica ativa e justificam esse resultado pela significativa redução da porosidade conferida pela sílica ativa.

SCHIESSL (1987) coloca que o principal parâmetro que influencia a profundidade de carbonatação é a estrutura de poros da matriz cimentante, tanto em relação ao refinamento (tamanho e distribuição) quanto em relação à capacidade de “combinar” o CO<sub>2</sub>, a qual é determinada pelo conteúdo total de hidróxido de cálcio livre, álcalis e C-S-H da matriz (GJØRV, 1995). Nesse sentido, GJØRV (1995) argumenta que o fato da adição de sílica ativa diminuir o teor de hidróxido de cálcio não necessariamente significa que aumente a taxa de carbonatação, a qual é controlada também pela permeabilidade e teor de umidade do concreto.

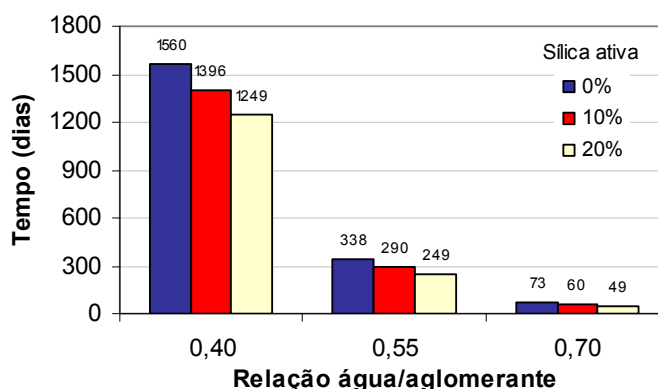
Contudo, com base nos resultados obtidos na avaliação da profundidade de carbonatação, pode-se inferir que quando a porosidade é elevada em função do aumento da relação água/aglomerante, o efeito do refinamento da estrutura de poros proporcionado pela sílica ativa é secundário frente à redução do pH, decorrente da reação pozolânica, que favorece o aumento da profundidade de carbonatação pela maior difusividade do CO<sub>2</sub>. Já para relações água/aglomerante menores (< 0,50), a profundidade de carbonatação não apresenta diferenças que possam ser consideradas tecnicamente significativas. Ou seja, o comportamento observado retrata a existência de um “cotovelo” existente em torno da relação água/aglomerante 0,50, que pode ser considerada um limite, abaixo do qual a profundidade de carbonatação pode ser considerada “desprezível” tanto para concretos com sílica ativa como para concretos com adição. Acima desse limite, as características químicas passam a exercer um efeito significativo e o consumo de hidróxido de cálcio, decorrente da reação pozolânica da sílica ativa, passa a ser desfavorável para a carbonatação.

Os resultados obtidos para a profundidade de carbonatação no presente trabalho são coincidentes com o comportamento verificado por KULAKOWSKI (2002), ao avaliar a carbonatação de concretos com sílica ativa.

CABRERA et al.. (1995) observaram que concretos com relação água/aglomerante de 0,30 a 0,46 e 0 e 20% de sílica ativa, em substituição à massa de cimento, apresentam profundidades de carbonatação nulas ou muito baixas.

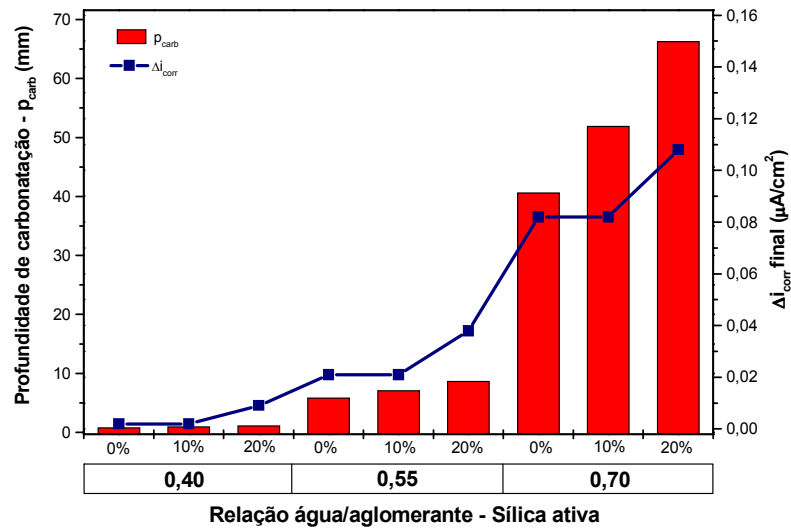
KHAN e LYNSDALE (2002), ao verificarem a profundidade de carbonatação de concretos de alto desempenho com relação água/aglomerante 0,27, constataram que a substituição de 10% de cimento por sílica ativa não influencia significativamente a profundidade de carbonatação.

A partir do modelo de carbonatação proposto (Equação 5.18) foi plotado o gráfico apresentado na Figura 5.56, que representa o tempo necessário para frente de carbonatação atingir a armadura, considerando o cobrimento de 15 mm adotado no presente trabalho. Verifica-se que para a relação água/aglomerante 0,40 o tempo necessário para a frente de carbonatação atingir a armadura no concreto sem adição seria 25% maior do que para o concreto com 20% de sílica ativa, enquanto que para a relação água/aglomerante 0,70, esse tempo foi 50% maior, evidenciando o desvantajoso efeito da sílica ativa com o aumento da relação água/aglomerante.



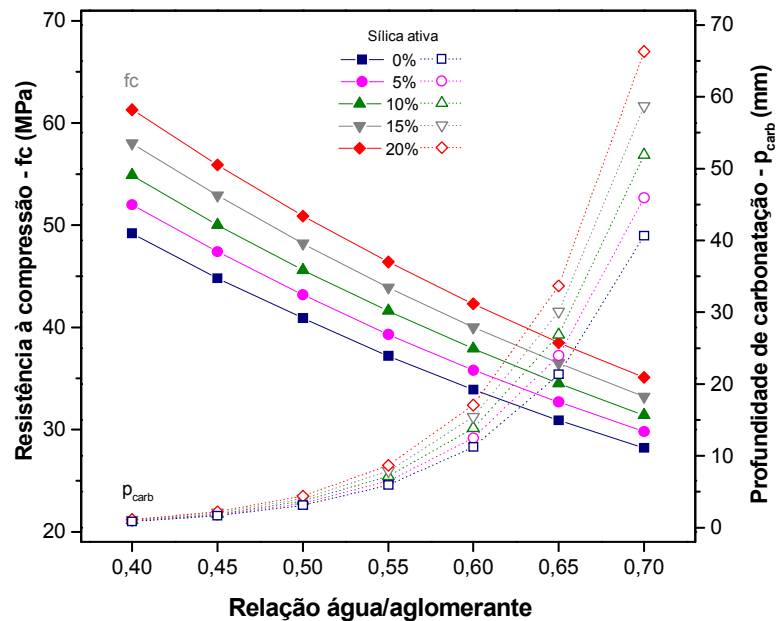
**Figura 5.56** Tempo para a frente de carbonatação atingir a armadura.

A interação verificada entre a relação água/aglomerante e o teor de sílica ativa na profundidade de carbonatação também foi identificada nos resultados da avaliação das grandezas eletroquímicas, conforme apresentado nos itens 5.2.1 e 5.2.2, onde em relações água/aglomerante maiores o efeito da adição de sílica ativa é mais pronunciado. A Figura 5.57, que apresenta a relação entre os valores previstos para a profundidade de carbonatação, aos 161 dias, e para a variação da intensidade de corrosão, evidencia esse fato. Além disso, pode-se observar que embora a profundidade de carbonatação aumente com a adição de 10% de sílica ativa, a variação da intensidade de corrosão não é alterada.



**Figura 5.57** Relação entre a profundidade de carbonatação após 161 dias e a variação final da intensidade de corrosão.

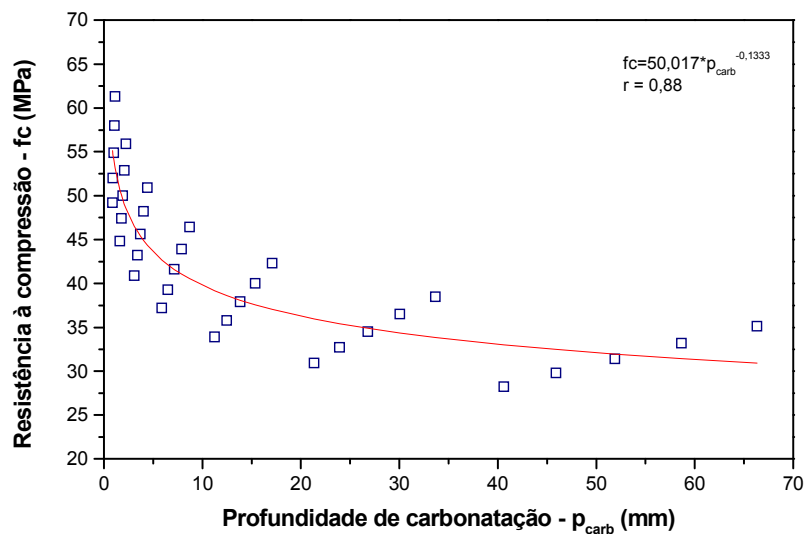
Na Figura 5.58 é apresentado o gráfico que representa o comportamento da resistência à compressão e da profundidade de carbonatação, plotado a partir dos valores estimados pelos modelos propostos.



**Figura 5.58** Profundidade de carbonatação x resistência à compressão.

Da análise da Figura 5.58, pode-se observar, para um mesmo teor de adição de sílica ativa, o comportamento inversamente proporcional entre a profundidade de carbonatação e a resistência à compressão, amplamente relatado na literatura (LOO et al., 1994; ROY et al., 1996; KHAN e LYNSDALE, 2002; entre outros). Entretanto, quando se comparam diferentes teores de adição, a profundidade de carbonatação passa a ser proporcional à resistência, ou seja, embora a sílica ativa aumente a resistência à compressão, verifica-se uma maior profundidade de carbonatação nos concretos com adição. Salienta-se que o aumento da profundidade de carbonatação observado para relações água/aglomerante menores do que 0,55 não é significativo frente ao acréscimo de resistência de 12% obtido com a adição de 10% de sílica ativa.

A correlação entre a profundidade de carbonatação e a resistência à compressão é apresentada na Figura 5.59, a qual mostra que a menor variabilidade entre os valores plotados ocorre para menores profundidades de carbonatação e maiores resistências à compressão, correspondendo aos resultados obtidos para relações água/aglomerante mais baixas, onde o efeito da sílica ativa na profundidade de carbonatação é relativamente pequeno.



**Figura 5.59** Correlação entre a profundidade de carbonatação e a resistência à compressão.

### 5.3.3 Teor de íons cloreto

Os resultados da determinação do teor de cloretos livres nos concretos estudados, realizada ao final dos ciclos de agressão, são apresentados na Tabela 5.26. Os valores obtidos foram determinados em porcentagem em relação à massa de concreto.

**Tabela 5.26** Teor de cloretos livres, em relação à massa de concreto.

Teor de Cl <sup>-</sup> livre (%)		Relação água/aglomerante		
		0,40	0,55	0,70
Teor de sílica ativa (%)	0	0,39	0,52	0,58
		0,45	0,43	0,50
	10	0,42	0,41	0,45
		0,30	0,42	0,47
	20	0,33	0,42	0,50
		0,34	0,34	0,46

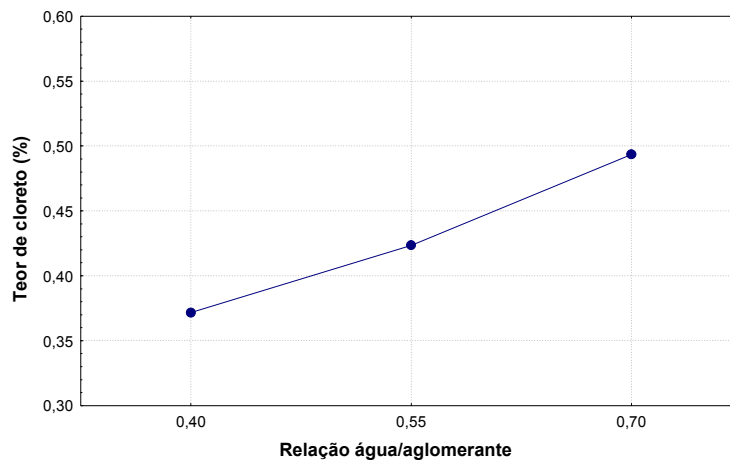
A influência da relação água aglomerante e do teor de sílica ativa no teor de íons cloreto foi avaliada através da análise de variância (ANOVA), cujo resultado é apresentado na Tabela 5.27.

**Tabela 5.27** Análise de variância para o teor de íons cloreto.

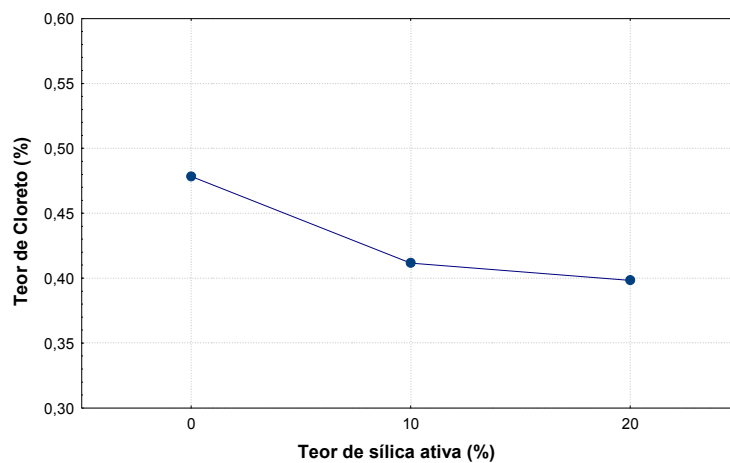
Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância "p-value"
Relação a/agl (A)	2	0,0448	0,0224	9,80	0,0055
Sílica ativa (B)	2	0,0220	0,0110	4,83	0,0376
Interação A x B	4	0,0016	0,0004	0,19	0,9364
Erro	9	0,1458	0,0016	-	-

GDL = Graus de Liberdade    SQ = Soma Quadrada    MQ = Média Quadrada = SQ/GDL

A análise de variância mostra que o efeito da relação água/aglomerante e do teor de sílica ativa é significativo sobre o teor de íons cloreto livres, em um nível de confiança de 95% ("p-value" < 0,05). No entanto, a interação entre esses dois fatores não é significativa. A Figura 5.60 (a) e (b) mostra a influência dos fatores significativos. Embora a interação entre a relação água/aglomerante e o teor de sílica ativa não seja significativa, a Figura 5.61 é apresentada com o objetivo de verificar a tendência de comportamento observada entre as variáveis analisadas.



(a)



(b)

**Figura 5.60** Teor de íons cloreto livres: (a) efeito da relação água/aglomerante e (b) efeito do teor de adição de sílica ativa.

A análise da Figura 5.60 indica uma redução média de aproximadamente 14% e 24% no teor de cloretos livres quando a relação água/aglomerante diminui de 0,70 para 0,55 e 0,40, respectivamente. Os resultados obtidos estão de acordo com os dados apresentados na bibliografia (ARYA et al., 1990; JENSEN et al., 1999; entre outros), onde constata-se que quanto maior a relação água/aglomerante, maior o teor de cloretos livres no concreto, em função da maior porosidade.

A adição de sílica ativa revelou uma significativa redução no teor de cloretos livres. Pode-se observar que com 10% de adição o teor de cloretos livres é, em média, 15% menor do que o determinado para os concretos de referência. Para o teor 20% de sílica ativa os resultados mostram uma redução média de 17%, em relação ao concreto de referência,

evidenciando que a partir de 10% o aumento do teor de adição não é tão efetivo na redução do teor de cloretos livres.

Essa constatação é confirmada pelos resultados da comparação múltipla de médias, realizada pelo método de Duncan (Tabela 5.28), onde verifica-se que os valores médios do teor de cloretos livres determinados para 10% e 20% de adição não diferem estatisticamente entre si.

**Tabela 5.28** Comparação múltipla de médias.

Teor de Cl <sup>-</sup> livres (média)	Resultados do teste de Duncan			
	Sílica ativa (%)	0	10	20
0,48	0	-	0,0390 *	0,0214 *
0,41	10	0,0390 *	-	0,6406
0,40	20	0,0214*	0,6406	-

\* Valores marcados indicam médias estatisticamente diferentes.

