

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**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**

**ELIANA CRISTINA BARRETO MONTEIRO**

**ORIENTADOR: ANTONIO ALBERTO NEPOMUCENO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS**  
**PUBLICAÇÃO: E.DM 004A/96**

**BRASÍLIA/DF: JULHO DE 1996**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**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**

**ENG<sup>a</sup> ELIANA CRISTINA BARRETO MONTEIRO**

Dissertação de Mestrado submetida ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre (M.Sc.).

Aprovada por:



---

**Prof. Antônio Alberto Nepomuceno**  
(Orientador - Dr. - UnB)



---

**Prof. Elton Bauer**  
(Examinador Interno - Dr. - UnB)



---

**Prof. Paulo Roberto do Lago Helene**  
(Examinador Externo - Dr. - EPUSP)

Brasília, 16 de Julho de 1996

## FICHA CATALOGRÁFICA

MONTEIRO, ELIANA CRISTINA BARRETO

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 [Distrito Federal] 1996.

xxiii, 138 p., 210 mm x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas, 1996).

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília.  
Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil.

1.- Corrosão	6 - Cimento
3.- Cloretos	7 - Concreto Armado
5.- Carbonatação	8 - Resistência de Polarização
I. ENC/FT/UnB	II - Título (Série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MONTEIRO, E.C.B.; 1996. 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. Dissertação de Mestrado, Publicação E.DM 004A/96, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 138 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

**NOME DO AUTOR:** Eliana Cristina Barreto Monteiro

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO:** 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.

**GRAU/ANO:** Mestre/1996

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Eliana Cristina Barreto Monteiro  
Rua Capitão Sampaio Xavier, nº 299 Aflitos  
CEP: 52050-210 Recife/PE - Brasil

## DEDICATÓRIA

*À Mamãe, Papai e Beth com muito amor,  
a minha eterna gratidão.*

*Ao meu querido marido Sérgio,  
que esteve sempre ao meu lado,  
durante a realização deste trabalho.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, que sem a sua ajuda nada poderia ser feito.

Ao Professor Antonio Alberto Nepomuceno, meu orientador, meus sinceros agradecimentos por sua dedicação inestimável e por ter sempre tempo disponível para orientação o que foi fundamental neste período de dissertação.

Ao Professor Elton Bauer, pelo seu importantíssimo apoio, sugestões e esclarecimentos durante todo o período de realização deste trabalho.

Aos Laboratórios de Ensaios de Materiais e Análise de Águas pelo importante apoio na etapa de procedimento experimental e aos técnicos do departamento de engenharia civil (UnB), em especial a Severino e Xavier pelo grande auxílio prestado durante os ensaios.

Aos Professores do Mestrado em Estruturas da UnB, pelo ensino e amizade dados nesses dois anos de convivência.

Aos meus colegas do mestrado, pela amizade e ajuda nos momentos difíceis; em especial a minhas amigas Ana Paula, Ana Lúcia, Marilene, Suzana e Eugênia.

Ao CNPq, pelo suporte financeiro.

As empresas de Cimento Tocantins, Cimento Ciminas e Cimento Cauê, o apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Aos queridos Mario, Maria, Demetrius, Paula, Ben-Hur e Ulisses, pelo carinho com que nos receberam em Brasília.

E, finalmente a minha família, meus pais Heliane e Otacilio pelo esforço na minha educação, a Beth, pelo apoio e carinho, aos meus irmãos que são meus grandes amigos e ao meu querido marido pelo carinho, incentivo e companheirismo, os quais foram fundamentais para a realização deste trabalho.

## RESUMO

As estruturas de concreto armado quando sujeitas a corrosão de armaduras por carbonatação do concreto e contaminação por cloretos diminuem a sua vida útil com conseqüências negativas na estabilidade, estética e nos custos de manutenção. Existem no mercado diversos tipos de cimento com características distintas do ponto de vista de proteção das armaduras, devido principalmente à sua composição química.

Este trabalho apresenta estudos do comportamento de alguns cimentos nacionais (CPII-F 32, CPIII 32 e CPV-ARI-RS-MS) em relação à proteção contra a corrosão das armaduras, com diferentes relações água/cimento e cura. Foram feitos dois ensaios onde, no primeiro, os corpos de prova foram submetidos à ensaios de carbonatação acelerada e posteriormente de penetração de cloretos com ciclos de umidecimento e secagem. e, no segundo, os corpos de prova foram submetidos à ensaios de penetração de cloretos com ciclos de umidecimento e secagem e posteriormente de carbonatação acelerada. A intensidade de corrosão nas armaduras dos corpos de prova foi medida através da técnica eletroquímica de Resistência de polarização ( $R_p$ ), que permite avaliar o comportamento das armaduras usadas como sensores a cada momento do ensaio.

A metodologia utilizada permitiu avaliar comparativamente a capacidade de proteção dos diversos tipos de cimentos estudados contra a penetração de agentes agressivos às armaduras no que diz respeito a corrosão do concreto armado, tendo sido observado que os cimentos com adições apresentaram, de maneira geral, um pior desempenho. Os cimentos com adições tiveram um bom desempenho, apenas quando os cloretos atuaram isoladamente e para relação água/cimento 0,4.

## ABSTRACT

The reinforced concrete structures when submitted to corrosion of steel reinforcement by concrete carbonation and chloride contamination reduce their service life with negative consequences in stability, esthetics and maintenance costs. There are many types of cement with different characteristics by the point of view of corrosion protection, due mainly by their chemical composition.

This work presents studies of the behaviour of some Brazilian cements (CPII-F 32, CPIII 32 e CPV-ARI-RS-MS) in relation with the protection against the corrosion of steel reinforcement with different water/cement relations and curing. It was done two tests, the first one, the specimens were submitted to accelerated carbonation and afterwards to chlorides penetration test with wetting and drying cycles and, in the second one, the specimens were submitted to chlorides penetration tests with wetting and drying cycles and afterwards to accelerated carbonation. The corrosion intensity of the specimens rebars was estimated by the polarization resistance technique ( $R_p$ ), that allows to evaluate the behaviour of the rebars used as a sensor in each moment of the test.

The methodology used allowed to evaluate comparatively the protection capacity of some types of cements studied against the ingress of aggressive agents in the rebars in relation of corrosion of steel reinforcement, it has been observed that cements with pozzolanic admixtures showed, in general, a worst behaviour. The cements with pozzolanic admixtures had a good behaviour, only when the Chlorides worked alone and with water/cement relation of 0,4.

# ÍNDICE

Capítulo	Página
1 - INTRODUÇÃO .....	1
1.1 - IMPORTÂNCIA DO TEMA .....	1
1.2 - OBJETIVO DO TRABALHO .....	3
1.3 - ESCOPO DO TRABALHO .....	3
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 - DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO .....	5
2.1.1 - Conceito de durabilidade.....	5
2.1.2 - Conceito de vida útil .....	6
2.2 - ASPECTOS DA MICROESTRUTURA DO CONCRETO .....	7
2.2.1 - Hidratação do cimento .....	8
2.2.2 - Estrutura dos poros.....	10
2.2.3 - Fase aquosa .....	11
2.2.4 - Influência das adições na microestrutura.....	12
2.2.4.1 - Fíler .....	12
2.2.4.2 - Escória de alto-forno.....	13
2.2.4.3 - Microssílica.....	14
2.3 - CORROSÃO DAS ARMADURAS .....	15
2.3.1 - Fundamentos da corrosão .....	15
2.3.2 - Passivação das armaduras no concreto armado.....	17
2.3.3 - Natureza eletroquímica da corrosão de armaduras no concreto.....	17
2.3.4 - Técnicas para avaliação de corrosão.....	19
2.3.4.1 - Técnicas eletroquímicas.....	19
2.3.4.2 - Técnicas não eletroquímicas .....	24

2.4 - MECANISMOS DE TRANSPORTE .....	24
2.4.1 - Absorção capilar .....	25
2.4.2 - Difusão .....	26
2.4.3 - Permeabilidade.....	28
2.5 - INICIAÇÃO DA CORROSÃO PELA CARBONATAÇÃO.....	28
2.5.1 - Introdução .....	28
2.5.2 - Reações de carbonatação .....	29
2.5.3 - Fatores que influenciam a carbonatação.....	30
2.5.3.1 - Relação água/cimento .....	30
2.5.3.2 - Tipo de cimento .....	31
2.5.3.3 - Condições de cura.....	32
2.5.3.4 - Condições de umidade .....	32
2.5.3.5 - Quantidade de CO <sub>2</sub> .....	33
2.5.4 - Medidas de carbonatação .....	33
2.6 - INICIAÇÃO DA CORROSÃO PELOS ÍONS CLORETO .....	34
2.6.1 - Introdução .....	34
2.6.2 - Fatores que influenciam a penetração de cloretos .....	36
2.6.2.1 - Relação água/cimento .....	36
2.6.2.2 - Composição química do cimento .....	36
2.6.2.3 - Compactação e cura .....	38
2.6.2.4 - Temperatura .....	38
2.6.2.5 - Fissuras.....	39
2.6.2.6 - Carbonatação .....	39
2.7 - FATORES CONTROLADORES DA PROPAGAÇÃO DE CORROSÃO .....	39
2.7.1 - Teor de umidade, resistividade e disponibilidade de oxigênio .....	39
2.7.2 - Proporção de cloretos .....	41
2.7.3 - Temperatura .....	42
2.7.4 - Formação da macrocélula de corrosão.....	42
3 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	43
3.1 - MATERIAIS .....	43
3.1.1 - Cimento .....	43
3.1.2 - Areia.....	43

3.1.3 - Armadura.....	44
3.2 - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	44
3.3 - DEFINIÇÃO DAS SÉRIES DE ENSAIOS.....	44
3.3.1 - Séries normais.....	45
3.3.2 - Séries inversas.....	46
3.4 - CORPOS DE PROVA.....	47
3.4.1 - Ensaio de corrosão.....	48
3.4.1.1 - Preparação das barras.....	49
3.4.1.2 - Moldagem.....	50
3.5 - ENSAIO DE CARBONATAÇÃO.....	54
3.5.1 - Câmara de carbonatação.....	54
3.5.2 - Metodologia.....	55
3.5.3 - Medidas eletroquímicas dos corpos de prova submetidos a carbonatação.....	56
3.6 - ENSAIO COM CLORETOS.....	60
3.6.1 - Metodologia.....	61
3.6.2 - Medidas eletroquímicas de corpos de prova submetidos a ensaios com cloretos.....	62
3.7 - ENSAIOS COMPLEMENTARES.....	62
3.7.1 - Absorção capilar.....	62
3.7.2 - Absorção por imersão.....	63
3.8 - PERDA GRAVIMÉTRICA.....	63
4 - RESULTADOS.....	64
4.1 - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	64
4.1.1 - Caracterização química.....	64
4.1.1.1 - Análise química.....	64
4.1.1.2 - Teor de escória e microssilica.....	64
4.1.2 - Caracterização física.....	65
4.1.2.1 - Propriedades físicas dos cimentos.....	65
4.1.2.2 - Granulometria das areias.....	65
4.2 - ENSAIOS DE CORROSÃO DAS SÉRIES NORMAIS CURADAS 28 DIAS.....	66
4.2.1 - Ensaio de carbonatação.....	66
4.2.1.1 - Evolução da intensidade de corrosão ( $i_{corr}$ ).....	67
4.2.1.2 - Evolução do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ).....	68

4.2.1.3 - Evolução da resistência ôhmica (Rohm) .....	70
4.2.1.4 - Evolução da variação de massa (Mv).....	71
4.2.2 - Ensaio com cloretos, após a carbonatação .....	73
4.2.2.1 - Evolução da intensidade de corrosão ( $i_{corr}$ ).....	73
4.2.2.2 - Evolução do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ).....	75
4.2.2.3 - Evolução da resistência ôhmica (Rohm) .....	76
4.2.2.4 - Evolução da variação de massa (Mv).....	77
4.3 - ENSAIOS DE CORROSÃO DAS SÉRIES NORMAIS CURADAS 7 DIAS.....	79
4.3.1 - Ensaio de carbonatação acelerada .....	79
4.3.1.1 - Evolução da intensidade de corrosão ( $i_{corr}$ ).....	80
4.3.1.2 - Evolução do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ).....	81
4.3.1.3 - Evolução da resistência ôhmica (Rohm) .....	83
4.3.1.4 - Evolução da variação de massa (Mv).....	84
4.3.2 - Ensaio com cloretos, após a carbonatação.....	85
4.3.2.1 - Evolução da intensidade de corrosão ( $i_{corr}$ ).....	85
4.3.2.2 - Evolução do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ).....	87
4.3.2.3 - Evolução da resistência ôhmica (Rohm) .....	88
4.3.2.4 - Evolução da variação de massa (Mv).....	89
4.4 - SÉRIES INVERSAS .....	91
4.4.1 - Ensaio com cloretos.....	91
4.4.1.1 - Evolução da intensidade de corrosão ( $i_{corr}$ ).....	91
4.4.1.2 - Evolução do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ).....	93
4.4.1.3 - Evolução da resistência ôhmica (Rohm) .....	94
4.4.1.4 - Evolução da variação de massa (Mv).....	95
4.4.2 - Ensaio de carbonatação acelerada .....	97
4.4.2.1 - Evolução da intensidade de corrosão ( $i_{corr}$ ).....	97
4.4.2.2 - Evolução do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ).....	98
4.4.2.3 - Evolução da resistência ôhmica (Rohm) .....	100
4.4.2.4 - Evolução da variação de massa (Mv).....	101
4.5 - ENSAIOS COMPLEMENTARES .....	102
4.5.1 - Absorção Capilar .....	102
4.5.1.1 - Cura 28 dias.....	102
4.5.1.2 - Cura 7 dias.....	103