<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td style="text-align: center;">20%</td> <td style="text-align: center;">10%</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">(0,40%)</td> <td style="text-align: center;">(0,41%)</td> </tr> </table>	20%	10%	(0,40%)	(0,41%)	<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td style="text-align: center;">0%</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">(0,48%)</td> </tr> </table>	0%	(0,48%)
20%	10%						
(0,40%)	(0,41%)						
0%							
(0,48%)							

TALIB et al. (1993) verificaram que com até 10% de sílica ativa, em substituição à massa de cimento, o teor de cloretos livres diminui, em média, 55%. No entanto, os autores observaram que para os teores de substituição de 15, 20 e 25% de sílica ativa o teor de cloretos livres foi maior do que para o determinado para o teor de 10%, porém menor do que para o concreto sem adição. ARYA e NEWMAN (1990) constataram que 10% de sílica ativa reduziu em 18% o teor de cloretos livres, em relação ao concreto de referência.

O fato do teor 20% apresentar o mesmo desempenho observado para o teor 10% pode estar associado ao efeito químico da sílica ativa, onde a partir de um determinado teor de adição o efeito da redução da alcalinidade passa a “concorrer” com a redução da porosidade proporcionada pela incorporação de sílica ativa, sem apresentar um efetivo benefício na diminuição do teor de cloretos livres, responsáveis pela despassivação da armadura. Outro aspecto a ser considerado é que a absorção capilar, principal mecanismo de transporte que rege o ingresso de cloretos em meios parcialmente saturados, não diminui significativamente a partir de 10% de sílica ativa, conforme será apresentado no item 5.3.5.

Alguns autores (PAGE e VENNESLAND, 1983; BEAUDOIN et al., 1990; MANGAT e MOLOY, 1995) colocam que a sílica ativa, por reduzir o pH do concreto, diminui a capacidade de fixação dos íons cloreto, disponibilizando uma maior quantidade de cloretos livres na solução dos poros.

Considerando que a sílica ativa, pela sua ação microfíler e pozolânica, proporciona uma densificação da matriz, com redução da porosidade, o aumento do teor de cloretos livres em concretos com sílica ativa verificado pelos autores supracitados aparece como um paradoxo. Em relação a esse fato HELENE (1993) argumenta que “a quantidade total de cloretos que penetram em concretos com adições ativas é significativamente menor, porém do total penetrado quanto mais adição menor a capacidade de retenção de cloretos”.

No entanto, de acordo com GJØRV (1995) não existe um consenso a respeito da influência da sílica ativa na fixação de cloretos. O autor faz referência à pesquisa realizada por BYFORS et al.<sup>40</sup>, que observaram um aumento do teor de cloretos combinados em concretos com 10% de adição de sílica ativa em comparação ao concreto de referência.

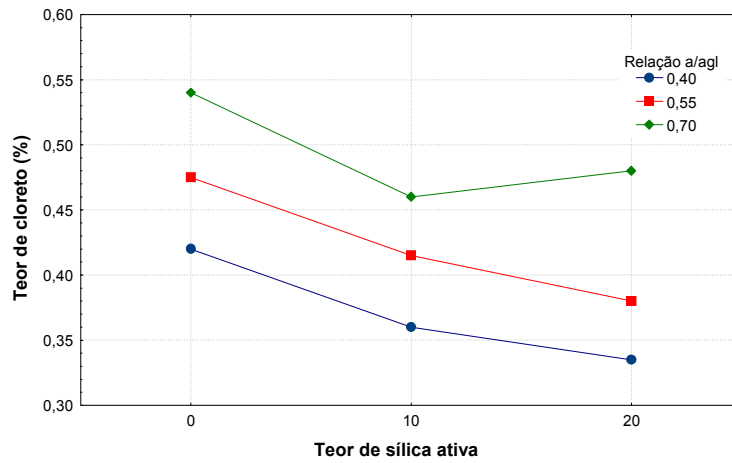
Embora a interação entre a relação água/aglomerante e o teor de cloretos não seja significativa, na Figura 5.61 pode-se observar que para a relação água/aglomerante 0,70 a adição de 20% aumentou o teor de cloretos em relação à adição de 10%. A tendência observada pode estar relacionada ao fato de que para relações água/aglomerante mais elevadas, onde a porosidade é maior, a adição de 20% não é efetiva para reduzir a porosidade o suficiente para compensar o possível efeito decorrente da maior redução da alcalinidade.

A correlação entre o teor de cloretos livres e o tempo para despassivação da armadura, determinado a partir dos resultados obtidos para a intensidade de corrosão, é apresentada na Figura 5.62, onde o maior teor de cloretos livres corresponde, como esperado, a um menor tempo para despassivar a armadura.

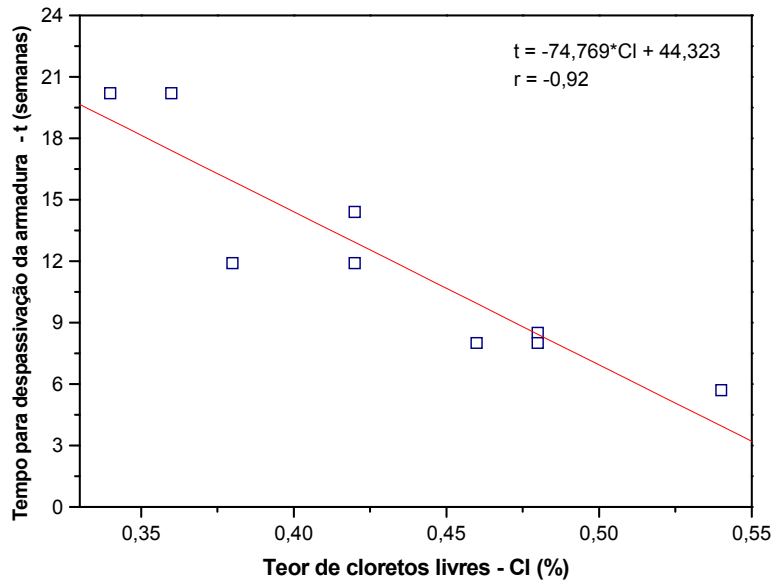
---

<sup>40</sup> BYFORS, K.; HANSSON, C. M.; TRITTHART, J. Pore solution expression as a method to determine influence of mineral additives on chloride binding. **Cement and Concrete Research**, v. 16, 1986, p. 760-770.





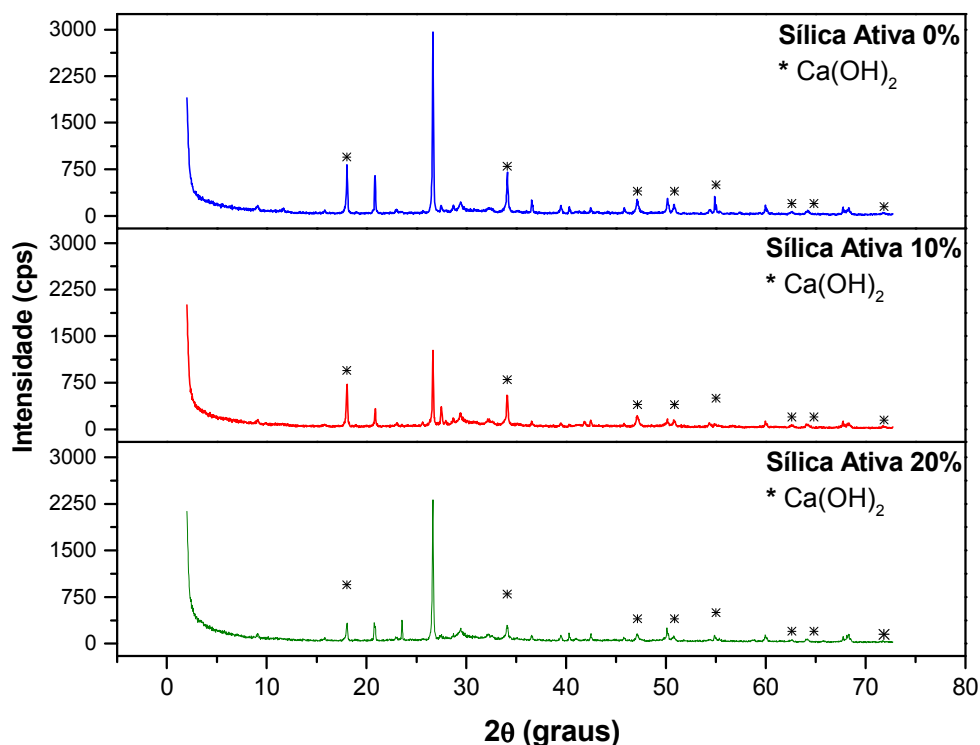
**Figura 5.61** Teor de íons cloreto livres: interação entre a relação água/aglomerante e teor de adição de sílica ativa.



**Figura 5.62** Correlação entre o teor de cloretos livres e o tempo para despassivação da armadura.

### 5.3.4 Difração de raios-X

Como comentado no item 4.8.2.4, a difração de raios-x foi realizada apenas para os concretos com relação água/aglomerante 0,55, com 0%,10% e 20% de sílica ativa, visto que o objetivo foi apenas comparar o efeito pozolânico dos diferentes teores de adição. Na Figura 5.63 são apresentados os difratogramas obtidos para os concretos analisados.



**Figura 5.63** Difratogramas obtidos para os teores de 0%, 10% e 20% de sílica ativa com relação água/aglomerante 0,55.

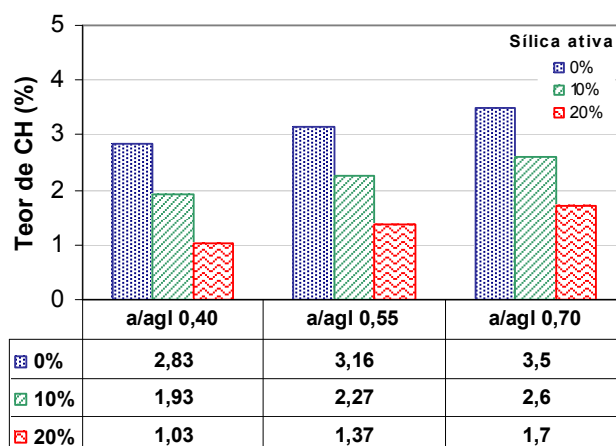
Ao comparar os difratogramas obtidos para 0%, 10% e 20% de sílica ativa, observa-se uma diminuição na intensidade dos picos identificados como Ca(OH)<sub>2</sub>, indicando o consumo de hidróxido de cálcio na reação pozolânica da sílica com o cimento, principalmente para o teor de 20% de adição. O resultado obtido está de acordo com a análise de difração de raios-X realizada por KULALOWSKI (2002) em argamassas com adição de sílica ativa.

O estudo realizado por SEIDLER (1999) para avaliar o efeito de adições pozolânicas no consumo de hidróxido de cálcio (CH), através da técnica de difração de raios-X, indicou que tanto para a relação água/aglomerante 0,40 como para a 0,70 há uma redução na intensidade dos picos de CH quando aumenta-se o teor de sílica ativa de 0% para 10% e 30%, em função do consumo de hidróxido de cálcio.

HAVDAHL e JUSTNES (1993), em estudo realizado para avaliar a alcalinidade de pastas de cimento com relações água/aglomerante variando de 0,20 a 0,40, com 0% a 20% de sílica ativa em substituição à massa de cimento, constataram que o teor de hidróxido de cálcio aumenta com o acréscimo da relação água/aglomerante e diminui com o aumento do teor de sílica ativa. Os autores verificaram que o hidróxido de cálcio foi consumido em todas as pastas com 20% de sílica ativa antes de 90 dias de cura e antes de 420 dias para as pastas com 15% de sílica ativa. No entanto, mesmo com o consumo do hidróxido de cálcio, o pH manteve-se acima de 12,5.

ZHANG e GJØRV (1991) observaram que em pastas com 16% de sílica ativa todo o hidróxido de cálcio é consumido, independente da relação água/cimento, entretanto, também concluíram que o pH não foi inferior a 12,7, sendo apenas um pouco menor do que o verificado para a solução saturada de hidróxido de cálcio.

A Figura 5.64 apresenta os resultados do consumo de hidróxido de cálcio obtidos por KULAKOWSKI (2002)<sup>41</sup>, através de análise térmica diferencial, onde é possível observar uma redução no teor de hidróxido à medida que aumenta-se o teor de sílica ativa. A autora verificou que para 10% e 20% de adição de sílica ativa ocorre um consumo médio do Ca(OH)<sub>2</sub> de 28% e 56%, respectivamente. Nota-se, ainda, que o teor de hidróxido de cálcio aumenta com o incremento da relação água/aglomerante.

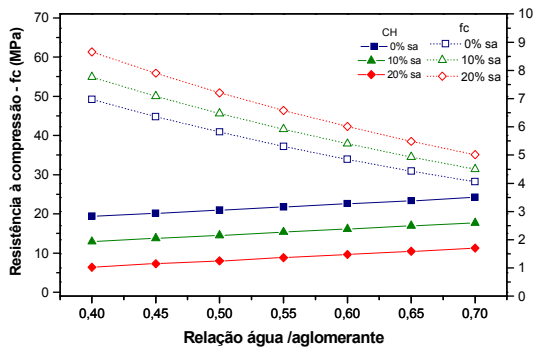


**Figura 5.64** Teor de hidróxido de cálcio determinado por KULAKOWSKI (2002).

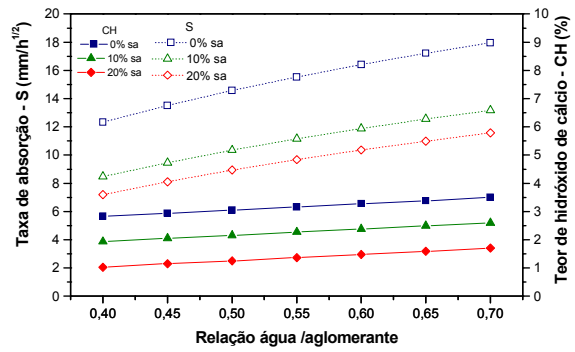
<sup>41</sup> Como anteriormente comentado, os experimentos executados por KULAKOWSKI (2002) fazem parte do mesmo projeto de pesquisa no qual a presente tese está inserida, tendo sido realizados dentro de um programa experimental com a mesma concepção e materiais adotados no presente trabalho

Salienta-se que embora haja uma redução no teor de hidróxido de cálcio, decorrente da reação pozolânica da sílica ativa, diversos autores (BYFORS, 1987; GJØRV, 1992; KHAYAT e AİTCIN, 1992; HAVDAHL e JUSTNES, 1993; entre outros) concordam que o pH não diminui o suficiente para despassivar a armadura.

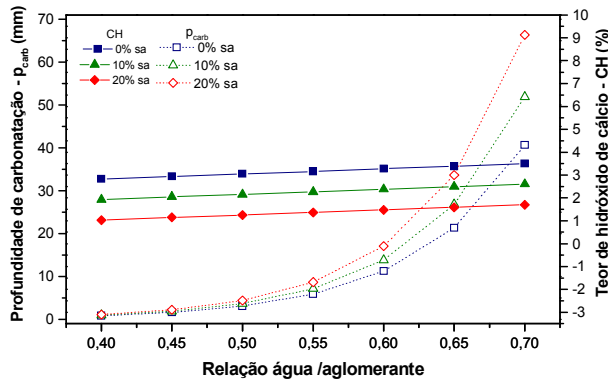
Com o objetivo de verificar a relação existente entre o teor de hidróxido de cálcio, determinado por KULAKOWSKI (2002), e a resistência à compressão, a absorvidade, a profundidade de carbonatação e a variação da intensidade de corrosão desencadeada por carbonatação e por íons cloreto, determinadas no presente trabalho, foram plotados os gráficos apresentados na Figura 5.65 (a), (b), (c), (d) e (e).



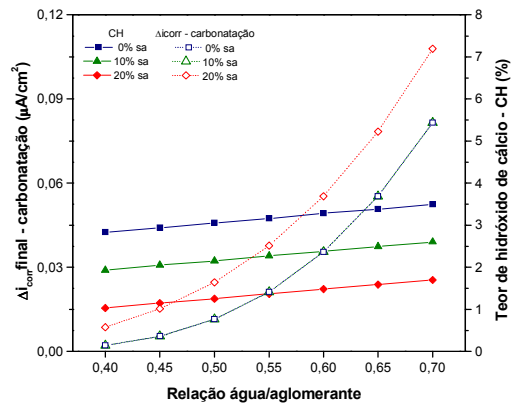
(a)



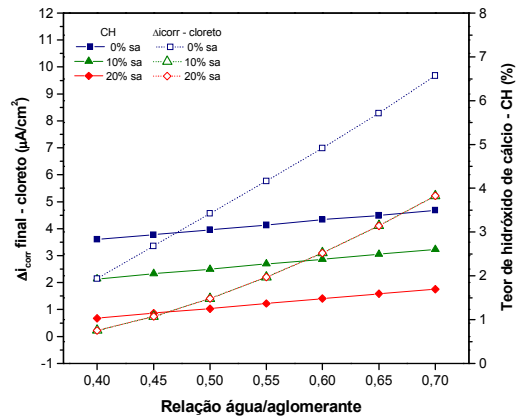
(b)



(c)



(d)



(e)

**Figura 5.65** Relação entre o teor de hidróxido de cálcio, determinado por KULAKOWSKI (2002), e a (a) resistência à compressão, (b) absorvidade, (c) profundidade de carbonatação, (d) variação final da intensidade de corrosão desencadeada por carbonatação e (e) variação da intensidade de corrosão no final do ensaio acelerado por cloretos.

Como resultado do consumo de hidróxido de cálcio (CH), decorrente da reação pozolânica, tem-se a densificação da matriz cimentante e o refinamento da estrutura de poros, aumentando a compacidade do concreto, favorecendo a obtenção de maior resistência à compressão e de menor taxa de absorção de água (item 5.3.5), conforme pode ser observado na Figura 5.65 (a) e (b).

Apesar da maior compacidade e menor porosidade dos concretos com adição de sílica ativa, a redução da alcalinidade resultante do consumo do CH aumenta a profundidade de carbonatação - Figura 5.65 (c), principalmente em relações água/aglomerante maiores, conforme anteriormente discutido. Entretanto, como pode ser visualizado na Figura 5.65 (d), para teores de adição de até 10% de sílica ativa, a redução da alcalinidade não altera a corrosão desencadeada por carbonatação, possivelmente, em função da maior resistividade e menor mobilidade iônica proporcionada pela a adição de sílica ativa. Já para teores de 20% de sílica ativa o consumo de CH na reação pozolânica da sílica ativa passa a ser desfavorável na corrosão por carbonatação.

Em relação à corrosão desencadeada por íons cloreto - Figura 5.65 (e), apesar da maior compacidade proporcionada pela adição de 20% de sílica ativa e do menor teor de cloretos livres (item 5.3.3), a redução do teor de CH e, conseqüentemente, da alcalinidade pode ter influenciado a capacidade de fixação dos íons cloreto, obtendo-se uma variação da intensidade de corrosão equivalente à observada para os concretos com 10% de adição.

### 5.3.5 Absorção de água – Método de Kelham

Nas Tabelas 5.29 e 5.30 são apresentados, respectivamente, os resultados obtidos para a taxa de absorção de água e resistência capilar para as variáveis analisadas.

**Tabela 5.29** Taxa de absorção –  $S$  (mm/h<sup>1/2</sup>) x 10<sup>-2</sup>.

		Relação água/aglomerante				
		0,30	0,35	0,45	0,60	0,80
Teor de sílica ativa (%)	0	9,01	-	11,90	-	20,00
		9,14	-	14,86	-	19,30
	5	-	9,30	-	13,18	-
		-	10,70	-	12,05	-
	10	6,37	-	9,25	-	15,73
		6,44	-	8,55	-	12,76
	15	-	5,90	-	9,03	-
		-	6,58	-	11,46	-
	20	4,47	-	8,31	-	12,75
		5,68	-	7,37	-	14,47

**Tabela 5.30** Resistência capilar –  $M$  (h/m<sup>2</sup>).

		Relação água/aglomerante				
		0,30	0,35	0,45	0,60	0,80
Teor de sílica ativa (%)	0	16593	-	10836	-	3697
		15812	-	7042	-	3496
	5	-	23104	-	8467	-
		-	17009	-	13397	-
	10	36140	-	19486	-	8419
		28056	-	24532	-	11636
	15	-	37940	-	28585	-
		-	33058	-	18580	-
	20	26678	-	30938	-	16954
		28369	-	39111	-	10291

A análise estatística dos parâmetros obtidos no ensaio de absorção de água foi realizada através de regressão linear múltipla, obtendo-se modelos de comportamento que relacionam a relação água/aglomerante, o teor de adição de sílica ativa e as possíveis interações com os parâmetros determinados. Para os modelos propostos é realizada a análise de variância (ANOVA), a qual permite verificar a significância do modelo e obter o coeficiente de determinação.

O modelo de regressão obtido para a taxa de absorção – S – é apresentado na Equação 5.19. A Tabela 5.31 apresenta os parâmetros estatísticos calculados para o modelo proposto.

$$S = \{10,770 + [6,715 \times \ln(aag)] + [5,391 \times 1/sa] + [1,675 \times \ln(aag) \times 1/sa]\} \text{ Equação 5.19}$$

$r^2 = 0,934$

Onde:

S = taxa de absorção (mm/h<sup>1/2</sup>);

aag = relação água/aglomerante (0,30 a 0,80);

sa = teor de sílica ativa (em níveis codificados de 0,5 a 1,5, que correspondem a um intervalo de 0 a 20%).

**Tabela 5.31** Parâmetros calculados para o modelo da taxa de absorção.

Fator	Estimativa	Erro padrão	Teste t	Significância "p-value"
Constante	10,770	1,224	8,798	0,0000
ln(aag)	6,715	1,456	4,610	0,0001
sa	5,391	0,937	5,753	0,0000
ln(aag) × 1/sa	1,675	1,113	1,505	0,1466

Os parâmetros da Tabela 5.31 indicam que a relação água/aglomerante e o teor de sílica ativa são estatisticamente significativos na taxa de absorção, a um nível de confiança de 95%, visto que apresentam "p-value" menor do que 0,05. No entanto, a interação entre os fatores estudados não é significativa.

A Tabela 5.32 apresenta a análise de variância (ANOVA) para o modelo proposto.

**Tabela 5.32** Análise de variância para o modelo da taxa de absorção.

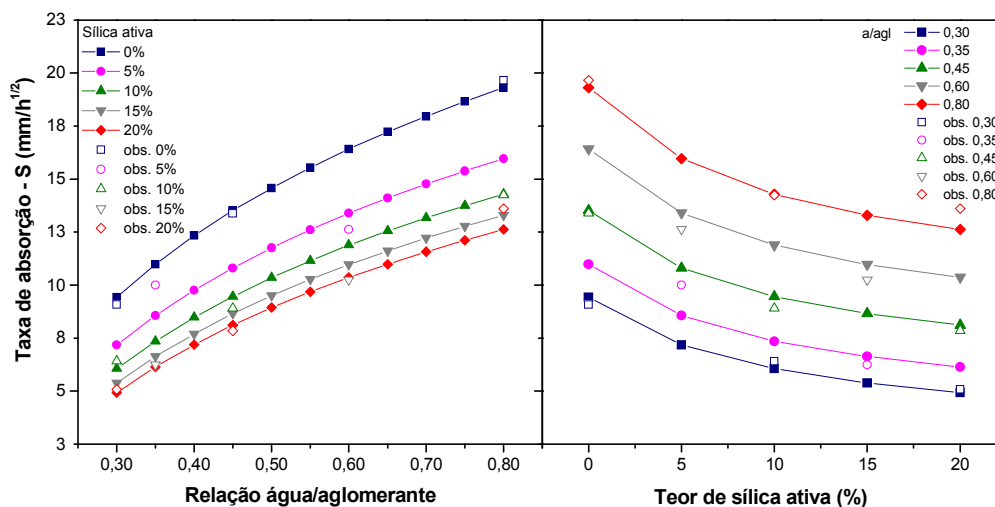
Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância "p-value"
Modelo	3	382,66	127,56	103,7	0,0000
Resíduo	22	26,96	1,23	-	-
Total corrigido	25	409,62	-	-	-

Coefficiente de determinação  $r^2 = 0,934$

GDL = Graus de Liberdade    SQ = Soma Quadrada    MQ = Média Quadrada = SQ/GDL

O valor de p-value menor do que 0,01 para o modelo ajustado indica que a relação entre as variáveis é estatisticamente significativa em um nível de 99% de confiança. O coeficiente de determinação obtido indica que o modelo ajustado explica 93,4% da variabilidade da taxa de absorção.

Na Figura 5.66 são apresentadas as curvas ajustadas pelo modelo obtido, bem como os valores observados para a taxa de absorção de água.



**Figura 5.66** Taxa de absorção de água.

A análise estatística indicou que tanto a redução da relação água/aglomerante como o aumento do teor de adição de sílica ativa contribuem significativamente para reduzir a taxa de absorção do concreto. Pode-se observar que a taxa de absorção diminui, em média, 57% quando a relação água/aglomerante é alterada de 0,80 para 0,30. Como esperado, a redução da porosidade dificulta a penetração de água no concreto.

De acordo com a Figura 5.66, verifica-se que a taxa de absorção com 10% de adição de sílica ativa é, em média, aproximadamente 31% menor do que para os concretos de referência. Já com 20% de sílica ativa a redução média observada é de aproximadamente 40%, ou seja, com o dobro de sílica ativa a diminuição é apenas 9% maior do que com 10% de adição.



Com base nessa constatação foi realizada uma comparação múltipla de médias, pelo método de Duncan, com o objetivo de verificar se existe diferença significativa entre as médias observadas para os teores 10% e 20% de adição. A Tabela 5.33 apresenta o resultado obtido, onde verifica-se que as taxas de absorção dos concretos com 10% e 20% de sílica ativa não diferem significativamente entre si. O comportamento observado pode estar associado à elevada finura e reatividade pozolânica da sílica ativa, onde com 10% de adição já se obtém significativo refinamento da estrutura de poros e densificação da matriz cimentante, sendo teores adicionais não tão efetivos na redução da taxa de absorção. Esse fato pode justificar os resultados obtidos nos ensaios de corrosão, onde se constatou que 20% de adição não contribui da mesma forma como verificado para 10% ou 15% de sílica ativa.

**Tabela 5.33** Comparação múltipla de médias para a taxa de absorção.

Taxa de absorção (média)	Resultados do teste de Duncan			
	Sílica ativa (%)	0	10	20
14,04	0	-	0,000324 *	0,000120 *
9,85	10	0,000324 *	-	0,164000
8,84	20	0,000120 *	0,164000	-

\* Valores marcados indicam médias estatisticamente diferentes.

$\overline{\quad\quad\quad}$ 20%      10% (8,84 mm/h <sup>1/2</sup> ) (9,85 mm/h <sup>1/2</sup> )	$\overline{\quad\quad\quad}$ 0% (14,04 mm/h <sup>1/2</sup> )
---------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------

Os resultados obtidos para a taxa de absorção estão de acordo com a avaliação realizada por BARATA (1999), o qual constatou significativa redução na taxa de absorção de concretos produzidos com materiais disponíveis em Belém –PA e adição de sílica ativa.

SMESPLASS citado por GJØRV (1994) observou uma redução média na taxa de absorção de 20% ao utilizar 5% de sílica ativa em concretos com relações água/aglomerante que variaram de 0,40 a 0,70.

HOU e CHUNG (2000), estudando o efeito de adições minerais na resistência à corrosão da armadura, verificaram que 15% de sílica ativa, em substituição à massa de cimento, reduz consideravelmente a absorvidade em relação ao concreto de referência.

Na seqüência podem ser observadas as relações entre a taxa de absorção e os parâmetros analisados no programa experimental, conforme resumidamente apresentado a seguir.

### a) Relação entre a taxa de absorção e a resistência à compressão

Observa-se na Figura 5.67 que a taxa de absorção é inversamente proporcional à resistência à compressão. Para uma mesma relação água/aglomerante, a medida que adiciona-se a sílica ativa a resistência à compressão aumenta e a taxa de absorção diminui. Por outro lado, verifica-se que a resistência à compressão, isoladamente, não é um parâmetro de durabilidade, visto que para um mesmo valor de resistência, a taxa de absorção pode variar, conforme o teor de adição de sílica ativa utilizado. Para exemplificar, uma resistência à compressão de 40 MPa pode corresponder a uma taxa de absorção de 15 mm/h<sup>1/2</sup>, se não for utilizada a sílica ativa, ou 11,5 mm/h<sup>1/2</sup>, utilizando-se 10% de sílica ativa, o que significa uma variação de 23% na taxa de absorção para uma mesma resistência.

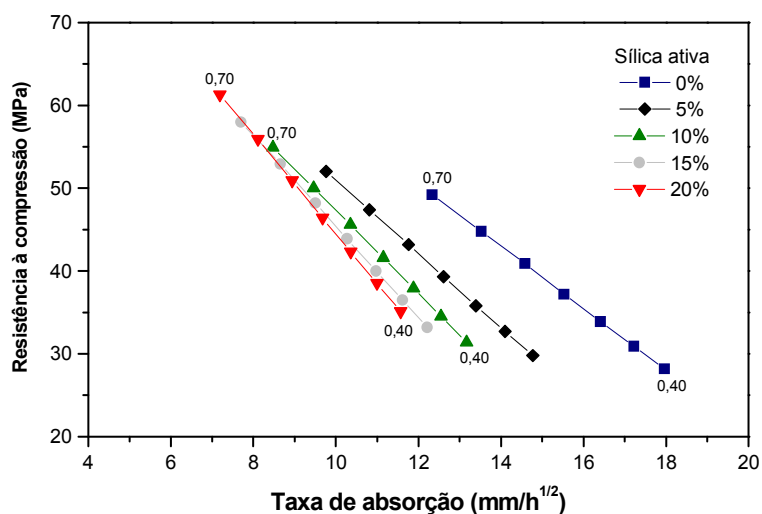


Figura 5.67 Taxa de absorção x resistência à compressão.

### b) Relação entre a taxa de absorção e a profundidade de carbonatação

O gráfico apresentado na Figura 5.68 indica que para um mesmo teor de adição de sílica ativa tem-se uma relação diretamente proporcional entre os parâmetros analisados, ou seja, quanto maior a taxa de absorção, maior a profundidade de carbonatação. No entanto, verifica-se que à medida que o teor de sílica ativa aumenta, a taxa de absorção diminui, conforme o esperado, e a profundidade de carbonatação é maior.

KULAKOWSKI (2002) chama a atenção para o fato de que alguns autores colocam que os ensaios de permeabilidade à água, ou de absorção de água, possuem uma boa correlação com experimentos de carbonatação, sem considerar, no entanto, o efeito das adições altamente reativas como a sílica ativa e o metacaulim, por exemplo, que por

aumentarem o consumo de hidróxido de cálcio podem aumentar a profundidade de carbonatação, mesmo com a diminuição da taxa de absorção.

A Figura 5.68 evidencia, ainda, que em menores relações água/aglomerante o aumento da profundidade de carbonatação, decorrente da adição de sílica ativa, não é tecnicamente significativo, mas a redução da taxa de absorção é bastante pronunciada.

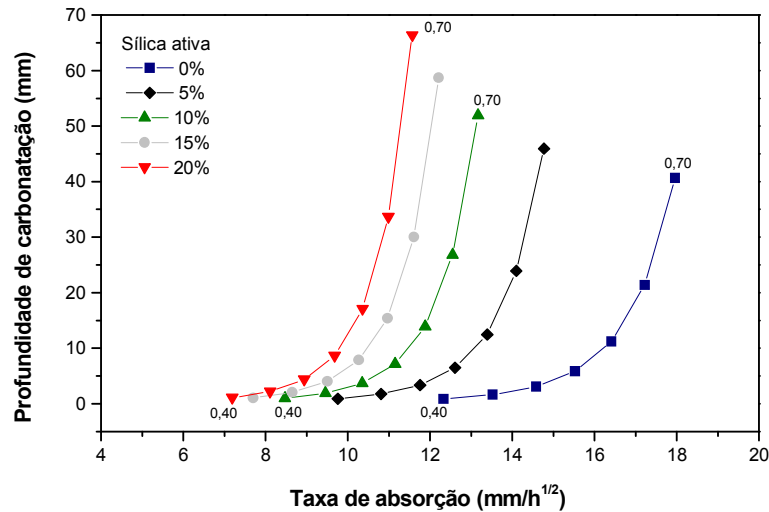
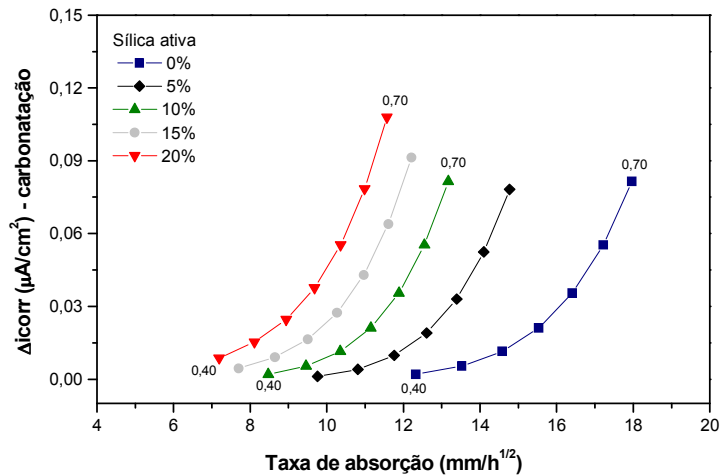


Figura 5.68 Taxa de absorção x profundidade de carbonatação.