4.5.2 - Absorção por imersão .....	104
4.5.2.1 - Cura 28 dias.....	104
4.5.2.2 - Cura 7 dias.....	104
4.6 - PERDA DE MASSA ELETROQUÍMICA X GRAVIMÉTRICA.....	105
5 - DISCUSSÃO .....	107
5.1 - METODOLOGIA UTILIZADA.....	107
5.1.1 - Introdução .....	107
5.1.2 - Precondicionamento dos corpos de prova antes dos ensaios .....	108
5.1.3 - $i_{corr}$ como parâmetro principal de avaliação da corrosão .....	108
5.1.3.1 - Fase de iniciação .....	108
5.1.3.2 - Fase de propagação.....	110
5.1.4 - $E_{corr}$ , Rohm e $Mv$ .....	112
5.2 - COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS .....	113
5.2.1 - Em relação a estrutura física.....	113
5.2.1.1 - Absorção capilar .....	114
5.2.1.2 - Absorção por imersão .....	115
5.2.2 - Em ambientes contaminados por $CO_2$ e posteriormente por cloretos.....	116
5.2.2.1 - Iniciação da corrosão .....	116
5.2.2.2 - Ingresso de cloretos nos corpos de prova carbonatados.....	116
5.2.2.3 - Influência da relação água/cimento .....	117
5.2.2.4 - Influência do período de cura .....	118
5.2.2.5 - Relação entre intensidade de corrosão e potencial de corrosão .....	119
5.2.2.6 - Relação entre intensidade de corrosão e resistência ôhmica na carbonatação.....	122
5.2.3 - Em ambientes contaminados por cloretos e posteriormente por $CO_2$ .....	123
5.2.3.1 - Ingresso de cloretos .....	123
5.2.3.2 - Evolução da intensidade de corrosão na etapa de carbonatação .....	124
5.2.3.3 - Influência da relação água/cimento .....	124
5.2.3.4 - Relação entre intensidade de corrosão e potencial de corrosão .....	125
5.2.3.5 - Relação entre intensidade de corrosão e resistência ôhmica na carbonatação.....	126
5.3 - IMPORTÂNCIA DO ESTUDO PARA A VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS .....	127

6 - CONCLUSÕES.....	129
6.1 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	129
6.2 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	130
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	133

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
Figura 2.1- Representação esquemática de um modelo de equilíbrio de uma estrutura onde se consideram os fatores relacionados a durabilidade, modificado (Selinger, 1992).....	6
Figura 2.2- Representação esquemática do modelo de vida útil, modificado (Tuutti, 1982). ....	7
Figura 2.3- Hidratação do cimento portland (Scrivener, citado por Bauer, 1995).....	9
Figura 2.4- Diagrama simplificado de Pourbaix, pH em função do potencial eletroquímico do ferro, para 25°C (Page, 1988).....	16
Figura 2.5- Ilustração esquemática da corrosão da armadura no concreto (Moskiv et al., 1983).....	18
Figura 2.6- Representação esquemática da interação entre o concreto e o ambiente agressivo as armaduras (Nepomuceno, 1992). ....	25
Figura 2.7- Avanço do processo de carbonatação (CEB, 1984).....	28
Figura 2.8- Influência da relação água/cimento sobre a profundidade de carbonatação, após 3 anos de ensaio (Vénuat, citado por Figueredo et al., 1993).....	31
Figura 2.9- Variação da velocidade de carbonatação com a umidade (Verbeck, 1958).....	33
Figura 2.10- Esquema da influência de parâmetros relacionados com a quantidade do concreto e umidade ambiental sobre o conteúdo crítico de cloretos (CEB, 1984).....	35
Figura 2.11- Efeito do conteúdo de C <sub>3</sub> A do cimento no tempo de iniciação da corrosão da armadura do concreto (Rasheeduzzafar et al., 1990).....	37
Figura 2.12- Teor de umidade dos poros do concreto em função da umidade do ambiente (Andrade, 1992). ....	40
Figura 2.13- Variação da intensidade de corrosão de armaduras no concreto conservado parcialmente submerso em água do mar (Andrade, 1992). ....	41

Figura 3.1- Fluxograma dos ensaios das séries normais.....	46
Figura 3.2- Fluxograma dos ensaios das séries inversas. ....	47
Figura 3.3- Cortes vertical e horizontal do corpo de prova. ....	49
Figura 3.4- Representação esquemática da câmara de carbonatação (Bauer, 1995). ....	55
Figura 4.1- Composição granulométrica das areias. ....	65
Figura 4.2- Evoluções das intensidades de corrosão das séries normais na carbonatação, para a/c=0,4 e cura de 28 dias. ....	67
Figura 4.3- Evoluções das intensidades de corrosão das séries normais na carbonatação, para a/c=0,7 e cura de 28 dias. ....	68
Figura 4.4- Evoluções dos potenciais de corrosão das séries normais na carbonatação, para a/c=0,4 e cura 28 dias. ....	69
Figura 4.5- Evoluções dos potenciais de corrosão das séries normais na carbonatação, para a/c=0,7 e cura 28 dias. ....	69
Figura 4.6- Evoluções das resistências ôhmica das séries normais na carbonatação, para a/c=0,4 e cura 28 dias. ....	70
Figura 4.7- Evoluções das resistências ôhmica das séries normais na carbonatação, para a/c=0,7 e cura 28 dias. ....	71
Figura 4.8- Evoluções das variações de massa das séries normais na carbonatação, para a/c=0,4 e cura 28 dias. ....	72
Figura 4.9- Evoluções das variações de massa das séries normais na carbonatação, para a/c=0,7 e cura 28 dias. ....	72
Figura 4.10- Evoluções das intensidades de corrosão das séries normais no ensaio com cloretos, para a/c=0,4 e cura 28 dias. ....	74
Figura 4.11- Evoluções das intensidades de corrosão das séries normais no ensaio com cloretos, para a/c=0,7 e cura 28 dias. ....	74
Figura 4.12- Evoluções dos potenciais de corrosão das séries normais no ensaio com cloretos, para a/c=0,4 e cura 28 dias. ....	75
Figura 4.13- Evoluções dos potenciais de corrosão das séries normais no ensaio com cloretos, para a/c=0,7 e cura 28 dias. ....	76
Figura 4.14- Evoluções das resistências ôhmica das séries normais no ensaio com cloretos, para a/c=0,4 e cura 28 dias. ....	77

Figura 4.15- Evoluções das resistências ôhmica das séries normais no ensaio com cloretos, para $a/c=0,7$ e cura 28 dias. ....	77
Figura 4.16- Evoluções das variações de massa das séries normais no ensaio com cloretos, para $a/c=0,4$ e cura 28 dias. ....	78
Figura 4.17- Evoluções das variações de massa das séries normais no ensaio com cloretos, para $a/c=0,7$ e cura 28 dias. ....	78
Figura 4.18- Evoluções das intensidades de corrosão das séries normais na carbonatação, para $a/c=0,4$ e cura 7 dias. ....	80
Figura 4.19- Evoluções das intensidades de corrosão das séries normais na carbonatação, para $a/c=0,7$ e cura 7 dias. ....	81
Figura 4.20- Evoluções dos potenciais de corrosão das séries normais na carbonatação, para $a/c=0,4$ e cura 7 dias. ....	82
Figura 4.21- Evoluções dos potenciais de corrosão das séries normais na carbonatação, para $a/c=0,7$ e cura 7 dias. ....	82
Figura 4.22- Evoluções das resistências ôhmica nas séries normais na carbonatação, para $a/c=0,4$ e cura 7 dias. ....	83
Figura 4.23- Evoluções das resistências ôhmica das séries normais na carbonatação, para $a/c=0,7$ e cura 7 dias. ....	84
Figura 4.24- Evoluções das variações de massa das séries normais na carbonatação, para $a/c=0,4$ e cura 7 dias. ....	84
Figura 4.25- Evoluções das variações de massa das séries normais na carbonatação, para $a/c=0,7$ e cura 7 dias. ....	85
Figura 4.26- Evoluções das intensidades de corrosão das séries normais no ensaio com cloretos, para $a/c=0,4$ e cura 7 dias. ....	87
Figura 4.27- Evoluções das intensidades de corrosão das séries normais no ensaio com cloretos, para $a/c=0,7$ e cura 7 dias. ....	87
Figura 4.28- Evoluções dos potenciais de corrosão das séries normais no ensaio com cloretos, para $a/c=0,4$ e cura 7 dias. ....	87
Figura 4.29- Evoluções dos potenciais de corrosão das séries normais no ensaio com cloretos, para $a/c=0,4$ e cura 7 dias. ....	88
Figura 4.30- Evoluções das resistências ôhmica das séries normais no ensaio com cloretos para $a/c=0,4$ e cura 7 dias. ....	89

Figura 4.31- Evoluções das resistências ôhmica das séries normais no ensaio com cloretos, para $a/c=0,7$ e cura 7 dias.....	89
Figura 4.32- Evoluções das variações de massa das séries normais no ensaio com cloretos, para $a/c=0,4$ e cura 7 dias.....	90
Figura 4.33- Evoluções das variações de massa das séries normais no ensaio com cloretos, para $a/c=0,7$ e cura 7 dias.....	90
Figura 4.34- Evoluções das intensidades de corrosão das séries inversas no ensaio com cloretos, para $a/c=0,4$ .....	92
Figura 4.35- Evoluções das intensidades de corrosão das séries inversas no ensaio com cloretos, para $a/c=0,7$ .....	92
Figura 4.36- Evoluções dos potenciais de corrosão das séries inversas no ensaio com cloretos, para $a/c=0,4$ .....	93
Figura 4.37- Evoluções dos potenciais de corrosão das séries inversas no ensaio com cloretos, para $a/c=0,7$ .....	94
Figura 4.38- Evoluções das resistências ôhmica das séries inversas no ensaio com cloretos, para $a/c=0,4$ .....	94
Figura 4.39- Evoluções das resistências ôhmica das séries inversas no ensaio com cloretos, para $a/c=0,7$ .....	95
Figura 4.40- Evoluções das variações de massa das séries inversas no ensaio com cloretos, para relação $a/c=0,4$ .....	96
Figura 4.41- Evoluções das variações de massa das séries inversas no ensaio com cloretos, para $a/c=0,7$ .....	96
Figura 4.42- Evoluções das intensidades de corrosão das séries inversas na carbonatação, para $a/c=0,4$ .....	97
Figura 4.43- Evoluções das intensidades de corrosão das séries normais na carbonatação, para $a/c=0,4$ .....	98
Figura 4.44- Evoluções dos potenciais de corrosão das séries inversas na carbonatação, para $a/c=0,4$ .....	99
Figura 4.45- Evoluções dos potenciais de corrosão das séries inversas na carbonatação, para $a/c=0,7$ .....	99
Figura 4.46- Evoluções das resistências ôhmica das séries inversas na carbonatação, para $a/c=0,4$ .....	100

Figura 4.47- Evoluções das resistências ôhmica das séries inversas na carbonatação, para $a/c=0,7$ .	100
Figura 4.48- Evoluções das variações de massa das séries inversas na carbonatação, para $a/c=0,4$ .	101
Figura 4.49- Evoluções das variações de massa das séries inversas na carbonatação, para $a/c=0,7$ .	102
Figura 4.50- Absorção capilar em função da raiz quadrada do tempo para os corpos de prova curados 28 dias.	103
Figura 4.51- Absorção capilar em função da raiz quadrada do tempo para os corpos de prova curados 7 dias.	103
Figura 4.52- Absorção por imersão total para os corpos de prova curados 28 dias.	104
Figura 4.53 Absorção por imersão total para os corpos de prova curados 7 dias.	105
Figura 4.54- Perda eletroquímica x gravimétrica dos corpos de prova com $a/c=0,4$ .	105
Figura 4.55- Perda eletroquímica x gravimétrica dos corpos de prova com $a/c=0,7$ .	106
Figura 5.1- Duração da fase de iniciação em horas para corpos de prova submetidos a ambientes contaminados por $CO_2$ e posteriormente por cloretos, curados 28 dias.	109
Figura 5.2- Duração da fase de iniciação em horas para corpos de prova submetidos a ambientes contaminados por $CO_2$ e posteriormente por cloretos, curados 7 dias.	109
Figura 5.3- Duração da fase de iniciação em horas para corpos de prova submetidos a ambientes contaminados por cloretos e posteriormente por $CO_2$ , curados 7 dias.	110
Figura 5.4- Intensidade de corrosão total para corpos de prova submetidos a ambientes contaminados por $CO_2$ e posteriormente por cloretos, curados 28 dias.	111
Figura 5.5- Intensidade de corrosão total para corpos de prova submetidos a ambientes contaminados por $CO_2$ e posteriormente por cloretos, curados 7 dias.	113
Figura 5.6- Intensidade de corrosão total para corpos de prova submetidos a ambientes contaminados por cloretos e posteriormente por $CO_2$ , curados 7 dias.	112

Figura 5.7-	Variação de massa da etapa de parcialmente submerso no ensaio de carbonatação para os corpos de prova curados 28 dias com relação água/cimento 0,4.....	115
Figura 5.8-	Variação de massa da etapa de parcialmente submerso no ensaio de carbonatação para os corpos de prova curados 28 dias com relação água/cimento 0,7.....	115
Figura 5.9-	Relação entre intensidade de corrosão e potencial de corrosão na carbonatação, para séries normais curadas 28 dias com relação água/cimento 0,4 e 0,7.....	120
Figura 5.10-	Relação entre intensidade de corrosão e potencial de corrosão na carbonatação, para séries normais curadas 7 dias com relação água/cimento 0,4 e 0,7.....	120
Figura 5.11-	Relação entre intensidade de corrosão e potencial de corrosão no ensaio com cloretos, para séries normais curadas 28 dias com relação água/cimento 0,4 e 0,7.....	121
Figura 5.12-	Relação entre intensidade de corrosão e potencial de corrosão no ensaio com cloretos, para séries normais curadas 7 dias com relação água/cimento 0,4 e 0,7.....	121
Figura 5.13-	Relação entre intensidade de corrosão e resistência ôhmica na carbonatação, para séries normais curadas 28 dias com relação água/cimento 0,4 e 0,7.....	122
Figura 5.14-	Relação entre intensidade de corrosão e resistência ôhmica na carbonatação, para séries normais curada 7 dias com relação água/cimento 0,4 e 0,7.....	123
Figura 5.15-	Relação entre intensidade de corrosão e potencial de corrosão no ensaio com cloretos, para séries inversas com relação água/cimento 0,4 e 0,7.....	125
Figura 5.16-	Relação entre intensidade de corrosão e potencial de corrosão na carbonatação, para séries inversas com relação água/cimento 0,4 e 0,7.....	126
Figura 5.17-	Relação entre intensidade de corrosão e resistência ôhmica, na carbonatação para séries inversas com relação água/cimento 0,4 e 0,7.....	127