### c) Relação entre a taxa de absorção e variação final da intensidade de corrosão no ensaio acelerado por carbonatação

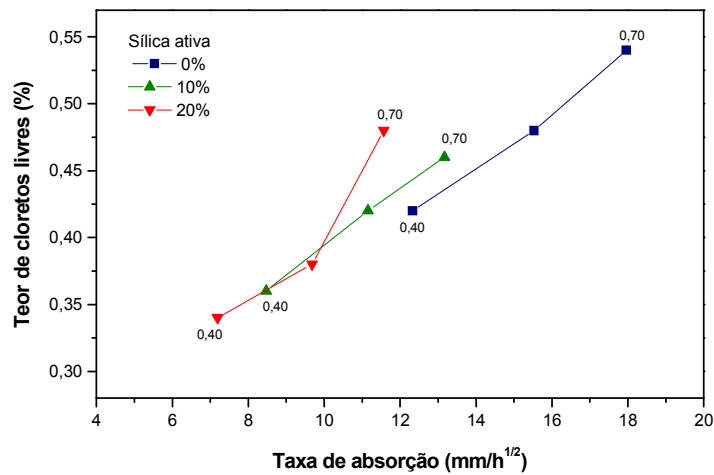
Na Figura 5.69 pode-se observar que a relação entre as variáveis analisadas apresenta, de forma geral, a mesma tendência verificada na Figura 5.68. Ou seja, para um mesmo teor de adição obtém-se uma maior variação da intensidade de corrosão com o aumento da taxa de absorção. Contudo, à medida que aumenta-se o teor de sílica ativa e, conseqüentemente a profundidade de carbonatação (Figura 5.68), a variação da intensidade de corrosão mantém-se inalterada até o teor 10% de adição e a taxa de absorção diminui para todos os teores de adição.



**Figura 5.69** Taxa de absorção x variação final da intensidade de corrosão no ensaio acelerado por carbonatação.

**d) Relação entre a taxa de absorção e o teor de cloretos livres**

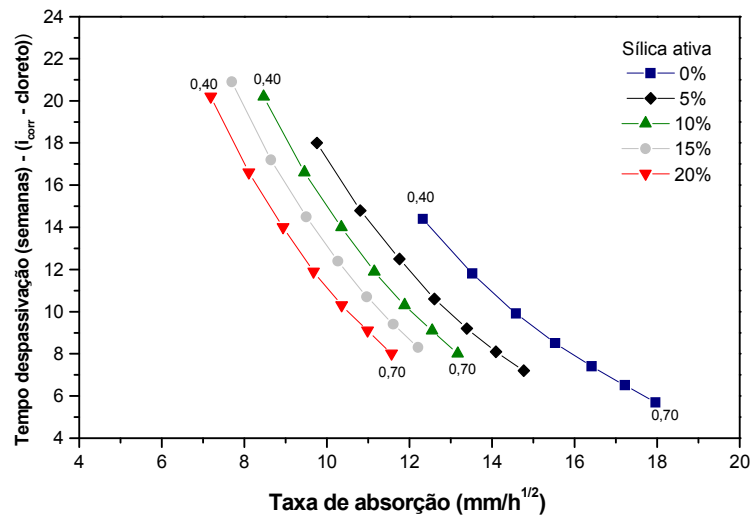
Da análise da Figura 5.70 verifica-se que para um mesmo teor de adição quanto maior a taxa de absorção, maior o teor de cloretos livres. Pode-se constatar que com o aumento do teor de adição há uma redução tanto na taxa de absorção como no teor de cloretos livres, a não ser para a relação água/aglomerante 0,70 com 20% de adição, onde mesmo com a redução da taxa de absorção, o teor de cloretos aumenta. Entretanto, conforme a análise realizada no item 5.3.3, essa interação entre a relação água/aglomerante e o teor de adição não é significativa. Além disso, foi verificado na análise dos resultados do teor de íons cloreto que as médias dos valores obtidos para os concretos com 10% e 20% de sílica ativa não diferem significativamente entre si.



**Figura 5.70** Taxa de absorção x teor de cloretos livres.

**e) Relação entre a taxa de absorção e o tempo para despassivação da armadura avaliado pela  $i_{corr}$  no ensaio acelerado por íons cloreto**

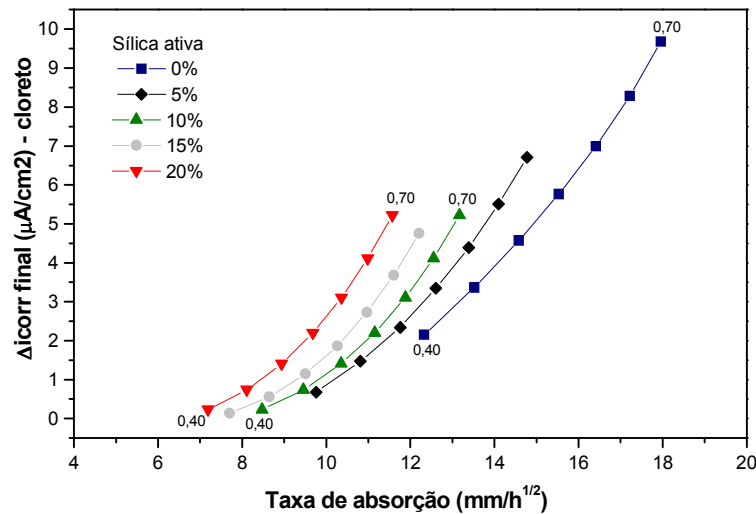
Os resultados apresentados na Figura 5.71 indicam, de forma geral, que o tempo para a despassivação da armadura é inversamente proporcional à taxa de absorção. Isto é, quanto menor a taxa de absorção, maior o tempo necessário para a despassivação da armadura. Observa-se, no entanto, que para o teor 20% de adição, mesmo com a redução da taxa de absorção, o tempo para a despassivação é o mesmo determinado para concretos com 10% de sílica ativa.



**Figura 5.71** Taxa de absorção x tempo para despassivação da armadura no ensaio acelerado por íons cloreto.

**f) Relação entre a taxa de absorção e a variação da intensidade de corrosão no final do ensaio acelerado por íons cloreto**

Na Figura 5.72 observa-se, como esperado, a mesma tendência de comportamento verificada na relação entre a taxa de absorção e o tempo para despassivação da armadura (Figura 5.71), sendo maior a variação da intensidade de corrosão à medida que a taxa de absorção aumenta. A não ser para o teor de 20% de adição, à medida que aumenta-se o teor de sílica ativa tanto a taxa de absorção como a variação da intensidade de corrosão são significativamente reduzidas.



**Figura 5.72** Taxa de absorção x variação da intensidade de corrosão no final do ensaio acelerado por íons cloreto.

Para a resistência capilar, determinada no ensaio de absorvidade, o modelo de regressão proposto é apresentado na Equação 5.20. A Tabela 5.34 apresenta os parâmetros estatísticos calculados para o modelo, os quais indicaram que a relação água/aglomerante e a sua interação com o teor de adição são significativas em um nível de confiança de 95%.

$$M = \{0,871 - [11,66 \times \ln(aag)] + [33,43 \times sa] - [113,86 \times \ln(aag) \times sa]\} \quad \text{Equação 5.20}$$

$$r^2 = 0,911$$

Onde:

M = resistência capilar ( $h/m^2 \times 10^3$ )

aag = relação água/aglomerante (0,30 a 0,80);

sa = teor de sílica ativa (0 a 0,2).

**Tabela 5.34** Parâmetros calculados para o modelo da resistência capilar.

Fator	Estimativa	Erro padrão	Teste t	Significância "p-value"
Constante	0,871	2,55	0,34	0,7367
ln(aag)	-11,66	3,10	-3,77	0,012
sa	33,43	21,21	1,58	0,1306
ln(aag) × sa	-113,86	28,63	-3,98	0,007

Na Tabela 5.35 apresenta-se a análise de variância (ANOVA) para o modelo de resistência capilar.

**Tabela 5.35** Análise de variância para o modelo de resistência capilar.

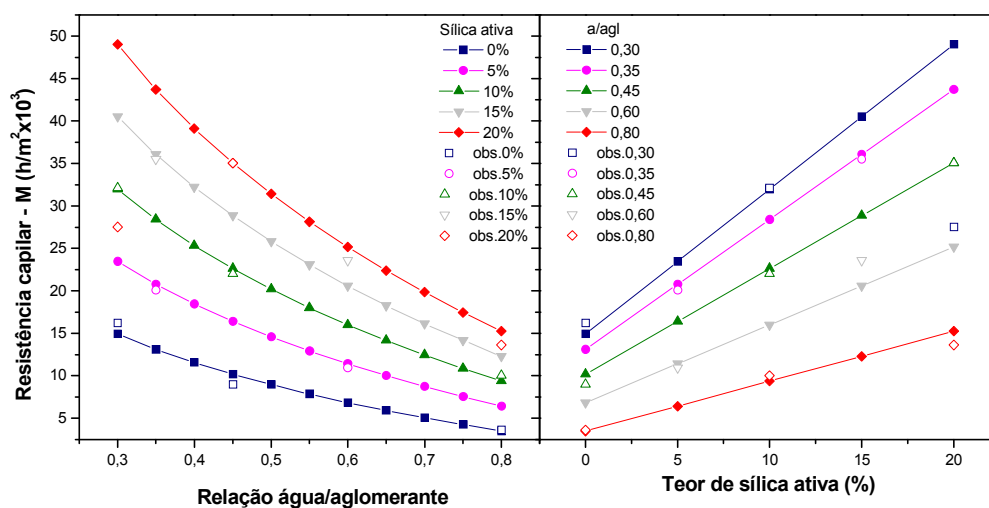
Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância "p-value"
Modelo	3	2469,19	823,06	68,59	0,0000
Resíduo	20	240,00	12,00	-	-
Total corrigido	23	2709,19	-	-	-

Coeficiente de determinação  $r^2 = 0,911$

GDL = Grau de Liberdade    SQ = Soma Quadrada    MQ = Média Quadrada = SQ/GDL

O valor de p-value determinado para o modelo ajustado ( $< 0,01$ ) indica que a relação entre as variáveis é estatisticamente significativa em um nível de 99% de confiança. Conforme o coeficiente de determinação obtido, 91,1% dos valores observados para a resistência capilar são explicados pelo modelo proposto.

As curvas de comportamento para a relação água/aglomerante e teor de sílica ativa, ajustadas pelo modelo obtido, bem como os valores médios observados para a resistência capilar são apresentados na Figura 5.73.



**Figura 5.73** Resultados observados e previstos pelo modelo ajustado para resistência capilar.

De acordo com a análise dos resultados, tanto a relação água/aglomerante como a interação entre o teor de sílica ativa e a relação água/aglomerante apresentam influência significativa na resistência capilar do concreto. Ou seja, o efeito da adição na resistência capilar é influenciado pela relação água/aglomerante, sendo um pouco mais pronunciado para relações água/aglomerante maiores. Observa-se que para a relação água/aglomerante 0,30 com 20% de sílica ativa a resistência capilar é 3,3 vezes maior do que a obtida para o concreto sem adição e para a relação água/aglomerante 0,80 com o mesmo teor de adição é 4,4 vezes maior.

Os resultados obtidos por SMEPLASS, citado por GJØRV (1994), na avaliação da resistência capilar de concretos com diferentes relações água/aglomerante indicaram que 5% de sílica ativa aumenta em 58% a resistência capilar, em relação aos concretos sem adição.



## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 6.1 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi avaliada a influência da adição de sílica ativa na corrosão da armadura, desencadeada por íons cloreto e por carbonatação, em concretos com relações água/aglomerante na faixa de 0,40 a 0,70 e teores de sílica ativa variando de 0% a 20%, através da técnica de resistência de polarização. Para complementar a pesquisa, de modo a obter-se parâmetros que subsidiassem o esclarecimento do desempenho de concretos com sílica ativa frente à corrosão da armadura, também foram avaliadas a resistência à compressão e a absorvidade, assim como o teor de cloretos livres e a profundidade de carbonatação, no caso da corrosão desencadeada por íons cloreto e por carbonatação do concreto, respectivamente.

A concepção do programa experimental desenvolvido foi baseada em um planejamento estatístico, o qual possibilitou a obtenção de modelos matemáticos que representaram com confiabilidade o efeito das variáveis independentes (relação água/aglomerante e teor de sílica ativa) nas propriedades analisadas.

A seguir são apresentadas as conclusões referentes ao efeito da sílica ativa na corrosão da armadura desencadeada por íons cloreto e por carbonatação, obtidas a partir da análise estatística dos resultados dos ensaios realizados. Salienta-se que as conclusões aqui apresentadas referem-se às condições específicas do programa experimental desenvolvido no presente trabalho e não devem, portanto, ser consideradas de forma absoluta, sendo necessária a realização de novas pesquisas para confirmar sua representatividade, bem como complementar o conhecimento do desempenho dos concretos com sílica ativa frente à corrosão das armaduras.

#### 6.1.1 Efeito da sílica ativa na corrosão desencadeada por íons cloreto

A corrosão por íons cloreto foi acelerada através de ciclos alternados de imersão parcial em solução de NaCl 3,5% e secagem em estufa a 50° C. No desenvolvimento do ensaio foram avaliados o **potencial de corrosão** e a **intensidade de corrosão**. Também foram determinados, ao final dos ensaios, a **perda de massa gravimétrica** das barras e o **teor de cloretos livres** dos corpos-de-prova analisados.

### **6.1.1.1 Potencial de corrosão**

#### **a) Em relação ao tempo de início da despassivação da armadura**

A partir do modelo de comportamento proposto, obtido através de regressão não linear múltipla (Equação 5.2, item 5.1.1.1), o qual apresentou um coeficiente de determinação de 94,7%, é possível obter as seguintes conclusões:

- Tanto a relação água/aglomerante como a interação entre o teor de sílica ativa e a relação água/aglomerante apresentaram efeito significativo no tempo para despassivar a armadura;
- A redução de relação água/aglomerante de 0,70 para 0,40 aumentou em 130% o tempo para despassivar a armadura;
- A adição de até 15% de sílica ativa contribuiu para aumentar o tempo de despassivação da armadura. No entanto, os concretos com 10% de sílica apresentaram o melhor desempenho, onde o tempo para despassivar a armadura aumenta 50% em relação ao concreto de referência;
- O teor de 20% de adição de sílica ativa não contribuiu para retardar a despassivação, obtendo-se com esse teor um desempenho equivalente ao concreto sem adição.

#### **b) Em relação à variação do potencial de corrosão em função do tempo**

Com base no modelo de comportamento para a variação do potencial de corrosão com o tempo, obtido através de regressão não linear múltipla (Equação 5.4, item 5.1.1.2), o qual apresentou um coeficiente de determinação de 74,8%, é possível obter as seguintes conclusões:

- A relação água/aglomerante, o teor de sílica ativa e a variação do tempo foram significativos na variação do potencial de corrosão;
- Concretos com maior relação água/aglomerante atingiram, como esperado, valores mais negativos de potencial de corrosão ao longo do tempo, apresentando uma condição mais favorável à ocorrência do fenômeno de corrosão;
- A adição de sílica ativa mostrou-se efetiva na redução da variação do potencial de corrosão com o tempo. Os concretos com adição de sílica ativa apresentaram, para todas as relações água/aglomerante analisadas, um desempenho superior aos concretos sem adição.