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela</b>	<b>Página</b>
Tabela 3.1- Descrição dos cimentos utilizados.....	43
Tabela 3.2- Denominação das séries normais.....	46
Tabela 3.3- Denominação das séries inversas.....	47
Tabela 3.4- Etapas do ensaio cíclico.....	61
Tabela 4.1- Análise química dos materiais.....	64
Tabela 4.2- Propriedades físicas dos cimentos.....	65

## LISTA DE FOTOS

<b>Foto</b>	<b>Página</b>
Foto 3.1- Imersão da barra na solução de ácido clorídrico e hexametenotetramina.....	51
Foto 3.2- Lavagem e escovação da barra em água corrente. ....	51
Foto 3.3- Imersão das barras em acetona.....	52
Foto 3.4- Secagem das barras com jato de ar quente. ....	52
Foto 3.5- Capeamento dos corpos de prova. ....	53
Foto 3.6- Moldagem dos corpos de prova. ....	53
Foto 3.7- Aparato do ensaio de carbonatação.....	58
Foto 3.8- Condição parcialmente submerso em água após ensaio de carbonatação.....	58
Foto 3.9- Aparato de aquisição de dados.....	59
Foto 3.10- Detalhe do corpo de prova na aquisição de dados .....	59

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área de exposição da armadura
a/c	Água/cimento
Aft	Etringita
Afm	Etringita transformada na hidratação (monossulfato)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de alumínio
B	Constante dependente de ba e bc
ba	Tangente anódica de Tafel
bc	Tangente catódica de Tafel
C	Cura
C	Concentração de íons na solução
C-S-H	Gel amorfo coloidal
C <sub>3</sub> A	Aluminato tricálcico
C <sub>3</sub> S	Silicato tricálcico
C <sub>4</sub> AF	Ferro aluminato cálcio
Ca(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de cálcio
CaCl <sub>2</sub>	Cloreto de cálcio
CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de cálcio
CaSO <sub>4</sub>	Sulfato de cálcio
CH	Hidróxido de cálcio
Cl <sup>-</sup>	Cloreto
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
D	Coefficiente efetivo de difusão
D	Diâmetro equivalente da armadura
E <sub>corr</sub>	Potencial de corrosão
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de ferro
h	Altura ou penetração de água no capilar
H <sub>2</sub> O	Água
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Ácido sulfúrico

Hg	.....	Mercúrio
$i_{\text{corr}}$	.....	Intensidade de corrosão
$i_{\text{T}}$	.....	Intensidade de corrosão total
J	.....	Fluxo de íons
$\text{K}_2\text{O}$	.....	Óxido de potássio
l	.....	Comprimento da armadura
m	.....	Massa da armadura
MgO	.....	Óxido de magnésio
Mv	.....	Varição de massa dos corpos de prova
$\text{Na}_2\text{O}$	.....	Óxido de sódio
NaCl	.....	Cloreto de sódio
$\text{O}_2$	.....	Oxigênio
$\text{OH}^-$	.....	Íon hidroxila
$P_{\text{elet}}$	.....	Perda de massa eletroquímica
r	.....	Raio do capilar
Rohm	.....	Resistência ôhmica
$R_p$	.....	Resistência de polarização
$\text{SiO}_2$	.....	Óxido de silício
$\text{SO}_3$	.....	Trióxido de enxofre
$\text{SO}_4^{2-}$	.....	Íon sulfato
T	.....	Tempo considerado
UR	.....	Umidade relativa
X	.....	Profundidade considerada
$\Delta E$	.....	Varição de potencial
$\Delta I$	.....	Varição de corrente
v	.....	Tensão superficial
$\gamma$	.....	Massa específica da água

# 1 - INTRODUÇÃO

## 1.1 - IMPORTÂNCIA DO TEMA

As estruturas de concreto armado quando sujeitas a corrosão das armaduras, diminuem a sua vida útil, por ser este um mecanismo de deterioração que afeta significativamente a durabilidade, ocasionando conseqüências negativas para a estabilidade, funcionalidade e estética das estruturas. Sérios danos causados pela corrosão das armaduras do concreto manifestam-se sob a forma de expansão, fissuração, destacamento do cobrimento, perda de aderência e redução de seção da armadura. Devido ao elevado número de estruturas afetadas, a corrosão das armaduras tem sido um grande problema na construção civil. Em estudos recentes, Nince (1996), pesquisou a incidência de manifestações patológicas em estruturas de concreto na região Centro-Oeste, encontrando a maior percentagem de incidência para a corrosão das armaduras de 30,1 %, em Brasília.

As armaduras das estruturas de concreto armado, são originalmente passivas devido a elevada alcalinidade do concreto, que tem um pH acima de 12,6. Nestas condições as armaduras mantêm-se protegidas e não se desenvolve a corrosão. Entretanto, esta situação de equilíbrio pode ser alterada quando o pH do concreto é reduzido, como conseqüência da carbonatação ou penetração de cloretos. Quando esta situação de equilíbrio deixa de existir ocorre o fenômeno de despassivação da armadura.

A despassivação determina o fim do período de iniciação da corrosão, que é o período no qual as substâncias agressivas penetram avançando progressivamente até a armadura (Tuutti, 1982). Helene (1993), coloca que a duração da fase de iniciação deve corresponder a estimativa da vida útil de projeto da estrutura quanto à corrosão das armaduras. Esta despassivação pode ocorrer por carbonatação do concreto ou pela presença de cloretos. Estes fatores freqüentemente agem simultaneamente nas estruturas, ocasionando um efeito adicional na corrosão (Alonso & Andrade, 1988). Uma vez despassivada, dá-se início a fase de propagação, e já se observa as manifestações típicas do fenômeno da corrosão.

O tipo de cimento influencia na velocidade de carbonatação, já que a reserva alcalina é função, dentre outros fatores, da composição química do cimento e das adições. A carbonatação é geralmente mais rápida nos casos de cimentos com adições (Parrott, 1987). Al-Amoudi et al. (1991), constataram que adicionando cinza volante ao cimento, aumentava a profundidade de carbonatação. Bauer (1995) constatou um desempenho inferior de cimentos com 24% de adição de escória em relação a carbonatação, apesar do efeito benéfico de refinamento dos poros.

Com relação à penetração de íons cloretos, a composição química do cimento tem grande influência. Al-Amoudi et al. (1992), estudando diversos cimentos quanto ao desenvolvimento da corrosão por cloretos, concluem que os cimentos com adição de escória e microssilica tem desempenho superior. Bauer (1995), entretanto, constatou que a adição de 24% de escória de alto forno ao cimento, no caso de ingresso de cloretos, tem um efeito benéfico da capacidade de fixação de cloretos apenas para relação água/cimento abaixo de 0,5.

A relação água/cimento e a cura são um dos principais fatores que limitam tanto a carbonatação como o cloreto devido à influência na porosidade, ou seja na forma, no volume e na distribuição do tamanho de poros. Quanto menor a relação água/cimento e maior o período de cura menor o ingresso de substâncias agressivas.

As considerações mencionadas ilustram a complexa questão do desenvolvimento da corrosão nos casos dos cimentos com adições. Por um lado temos um comportamento positivo frente a ação de cloretos, com bom desempenho, e por outro lado, temos um aspecto negativo quanto a maior velocidade e profundidade da frente de carbonatação.

Não foi encontrada na literatura nacional nenhuma análise da corrosão das armaduras sob a ação conjunta do CO<sub>2</sub> e íons cloreto, em relação a capacidade de proteção dos cimentos nacionais. Sendo assim, devido a necessidade de um estudo neste sentido, foram escolhidos três tipos de cimentos facilmente encontrados no mercado nacional. Foi selecionado um cimento sem nenhuma adição pozolânica, um com adição de escória e outro com adição de escória e microssilica. Quanto à escolha do estudo da ação conjunta de CO<sub>2</sub> e cloretos, está

teve a intenção de idealizar uma situação mais próxima da real bem mais desfavorável do que se eles agissem separadamente.

## **1.2 - OBJETIVO DO TRABALHO**

O objetivo da presente dissertação é o estudo da capacidade de proteção de alguns tipos de cimentos nacionais, com e sem adições quanto a corrosão das armaduras sob a ação conjunta de CO<sub>2</sub> e íons cloreto, com diferentes relações água/cimento e períodos de cura, utilizando ensaios acelerados, com o uso da técnica de resistência de polarização (Rp), que nos permite avaliar de forma comparativa o desempenho dos cimentos estudados.

## **1.3 - CONTEÚDO DO TRABALHO**

A apresentação da dissertação é feita seguindo uma seqüência lógica, onde seus capítulos estão assim divididos:

O capítulo 2, compreende a abordagem de temas julgados importantes para um completo entendimento deste trabalho. Apresenta-se inicialmente conceitos de durabilidade, já que problemas patológicos, como corrosão de armaduras, podem reduzir a vida útil de uma estrutura. Em seguida, são apresentados os aspectos da microestrutura do concreto, com a intenção de conhecer como as adições podem influenciar a microestrutura. Enfoca-se então a corrosão das armaduras, seus aspectos conceituais e as técnicas para avaliação de corrosão. Menciona-se ainda os mecanismos de transporte tais como: absorção capilar, difusão e permeabilidade. Em seguida, descreve-se a iniciação da corrosão pela carbonatação e a iniciação da corrosão pelos íons cloreto. E por fim, aborda-se os fatores controladores da propagação de corrosão.

O procedimento experimental é abordado no capítulo 3. Apresenta-se a caracterização dos materiais, a definição das séries de ensaios e a confecção dos corpos de prova. Aborda-se principalmente a metodologia dos ensaios de corrosão acelerada por carbonatação e com

cloretos. E por fim, são apresentados os ensaios complementares destinados aos estudos de propriedades específicas dos materiais.

No capítulo 4 são mostrados os resultados seguindo uma seqüência similar a abordada no capítulo 3. No entanto, os resultados dos ensaios de corrosão acelerada estão divididos para as séries normais (carbonatação-cloreto) e inversas (cloreto-carbonatação). Ainda é incluída a perda gravimétrica, que comparada com as técnicas eletroquímicas serve como avaliação da precisão da metodologia aplicada.

A discussão dos resultados é apresentada no capítulo 5. Aborda-se inicialmente a influência da estrutura física nos resultados e posteriormente analisam-se os resultados encontrados nos ensaios de corrosão acelerada.

No capítulo 6 estão as conclusões finais baseadas e fundamentadas no presente trabalho.

Por fim, encontra-se no capítulo 7 as recomendações e sugestões resultantes da pesquisa que deveram ser objetos de pesquisas futuras.

## 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 - DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

#### 2.1.1 - Conceito de durabilidade

Sabe-se hoje que nenhum material estrutural é eternamente durável devido à sua interação com o meio ambiente. No caso das estruturas de concreto armado, a partir da década de 70, foi crescente a preocupação com a deterioração das estruturas e sua durabilidade. Segundo CIB W80/RILEM 71-PSL (1983) a durabilidade é “a capacidade que um produto, componente ou construção possui de manter o seu desempenho acima dos níveis mínimos especificados, de maneira a atender às exigências dos usuários, em cada situação específica.”

Em relação as estruturas de concreto a interação com o meio ambiente se dá em função de suas características físicas como: porosidade, permeabilidade, absorção, etc, e características químicas que dependem principalmente da composição do cimento e adições. Estas características permitirão uma maior ou menor capacidade de interação com os agentes agressivos presentes no meio ambiente.

Atualmente na etapa de projeto de uma estrutura os fatores relacionados com a durabilidade devem ser levados em consideração tão cuidadosamente quanto outros aspectos tais como: estabilidade estrutural, funcionalidade e estética. A Figura 2.1, ilustra esquematicamente um modelo de equilíbrio de uma estrutura de concreto considerando outros fatores além das ações mecânicas (Selinger, 1992).

A nível mundial uma das principais causas de deterioração das estruturas de concreto é a corrosão das armaduras (Chamosa & Ortiz, 1985). Não existe um levantamento estatístico de causas de deterioração para todo Brasil mas Carmona & Marega (1988) encontraram, para o estado de São Paulo, que 31% das causas de deterioração se devem à corrosão. Nince

(1996) em trabalho recente na região Centro-Oeste constatou que dos 401 casos de problemas patológicos 17,98 % correspondem à corrosão de armaduras.

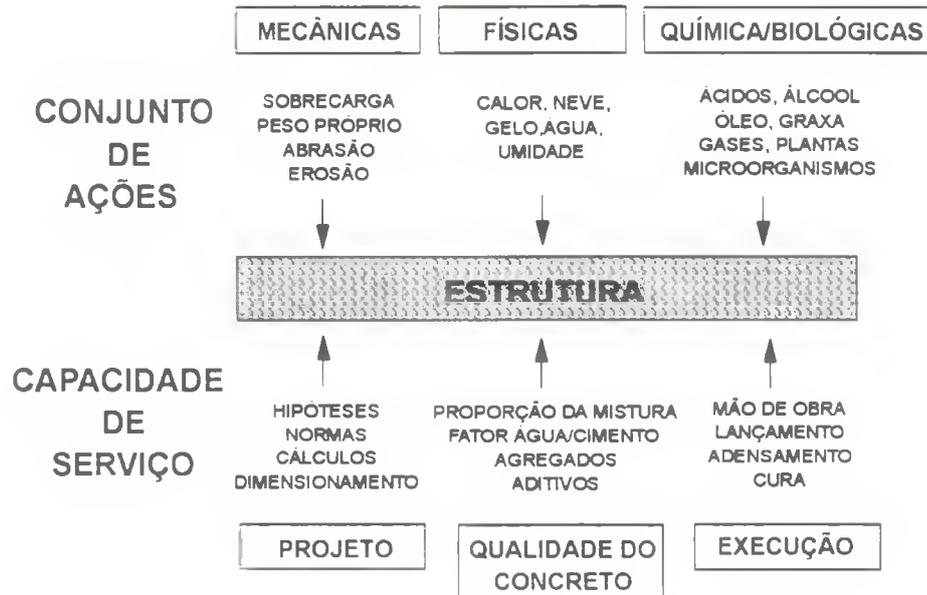


Figura 2.1- Representação esquemática de um modelo de equilíbrio de uma estrutura onde se consideram os fatores relacionados a durabilidade (Selinger, 1992).

### 2.1.2 - Conceito de vida útil

Considerando que o concreto tem sua durabilidade limitada é importante que as estruturas sejam projetadas para determinada vida útil. Define-se como vida útil, o tempo em que a estrutura se mantém dentro de um limite mínimo de comportamento em serviço para qual foi projetada, sem elevados custos de manutenção e reparação (CEB, 1989).

Uma contribuição importante neste campo foi o estudo feito por Tuutti (1982), que introduziu um modelo teórico de vida em serviço, aplicada a corrosão de armaduras, e que hoje já foi estendido a outros tipos de deterioração das estruturas (Rostam, 1991). A Figura 2.2 representa esquematicamente o seu modelo, que é dividido em duas etapas distintas.

A primeira etapa chamada de "iniciação", é o período em que os agentes agressivos, que provocam a corrosão das armaduras, o dióxido de carbono e o cloreto, penetram desde o exterior avançando progressivamente até a armadura e quando alcançam um teor crítico

provocam o rompimento de sua película protetora. A duração da fase de iniciação é controlada principalmente pela permeabilidade, difusão e sucção capilar gases ou líquido. Helene (1993), considera que a duração da fase de iniciação deve corresponder a estimativa da vida útil de projeto da estrutura quanto à corrosão.

A segunda etapa chamada de "propagação", é caracterizada por uma intensificação do processo de corrosão principalmente pela presença do oxigênio, umidade e temperatura.

Estes aspectos serão abordados em maiores detalhes no item 2.3.

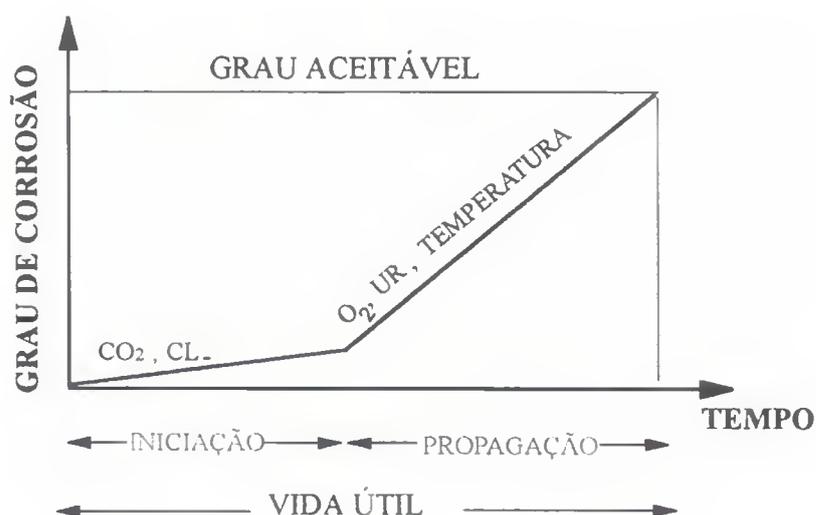


Figura 2.2- Representação esquemática do modelo de vida útil, modificado (Tuutti, 1982).

## 2.2 - ASPECTOS DA MICROESTRUTURA DO CONCRETO

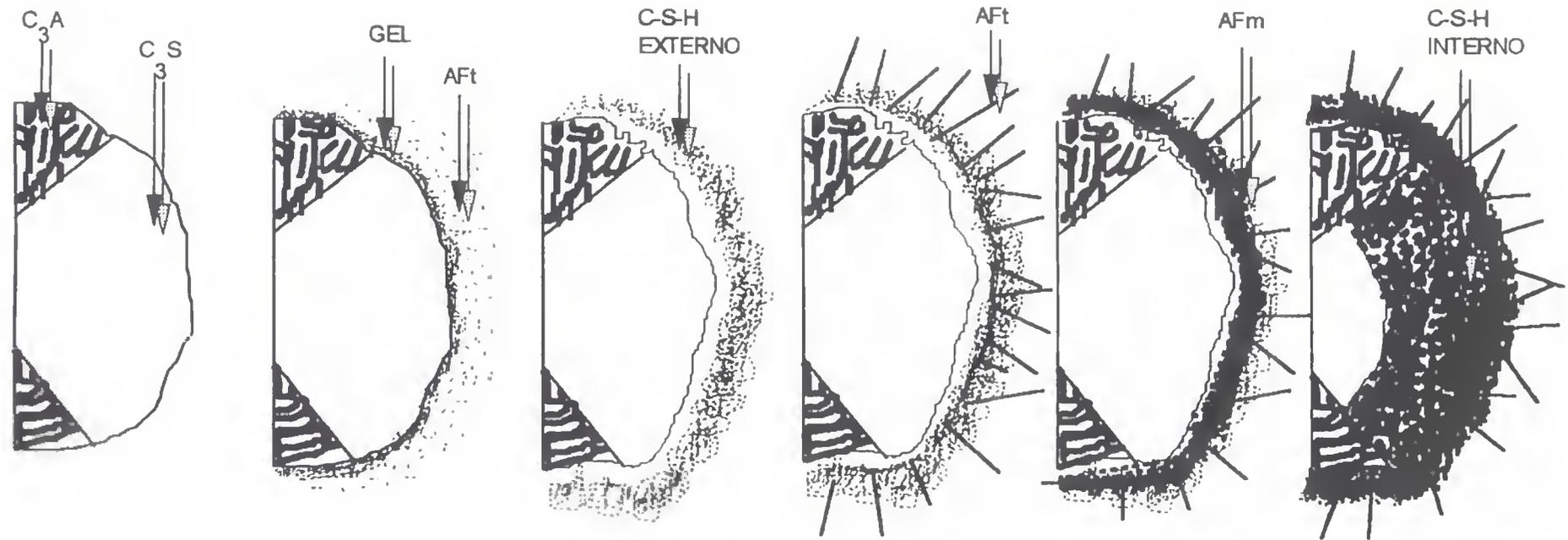
A durabilidade do concreto está intimamente relacionada com sua microestrutura interna, que define principalmente a sua porosidade. Vários são os aspectos que definem a característica da microestrutura do concreto podendo-se ressaltar os mecanismos de hidratação do cimento, estrutura dos poros e a fase aquosa.

### 2.2.1 - Hidratação do cimento

O cimento anidro só adquire propriedades aglomerantes quando misturado a água. Esta reação química do cimento com a água é chamada de hidratação. As reações de hidratação produzem transformações físicas e químicas no produto hidratado de grande significado para a tecnologia dos concretos.

Existem dois mecanismos de hidratação do cimento portland, definidos por Mehta (1986). A hidratação por dissolução-precipitação, que envolve a dissolução dos compostos anidridos em seus constituintes iônicos, formação de hidratos na solução e, devido à sua baixa solubilidade, uma eventual precipitação de hidratos provenientes da solução supersaturada, e a hidratação pelo mecanismo topoquímico onde a reação de hidratação ocorre diretamente sobre a superfície do cimento anidro sem passagem para solução. Taylor (1992), considera a existência de três estágios da fase de hidratação do cimento:

- Estágio 1- Correspondente ao período inicial de hidratação, logo após o contato com a água, ocorre formação de uma membrana de gel (amorfo, coloidal, rico em alumina e sílica) sobre a superfície dos grãos. Após 10 minutos, já se verifica a presença de agulhas de etringita (Aft), sendo que as mesmas ocorrem na superfície do grão e a uma certa distância do mesmo (Fig. 2.1 a e 2.1 b).
- Estágio 2- Correspondente ao período de hidratação propriamente dito, de 3 a 24 horas constata-se a reação de cerca de 30% do cimento caracterizando-se pela rápida formação de C-S-H e CH. O C-S-H forma uma pequena camada ao redor do grão, envolvendo-o e ocorrendo nucleação de forma ocasional junto às agulhas de etringita (Figuras 2.3 c e 2.3 d). Nesta etapa ocorre a formação de um espaço entre a camada externa e o grão anidro, como pode ser visto na Figura 2.3 c. Este espaço provavelmente é preenchido por uma solução altamente concentrada ou coloidal. A existência de espaços demonstra que a reação de hidratação ocorre por dissolução-precipitação. Ao final do estágio 2, constata-se nova germinação de cristais de etringita (AFt) de forma mais circular do que inicialmente (Fig. 2.1d).



a. Seção de um grão polimíneral anidro

b. 10 minutos

Parte do  $C_3A$  reage com sulfato de cálcio em solução. Forma-se um gel amorfo sobre a superfície rico em aluminato ocorrendo nucleação de pequenas agulhas de AFt

c. 10 horas

Reação do  $C_3S$  produzindo C-S-H externo à superfície do grão ocorrendo nucleação a partir das agulhas de AFt

d. 18 horas

Hidratação secundária do  $C_3A$  produzindo longas agulhas de AFt. Consta-se o início da formação de C-S-H interno através da continuidade da hidratação do  $C_3S$

e. 1 a 3 dias

$C_3A$  reage com algum AFt da região interna formando placas hexagonais de AFm. A contínua formação dos produtos internos reduz a separação entre a região anidra e a camada externa hidratada

f. 14 dias

Suficiente C-S-H interno foi formado para preencher o espaço entre o grão e a camada externa. O C-S-H externo torna-se mais fibroso

Figura 2.3- Hidratação do cimento portland (Scrivener, citado por Bauer, 1995).

- Estágio 3- Correspondente ao período final da hidratação, O C-S-H começa a ser depositado internamente ao grão por causa do decréscimo da permeabilidade da camada envolvente do grão. O espaço entre a camada externa e a região anidra é preenchido, até aos 7 dias na sua totalidade. A concentração de sulfatos cai rapidamente na região interna devido à reação da fase aluminato (Aft se transforma em Afm). Após o preenchimento do espaço entre a camada externa e a região anidra, as reações são lentas ocorrendo por mecanismo topoquímico (Fig. 2.1 e).

As diferenças da composição e estrutura do C-S-H depende do tipo de cimento e da presença (natureza e quantidade) de adições no clínquer.(Calleja, 1986).

### 2.2.2 - Estrutura dos poros

A estrutura dos poros influencia diversas propriedades do concreto tais como: resistência mecânica, permeabilidade, absorção capilar, difusão iônica, com conseqüências para a durabilidade.

Segundo Mehta (1986), a pasta de cimento contém diferentes tipos de vazios, os quais têm uma influência importante nas suas propriedades:

- Espaço interlamelar no C-S-H- Powers, citado por Mehta (1986), assumiu que a largura do espaço interlamelar na estrutura do C-S-H é de 18 Å e verificou que ele é responsável por 28% da porosidade capilar no C-S-H sólido. Entretanto, este tamanho de vazio é muito pequeno para ter um efeito desfavorável sobre a resistência e a permeabilidade da pasta.
- Vazios capilares- Representam o espaço não preenchido pelos componentes sólidos da pasta, sendo o volume e o tamanho dos capilares determinado pela distância inicial entre as partículas de cimento anidro na pasta de cimento recém-misturada e o grau de hidratação do cimento. Em pastas bem hidratadas, de baixa relação água/cimento, os vazios capilares podem variar entre 10 e 50 µm.

A caracterização do sistema poroso da pasta geralmente é feita a partir da porosidade, da distribuição do tamanho e volume dos poros e do tamanho médio de poros, geralmente

obtidos a partir de técnicas de porosimetria de Hg e de adsorção de N<sub>2</sub> (Uchikawa, 1986; Mehta, 1986).

A porosidade está mais relacionada com o tamanho dos poros do que com o seu volume total, ou seja, quanto menor, maior é a resistência ao ataque químico (Asgeirsson & Gudmundsson, citados por Calleja, (1986). Uchikawa (1986) considera que poros maiores do que 100 nm são contínuos enquanto que poros menores do que este valor são provavelmente descontínuos.

### **2.2.3 - Fase aquosa**

A fase aquosa é constituída da água presente nos poros em função de um certo grau de umidade de equilíbrio, e fica distribuída principalmente nos poros capilares da matriz do cimento, onde ficam dissolvidos os principais componentes solúveis do cimento hidratado. Assim os íons provenientes do hidróxido de cálcio e dos compostos alcalinos: Ca<sup>2+</sup>, OH<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, e K<sup>+</sup> serão os responsáveis pelo elevado pH (>13) (Mehta, 1986).

Taylor (1992), estudando a composição da fase aquosa, observou que a concentração inicial de cada um dos íons presentes (Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, OH<sup>-</sup>) depende principalmente do tipo e teor de cimento e da relação água/cimento.

A importância de um pH elevado na fase aquosa, e a sua manutenção ao longo do tempo, é de grande importância em relação a corrosão das armaduras. Com um pH elevado, forma-se e mantém-se uma película de óxidos passivante envolvendo a armadura, de natureza protetora, propiciando valores muito pequenos e desprezíveis de intensidade de corrosão (Andrade, 1984).

A composição da fase aquosa influencia a reação de carbonatação, pois esta depende do NaOH, KOH e Ca(OH)<sub>2</sub> dissolvidos que reagem com o CO<sub>2</sub> do ar, com conseqüente redução do pH (Tuutti, 1982).

#### 2.2.4 - Influência das adições na microestrutura

Com o objetivo de melhorar entre outras propriedades, a durabilidade do concreto, a moderna tecnologia tem utilizado adições minerais de diversas origens especialmente escória de alto-forno, microssílica, cinza volante além de outras adições com propriedades pozolânicas.

As adições ativas usadas nos cimentos, de maneira geral, devido às reações de hidratação, têm um efeito de refinamento dos poros que é de grande importância no que se refere ao aumento da durabilidade, dificultando principalmente o ingresso de substâncias agressivas (Mehta, 1986).

##### 2.2.4.1 - Filer

O pó ou filer calcário é uma adição muito utilizada na maioria dos cimentos nacionais. Apesar de ser predominante inerte, Cincotto (1988) observou que a interação entre os constituintes ativos do calcário e os compostos de hidratação do cimento, afetam de algum modo as características físico-químicas e mecânicas da pasta.

O filer calcário interfere na reação de hidratação por intermédio de sua finura e da sua reatividade química, formando com a pasta de cimento ligações que melhoram as resistências mecânicas, quando comparado com um filer inerte como o quartzo. O  $C_3S$  e  $C_3A$  hidratam-se mais rapidamente num cimento com adição de filer do que num cimento portland comum. Há uma maior formação de CH e ocorrem modificações morfológicas do C-S-H (Cincotto, 1988).

Ramachandran & Chun-mei (1986), estudando cimentos com filer, relatam que o decréscimo da resistência nas idades mais altas, decorre do aumento da porosidade total da pasta, provavelmente pela adição de filer.