- O desempenho dos concretos com 10% de sílica ativa foi superior ao desempenho dos concretos com 15%, 5% e 20%, nessa ordem.
- Embora o teor 20% de adição tenha apresentado um comportamento equivalente ao concreto de referência no tempo para despassivação da armadura, desenvolveu potenciais menos negativos ao longo do ensaio de corrosão, conferindo maior proteção à armadura do que os concretos sem adição.

Dessa forma, pode-se concluir que em relação ao potencial de corrosão, 10% de sílica ativa apresenta-se como um teor ótimo de adição, tanto em relação ao tempo para a despassivação da armadura como na evolução do fenômeno de corrosão.

### **6.1.1.2 Intensidade de corrosão**

#### **a) Em relação ao tempo de início da despassivação da armadura**

A partir do modelo de comportamento proposto, obtido através de regressão não linear múltipla (Equação 5.7, item 5.1.2.1), o qual apresentou um coeficiente de determinação de 99,6%, é possível enumerar as seguintes conclusões:

- Tanto a relação água/aglomerante como a interação entre o teor de sílica ativa e a relação água/aglomerante influenciaram significativamente o tempo para despassivar a armadura;
- A redução da relação água/aglomerante de 0,70 para 0,40 proporcionou um incremento médio de aproximadamente 155% no tempo para despassivar a armadura;
- Ao aumentar o teor de sílica ativa de 0% para 15% verificou-se um acréscimo médio de 45% no tempo de despassivação da armadura;
- Concretos com 20% de sílica ativa apresentaram desempenho equivalente aos concretos com 10% de adição, evidenciando um teor ótimo de sílica ativa de 15%;
- O tempo estimado para despassivar a armadura avaliado pela intensidade de corrosão foi maior do que quando avaliado pelo potencial de corrosão.

#### **b) Em relação à variação da intensidade de corrosão com o tempo**

Considerando o modelo matemático ajustado para a variação da intensidade de corrosão, determinado através de regressão não linear múltipla (Equação 5.9, item 5.1.2.2), o qual revelou um coeficiente de determinação de 83,1%, é possível concluir:

- A relação água/aglomerante, o teor de sílica ativa e o tempo de ensaio apresentaram efeito significativo na variação da intensidade de corrosão;
- A variação da intensidade de corrosão foi, em média, 9,3 vezes maior para concretos com relação água/aglomerante 0,70 em relação aos concretos com relação água/aglomerante 0,40;
- A adição de sílica ativa apresentou favorável influência na variação da intensidade de corrosão com o tempo, para todas as relações água/aglomerante analisadas.
- Concretos com 15% de sílica ativa apresentaram o melhor desempenho ao longo do período de ensaio. Com 15% de sílica ativa foi possível verificar uma redução média de 70% na variação da intensidade de corrosão em relação ao concreto de referência, ao final do ensaio;
- O teor de 20% de adição revelou um desempenho equivalente ao observado para o teor de 10% de sílica ativa.

Diante dos resultados obtidos a partir da determinação da intensidade de corrosão, conclui-se que a adição de sílica ativa ao concreto proporciona um favorável efeito no tempo para a despassivação da armadura e na variação da intensidade de corrosão com o tempo, sendo um teor ótimo de adição 15% de sílica ativa.

#### **6.1.1.3 Em relação à perda de massa gravimétrica das barras de aço**

De acordo com a análise estatística dos resultados, realizada através da análise de variância (ANOVA), é possível enumerar as seguintes conclusões:

- A relação água/aglomerante, o teor de adição de sílica ativa e a interação entre os dois fatores apresentaram influência significativa na perda de massa gravimétrica;
- Ao diminuir a relação água/aglomerante de 0,70 para 0,55 e para 0,40 obteve-se, respectivamente, uma redução de 63% e 88% na perda de massa gravimétrica;
- A adição de sílica ativa ao concreto acarretou uma menor perda de massa gravimétrica. A redução observada, em relação ao concreto de referência, foi de 40% e 31% para os teores de adição de 10% e 20% de sílica ativa, respectivamente;
- O efeito da sílica ativa na perda de massa gravimétrica foi mais pronunciado para a relação água/aglomerante 0,55, onde obteve-se uma redução de 70% para o teor de 10% de adição e 61% para o teor 20%.

- Os resultados obtidos para a perda de massa gravimétrica apresentaram a mesma tendência de comportamento observada na perda de massa eletroquímica;
- Considerando a natureza da corrosão por íons cloreto (pites) obteve-se uma relação satisfatória entre a perda de massa gravimétrica e a perda de massa eletroquímica.

#### **6.1.1.4 Em relação ao teor de cloretos livres**

Com base na análise de variância (ANOVA) dos resultados obtidos para o teor de cloretos livres, pode-se concluir:

- Tanto a relação água/aglomerante como o teor de adição de sílica ativa revelaram um efeito significativo sobre o teor de cloretos livres;
- Concretos com menor relação água/aglomerante apresentaram, como esperado, um menor teor de cloretos livres. O teor de cloretos diminuiu, em média, 24% ao se reduzir a relação água/aglomerante de 0,70 para 0,40;
- A adição de sílica ativa apresentou favorável influência na redução do teor de cloretos livres. Foi constatado que com 10% de sílica ativa o teor de cloretos é, em média, 15% menor do que o determinado para os concretos sem adição. Para o teor 20% de sílica ativa os resultados indicaram uma redução média de 17% em relação aos concretos de referência, o que evidenciou que a partir de 10% o aumento do teor de adição não é tão efetivo na redução dos cloretos livres;
- De acordo com os resultados obtidos no teste de “Duncan”, verificou-se que os teores de cloretos determinados para 10% e 20% de adição de sílica ativa não diferem estatisticamente entre si;
- A correlação entre o teor de cloretos livres e o tempo para despassivar a armadura, determinado a partir dos resultados da intensidade de corrosão, indicou, como esperado, que quanto maior o teor de cloretos livres menor o tempo para despassivar a armadura.

Os resultados obtidos no presente trabalho indicaram uma favorável influência da adição de sílica ativa ao concreto, tanto em relação ao teor de cloretos livres como em relação à resistência à corrosão da armadura desencadeada por íons cloreto. Pode-se concluir, dessa forma, que a utilização da sílica ativa é uma alternativa viável para aumentar a durabilidade das estruturas de concreto armado, capaz de melhorar o desempenho do concreto em relação à corrosão desencadeada por íons cloreto.

## **6.1.2 Efeito da sílica ativa da corrosão desencadeada por carbonatação**

O ensaio acelerado de corrosão desencadeada por carbonatação foi realizado em câmara de carbonatação com concentração de  $\text{CO}_2 \geq 50\%$ . No desenvolvimento do ensaio foram monitorados o *potencial de corrosão* e a *intensidade de corrosão*. A profundidade de carbonatação foi determinada no decorrer do ensaio, em idades pré-estabelecidas. No final da realização do ensaio também foi avaliada a *perda de massa gravimétrica* das barras.

### **6.1.2.1 Em relação à variação final do potencial de corrosão**

A partir do modelo de comportamento da variação final do potencial de corrosão, obtido através de regressão não linear múltipla (Equação 5.12, item 5.2.1), o qual apresentou um coeficiente de determinação de 83%, é possível enumerar as seguintes conclusões:

- A relação água/aglomerante e a interação entre o teor de sílica ativa e a relação água/aglomerante foram significativas na variação final do potencial de corrosão;
- Quanto maior a relação água/aglomerante, maior a variação do potencial de corrosão. Constatou-se que para a relação água/aglomerante 0,70 a variação da intensidade de corrosão é, em média, 11 vezes maior do que a observada para a relação água/aglomerante 0,40;
- O efeito da sílica ativa foi mais pronunciado para relações água/aglomerante maiores;
- A adição de até 10% de sílica ativa não alterou a variação do potencial de corrosão;
- Para teores menores do que 10% de adição constatou-se que a variação final do potencial de corrosão é menos negativa do que para os concretos de referência. Com 5% de sílica ativa, o desempenho dos concretos foi, em média, 10% superior ao desempenho dos concretos sem adição;
- A adição de teores maiores do que 10% de sílica ativa apresentou efeito desfavorável na variação do potencial de corrosão.

### **6.1.2.2 Em relação à variação final da intensidade de corrosão**

A partir do modelo matemático ajustado para a variação final da intensidade de corrosão através de regressão não linear múltipla (Equação 5.14, item 5.2.2), o qual indicou um coeficiente de determinação de 88,8%, é possível concluir:

- Tanto a relação água/aglomerante como a interação entre o teor de sílica ativa e a relação água/aglomerante apresentaram influência significativa na variação final da intensidade de corrosão;
- O aumento da relação água/aglomerante implicou em uma maior variação da intensidade de corrosão. Para a relação água/aglomerante 0,70 a variação final média da intensidade de corrosão foi 20 vezes maior do que a observada para a relação água/aglomerante 0,40;
- O efeito da sílica ativa foi mais pronunciado para relações água/aglomerante maiores;
- Assim como constatado para a variação final do potencial de corrosão, a adição de até 10% de sílica ativa não alterou a variação final da intensidade de corrosão. Ou seja, concretos sem adição ou com 10% de sílica ativa apresentaram comportamentos equivalentes frente à corrosão das armaduras;
- Para concretos com teores menores do que 10% de sílica ativa a variação final da intensidade de corrosão foi menor do que para os concretos sem adição. Constatou-se que concretos com 5% de sílica ativa apresentaram a menor variação final da intensidade de corrosão;
- Tal como verificado para a variação final do potencial de corrosão, a adição de teores mais elevados do que 10% de sílica ativa apresentou efeito desfavorável na variação final da intensidade de corrosão.

### **6.1.2.3 Em relação à perda de massa gravimétrica das barras**

A partir dos resultados obtidos na análise de variância (ANOVA) dos valores determinados para a perda de massa gravimétrica das barras, pode-se concluir:

- Somente a relação água/aglomerante apresentou efeito significativo na perda de massa gravimétrica;
- O teor de sílica ativa, bem como a interação entre os dois fatores analisados não influenciaram a perda de massa gravimétrica;
- Para as relações água/aglomerante 0,40 e 0,55 a perda de massa gravimétrica foi, respectivamente, 71% e 48% menor do que a verificada para a relação água/aglomerante 0,70;
- Os resultados obtidos para a perda de massa gravimétrica apresentaram a mesma tendência de comportamento observada na perda de massa eletroquímica;

- A relação entre a perda de massa gravimétrica e a perda de massa eletroquímica foi considerada satisfatória.

#### **6.1.2.4 Em relação à profundidade de carbonatação**

A partir do modelo de comportamento proposto, obtido através de regressão não linear múltipla (Equação 5.18, item 5.3.2), o qual apresentou um coeficiente de determinação de 96,5%, é possível obter as seguintes conclusões:

- A relação água/aglomerante e a interação entre o teor de sílica ativa e a relação água/aglomerante, bem como o tempo de ensaio, influenciaram significativamente a profundidade de carbonatação;
- Como esperado, a profundidade de carbonatação é diretamente proporcional à relação água/aglomerante. Para a relação água/aglomerante 0,40 a profundidade de carbonatação foi, em média, 50 vezes menor do que para a relação água/aglomerante 0,70;
- O efeito da sílica ativa é determinado pela relação água/aglomerante. Em concretos com baixa relação água/aglomerante o efeito da adição não foi evidenciado. Já em concretos com relação água/aglomerante maior do 0,50, a sílica ativa aumentou significativamente a profundidade de carbonatação. Ou seja, o comportamento observado retratou a existência de um “cotovelo” em torno da relação água/aglomerante 0,50, considerada como um limite, abaixo do qual a profundidade de carbonatação pode ser considerada tecnicamente “desprezível” tanto para concretos com sílica ativa como para concretos sem adição. A partir desse limite, o refinamento da estrutura de poros proporcionado pela adição de sílica ativa apresentou um efeito secundário e a redução da alcalinidade, decorrente do consumo do hidróxido de cálcio, passou a ser desfavorável para a carbonatação;
- Para a relação água/aglomerante 0,40 o tempo para a frente de carbonatação atingir a armadura no concreto com 20% de sílica ativa foi 20% menor do que para o concreto sem adição. Já para a relação água/aglomerante 0,70 o tempo foi 35% menor, o que evidenciou o desvantajoso efeito da sílica ativa com o aumento da relação água/aglomerante.

Os resultados obtidos na avaliação experimental indicaram que, embora a sílica ativa aumente a profundidade de carbonatação, a adição de 10% de sílica ativa ao concreto não altera a intensidade de corrosão, obtendo-se, ainda, um efeito favorável na corrosão da



armadura quando se utilizam teores inferiores a esse limite. Ou seja, com a utilização de até 10% de sílica ativa, teor normalmente utilizado nas estruturas de concreto, o refinamento da estrutura de poros proporcionado pela sílica ativa compensa o efeito da redução da alcalinidade e da maior difusão de CO<sub>2</sub>, sem comprometer o desempenho das estruturas de concreto armado frente à corrosão da armadura desencadeada pelo efeito da carbonatação do concreto. Contudo ficou evidenciado na presente pesquisa que teores acima de 10% de sílica ativa não são favoráveis na proteção à armadura, podendo acelerar a despassivação da armadura, principalmente em concretos com maior relação água/aglomerante.

Frente a essas considerações, conclui-se que a utilização da sílica ativa de forma a melhorar o desempenho do concreto, sem comprometer sua durabilidade em relação à corrosão desencadeada por carbonatação, não deve ultrapassar o teor limite de 10%, beneficiando, dessa forma, diversas propriedades do concreto, sem risco à proteção da armadura.

### **6.1.3 Efeito da sílica ativa na absorvidade**

#### **6.1.3.1 Em relação à taxa de absorção de água**

Com base no modelo proposto para a absorção de água, obtido através de regressão linear múltipla (Equação 5.19, item 5.3.5), o qual apresenta um coeficiente de determinação de 93,4%, pode-se enumerar as seguintes conclusões:

- A relação água/aglomerante e o teor de sílica ativa foram estatisticamente significativos na taxa de absorção de água;
- A taxa de absorção de água é proporcional à relação água/aglomerante. Foi constatada uma redução média de 57% na taxa de absorção de água quando a relação água/aglomerante diminui de 0,80 para 0,30;
- A taxa de absorção de água é inversamente proporcional ao teor de adição de sílica ativa. Verificou-se que em concretos com 10% de sílica ativa a taxa de absorção de água foi, em média, 31% menor do que para os concretos sem adição. Já para 20% de sílica ativa a redução na taxa de absorção foi de 40%;
- De acordo com os resultados obtidos no teste de “Duncan” (Comparação múltipla de médias) as taxa de absorção de água para concretos com 10% ou 20% de adição de sílica ativa não apresentaram diferença estatisticamente significativa.

### **6.1.3.2 Em relação à resistência capilar**

A partir do modelo proposto para a resistência capilar, obtido através de regressão linear múltipla (Equação 5.20, item 5.3.5), o qual apresentou um coeficiente de determinação de 91,1%, pode-se enumerar as seguintes conclusões:

- A relação água/aglomerante, bem como a interação entre o teor de sílica ativa e a relação água/aglomerante apresentaram efeito significativo na resistência capilar;
- Quanto menor a relação água/aglomerante e maior o teor de adição de sílica ativa, maior a resistência capilar. Para a relação água/aglomerante 0,30 a resistência capilar foi, em média, quatro vezes superior à resistência capilar determinada para a relação água/aglomerante 0,80;
- Ao aumentar o teor de adição de 0% para 20% a resistência capilar aumentou, em média, quatro vezes;
- O efeito da adição da sílica ativa na resistência capilar foi um pouco mais pronunciado em relações água/aglomerante maiores.

### **6.1.4 Efeito da sílica ativa na resistência à compressão**

A partir do modelo proposto, obtido através de regressão não linear múltipla (Equação 5.16, item 5.3.1), o qual apresentou um coeficiente de determinação de 94,2%, é possível concluir:

- A relação água/aglomerante e o teor de sílica ativa influenciaram significativamente a resistência à compressão;
- Ao se reduzir a relação água/aglomerante de 0,70 para 0,40 obteve-se um aumento médio de 75% na resistência à compressão;
- Para todos os níveis de relação água/aglomerante analisados a adição de sílica ativa foi efetiva no aumento da resistência à compressão;
- A adição de 10% e 20% de sílica ativa promoveu um incremento médio de 12% e 25%, respectivamente, na resistência à compressão.