#### 2.2.4.2 - Escória de alto-forno

A escória de alto-forno consiste de um subproduto da fabricação da gusa em alto-forno. Utilizada como adição ao cimento portland, caracteriza-se por apresentar propriedades hidráulicas latentes (Uchikawa, 1986).

A principal propriedade da escória que a habilita a ser empregada como adição, é a sua significativa reatividade, a qual depende da composição química, do teor de sílica amorfa e da finura (Taylor, 1992).

Na hidratação do cimento de alto-forno, parte do hidróxido de cálcio produzido pelo cimento portland é consumido pela escória constituinte do cimento, o que significa que a reserva alcalina é conseqüentemente menor (Mehta, 1986).

Nos instantes iniciais da hidratação da escória no cimento constata-se uma dissolução inicial da escória ocorrendo principalmente dissolução de  $\text{Ca}^{2+}$  na fase aquosa. Após esta etapa o processo atinge um período no qual é acompanhado pela formação de etringita ( $\text{Af}_i$ ) ocorrendo redução da concentração de íons  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Al}^{2+}$  da fase líquida. Uma vez formada a etringita, e com um pH próximo a 12 constata-se a aceleração da hidratação (Roy, 1989).

Em relação aos produtos da hidratação da escória observa-se baixos teores de CH, e diferentes relações de C/S (do C-S-H). Para um cimento com 70% de escória, aos 28 dias Taylor (1992), encontrou C/S de 0,9 a 1,3. Embora o produto formado em reações de hidratação seja o C-S-H, este é diferenciado pela relação  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  segundo a origem, cujo valor diminui na ordem: cimento portland > escória de alto-forno > pozolana (Mehta, 1994).

O grau de supersaturação da fase aquosa é gradualmente diminuído pela precipitação do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e da concentração de  $\text{Ca}^{2+}$ . A formação da baixa relação C/S do C-S-H depende largamente da concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  da fase aquosa (Uchikawa, 1986).

De acordo com Feldman, citado por Calleja (1986) a porosidade total de um cimento com adição de escória é maior, porém possui poros mais refinados do que um cimento portland comum. Al-Amoudi et al. (1993) trabalhando com  $a/c=0,45$  e um teor de escória de 60% observaram um melhor desempenho do cimento de alto-forno em relação a corrosão das armaduras, atribuído a uma aparente estrutura descontínua dos poros que reduz a permeabilidade. Uchikawa (1986) relata que é pequeno o volume de poros maiores do que 100  $\eta\text{m}$  nas pastas de cimento de alto-forno, mesmo em baixas idades, significando então que existe um maior volume de poros descontínuos.

O coeficiente de permeabilidade de uma pasta de cimento com 70% de escória é consideravelmente menor do que uma pasta de cimento com 30% de escória, embora tenha um volume de vazios total muito maior. A porosidade de uma pasta com 70% de escória é formada por poros de 45 até 150  $\text{Å}$ , sendo assim, mais difícil de penetrar do que a porosidade de uma pasta de 30% de escória (Manmohan & Mehta, citados por Calleja, 1986).

#### 2.2.4.3 - Microssílica

A microssílica é uma pozolana altamente reativa, subproduto de fornos a arco e da indução das indústrias de silício-metálico e ligas de ferro-silício. Comparando com o cimento portland comum, apresenta distribuição granulométrica das partículas duas ordens de grandeza mais finas (Mehta, 1986), o que significa uma superfície específica de 20  $\text{m}^2/\text{g}$ .

Na hidratação, a reação da microssílica com  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  é afetada pela área da superfície específica, distribuição do tamanho das partículas e energia superficial causada pela pequena tensão da estrutura do  $\text{SiO}_2$ . A hidratação do  $\text{C}_3\text{S}$  é acelerada pela adição da microssílica, como também a hidratação do  $\text{C}_3\text{A}$  e do  $\text{C}_4\text{AF}$ , reduzindo com isto o efeito retardador do  $\text{CaSO}_4$  na hidratação do  $\text{C}_3\text{A}$  e  $\text{C}_4\text{AF}$  (Uchikawa, 1986).

Em relação aos produtos da hidratação da microssílica, todo o CH formado na hidratação do clínquer é consumido pelas reações pozolânicas e observa-se valores para a relação C/S do (C-S-H) tão pequenos quanto 1,2 (Sellevold et al., citados por Calleja, 1986),

sendo menor que os valores encontrados para o cimento Portland comum que estão entre 1,5 e 2,5 (Calleja, 1986).

Em concretos com microssilica, observou-se que o volume dos poros grandes, maiores do que 100  $\eta\text{m}$ , considerados contínuos, decresce muito rapidamente com o tempo. A redução dos poros capilares e do diâmetro dos poros nas pastas de cimento com microssilica em idades jovens, é causada pelo empacotamento das partículas pequenas e da rápida iniciação da reação pozolânica (Uchikawa, 1986).

O  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  dissolvido na fase aquosa é reduzido imediatamente depois da mistura da pasta de cimento com adição de microssilica com a água, porém em seguida há um rápido aumento mais cedo do que o aumento que acontece com o cimento sem adição. (Uchikawa, 1986).

## **2.3 - CORROSÃO DAS ARMADURAS**

### **2.3.1 - Fundamentos da corrosão**

Os metais encontram-se, em geral, na natureza formando compostos tais como óxidos, com outros elementos. Para usá-los em sua forma elementar é preciso extrair o metal mediante um processo de redução. O processo inverso pelo qual o metal volta ao seu estado natural vai acompanhado de uma redução da sua energia, isto é, tem lugar através de uma reação espontânea. Este processo, que corresponde a uma oxidação, é conhecido por corrosão e pode representar a destruição paulatina do metal (Andrade, 1992).

A corrosão metálica em um meio aquoso é um fenômeno de caráter eletroquímico, isto é, supõe-se uma reação de oxidação e uma de redução a movimentação de elétrons através do metal, e a circulação de íons através do eletrólito, o que pressupõe a formação de um circuito fechado.

Quando em meio aquoso, a corrosão dá origem a íons em dissolução, os quais podem participar em reações de equilíbrio com outros do meio, incluídos os da água. Portanto, a corrosão depende de uma série de reações nas que intervêm direta ou indiretamente, os íons da água, isto é, dependem do pH do meio.

Como o potencial do processo de corrosão depende do equilíbrio das reações de corrosão com o pH, pode-se estabelecer uma relação em função do pH, que são representados graficamente, como diagrama de Pourbaix (Page, 1988) conforme é mostrado na Figura 2.4.

O diagrama está dividido em 3 zonas: imunidade, passivação e corrosão. Na zona de imunidade, o metal não se corroe permanecendo estável para qualquer valor de pH. A zona definida como passivação é onde o metal se recobre de uma capa de óxidos transparente e imperceptível, e que esta atua como uma barreira impedindo a oxidação posterior. E finalmente no estado de corrosão, o pH e o potencial eletroquímico estabelecem condições termodinâmicas para que os óxidos da capa passiva não sejam mais estáveis. Os íons do metal são a fase estável.

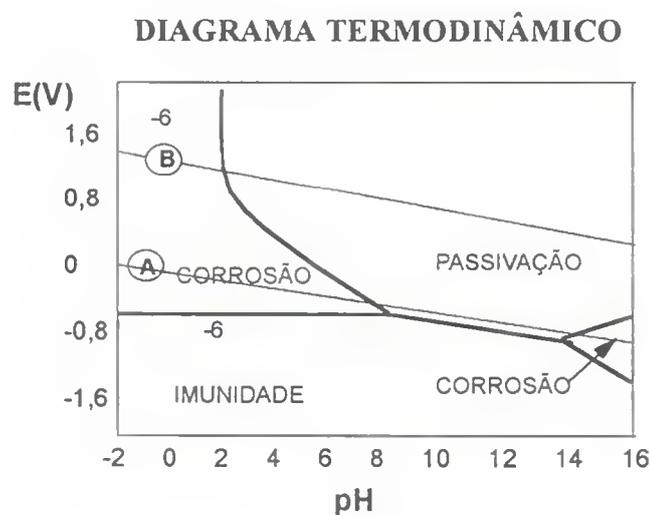


Figura 2.4- Diagrama simplificado de Pourbaix, pH em função do potencial eletroquímico do ferro, para 25° C (Page, 1988).

Os parâmetros que determinam a velocidade ou taxa de corrosão ou seja, a cinética da reação, são dentre outros a natureza do eletrólito, a resistividade elétrica do meio e a disponibilidade de oxigênio (Andrade, 1992).

### 2.3.2 - Passivação das armaduras no concreto armado

A elevada alcalinidade da solução aquosa dos poros do concreto favorece a formação e manutenção de um filme de óxido aderente a superfície do aço que evita a dissolução anódica dos íons ferrosos e portanto passiva o aço.

A elevada alcalinidade do meio, com pH entre 12,5 a 13,5 é obtida às custas da formação de hidróxidos durante a hidratação do cimento. Quando o filme de passivação não é formado, ou destruído, pode haver corrosão.

### 2.3.3 - Natureza eletroquímica da corrosão de armaduras no concreto

A formação de uma célula eletroquímica ou célula de corrosão no concreto depende da existência de quatro componentes. Um ânodo, onde ocorre reação de oxidação ou dissolução; um cátodo, onde ocorre a reação de redução; um condutor metálico, no caso a armadura, que permite um fluxo de elétrons e um eletrólito que é a fase aquosa do concreto, onde ocorre o fluxo de íons. As áreas anódicas e catódicas surgem como resultado de diferenças de potencial elétrico das regiões das armaduras (Andrade, 1992).

Para ocorrer o processo de corrosão deve existir, como já foi dito, um circuito elétrico completo entre as áreas anódicas e catódicas do aço. No que se refere às reações envolvidas, a reação anódica mais provável para o caso da corrosão das armaduras é:



Enquanto as possíveis reações catódicas são:





A primeira reação catódica ocorre geralmente em meios aerados de pH neutros e básicos ( $\text{pH} \geq 7$ ). Já a segunda reação é típica de meios ácidos ( $\text{pH} < 7$ ) e desaerados (Andrade & Feliu, 1991).

A Figura 2.5 mostra a ilustração esquemática da corrosão da armadura no concreto (Moskvín et al., 1983).

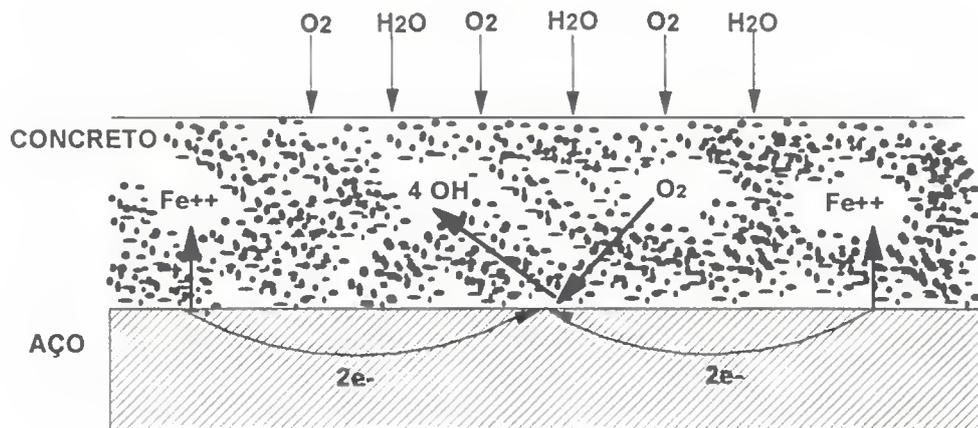


Figura 2.5- Ilustração esquemática da corrosão da armadura no concreto (Moskvín et al., 1983).

As armaduras no concreto permanecem, em condições normais, em um meio alcalino que permite que elas trabalhem na região de passividade do diagrama de Pourbaix. Entretanto esta passividade pode ser alterada pela penetração principalmente de dois agentes agressivos que estabelecem as condições para que a corrosão ocorra:

- o  $\text{CO}_2$ , que provoca a carbonatação da pasta do cimento, com redução do pH para valores em torno de 9;
- os íons cloreto, que podem romper pontualmente a película passiva, quando a relação  $\text{Cl}^-/\text{OH}^- \geq 0,6$ ; Hausman (1967).

A penetração destes agentes agressivos se dá através de mecanismos de transporte que controlam a penetração de gases e líquidos no concreto, como será visto no item 2.4.

#### **2.3.4 - Técnicas para avaliação de corrosão**

O processo de corrosão das armaduras de concreto armado resulta em diferentes estágios de deterioração, como por exemplo: manchas marrom-avermelhadas, fissuras e lascamento do cobrimento. Entretanto, antes deste estágio aparente, a armadura corroe sem nenhum sinal externo de deterioração o que dificulta a observação.

Até recentemente o estudo da corrosão era feito através de ensaios destrutivos, submetendo os corpos de prova a ambientes agressivos e analisando as amostras no final do ensaio, avaliando principalmente a perda de massa das armaduras. Entretanto, esta técnica não permite avaliar a intensidade de corrosão quando variam as condições de exposição em um determinado instante, o que levou vários pesquisadores (Stratful, 1973; Andrade, 1973; John et al., 1981) a estudar a utilização de técnicas eletroquímicas em estruturas de concreto.

##### **2.3.4.1 - Técnicas eletroquímicas**

As técnicas eletroquímicas buscam interpretar as variáveis que intervêm no processo eletroquímico da corrosão no momento em que acontece o fenômeno. Contudo, estas técnicas não eram muito usadas para estudar o processo de corrosão das armaduras de concreto armado por dificuldades experimentais especialmente devido a elevada resistividade do concreto. Elas começaram a ser difundidas a partir da década de 70.

Algumas técnicas eletroquímicas são freqüentemente aplicadas ao estudo da corrosão das armaduras, tais como: Resistência de polarização (Andrade, 1973; Page et al., 1991; Nepomuceno, 1992; Figueiredo, 1994; Bauer, 1995), registro do potencial de corrosão (Stratful, 1973; Bauer & Souza, 1989), medidas de impedância (John et al., 1981; Alonso & Andrade, 1988), resistividade elétrica (Farias e Tezuka, 1992) e medidas de intensidade

galvânica (Schiessel, 1992; Nepomuceno, 1992). A seguir se desenvolverá a técnica de resistência de polarização que foi aplicada no programa experimental deste trabalho.

#### a) Resistência de polarização

A Resistência de Polarização ( $R_p$ ) como técnica que permite a estimativa da velocidade instantânea de corrosão de um metal em um meio, foi descrita por Stern & Geary (1957). O cálculo da velocidade instantânea de corrosão é feito utilizando corrente contínua e medindo a variação do potencial com a corrente quando se aplica ao sistema em equilíbrio uma polarização (varredura potenciodinâmica) de  $\pm 10$  a 20 mV.

O procedimento se baseia nas curvas de polarização que são praticamente retas em torno do potencial de corrosão, e sua tangente está relacionada com a velocidade de corrosão. A tangente da curva potencial-corrente na região do potencial de equilíbrio corresponde a grandeza  $R_p$ .

$$R_p = \left( \frac{\Delta E}{\Delta I} \right) \quad \Delta E \rightarrow 0 \quad (2.1)$$

$R_p$ - Resistência de polarização [ $k\Omega \text{ cm}^2$ ];

E- Potencial [mV];

I- Corrente [ $\mu \text{ A}$ ].

A intensidade de corrosão é então calculada através da equação de Stern & Geary (1957):

$$i_{\text{corr}} = \frac{B}{AR_p} \quad (2.2)$$

$i_{\text{corr}}$ - Intensidade instantânea de corrosão [ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ];

B- Constante;

A- Área de exposição da armadura;

R<sub>p</sub>- Resistência de polarização [kΩ cm<sup>2</sup>].

B é uma constante empírica normalmente determinada em função das tangentes de Tafel, b<sub>a</sub> e b<sub>c</sub> para a zona anódica e catódica que dependem do metal e do meio.

$$B = \frac{b_a b_c}{2,3(b_a + b_c)} \quad (2.3)$$

O valor de B não tem sido precisamente determinado para as armaduras de concreto armado, mas normalmente fica entre 13 e 52 mV dependendo do sistema.

Os primeiros pesquisadores a empregar esta técnica no concreto armado foram (Andrade, 1973; Andrade & Gonzalez, 1978). Estes pesquisadores encontraram relações quantitativas aceitáveis entre as estimativas eletroquímicas e gravimétricas superando a dificuldade prática da determinação da constante B para o caso do concreto. Os valores propostos são 26 mV para armaduras em estado ativo de corrosão e 52 mV para armaduras em estado passivo de corrosão. Gonzalez et al., (1985) destacam que a técnica possui um fator de erro associado a 2 quanto a estimativa de i<sub>corr</sub>, erro este associado a determinação de B.

A técnica permite a velocidade instantânea de corrosão em cada momento do ensaio, o que nos leva a intensidade de corrosão total (i<sub>t</sub>) através da integração da curva de i<sub>corr</sub> x tempo. Utilizando-se a fórmula de Faraday é possível calcular a perda de massa eletroquímica e compará-la com a perda de massa gravimétrica.

$$i_t = \int i_{corr} dt \quad (2.4)$$

Para medir a resistência de polarização é necessário um potenciostato, que para experimentos em concreto, tenha uma compensação eletrônica para a queda ôhmica. Os

detalhes operacionais da técnica serão apresentados no capítulo 3. Acompanhando o processo de corrosão, medidas periódicas são necessárias e valores de  $i_{\text{corr}}$  são apresentados em função do tempo.

Esta técnica é muito rápida e tem uma importante vantagem de não ser destrutiva devido à pequena polarização aplicada. Um mesmo corpo de prova permite inúmeras medidas. Sua principal utilidade está justamente em que, medindo a velocidade de corrosão ao longo do tempo, é possível determinar a vida residual da estrutura, considerando que se pode conhecer a perda de seção ocorrida antes do momento da medida.

Esta técnica, mais difundida para ensaios de laboratório começa a ser aplicada também em estruturas reais através do confinamento do sinal de corrente, através do equipamento denominado GECOR (Andrade & Alonso, 1992).

#### **b) Medidas de potencial de corrosão**

O registro do potencial de corrosão nas armaduras de concreto é uma técnica limitada pois só dá informações termodinâmicas do processo de corrosão. Junto com o pH do meio tem-se uma idéia qualitativa da corrosão através do diagrama de Pourbaix, indicando riscos graves no estado ativo e garantias de durabilidade suficiente no estado passivo, ou das condições de imunidade.

Stratful (1973) a utilizou muito para realizar mapas de potencial em estruturas, identificando através dos potenciais mais negativos as zonas com possível corrosão (ânodo) em relação aos mais passivos (cátodo). A técnica permite determinar onde pode haver corrosão no momento da medida mas não o grau de ataque sofrido pela estrutura.

A medida de potencial consiste na determinação da diferença de potencial elétrico entre o aço das armaduras e um eletrodo de referência que se coloca em contato com a superfície do concreto. Uma vantagem do método de medida de potencial de corrosão é que ele pode ser

aplicado tanto para pequenos corpos de prova em laboratório quanto em estruturas de grandes dimensões.

As principais circunstâncias que podem conduzir a conclusões errôneas nas medidas de potencial são: teor de umidade de concreto, teor de oxigênio disponível, diferentes espessuras de revestimento de concreto, presença de fissuras no concreto e a existência de correntes erráticas (Andrade, 1992).

A norma ASTM-C-876 (1992) estabelece como parâmetros orientativos do estado de corrosão os seguintes valores para a probabilidade de corrosão, para eletrodo de cobre/sulfato de cobre.

- >95%       $E_{\text{corr}} < -350 \text{ mV}$
- <5%       $E_{\text{corr}} > -200 \text{ mV}$
- Aprox 50%     $-200 \text{ mV} < E_{\text{corr}} < -350 \text{ mV}$

### **c) Medidas de resistividade**

Após a despassivação da armadura, o processo de corrosão é governado pela disponibilidade de oxigênio e pela resistividade elétrica do concreto. A resistividade depende fundamentalmente da umidade contida nos poros do concreto (Andrade, 1992).

A resistividade tem um comportamento muito distinto dependendo do tipo de agressivo, havendo uma boa correlação entre seu valor e a velocidade de corrosão, principalmente devido a carbonatação.

As características do concreto variam consideravelmente durante o processo de hidratação e conseqüentemente fatores tais como o tipo de cimento, relação água/cimento e a idade são de extrema importância, e influenciam diretamente na resistividade elétrica (Gjorv et al., 1977).

As medidas de resistividade em estruturas reais se realizam normalmente através do método dos quatro eletrodos de Wenner (Millard et al., 1990) e em laboratório, utilizando a técnica de Resistência de polarização pode-se determinar a resistência ôhmica e conseqüentemente a resistividade de concretos e argamassas por correlações.

#### **d) Outras técnicas eletroquímicas**

Outras técnicas eletroquímicas usadas ao estudo da corrosão das armadura são: impedância eletroquímica, curvas de polarização e ruído eletroquímico.

#### **2.3.4.2 - Técnicas não eletroquímicas**

Algumas técnicas não eletroquímicas podem ser usadas na avaliação do processo de corrosão, podendo citar as técnicas gravimétricas, as observações visuais e microscópicas.

### **2.4 - MECANISMOS DE TRANSPORTE**

Como se comentou anteriormente a penetração dos agentes agressivos no concreto ocorre basicamente por transporte, através dos poros da matriz do cimento e das microfissuras. Os mecanismos de transporte destas substâncias no concreto dependem: a) das características químicas e físicas de sua concentração superficial e das condições ambientais, b) da microestrutura (tipo e distribuição de tamanho dos poros e presença de microfissuras), c) do grau de umectação do concreto, e d) da temperatura.

Estes fatores determinam o tipo de mecanismo de penetração de agressivo, tais como a absorção capilar, difusão e a penetração por pressão (permeabilidade). Por outro lado a capacidade de combinação dos agressivos por parte do concreto através de reações químicas ou da adsorção física, dificulta a penetração do agressivo.

A Figura 2.6 representa esquematicamente a interação entre o concreto e o ambiente contaminado por agentes prejudiciais a durabilidade das armaduras.

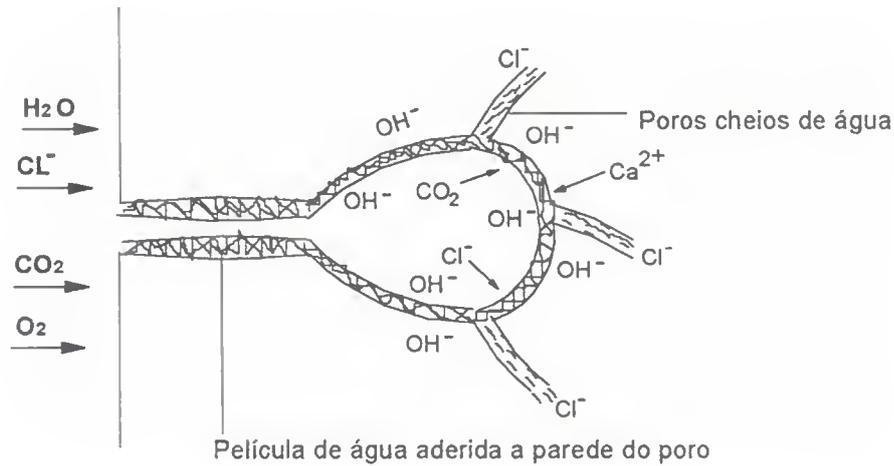


Figura 2.6- Representação esquemática da interação entre o concreto e o ambiente agressivo as armaduras (Nepomuceno, 1992).

#### 2.4.1 - Absorção capilar

O fenômeno da absorção capilar dá-se quando há um aumento da penetração de água pelos poros do concreto devido ao aumento da tensão capilar. As características do líquido que influem na absorção são: a viscosidade, a densidade e a tensão superficial. A modelação da ascensão capilar pode ser feita pela lei de Jurin (Helene, 1993).

$$h = \frac{2v}{r\gamma} \quad (2.5)$$

h- Altura ou penetração de água no capilar [m];

v- Tensão superficial [kg/m];

r- Raio do capilar [m];

$\gamma$ - Massa específica da água [kg/m<sup>3</sup>].

A influência da estrutura dos poros é determinante na absorção capilar, quer seja no volume de água absorvido, na velocidade de absorção, como também na altura de sucção. Teoricamente, quanto menores os diâmetros dos poros, maiores as pressões capilares e maior a altura. Sob enfoque inverso, com poros maiores temos alturas menores, porém volumes absorvidos maiores. Em observações experimentais todavia, face a condições peculiares de intercomunicabilidade e tortuosidade dos poros, constata-se comportamento diverso do esperado (Bauer, 1995). Helene (1993) coloca que concretos de reduzida relação água/cimento apresentam capilares de menor diâmetro, ao mesmo tempo que os mesmos são muito menos intercomunicáveis, resultando disso menores alturas de sucção e menores volumes absorvidos.

A absorção tem um importante papel na durabilidade do concreto, já que ela ocorre por exemplo no caso de concretos em contato com a chuva, solos úmidos e ciclos de umectação. Nestes casos, a profundidade que os íons cloreto, presente na água, podem atingir dependerá da duração dos períodos de secagem e umectação, (Bakker, citado por Nepomuceno, 1992).

#### **2.4.2 - Difusão**

É um processo espontâneo de transporte de massa num sistema físico-químico, por efeito de gradientes de concentração proporcionado pelos dois diferentes meios em contato íntimo. No caso do concreto este fenômeno ocorre devido ao contato íntimo da solução presente nos poros com o meio ambiente.

Este fenômeno ocorre tanto para substâncias presentes em meio líquido como para aquelas em meio gasoso. Assim os dois principais agentes agressivos, que comprometem as armaduras, os íons cloreto e o  $\text{CO}_2$  têm a sua penetração controlada por este fenômeno.

A difusão dos íons cloreto será tanto mais intenso quanto maior a sua concentração na solução externa. Em estruturas parcialmente submersas em água contaminada com cloreto a região acima da linha d'água é a mais contaminada devido a elevação da concentração à medida que a água que sobe por capilaridade, levando os íons cloreto, se evapora. Sendo a

difusão um fenômeno de transporte de massa através de um fluido, é de se esperar que seja tanto menor quanto mais compacto o concreto (Helene, 1986).

As expressões matemáticas que expressam o fenômeno são dadas pelas leis de Fick da difusão. O coeficiente de difusão  $D$ , das substâncias que penetram nos poros do concreto, é calculado através destas expressões.

1ª Lei- Difusão em estado estacionário - considerando um fluxo constante em relação ao tempo em torno da seção por onde penetra a substância.

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial X} = cte \quad (2.6)$$

J- Fluxo de íons;

D- Coeficiente efetivo de difusão;

$\partial C / \partial X$ - Gradiente de concentração;

C- Concentração de ions na solução;

X- Profundidade considerada.

2ª Lei- Difusão em fluxo variável - considerando um fluxo variável em relação ao tempo e a profundidade de penetração.

$$\frac{\partial C}{\partial T} = -D \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} \quad (2.7)$$

T- Tempo considerado.

### **2.4.3 - Permeabilidade**

Quando o concreto está em contato com um líquido de baixa pressão, este pode penetrar através dos poros capilares. Este fenômeno obedece a lei de Darcy, que, considerando um fluxo laminar constante, expressa o coeficiente de permeabilidade como uma função do volume do líquido que flui, do tempo, da espessura e da área da seção por onde penetra o líquido, da viscosidade do líquido e da diferença de pressão.

Esta situação ocorre em estruturas submersas ou parcialmente submersas e pode acelerar a penetração de agentes agressivos do concreto e das armaduras.

Estudos feitos por Al-Amoudi et al. (1993), indicaram que adições no cimento tais como: pozolanas, cinzas volantes e escória de alto-forno, reduzem a permeabilidade e porosidade dos concretos. Gjorv, citado por Mehta, (1989), observou que para altos consumos de cimento o efeito da microssilica em reduzir a permeabilidade do concreto é diminuído.

## **2.5 - INICIAÇÃO DA CORROSÃO PELA CARBONATAÇÃO**

### **2.5.1 - Introdução**

A carbonatação é o processo de neutralização da fase líquida intersticial saturada de hidróxido de cálcio e de outros compostos alcalinos hidratados do concreto, dissolvidos nesta fase líquida e da fase sólida do concreto. Como resultado desta reação obtém-se uma diminuição do pH a valores inferiores a 9 (Rilem, 1988).