### **6.1.5 Conclusão final**

Diante dos resultados obtidos nos ensaios realizados na presente pesquisa, constatou-se que o efeito da sílica ativa no desempenho do concreto em relação à corrosão das armaduras é influenciado pelo teor de adição utilizado. Dessa forma, foi possível concluir:

- **Para teores < 10% de adição:** a sílica ativa, embora aumente a profundidade de carbonatação, apresenta efeito favorável na resistência à corrosão desencadeada por carbonatação. Além disso, aumenta a resistência à corrosão por íons cloreto e contribui efetivamente para a melhoria dos demais parâmetros e propriedades analisadas: teor de cloretos livres, taxa de absorção de água; resistência capilar e resistência à compressão;
- **Para 10% de adição:** a sílica ativa, embora aumente a profundidade de carbonatação, não influencia a corrosão desencadeada por carbonatação, enquanto melhora significativamente a resistência à corrosão por cloretos e todas as demais propriedades avaliadas;
- **Para teores > 10% de adição:** a sílica ativa, além de aumentar a profundidade de carbonatação, é desfavorável para a corrosão desencadeada por carbonatação, principalmente em relações água/aglomerante maiores. No entanto, a sílica ativa aumenta a resistência à corrosão por íons cloretos e, embora em menor proporção, beneficia os demais parâmetros e propriedades analisadas.

## 6.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Considerando a abrangência do tema e os inúmeros fatores que podem influenciar o efeito da adição de sílica ativa na corrosão das armaduras, os quais não puderam ser abordados em função da delimitação da pesquisa, bem como a necessidade do desenvolvimento de novas pesquisas para consolidar e complementar as considerações apresentadas no presente trabalho, sugere-se:

- Utilizar a técnica de impedância eletroquímica para análise da corrosão da armadura em concretos com adição de sílica ativa;
- Realizar ensaios para a verificação da difusão de oxigênio em concretos com sílica ativa;
- Avaliar a corrosão desencadeada por carbonatação, variando-se as condições de umidade relativa;
- Analisar os produtos de corrosão formados no processo desencadeado por íons cloreto e por carbonatação;
- Correlacionar resultados obtidos em ensaios de corrosão acelerada e natural;
- Avaliar a ação conjunta do CO<sub>2</sub> e dos íons cloretos no fenômeno da corrosão em concretos com sílica ativa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, A.G. **Efeito das adições minerais na resistividade elétrica de concretos convencionais**. Porto Alegre, 1998. 129p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- AİTCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo: PINI, 2000. 667p.
- AL-AMOUDI, O. S. B.; RASHEEDUZZAFAR; MASLEHUDDIN, M. Carbonation and corrosion of rebars in salt contaminated OPC/PFA concretes. **Cement and Concrete Research**, v.21, p.38-50, 1991.
- AL-AMOUDI, O.S.B.; RASHEEDUZZAFAR; ABDULJAUWAD, S.N.; MASLEHUDDIN, M. Effect of chloride-sulfate ions on reinforcement corrosion and sulfate deterioration in blended cements. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA-FUME, SLAG, AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE, 4., Istanbul, Turkey, 1992. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1993, V.2, p.1105-1117. (ACI Special Publication, 132).
- AL-SUGAIR, F.H. Improving silica-fume's corrosion protection of steel bars in concrete. In.: CORROSION AND CORROSION PROTECTION OF STEEL IN CONCRETE, 1994, Sheffield. **Proceedings...** Sheffield: University of Sheffield, 1994. 2v. v.2, p.762-771.
- ALONSO, C. **Estudio de la corrosion de armaduras en hormigón carbonatado**. . Madrid-España, 1986. 360 p. Tesis (Doctoral). Facultad de Ciências, Universidad Complutense de Madrid.
- ALONSO, C.; ANDRADE, C.; GONZÁLEZ, J. A. Relation between resistivity and corrosion rate of reinforcements in mortar made with several cement types. **Cement and Concrete Research**, v.8, p.687-698, 1988.
- ALONSO, C.; ANDRADE, C. Effect of nitrite as a corrosion inhibitor in contaminated and chloride-free carbonated mortars. **ACI Materials Journal**, v.87, n.2, p.130-137, 1990.
- ALONSO, C.; ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M.; CASTRO, P. Chloride threshold values to despassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar. **Cement and Concrete Research**, v.30, p.1047-1055, 2000.
- AMARAL FILHO, E.M. **Concreto de alta resistência**. São Paulo, 1988. Texto datilografado.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Corrosion of metals in concrete: reported by ACI Committee 222. **ACI Manual of Concrete practice**. Detroit, 1990. v.1.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 226. **Silica fume in concrete**. ACI Materials Journal, Detroit, v.84, n.2, p.158-166, Mar./Apr. 1987.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete; C876-87. **Annual Book of ASTM Standard**, v.04.02, p.429-433, Philadelphia, 1991.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard practice for preparing, cleaning and evaluating test specimens. ASTM G1-90 - **Annual Book of ASTM Standard**. Philadelphia, 1990. (Reapproved 1994).

- ANDRADE, J. J. O. **Durabilidade das estruturas de concreto armado: análise das manifestações patológicas nas estruturas no estado de Pernambuco**. Porto Alegre, 1996. 150p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- ANDRADE, J. J. O; DAL MOLIN, D. C. C. **Influência da sílica ativa na previsão da vida útil das estruturas de concreto armado através das técnicas de confiabilidade**. In: Jeary, A. P.; Ferreira e Castro, P.; Souza, V. C. M., ed. International Conference on the Behaviour of Damaged Structures, 3., Rio de Janeiro, 2002 - DAMSTRUC'2002, 11p. (CD-ROM).
- ANDRADE, C. Monitoring techniques. In: Schiessl, P., ed. **Corrosion of steel in concrete**. London, Chapman and Hall, 1988, cap. 6, p.79-95.
- ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. São Paulo: PINI, 1992. 104p.
- ANDRADE, C. Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements. **Cement and Concrete Research**, v.23, p.724-742, 1993.
- ANDRADE, C.; ALGABA, S.; GONZÁLEZ, J. A. Corrosión de armaduras embebidas em hormigón carbonatado. **Materiales de Construcción**, n.181, p.45-53, 1981.
- ANDRADE, C.; ALONSO, C.; SANTOS, P.; MACÍAS, A. Corrosion behaviour of steel during accelerated carbonation of solutions which simulate the pore concrete solution. In: International Congress on the Chemistry of Cement, 8., Rio de Janeiro, Brasil, 1986. **Proceedings...** v.5, p.256-262.
- ANDRADE, C.; GONZÁLEZ, J. A. Tendencias actuales em la investigación sobre corrosion de armaduras. **Informes de la Construcción**, v. 40, n. 398, p. 7-14, nov.-dic. 1988.
- ANDRADE, C.; BACLE, B.; ALONSO, C. Evaluación de la eficacia de una reparación para hormigón contaminado con cloruros. **Materiales de Construcción**, v.38, n.211, p.25-39, 1988.
- ANDRADE, C.; ALONSO, C. On-site measurements of corrosion rate of reinforcements. **Construction and Building Materials**, v.15, p.141-145, 2001.
- ANDRADE, M. L. A; CUNHA, L. M. S.; GANDRA, G. T. **Panorama da indústria mundial de ferroligas**. BNDES Setorial , Rio de Janeiro, n. 10, p. 57-114, set. 1999.
- ANQI, L. et al.. Study on corrosion prevention in reinforced concrete containing condensed silica fume and its application. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DURABILITY OF CONCRETE, 2., Montreal. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1991. v.1, p.499-510. (ACI Special Publication, 126).
- ARANHA, P. M. **Contribuição ao estudo das manifestações patológicas em estruturas de concreto armado na região Amazônica**. Porto Alegre, 1994. 161p. Dissertação (Mestrado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- ARYA, C.; BUENFELD, N. R.; NEWMAN, J. B. Factors influencing chloride-binding in concrete. **Cement and Concrete Research**, v.20, n. 2, p.291-300, 1990.
- ARYA, C.; NEWMAN, J. B. Problem of predicting risk of corrosion of steel in chloride contaminated concrete. **Proc. Instn. Civil Engrs.**, Part 1, v.88, p.875-888, 1990.
- ARYA, C.; XU, Y. Effect of cement type on chloride binding and corrosion of steel in concrete. **Cement and Concrete Research**, v.25, n.4, p.893-902, 1995.
- ASAVAPISIT, S.; NANTHAMONTRY, W.; POLPRASERT, C.; Influence of condensed silica fume on the properties of cement-based solidified wastes. . **Cement and Concrete Research**, v.31, p.1147-1152, 2001.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do Frasco de Chapman:** NBR 9776. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados - determinação da composição granulométrica:** NBR 7217. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados - determinação da absorção e da massa específica do agregado graúdo:** NBR 9937. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados para concreto - determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis:** NBR 9917. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland de alta resistência inicial:** NBR 5733. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto:** NBR 5738. Rio de Janeiro, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto - ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos:** NBR 5739. Rio de Janeiro, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto - determinação da consistência pelo abatimento de tronco de cone:** NBR NM67. Rio de Janeiro, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto e execução de obras de concreto armado:** NBR 6118. Rio de Janeiro, 1980.
- 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.
- BAI, J.; WILD, S.; SABIR, B.B. Sorptivity and strength of air-cured and water-cured PC-PFA-MK concrete and the influence of binder composition on carbonation depth. **Cement and Concrete Research**, v.32, p.1813-1821, 2002
- BAKKER, R. F. M. Initiation period. In: Schiessl, P., ed. **Corrosion of steel in concrete**. London, Chapman and Hall, 1988, cap. 3, p.22-55.
- BARATA, M. S.. **Concreto de alto desempenho no Pará: estudo da viabilidade técnica e econômica de produção de concreto de alto desempenho com os materiais disponíveis em Belém e através do emprego de adições de sílica ativa e metacaulim**. Porto Alegre, 1998. 153p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- BASILIO, F. A. **Durabilidade dos concretos. Permeabilidade e corrosão eletrolítica**. São Paulo, ABCP, 1972.
- BAUER, E. **Avaliação comparativa da influência da adição de escória de alto-forno na corrosão das armaduras através de técnicas eletroquímicas**. São Paulo, 1995. 236 p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- BAUER, E.; NEPOMUCENO, A. A.; LINS, V. **Emprego de técnicas eletroquímicas no estudo da corrosão das armaduras**. In: Congresso Brasileiro de Cimento, 5., 8-12, Nov., 1999.
- BAWEJA, D.; ROPER, H.; GUIRGUIS, S. SRIVIVATNANON, V. Measurement of corrosion of steel reinforcement under high chloride conditions. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG, AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE, 4., 1992, Istanbul, Turkey. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1993. v2, p.1543-1563. (ACI Special Publication, 132).

- BEAUDOIN, J. J.; RAMACHANDRAM, V. S.; FELDMAN, R. F. Interaction of chloride and C-S-H. **Cement and Concrete Research**, v.20, p.875-883, 1990.
- 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, p.1121-1129, 2000.
- BENTZ, D. P.; JENSEN, O. M.; COATS, A. M.; GLASSER, F. P. Influence of silica fume on diffusivity in cement-based materials I. Experimental and computer modeling studies on cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v.30, p.953-962, 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 POZZOLANS IN CONCRETE, 3., Trondheim, Norway, 1989. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1989. v.2, p.861-886. (ACI Special Publication, 114).
- BERKE, N. S.; SCALI, M. J.; REGAN, J. C.; SHEN, D. F. Long-term corrosion resistance of steel in silica fume and/or fly ash containing concretes. In: Second CANMET/ACI international conference on durability of concrete, 1991. **Proceedings...**p.393-422. (ACI Special Publication – 126).
- BERKE, N.S.; DALLAIRE, M.P.; HICKS, M.C. Plastic, mechanical, corrosion, and chemical resistance properties of silica fume (microsilica) concretes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE, 4., Istanbul, Turkey, 1992. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1993, v.2, p.1125-1149. (ACI Special Publication, 132).
- BORGARD, B.; WARREN, C.; SOMAYAJI, S.; HEIDERSBACH, R. Mechanisms of corrosion of steel in concrete. In: Berke, S.; Chaker, V.; Whiting, D., ed. **Corrosion rates of steel in concrete**, STP 1065, ASTM, p.174-188, 1990.
- BRANCA, C.; FRATESI, R.; MORICONI, G.; SIMONCINI, S. Influence of fly ash on concrete carbonation and rebar corrosion. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG, AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE, 4., 1992, Istanbul, Turkey. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1993. v.1, p.245-255 (ACI Special Publication, 132).
- BROOMFIELD, J. P. **Corrosion of steel in concrete**. London: E & FN Spon, 1998.
- BYFORS, K. Influence of silica fume and flyash on chloride diffusion and pH values cement paste. **Cement and Concrete Research**, v.17, n.1, p.115-130, 1987.
- CABRAL, A.E.B. **Avaliação da eficiência de sistemas de reparo no combate à iniciação e à propagação da corrosão da armadura por cloretos**. Porto Alegre, 2000. 175p. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- CABRERA, J. G.; CLAISSE, P. A. Measurement of chloride penetration into silica fume concrete. **Cement & Concrete Composites**, v.12, p.157-161, 1990.
- CABRERA, J.G.; CLAISSE, P.A.; HUNT, D.N. A statistical analysis of the factors which contribute to the corrosion of steel in Portland cement and silica fume concrete. **Construction and Building Materials**, v.9, n.2, p.105-113, 1995.
- CAO, H.T.; SIRIVIVATNANON, V. Corrosion of steel in concrete with and without silica fume. **Cement and Concrete Research**, v.21, p.316-324, 1991.
- CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto - Inspeção e técnicas eletroquímicas**. Co-edição, São Paulo: Ed. PINI , Goiânia: Ed. UFG, 1997.

- CASCUDO, O. **Influência das características do aço carbono destinado ao uso como armaduras para concreto armado no comportamento frente à corrosão.** São Paulo, 2000. 310p. Tese (Doutorado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- CASTRO, P.; CASTILLO, R. M.; CARPIO, J. J.; GENESCÁ, J.; HELENE, P.; LÓPEZ, W.; PAZINI, E. J.; SANJUÁN, M.A. **Corrosión em estruturas de concreto armado – Teoria, inspección, diagnóstico, vida útil y reparaciones.** Instituto Mexicano Del Cemento y Del Concreto, A. C., México, 1998.
- CHISOLM, D. H. Factors influencing reinforced concrete durability in New Zealand's marine environment. In: MALHOTRA, V. M. ed. *Durability of concrete - Fourth CANMET/ACI International Conference, Sydney, Austrália, 1997. Proceedings...* Detroit: American Concrete Institute, 1997. p.801-824. (ACI Special Publication – 170).
- CIGNA, R.; PROVERBIO, E.; ROCCHINI, G. A study of reinforcement behaviour in concrete structures using electrochemical techniques. **Corrosion Science**, v.35, n.5-8, p. 1579-1584, 1993.
- COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BÉTON - CEB. **Durability of concrete structures.** Report of CEB-RILEM International workshop. Copenhagen, May, 1983 (Bulletin d'information, 152, 1984).
- COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BÉTON - CEB. **Durable Concrete Structures – Design Guide.** Lausanne, Thomas Telford, 1992.
- CONSTANTINO, G.; SCRIVENER, L. Corrosion of steel in carbonated concrete. In: Justnes, H., ed. *International Congress on the Chemistry of Cement, 10. Proceedings...* Gottemburg, Sweden, 1997, 4iv084, p. 587-594.
- DAL MOLIN, D.C.C. **Fissuras em estruturas de concreto armado: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no Estado do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre, 1988. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- DAL MOLIN, D. C. C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de microssilica.** São Paulo, 1995. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- DAL MOLIN, D.C.C.; VIEIRA, F.M.P.; KULAKOWSKI, M.P.; STOLFO, R.M. **Pesquisa para o aprimoramento do emprego da sílica ativa Silmix em cimento e concreto e verificação de desempenho dos cimentos Eldorado.** Porto Alegre; NORIE-CPGEC-UFRGS, 1997. 124p. (Relatório de pesquisa)
- DASTOL, M. Produção e propriedades da microssilica da Elkem. In: SEMINÁRIO TECNOLÓGICO DA ELKEM MICROSSÍLICA, 1., São Paulo, 1984. **Anais...** São Paulo, ELKEM, 1984. p.1-19.
- DEJA, J.; MALOLEPSZY, J.; JASKIEWICZ, G. Influence of chloride corrosion on the durability of reinforcement in the concrete. In: Second CANMET/ACI international conference on durability of concrete, 1991. **Proceedings...**p.511-525 (ACI Special Publication – 126).
- DETWEILER, R.J.; MEHTA, P.K. Chemical and physical effects of silica fume on the mechanical behaviour of concrete. **ACI Materials Journal**, v.86, n.6, p.609-614, 1989.
- DETWILER, R. J.; FAPOHUNDA, C. A.; NATALE, J. Use of supplementary cementing materials to increase the resistance to chloride ion penetration of concrete cured at elevated temperatures. **ACI Materials Journal**, v.91, n.1, p.63-66, 1994.
- DOTTO, J. M. R.; ABREU, A. G.; DAL MOLIN, D.C.C.; MÜLLER, I. L. Influence of silica fume addition on concretes physical properties and on corrosion behaviour of reinforcement bars. **Cement & concrete composites**, v.25, 2003 (Article in press).