O dióxido de carbono avança desde o exterior e quando alcança a armadura, a película passivadora que protege a armadura se dissolve e o metal se corroe se houver umidade presente no concreto.

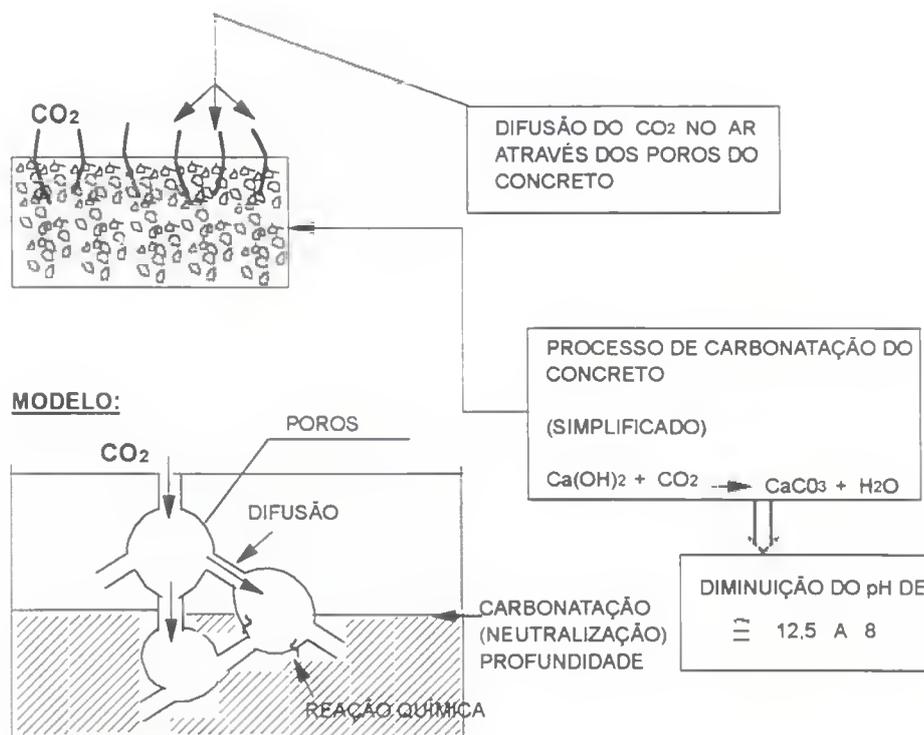


Figura 2.7- Avanço do processo de carbonatação (CEB, 1984).

A Figura 2.7 mostra uma representação esquemática do processo de carbonatação, segundo CEB (1984). Este processo de corrosão é generalizado e homogêneo, produzindo ao longo do tempo, e uma significativa quantidade de óxidos, que pode fissurar o recobrimento de concreto, com uma significativa redução na seção da armadura.

### 2.5.2 - Reações de carbonatação

A carbonatação do concreto normalmente envolve uma reação química entre atmosfera, o dióxido de carbono presente na atmosfera, e os produtos do cimento hidratado. O dióxido de carbono na atmosfera é derivado, principalmente, de um processo natural relativo ao crescimento da vegetação na superfície da terra, e de processos industriais. O cimento não hidratado também pode reagir com o dióxido de carbono quando em altas concentrações, mas em condições atmosféricas normais isto não ocorre (Parrott, 1987).

A principal reação que ocorre neste processo é:



Esta reação é possível quando os compostos estão dissolvidos na fase aquosa. A dissolução do  $\text{Ca(OH)}_2$  é controlada pela presença do  $\text{OH}^-$  oriundos da dissolução dos hidróxido de sódio e potássio que normalmente são os primeiros a carbonatar. O hidróxido de cálcio da fase sólida, terá então maior facilidade de diluir-se na fase aquosa, aumentando progressivamente a frente de carbonatação, ou seja a região com pH em torno de 9.

Uma importante consequência da carbonatação é que o pH reduz de um valor maior que 12,6 a valores inferiores a 9 (Rilem, 1988). Neste caso, se a carbonatação atingir a armadura e houver condições favoráveis, então um processo de corrosão poderá se iniciar.

### **2.5.3 - Fatores que influenciam a carbonatação**

#### **2.5.3.1 - Relação água/cimento**

A relação água/cimento é o principal fator que limita a velocidade de carbonatação. Em geral, a redução da relação água/cimento diminui extremamente a profundidade de carbonatação (Parrott, 1987). Isto acontece por causa da redução da porosidade da superfície do concreto que restringe a entrada do dióxido de carbono. A redução da relação água/cimento significa uma alteração nos poros capilares, numa faixa de 0,05  $\mu\text{m}$  a aproximadamente 3  $\mu\text{m}$ , que são os que mais influenciam a permeabilidade dos concretos e argamassas (Mehta, 1986).

A Figura 2.8 mostra a variação da profundidade de carbonatação em função da variação da relação água/cimento para um concreto de 350  $\text{kg}/\text{cm}^3$  de cimento e igual composição (Vénuat, citado por Figueiredo et al., 1993).

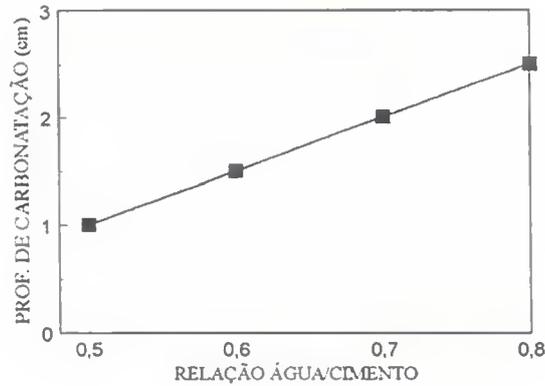


Figura 2.8- Influência da relação água/cimento sobre a profundidade de carbonatação, após 3 anos de ensaio (Vénuat, citado por Figueiredo et al., 1993).

### 2.5.3.2 - Tipo de cimento

O tipo de cimento influencia a velocidade de carbonatação, já que a reserva alcalina é função da composição química do cimento e das adições.

Cimentos com adições apresentam um desempenho inferior aos cimentos portland puros, em igualdade de condições de ensaios, no que diz respeito a resistência a carbonatação (Neville, 1982; Andres, 1989). Bauer (1995), estudando um cimento com adição de 24% de escória também constatou um desempenho inferior em relação a carbonatação apesar do efeito benéfico de refinamento dos poros. Litvan & Meyer (1986), verificaram que, a medida em que aumenta o teor de escória, diminui o teor de  $\text{Ca(OH)}_2$  resultante, uma vez que o teor de clínquer é menor. Com isso, a velocidade de carbonatação é maior para uma mesma relação água/cimento pois a reserva alcalina é significativamente menor.

Al-Amoudi et al. (1991), observaram que a substituição de cimento por cinza volante na confecção dos seus corpos de prova aumentou a profundidade de carbonatação, porém segundo Alonso & Andrade (1988), quando a argamassa já esta carbonatada, o tipo de cimento não influencia mais na intensidade de corrosão. Isto reforça a importância da fase de iniciação no desenvolvimento da vida útil das estruturas.

### **2.5.3.3 - Condições de cura**

A prática de uma boa cura melhora as propriedades do concreto. As condições de cura juntamente com as condições de exposição devem ser consideradas. O cimento na superfície do concreto para de se hidratar, se a umidade relativa interna cair para mais ou menos 80%, causando uma alta porosidade e permeabilidade na superfície, aumentando a velocidade de difusão do dióxido de carbono (Parrott, 1987). Portanto, para reduzir o ingresso do dióxido de carbono, o concreto deve ser curado com água por um certo período de tempo.

Fatthui (1986) verificou que o avanço da frente de carbonatação decresce com o aumento do período de cura. Ho & Lewis (1987) também relacionaram diretamente as condições de cura com a resistência à carbonatação através da utilização de períodos distintos de cura.

A característica de hidratação lenta da maioria das adições minerais quando comparadas com o cimento portland comum, requer uma atenção especial na cura do concreto. (Mehta, 1986). Portanto no caso do emprego da escória, principalmente em teores mais elevados (acima de 50%), deficiências nesta etapa levam a alterações da porosidade nas regiões próximas a superfície (Osborne, citado por Bauer, 1995).

### **2.5.3.4 - Condições de Umidade**

A umidade ambiente influencia também na velocidade de carbonatação pois é a responsável pela quantidade de água presente nos poros, que controla as reações de carbonatação conforme visto anteriormente. Com uma umidade ambiente entre 50 e 70%, temos a maior velocidade de carbonatação como pode ser visto na Figura 2.9 (Verbeck, 1958). O ciclo úmido-seco que ocorre nas estruturas submetidas a ciclos de chuva, dificulta a carbonatação, já que há uma diminuição da sua velocidade durante o ciclo úmido. Em ambientes protegidos da chuva há maior velocidade de carbonatação (Parrott, 1987).

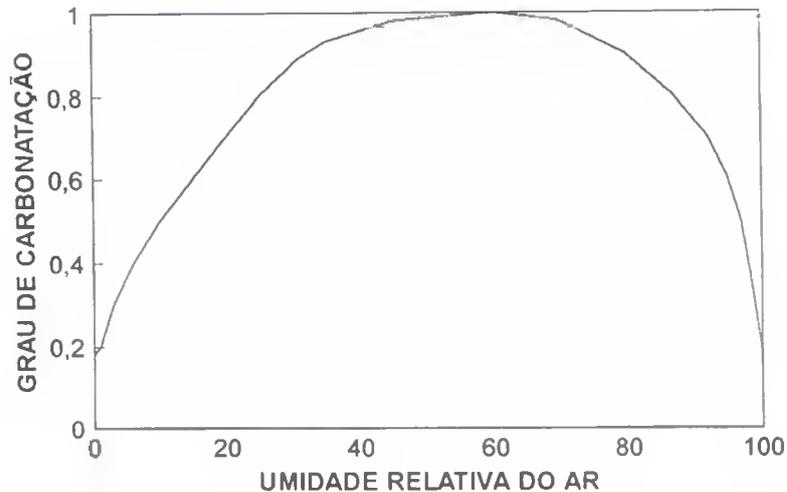


Figura 2.9- Variação da velocidade de carbonatação com a umidade (Verbeck, 1958)

### 2.5.3.5 - Quantidade de CO<sub>2</sub>

A quantidade de CO<sub>2</sub> influencia bastante a carbonatação. Em ambientes internos, onde tem-se uma maior concentração de CO<sub>2</sub>, a velocidade de carbonatação é maior do que em ambientes externos (Parrott, 1987). O conteúdo de CO<sub>2</sub> em ambientes naturais é de 0,03% em volume. Em ambientes mais industrializados ou ambientes como garagem e túneis, o conteúdo pode chegar a 0,1%. A quantidade de CO<sub>2</sub> tem mais influência nos concretos de maior porosidade (Nisher, 1984).

### 2.5.4 - Medidas de carbonatação

Como a carbonatação resulta numa redução de alcalinidade do concreto, saber a medida de profundidade de carbonatação é importante para se controlar o tempo de despassivação da armadura. O método usual é em pulverizar uma superfície recém fraturada do concreto com fenolftaleína ou timolftaleína, que são soluções indicadoras de pH. A solução de fenolftaleína é composta de 1 g de fenolftaleína dissolvida em 99 g de álcool.

A fenolftaleína apresenta uma coloração em vermelho carmim se o pH estiver acima de 9, enquanto que, se a superfície estiver carbonatada esta permanece incolor. Contudo para o pH igual a 9,0, a fenolftaleína indica uma profundidade que não corresponde necessariamente a

um concreto não carbonatado ou a um concreto parcialmente carbonatado (Parrott, 1987). Este procedimento é o mais prático, embora existam outros procedimentos mais precisos como difratometria de Rx, microscopia eletrônica ou análise térmica.

## 2.6 - INICIAÇÃO DA CORROSÃO PELOS ÍONS CLORETO

### 2.6.1 - Introdução

A corrosão da armadura devido a ação dos íons cloreto é um dos mais sérios problemas das estruturas de concreto armado. Os íons cloreto podem ser introduzidos no concreto de varias maneiras: como aditivo, pela contaminação da água ou da areia, ou podem penetrar desde o exterior em ambientes que os contenham. Os íons cloretos podem estar presentes no concreto de duas formas:

- Fixos- quimicamente combinados com as fases alumino-ferríticas para formar os cloroaluminatos ou adsorvidos às paredes dos poros através do C-S-H.
- Livres- dissolvidos na fase aquosa do concreto.

A agressividade dos íons  $Cl^-$  está associada ao teor de cloretos livres (Page et al., 1991; Tang & Nilson, 1991). A porção de cloretos livres na fase aquosa é de 75 a 80% do total de cloretos presentes (Bishara, 1991). A relação entre os cloretos livres e cloretos combinados depende das características dos cimentos, da porosidade e das substâncias agressivas (Tuutti, 1982).

Existe um valor limite de concentração a partir do qual os íons cloreto podem romper a camada de óxidos passivante e provocar a corrosão da armadura. Esse limite não está associado a um valor fixo, embora algumas normas ou recomendações de alguns países apresentem valores orientativos. Isto é devido a dificuldade de estabelecer um limite seguro, acima do qual existe risco de despassivação do aço, já que este limite depende de numerosas variáveis, entre elas: tipo de cimento, proporção de cimento, relação água/cimento, conteúdo de umidade, etc. (Andrade, 1992).

Já existe um consenso entre os pesquisadores de que o principal fator controlador da despassivação é a relação  $Cl^-/OH^-$ . Trabalhando em soluções alcalinas, Hausman (1967) sugeriu o valor de 0,6 para esta relação. Andrade & Gõni (1990) também trabalhando em soluções alcalinas, obtiveram valores críticos de  $Cl^-/OH^-$  de 0,3 e 0,8. Por outro lado, Lambert et al. (1991), trabalhando com vigas expostas a soluções com 5% de cloretos, encontraram que, a partir de uma relação entre  $Cl^-/OH^-$  igual a 3, ocorria a despassivação da armadura. Estas divergências mostram a dificuldade de se estabelecer um parâmetro seguro para o limite da quantidade de cloretos, principalmente pela dificuldade de se determinar a relação  $Cl^-/OH^-$  em estruturas reais. Por isto, para estruturas de concreto armado, o limite geralmente considerado como de baixo risco é 0,4% em relação a massa do cimento e depende da qualidade da estrutura e da umidade ambiental como se mostra na Figura 2.10 (CEB, 1984).