- DIAS, W.P.S. Reduction of concrete sorptivity with age through carbonation. **Cement and Concrete Research**, v.30, p.1255-1261, 2000.
- DELAGRAVE, A., MARCHAND, J., SAMSON, E.; PIGEON, M.; OLLIVIER, J. P. Diffusion of chloride ions in high performance mortars. In: Bickley, J. A. ed. High Strength Concrete: An International Perspective, Montreal, Canada, 1995. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1995. p.175-191. (ACI Special Publication 167).
- EL-DEBS, M. K.; VAREDA, L. V. Corrosão da armadura em concreto de granulometria fina e argamassa mediante ensaio acelerado. In: 44º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2002, Belo Horizonte. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2002. 1v. (CD-ROM), 13p.
- ELLIS, W. E.; RIGGS, E. H.; BUTLER, W. B. Comparative results of utilization of fly ash, silica fume and GGBFS in reducing the chloride permeability of concrete. In: Second CANMET/ACI international conference on durability of concrete, 1991. **Proceedings...**p.443-457. (ACI Special Publication – 126).
- EL-SAYED, H. A.; ALI, A. H.; EL-SABBAGH, B. A. Effect of silica fume incorporation in concrete on the corrosion protection of embedded reinforcement. In: Justnes, H., ed. International Congress on the Chemistry of Cement, 10. **Proceedings...** Gotteburg, Sweden, 1997, 4iv014, p. 89-96.
- FIDJESTOL, P. Reinforcement corrosion and the use of CSF-based additives. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE DURABILITY, 1987, Atlanta, USA. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1987, p.1445-1458 (ACI Special Publication 100).
- FIGUEIREDO, E. J. P. **Avaliação do desempenho de revestimentos para proteção da armadura contra a corrosão através de técnicas eletroquímicas - contribuição ao estudo de reparo de estruturas de concreto armado.** São Paulo, 1994. 423p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- FORNASIER, R. S. **Porosidade e permeabilidade do concreto de alto desempenho com microssilica.** Porto Alegre, 1995. 150p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- FUKUTE, T.; HAMADA, H.; MASHIMO, M.; WATANABE, Y. Chloride permeability of high strength concrete containing various mineral admixtures. In: de Larrard, F.; Lacroit, R., ed. International Symposium on the utilization of high strength/high performance concrete, 4., 29-31 may, 1996, Paris, France. **Proceedings...** p.489-497.
- GALVELE, J. R. **Corrosion.** Departamento de Materiales. Comisión Nacional de Energia Atômica. Buenos Aires, 1979.
- GAUTEFALL, O.; HAVDAHL, J. Effect of condensed silica fume on the mechanism of chloride diffusion into hardened cement paste. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG, AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE, 3., Trondheim, Norway, 1989. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1989. v.2, p.897-913. (ACI Special Publication, 114).
- GLASS, G. K.; BUENFELD, N. R. The presentation of the chloride threshold level for corrosion of steel in concrete. **Corrosion Science**, v.39, n.5, p.1001-1013, 1997.
- GLASS, G. K.; YANG, R.; DICKHAUS, T.; BUENFELD, N. R. Backscattered electron imaging of the steel-concrete interface. **Corrosion Science**, v.43, p.605-610, 2001.
- GLASSER, F. P.; SAGOE-CRENTSIL, K. K. Steel in concrete: Part II – Electron microscopy analysis. **Magazine of Concrete Research**, v.41, n.149, p.213-220, 1989.
- GENTIL, V. **Corrosão.** Rio de Janeiro: LTC, 1996. 345p.

- GJØRV, O. High-strength concrete. In: ADVANCES IN CONCRETE TECHNOLOGY, Athens, 1992. **Proceedings...** Montreal: CANMET, 1992. p.21-77.
- GJØRV, O. Important test methods for evaluation of reinforced concrete durability. In: V. MOHAN MALHOTRA SYMPOSIUM ON CONCRETE TECHNOLOGY: PAST, PRESENT, AND FUTURE, 1993, Berkeley, California. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1994. p.545-576. (ACI Special Publication, 144).
- GJØRV, O. Effect of condensed silica fume on steel corrosion in concrete. **ACI Materials Journal**, v.92, n.6, p.591-598, Nov.-Dec., 1995.
- GONÇALVES, J. P. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos.** Porto Alegre, 2000. 113 p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- GONZÁLEZ, J. A. **Control de la corrosión: estudio y medida por técnicas electroquímicas.** Ed. CSIC. Madrid, 1989. Capítulo V.
- GONZÁLEZ, J. A.; MOLINA, A.; ESCUDERO, M. L.; ANDRADE, C. Errors in the electrochemical evaluation of very small corrosion rates – I. Polarization resistance method applied to corrosion of steel in concrete. **Corrosion Science**, v.25, n.10, p.917-930, 1985.
- GONZÁLEZ, J. A.; LÓPEZ, W.; RODRÍGUEZ, P. Mecanismos de corrosión en el hormigón armado y factores que controlan su cinética. **Rev. Metal. Madrid**, v.28, n.5, p.297-305, 1992.
- GONZÁLEZ, J. A.; ANDRADE, C.; ALONSO, C.; FELIU, S. Comparison of rates of general corrosion and maximum pitting penetration on concrete embedded steel reinforcement. **Cement and Concrete Research**, v.25, n.2, p.257-264, 1995.
- GOPALAN, M.K. Sorptivity of fly ash concretes. **Cement and Concrete Research**, v.26, n.8, p.1189-1197, 1996.
- GOUDA, V. K. Corrosion and corrosion inhibition of reinforcing steel: I Immersed in alkaline solutions. **British Corrosion Journal**, v.5, n.3, p.198-203, 1970.
- GOWERS, K.; MILLARD, S. G.; GILL, J. S.; GILL, R. P. Programmable linear polarisation meter for determination of corrosion rate of reinforcement in concrete structures. **British Corrosion Journal**, v.29, n.1, p.25-32, 1994.
- GOWERS, K. R.; MILLARD, S. G. Electrochemical techniques for corrosion assesment of reinforced concrete structures. **Proc. Instn Civil Engrs Structs & Bldgs**, v.134, p.129-37, May, 1999.
- GRIMALDI, G.; CARPIO, J.; RAHARINAIVO, A. Effect of silica fume on carbonation and chloride penetration in mortars. In: Third CANMET/ACI international conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, 1989. **Supplementary papers**, p.320-334.
- GUIMARÃES, E. A. **Avaliação da capacidade protetora da resina de óleo de mamona contra a penetração de agentes agressivos no concreto.** Brasília, 1997. 150p. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília.
- HANSEN, M. R.; LEMING, M. L.; ZIA, P.; AHMAD, S. Chloride permeability and AC impedance of high performance concrete. In: Zia, P., ed. High Performance Concrete in Severe Environments, 1993. **Proceedings...**ACI SP-140, p.121-145.
- HANSSON, C. M. Comments on electrochemical measurements of the rate of corrosion of steel in concrete. **Cement and Concrete Research**, v.14, n.4, p.574-584, 1984.

- HASSAN, K. E.; CABRERA, J. G.; MALIECHE, R. S. The effect of mineral admixtures on the properties of high performance concrete. **Cemente & Concrete Composites**, v.22, p.267-271, 2000.
- HAVDAHL, J.; JUSTNES, H. The alkalinity of cementitious pastes with microsilica cured at ambient and elevated temperatures. **Nordic Concrete Research**, p.42-56, 1993.
- HELENE, P.R.L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo: PINI, 1986. 48p.
- HELENE, P.R.L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. São Paulo, 1993. 231p. Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- HELENE, P. e TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. Ed. Pini, São Paulo, 1992, 349 p.
- HISADA, M.; NAGATAKI, S.; OTSUKI, N. Evaluation of mineral admixtures on the viewpoint of chloride ion migration through mortar. **Cement & Concrete Composites**, v.21, p.443-448, 1999.
- 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**...Porto Alegre, 2001. 133p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- HJORTH, L. Microsilica in concrete. **Nordic Concrete Research**., p.1-18, Jan., 1982.
- HO, D. W. S.; LEWIS, R.K. carbonation of concrete and its prediction. **Cement and Concrete Research**, v.17, p.489-504, 1987.
- HONG, K.; HOOTON, R. D. Effects of cyclic chloride exposure on penetration of concrete cover. **Cement and Concrete Research**, v.29, p.1379-1386, 1999.
- HOU, J.; CHUNG, D. D. L. Effect of admixtures in concrete on the corrosion resistance of steel in reinforced concrete. **Corrosion Science**, v.42, p.1489-1507, 2000.
- HUSSAIN, S. E.; AL-GATHANI, A. S.; RASHEEDUZZAFAR Chloride threshold for corrosion of reinforcement in concrete. **ACI Materials Journal**, v.94, n.6, p.534-538, 1996.
- ISAIA, G.C. **Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura**. São Paulo, 1995. 280p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- JARRAH, N. R.; AL-AMOUDI, O. S. B.; MASLEHUDDIN, M.; ASHIRU, O.; AL-MANA, A. I. Electrochemical behaviour of steel in plain and blended cement concretes in sulphate and/or chloride environments. **Construction and Building Materials**, v.9, n.2, p.97-103, 1995.
- JENSEN, O.M.; HANSEN, P. F.; COATS, A. M.; GLASSER, F. P. Chloride ingress in cement paste and mortar. **Cement and Concrete Research**, v.29, p.1497-1504, 1999.
- KAZMIERCZAK, C.S. **Contribuição para a análise da eficiência de películas aplicadas sobre as estruturas de concreto armado com o objetivo de proteção contra a carbonatação**. São Paulo, 1995. 168p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica - Universidade de São Paulo.
- KAYYALI, O. A.; HAQUE, M. N. Chloride penetration and the ratio  $Cl^-/OH^-$  in the pores of cement paste. **Cement and Concrete Research**, v.18, n.6, p.895-900, 1988.

- KELHAM, S. A water absorption test for concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 40, n. 143, p. 106–110, June 1988.
- KHAYAT, K.H.; AITCIN, P.C. Silica fume in concrete - an overview. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG, AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE, 4., 1992, Istanbul, Turkey. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1993. v2, p.835-872 (ACI Special Publication, 132).
- KHAN, M. I.; LYNSDALE, C. J. Strength, permeability, and carbonation of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v.32, p.123-131, 2002.
- KHATIB, J. M.; MANGAT, P. S. Influence of high-temperature and low-humidity curing on chloride penetration in blended cement concrete. **Cement and Concrete Research**, v.32, p.1743-1753, 2002.
- KHAYAT, K.H.; AITCIN, P.C. Silica fume in concrete - an overview. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG, AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE, 4., 1992, Istanbul, Turkey. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1992. v2, p.835-872 (ACI Special Publication, 132).
- KITOWSKI, C., J.; WHEAT, H. G. Effect of chlorides on reinforcing steel exposed to simulated concrete solutions. **Corrosion**, v.53, n.3, p.216-226, 1997.
- KROPP, J. Chlorides in concrete. In: Kropp, J.; Hilsdorf, H. K. ed. Performance Criteria for Concrete Durability, p.138-164, 1995.
- KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa**. Porto Alegre, 2002. 200p. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- KURTIS, K. E.; MEHTA, P. K.. A critical review of deterioration of concrete due to corrosion of reinforcing steel. In: MALHOTRA, V. M. ed. Durability of concrete - Fourth CANMET/ACI International Conference, Sydney, Austrália, 1997. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1997. p.535-554. (ACI Special Publication – 170).
- LIMA, M. G. **Influência dos componentes do concreto na corrosão das armaduras**. Porto Alegre, 1990. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS.
- LOO, Y.H.; CHIN, M.S.; TAM, C.T.; ONG, K.C.G. A carbonation prediction model for accelerated carbonation testing of concrete. **Magazine of Concrete Research**, v.46, n.168, p.191-200, Sep.1994.
- LOPES, A. N. M. **Avaliação comparativa de concretos com e sem sílica ativa para resistências entre 50 e 65 MPa**. Brasília, 1999. 170p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Brasília.
- MACÍAS, A. Comparison of different electrochemical techniques for corrosion-rate determination of zinc-coated reinforcements in simulated concrete pore solutions. **Materials and Structures**, v.24, p.456-465, 1991.
- MALE, P. Properties of microsilica concrete. **Concrete**, London, v.23, n.8, p.31-34, Sept. 1989.
- MALHOTRA, V.M.; CARETTE, G.G.; SIVASUNDARAM, V. Role of silica fume in concrete: a review. In: ADVANCES IN CONCRETE TECHNOLOGY, Athens, 1992. **Proceedings..** Montreal: CANMET, 1992. p.925-991.
- MANGAT, P. S.; MOLLOY, B. T. Factors influencing chloride-induced corrosion of reinforcement in concrete. **Materials and Structures**, v.25, p. 404-411, 1992.

- MANGAT, P. S.; KHATIB, J. M.; MOLLOY, B. T. Microstructure, chloride diffusion and reinforcement corrosion in blended cement paste and concrete. **Cement & Concrete Composites**, v.16, p.73-81, 1994.
- MANGAT, P. S.; MOLLOY, B. T. Chloride binding in concrete containing PFA, gbs or silica fume under sea water exposure. **Magazine of Concrete Research**, v.47, n.171, p.129-141, 1995.
- MASUERO, A.B. **Estabilização das escórias de aciaria elétrica com vistas a sua utilização como substituição ao cimento**. Porto Alegre, 2001. 264p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Minas, Metalurgia e Materiais – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- McGRATH, P. F.; HOOTON, R. D. Influence of binder composition on chloride penetration resistance of concrete. In: MALHOTRA, V. M. ed. Durability of concrete - Fourth CANMET/ACI International Conference, Sydney, Austrália, 1997. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1997. p.331-347. (ACI Special Publication – 170)
- MEHTA, P.K. Mineral admixtures. In: RAMACHANDRAN, V.S. (Ed.). **Concrete admixtures handbook: properties, science, and technology**. Park Ridge, Noyes, 1984. Cap.6, p.303-336.
- MEHTA, P.K. Condensed silica fume. In: SWAMY, R.N. **Cement Replacement Materials**. (Concrete technology and design; v.3) London, Surrey University Press, 1986. Cap.5, p.134-170.
- MEHTA, P.K. Pozzolan and cementitious by-products in concrete. Another look. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE USE OF FLY ASH, SILICA FUME, SLAG, AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE, 3., 1989, Trondheim, Norway. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1989. v.2, p.1-44. (ACI Special Publication, 114).
- MEHTA, P.K. Fifty years of progress? In: SEMINÁRIO QUALIDADE E DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1993, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: UFRGS/CPGEC/NORIE, 1993. [Documento Suplementar]
- MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concrete: structure, properties and materials**. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1993.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994. 573p.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA Anuário 2002. In: <http://www.mme.gov.br/smm/anuario2002/Ferroliga.htm> (Acesso em 20 de novembro de 2002).
- MONTEIRO, P.J.M. **Microstructure of concrete and its influence on the mechanical properties**. Berkeley, California, 1985. 153p. Tese (Doutorado) - University of California, Berkeley.
- MONTEIRO, P. J. M. **Tecnologia Avançada no Estudo do Comportamento do Concreto**, 1992 (Notas de aula).
- MONTEIRO, E. C.B. **Estudo da capacidade de proteção de alguns tipos de cimentos nacionais, em relação à corrosão de armaduras sob a ação conjunta de CO<sub>2</sub> e íons cloretos**. Brasília, 1996. 138p. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília.
- MONTEIRO, P. J. M.; GJØRV, O.; MEHTA, P. K. Microstructure of the steel-cement paste interface in the presence of chloride. **Cement and Concrete Research**, v.15, p.781-784, 1985.

- MONTEIRO, P. J. M.; MEHTA, P.K. Improvement of the aggregate-cement paste transition zone by grain refinement of hydration products. In: Congresso Internacional de Química do Cimento, 8., 1986. **Proceedings...** Rio de Janeiro, 1986.
- 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 & Concrete Composites**, v.24, p.45-53, 2002.
- MORANVILLE-RÉGOURG, M. Durability of high performance concrete - alkali-aggregate reaction and carbonation. In.: MALIER, Y. (Ed.) **High Performance concrete. From Material to Structure**. London: E & FN SPON, 1992, p.225-233.
- MOURA, W.A. **Utilização de escória de cobre com adição e agregado miúdo para concreto**. Porto Alegre, 2000. 207p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- NAGATAKI, S. Mineral admixtures in concrete: state of the art and trends. In: V. MOHAN MALHOTRA SYMPOSIUM ON CONCRETE TECHNOLOGY: PAST, PRESENT, AND FUTURE, 1993, Berkeley, California. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1994. p.447-482. (ACI Special Publication, 144).
- NAGAYAMA, M.; TAMURA, H.; SHIMOZAWA, K. A proposal on corrosion investigation procedure using corrosion monitoring technique. In: Nagataki, s.; Nireki, T.; Tomosawa, F., ed. **Durability of Building Materials and Components 6**, p.993-1000, 1993.
- NANNI, L. F.; RIBEIRO, J. L. **Planejamento e avaliação de experimentos**. Porto Alegre: CPGEC/UFRGS, 1987. 193p. (Caderno Técnico, 17).
- NEPOMUCENO, A. A. **Comportamiento de los morteros de reparacion frente a la carbonatacion y a la penetracion de cloruros en estructuras de hormigon armado dañadas por corrosion de armaduras - Estudio mediante la tecnica de resistencia de polarizacion**. Madrid-España, 1992. 371 p. Tesis (Doctoral). Universidad Politecnica de Madrid.
- NEVILLE, A M. Chloride attack of reinforced concrete: an overview. **Materials and Structures**, v.28, n.176, p.63-70, 1995.
- NEVILLE, A M. **Propriedades do concreto**. São Paulo: PINI, 1997. 828p.
- NINCE, A.A. **Levantamento de dados sobre a deterioração de estruturas na região centro-oeste**. Brasília, 1996. 176p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Brasília.
- OH, B. H.; CHA, S. W.; JANG, B. S.; JANG, S. Y. development of high-prformance concrete having high resistance to chloride penetration. **Nuclear Engineering and Design**, v.212, p.221-231, 2002.
- PAGE, C. L.; HAVDAHL, J. Electrochemical monitoring of corrosion of steel in microsilica pastes. **Matériaux et Constructions**, v.18, n.103, p.41-47.
- PAGE, C. L.; VENNESLAND, Ø. Pore solution composition and chloride binding capacity of silica-fume cement pastes. **Matériaux et Constructions**, v.16, n.91, p.19-25, 1983.
- PAGE, C.L.; LAMBERT, P.; VASSIE, P.R. Investigations of reinforcement corrosion. I. The pore electrolyte phase in chloride-contamineted concrete. **Materials and Structures**, v.24, p.243-252, 1991.
- PANOSSIAN, Z. **Corrosão e proteção contra corrosão em equipamentos e estruturas metálicas**. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2v., 1993.
- PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation. **ACI Materials Journal**, v.88, n.4, p.363-373, 1991.

- PAPADAKIS, V. G. Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress. **Cement and Concrete Research**, v.30, p.291-299, 2000.
- PARROT, L. J. **A review of carbonation in reinforced concrete**. C&CA – Cement and concrete association, 1987. 42p.
- PARROT, L. J. A study of carbonation-induced corrosion. **Magazine of Concrete Research**, v.46, n.166, p.23-28, 1994.
- PEREIRA, V. G. A. **Avaliação do coeficiente de difusão de cloretos em concretos: influência do tipo de cimento, da relação a/c, da temperatura e do tempo de cura**. Porto Alegre, 2001. 138p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- PETTERSSON, K. Criteria for cracks in connection with corrosion in high strength concrete. In: de Larrard, F.; Lacroit, R., ed. International Symposium on the utilization of high strength/high performance concrete, 4., 29-31 may, 1996, Paris, France. **Proceedings...** p.509-517.
- PETTERSON, K.; SANDBERG, P. Chloride threshold levels, corrosion rates and service life for cracked high-performance concrete. In: MALHOTRA, V. M. ed. Durability of concrete - Fourth CANMET/ACI International Conference, Sydney, Austrália, 1997. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1997. p.451-472. (ACI Special Publication – 170).
- PREECE, C.M.; ARUP, H.; FRØLUND, T. Electrochemical behaviour of steel in dense silica-cement mortar. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG, AND OTHER MINERAL BY-PRODUCTS IN CONCRETE, 1., Ottawa, Canada, 1983. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1983, V.2, p.785-796. (ACI Special Publication, 79).
- RASHEEDUZZAFAR; HUSSAIN, S. H. Effect of microsilica and blast furnace slag on pore solution composition and alkali-silica reaction. **Cement & Concrete Composites**, v.13, p.219-225, 1991.
- RASHEEDUZZAFAR; AL-SAADOUN, S.S.; AL-GAHTANI, A.S. Reinforcement corrosion-resisting characteristics of silica fume blended-cement concrete. **ACI Materials Journal**, v.89, n.4, p.337-344, July-Aug., 1992.
- REDDY, B. GLASS, G. K.; LIM, P. J.; BUENFELD, N. R. On the corrosion risk presented by chloride bound in concrete. **Cement & Concrete Composites**, v.24, p.1-5, 2002.
- RINCÓN, A.; RINCÓN, O.T.; HACES, C.; FURET, N.R.; CORVO, F. Evaluation of steel corrosion products in tropical climates. **Corrosion**, v.53, n.11, p.835-841, 1997.
- RISOLUTI, P.; COPPOLA, L.; COLLEPARDI, M. Material for the engineered barrier system under development for the LLW repository in Italy. In: **International Symposium on the scientific Basis for Nuclear Waste Management**, 24., Sydney, Australia. p.1-11.
- ROBERTS-SEYMOUR, M. The effect of high range water reducing admixtures on some durability parameters of silica fume Portland cement concretes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE DURABILITY, 1987, Atlanta, USA. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1987, p.577-585 (ACI Special Publication 100).
- RODRÍGUEZ, P.; RAMÍREZ, E.; GONZÁLEZ, J. A. Methods for studying corrosion in reinforced concrete. **Magazine of Concrete Research**, v.46, n.167, p.81-90, 1994.
- RODOLPHO, P. M.; ISA, M. M. **A resistência a penetração de cloretos em microconcreto com adições**. In: Congresso Brasileiro de Cimento, 8-12, Nov., 1999. p.1-6.

- ROPER, H.; BAWEJA, D. Carbonation-chloride interactions and their influence on corrosion rates of steel in concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DURABILITY OF CONCRETE, 2., Montreal. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1991. v.1, p.295-315. (ACI Special Publication, 126).
- ROSENBERG, A.; HANSSON, C. M.; ANDRADE, C. Mechanisms of corrosion of steel in concrete. In: Skalny, J. P., ed. **Materials Science of Concrete**. The American Ceramic Society Inc., 1989. p.285-313.
- ROY, S.K.; BENG, P.K.; NORTHWOOD, D.O. The carbonation of concrete structures in the tropical environment of Singapore and a comparison with published data for temperate climates. **Magazine of Concrete Research**, v.48, n.177, p.293-300. Dec. 1996.
- ROY, S.K.; POH, K.B.; NORTHWOOD, D.O. Durability of concrete – accelerated carbonation and weathering studies. **Building and Environment**, v.34, p.597-606, 1999.
- SABIR, B. B. High strength condensed silica fume concrete. **Magazine of Concrete Research**, v.32, n.172, p.219-226, 1995.
- SAGOE-CRENTSIL, K., K.; GLASSER, F.P. Steel in concrete: Part I – A review of the electrochemical and thermodynamic aspects. **Magazine of Concrete Research**, v.41, n.149, p.205-212, 1989.
- SARRÍA, J. J. **Efecto de los parámetros ambientales en la velocidad de corrosión Del acero embebido en el hormigón. Incidência de la fisuración del recubrimiento**. Madrid-España, 1997. 243 p. Tesis (Doctoral). Universidad Politécnica de Madrid.
- SCISLEWSKI, Z.; WÓJTOWICZ, M. The influence of silica fume on durability of concrete and reinforced concrete. In: Sjöström, C., ed. **Durability of Building Materials and Components 7**, London, E & FN Spon, 1996, v.1, p.309-317.
- SEHGAL, A.; KHO, Y. T.; OSSEO-ASARE, K.; PICKERING, H. W. Comparison of corrosion rate-measuring devices for determining corrosion rate of steel-in-concrete systems. **Corrosion**, v.48, n.10, p.871-880, 1992.
- SEIDLER, N. **Efeito das adições pozolânicas na alcalinidade e consumo de hidróxido de cálcio durante a hidratação e carbonatação de materiais cimentícios**. Porto Alegre, 1999. 139p. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- SELLEVOLD, E.J.; NILSEN, T. Condensed silica fume in concrete: a world review. In: Malhotra, V.M. **Supplementary cementing materials for concrete**. Ottawa, CANMET, 1987. Cap.3, p.167-243.
- SCHIESSL, P. Influence of the composition of concrete on the corrosion protection of the reinforcement. In: International Conference on Concrete Durability, 1987, Atlanta, USA. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1987, p.1633-1649 (ACI Special Publication 100).
- SCHIESSL, P.; RAUPACH, M. Influence of the type of cement on the corrosion behaviour of steel in concrete. In: International Congress on the Chemistry of Cement, 9. **Proceedings...** New Delhi: National Council for cement and building materials, 1992. 6v., v1, p.296-301.
- SINGH, A. K.; ERICSSON, T.; HÄGGSTRÖM, L. Mössbauer and x-ray diffraction phase analysis of rusts from atmospheric test sites with different environments in Sweden. **Corrosion Science**, v.25, n.10, p.931-945, 1985.
- STEFFENS, A.; DINKLER, D.; AHRENS, H. Modeling carbonation for corrosion risk prediction of concrete structures. **Cement and Concrete Research**, v.32, p.935-941, 2002.



- STERN, M.; GEARY, A. L. Electrochemical polarization I: a theoretical analysis of the shape of polarization curves. **Journal of the Electrochemical Society**, v.104, n.1, p.56-63, 1957.
- STEWART, M. G.; ROSOWSKI, D. V. Time-dependent reliability of deteriorating reinforced concrete bridge decks. **Structural Safety**, n.20, p.91-109, 1998.
- SURYAVANSHI, A. K.; SWAMY, R. N. Stability of Friedel's salt in carbonated concrete structural elements. **Cement and Concrete Research**, v.26, n.5, p.729-741, 1996.
- SWAMY, R.N. A material and structural design strategy for high performance concrete structures. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON HIGH PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 1996, Florianópolis, Brasil. **Proceedings...** UFSC/UFRGS/USP, 1996, p.272-286.
- SWAMY, R. N.; SURYAVANSHI, A. K. Durability of blended cement concrete structural elements of higher water-binder ratio against chloride and carbonation attack. **The Arabian Journal for Science and Engineering**, v.23, n.1B, p.17-32, 1998.
- TALIB, A.Y.; RASHEEDUZZAFAR; AL-GAHTANI, A.S. Chloride binding and corrosion in silica fume concrete. In: Dhir, R. K. and Jones, M. R., eds. **Concrete 2000**, London, E & FN Spon, 1993, v.1, p.1453-1466.
- TALIB, A. Y.; RASHEEDUZZAFAR; AL-GAHTANI, A.S. Effect of temperature on the chloride binding capacity of silica fume blended cement. In: Swamy, R. N., ed. Corrosion and corrosion protection of steel in concrete – International Conference held at the University of Sheffield, UK, 24-28 July, 1994. **Proceedings...** Sheffield: University of Sheffield, 1994. 2v., p.806-816, 1994.
- TANAKA, D. K.; UEMOTO, K. L.; WOLYNEC, S. Corrosão de canos galvanizados por argamassa com aditivos. In: Seminário nacional de corrosão, 8./Simpósio nacional de corrosão na produção e utilização do álcool, 1., Rio de Janeiro, 1981. **Anais**. Rio de Janeiro, ABRACO/FTI, 1981. p.47-59.
- TAYLOR, H.F.W. **Cement chemistry**. 2ed. London, 1997. 459p.
- TEIXEIRA, M. P. **Metodologias auxiliares para diagnóstico de patologias de corrosão em estruturas de concreto**. Brasília, 1998. 169p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Brasília.
- TORII, K.; SASATANI, T.; KAWAMURA, M. Carbonation and steel corrosion in concretes containing mineral admixtures under different environments. In: Swamy, R. N., ed. Corrosion and corrosion protection of steel in concrete – International Conference held at the University of Sheffield, UK, 24-28 July, 1994. **Proceedings...** Sheffield: University of Sheffield, 1994. 2v, v.1, p.658-667, 1994.
- TORII, K.; KAWAMURA, M. Pore structure and chloride permeability of concretes containing fly ash, blast-furnace slag and silica fume. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE, 4., Istanbul, Turkey, 1992. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1993, v.1, p.135-150, (ACI Special Publication, 132).
- TREADWAY, K. Corrosion period. In: Schiessl, P., ed. **Corrosion of steel in concrete**. London, Chapman and Hall, 1988, cap. 4, p.56-69.
- TÜRKMEN, I.; GAVGAL, M.; GÜLL, R. Influence of mineral admixtures on the mechanical properties and corrosion of steel embedded in high strength concrete. **Materials Letters**, 4110, 2002, (Article in press).
- TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982.

- VAGHETTI, M. A. O. **Efeitos da cinza volante com cinza de casca de arroz ou sílica ativa sobre a carbonatação do concreto de cimento Portland**, Santa Maria - RS, 1999. 113p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria.
- VENNESLAND, Ø. Silica in concrete: corrosion of reinforcement. **Cement and Concrete Research Institute** – The Norwegian institute of technology, SINTEF Report, Trondheim, 1981. 25p.
- VIEIRA, F.M.P. **Estudo do comportamento da aderência das barras de aço no concreto de alta resistência com adição de microssílica**. Porto Alegre, 1994. 107p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- VIEIRA, F. M. P.; KULAKOWSKI, M. P.; VILELA, A. C. F.; DAL MOLIN, D. C. C. Aproveitamento do pó gerado na produção de ligas de ferro-silício e silício metálico na construção civil. In: XXVII Seminário sobre fusão, refino e solidificação dos aços, Maio, 1996, Belo Horizonte – MG. **Anais...** Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1996. p.779-790.
- VIEIRA, G. L. **Estudo do processo de corrosão sob a ação de íons cloreto em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Porto Alegre, 2003. 163p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- WAYERS, R. E. Service life model for concrete structures in chloride laden environments. **ACI Materials Journal**, v.95, n.4, p.445-453, 1998.
- WOLF, J. **Estudo sobre a durabilidade de concretos de alta resistência com adições de microssílica**. Porto Alegre, 1991. 145p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- WOLSIEFER, J.T. Silica fume concrete: a solution to steel reinforcement corrosion in concrete. In: UTILIZATION OF INDUSTRIAL BY-PRODUCTS FOR CONSTRUCTION MATERIALS, Dallas, Texas, October, 1991, ed. Nader Ghafoori. **Proceedings...** New York: American Society of Civil Engineers, 1991, p.527-558. (ACI Special Publication, 126).
- YAMATO, T; SOEDA, M; EMOTO, Y. Chemical resistance of concrete containing condensed silica fume. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG, AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE, 3., Trondheim, Norway, 1989. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1989. v.2, p.897-913. (ACI Special Publication, 114).
- ZANG, M. H.; GJØRV, O. Effect of silica fume on cement hydration in low porosity cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v.21, p.800-808, 1991.
- ZHANG, M. H.; BILODEAU, A.; MALHOTRA, V. M.; KIM, K. S.; KIM, J. C. Concrete incorporating supplementary cementing materials: Effect on compressive strength and resistance to chloride penetration. **ACI Materials Journal**, v.96, n.2, p.181-189, 1999.