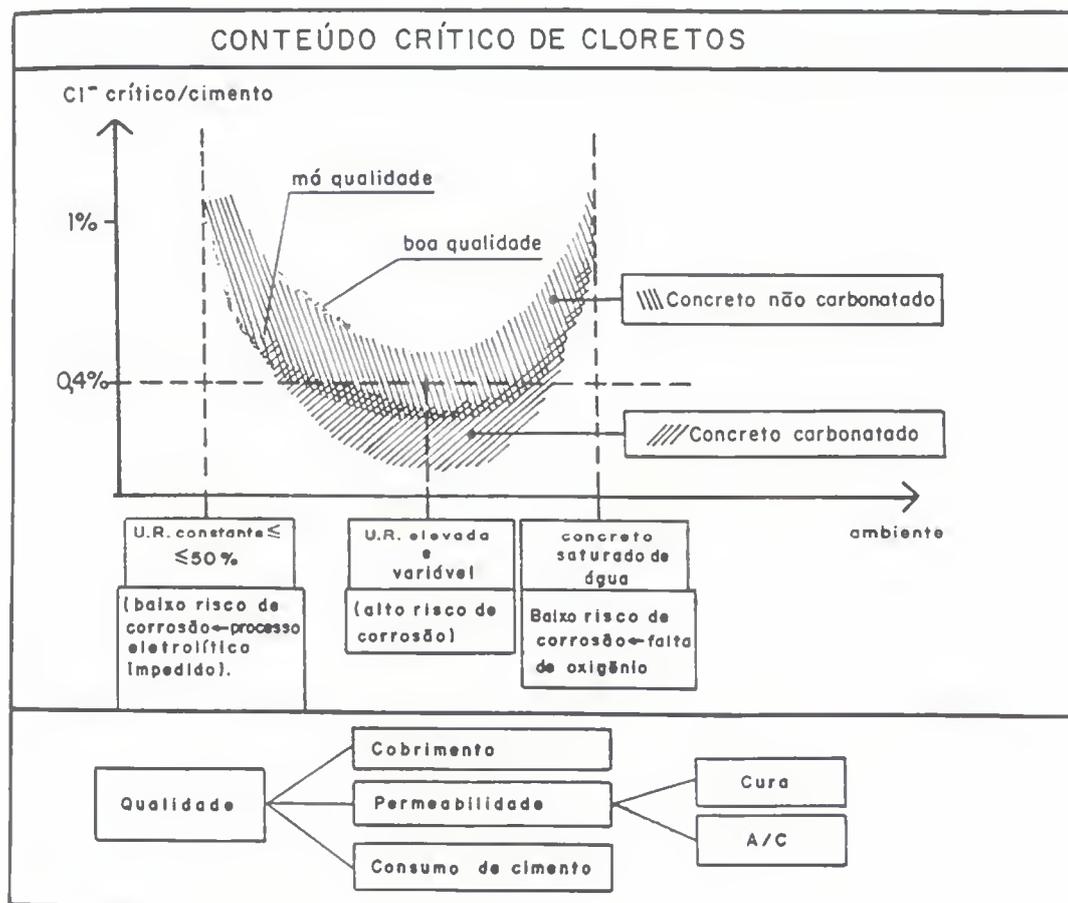


Figura 2.10- Esquema da influência de parâmetros relacionados com a quantidade do concreto e umidade ambiental sobre o conteúdo crítico de cloretos (CEB, 1984).

## **2.6.2 - Fatores que influenciam a penetração de cloretos**

No caso dos cloretos oriundos do exterior, caso comum de obras em ambientes marinhos e de estruturas sujeitas a saís de degelo, vários são os fatores que influenciam na sua penetração.

### **2.6.2.1 - Relação água/cimento**

A relação água/cimento influencia na porosidade, na forma, no volume e na distribuição dos tamanhos dos poros, controlando assim, a penetração dos íons cloreto. Foi verificado que a velocidade de difusão de cloreto aumenta de 4 a 5 vezes com um aumento da relação água/cimento de 0,4 a 0,6 (Page & Short, 1981). Entretanto, Gjorv & Vennesland (1979), verificaram que o coeficiente de difusão era independente da relação água/cimento entre 0,4 e 0,6. Esta discrepância confirma que há outros fatores que intervêm na difusão dos cloretos, como a natureza dos tamanhos dos poros tal como sugeriu Collepari et al (1972).

### **2.6.2.2 - Composição química do cimento**

A composição química do cimento tem grande influência na penetração de cloretos, já que o  $C_3A$  e o  $C_4AF$  se combinam com os cloretos para formar os cloroaluminatos. Esta reação diminui o fluxo de penetração de cloretos devido a redução da concentração de íons livres na solução aquosa dos poros do concreto (Page et al., 1986). De acordo com Rasheeduzzafar et al. (1990), quanto mais  $C_3A$  conter o cimento, mais tempo levará a corrosão das armaduras para se iniciar devido à sua influência na fixação de cloretos. Na Figura 2.11, é mostrado o resultado do seu trabalho.

Al-Gahtani et al. (1994), estudando os cimentos com elevada alcalinidade, concluíram que eles têm um efeito benéfico e um degradador em relação a penetração de cloretos. O efeito benéfico, que em alguns casos ofusca o efeito degradador, é que os cimentos mais alcalinos têm um elevado  $OH^-$ , que torna um fator dominante para baixar a relação  $CL^-/OH^-$  e diminuir a corrosão, porém o fator deteriorador, é que estes cimentos possuem uma pequena

capacidade de retenção de cloretos pois têm menos  $C_3A$ . Jones et al. (1994), observaram que a capacidade de fixação de cloretos pelo  $C_3A$  reduz significativamente quando o concreto está carbonatado.

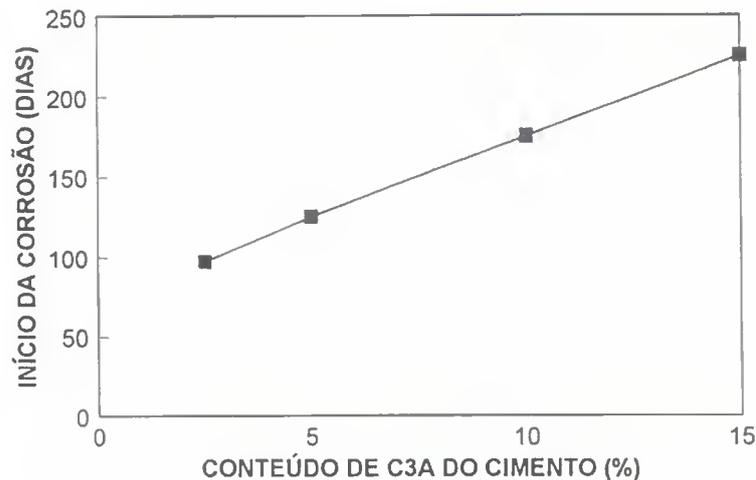


Figura 2.11- Efeito do conteúdo de  $C_3A$  do cimento no tempo de iniciação da corrosão da armadura do concreto (Rasheeduzzafar et al., 1990).

O uso de cimentos com adições contendo materiais pozolânicos, tais como: cinza volante, escória de alto forno ou microssilica está aumentando a cada dia. A influência benéfica das pozolanas em relação a penetração de cloretos inclui o aumento da resistividade elétrica do concreto e a diminuição do tamanho dos poros (Preece et al., 1983). Al-Amoudi et al. (1992) comparando diversos cimentos quanto ao desenvolvimento da corrosão por cloretos, concluíram que os cimentos com adição de escoria e microssilica têm desempenho superior, (tendo o cimento com adição de escória apresentado intensidade de corrosão 10 vezes inferior ao cimento sem escória ao final dos ensaios). Bauer (1995), também constatou que a adição de escória ao cimento, no caso de ingresso de cloretos, tem um efeito benéfico da capacidade de fixação de cloretos para relação água/cimento abaixo de 0,5.

A difusão dos ions cloreto dentro da pasta de cimento é mais influenciado pela composição do cimento e menos pela relação água/cimento (Goto & Roy, citados por Calleja, 1986). Page et al. (1981,1986), Uchikawa (1986), Roy (1989), Bauer (1995) são unânimes ao afirmar que a escória de alto-forno, empregada como adição mineral, reduz significativamente o coeficiente de difusão de cloretos, quer seja pelo efeito físico da adição (alterações na porosidade), ou pela maior capacidade de fixação de cloretos. Petterson (1994) estudando a

adição de microssilica ao cimento, relatou que a difusão de cloretos no concreto diminui, quando a microssilica é adicionada ao cimento por causa do efeito de “rede” que torna a estrutura mais densa.

Suryavanshi et al. (1994), estudando os cimentos portland resistentes a sulfatos e os cimentos portland comuns em relação a capacidade de retenção de cloretos, observaram que o cimento portland resistente a sulfatos retém menos cloretos por causa das pequenas quantidades de  $C_3A$  que possui. Estes ensaios revelam que na iniciação da corrosão por cloretos, as adições agem de forma a frear a penetração dos íons cloreto.

#### **2.6.2.3 - Compactação e cura**

Collepari et al.(1972), verificou que os concretos mais bem compactados têm o coeficiente de difusão de cloreto inferior a aqueles não compactados.

Em relação a cura, Jaegermann (1990) pesquisou a penetração de cloretos e a profundidade de penetração nos corpos de prova, depois de um ano de exposição no clima do Mar Mediterrâneo. Ele observou claramente a influência do período de cura na penetração de cloretos depois de 1 ano de exposição. Porém, depois de 3 anos de exposição, o período de cura não mostrou ter nenhuma influência significativa na profundidade de penetração de cloretos. Kayyali e Haque (1988), estudando argamassas com ou sem adição de cinza-volante, observaram que prolongando o período de cura melhorou a capacidade de retenção de cloretos para a argamassa sem adição de cinza-volante.

#### **2.6.2.4 - Temperatura**

Elevadas temperaturas aumentam substancialmente a corrosão como consequência do aumento da velocidade de penetração dos cloretos, porque os íons cloretos têm mais mobilidade à temperaturas mais elevadas (Cochet & Jesus, citados por Nepomuceno, 1992).

#### **2.6.2.5 - Fissuras**

Fissuras estruturais podem permitir o acesso de dióxido de carbono, oxigênio e dos íons cloretos, por isto, há uma preocupação natural em relação ao aparecimento das fissuras em relação à corrosão. Hart & Lucas (1987), trabalhando com vigas com várias aberturas de fissuras, 0,10 a 0,8 mm, verificaram que os íons cloreto de uma solução de cloretos com 3% de NaCl, chegaram a armadura em todas elas e o conteúdo de cloreto era proporcional a abertura. Contudo, Tuutti (1982) não chegou a uma conclusão clara sobre a influência de fissuras na corrosão.

#### **2.6.2.6 - Carbonatação**

De acordo com Dhir et al. (1993), em concretos parcialmente carbonatados, o ingresso de cloretos pode ser acelerado até 100%. Observaram também, que as intensidades de corrosão devido ao ataque de cloretos foram aumentadas de 2 a 3 vezes no concreto carbonatado.

Jones et al. (1994), estudaram o tempo de início de corrosão através do ingresso de cloretos, e observaram que este tempo é reduzido quando os corpos de prova já estão parcialmente carbonatados. Observou-se que este tempo foi reduzido 3 vezes para cimento portland comum e 4 vezes para cimento com adição de cinza volante.

### **2.7 - FATORES CONTROLADORES DA PROPAGAÇÃO DE CORROSÃO**

#### **2.7.1 - Teor de umidade, resistividade e disponibilidade de oxigênio**

O conteúdo de umidade no interior do concreto exerce importante papel sobre a corrosão, quer seja por causa da água necessária para que ocorra a reação catódica de redução do oxigênio, ou por causa da influência na resistividade do concreto e na permeabilidade ao oxigênio.

A corrosão aumenta com o aumento da umidade relativa. Atinge um valor máximo quando a umidade relativa está em 95%, e reduz a um nível baixo perto da saturação (Tuutti, 1982). Devido ao caráter higroscópico dos sais, como por exemplo o NaCl ou CaCl<sub>2</sub>, os concretos que os contêm em seus poros possuem maior capacidade de reter a umidade no seu interior (Rasheeduzzafar et al., citados por Figueiredo et al., 1993).

Segundo Andrade (1992), se os poros estão saturados de umidade, como é o caso da Figura 2.12 c, ainda que a resistividade seja a menor possível, o oxigênio terá primeiro que se dissolver na água para poder alcançar a armadura. Nesta situação, o processo de corrosão está controlado pelo acesso de oxigênio e as velocidades de corrosão não serão as mais elevadas, sendo inclusive muito baixas, como a que ocorre em estruturas de concreto armado situadas a certa profundidade do mar.

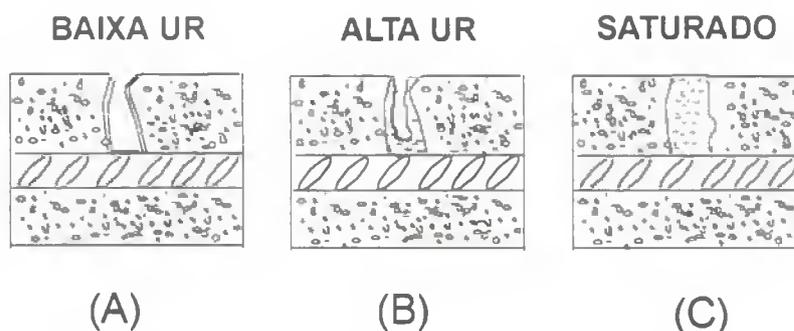


Figura 2.12- Teor de umidade dos poros do concreto em função da umidade do ambiente (Andrade, 1992).

Quando os poros contêm pouquíssima umidade, a resistividade é muito elevada e o processo de corrosão fica muito dificultado. Neste caso a velocidade de corrosão será baixa, ainda que o concreto se mostre carbonatado e contaminado de cloretos (Figura 2.12 a).

As velocidades de corrosão máximas se dão em concretos com teores de umidade altos, porém sem saturar os poros. Neste caso, o oxigênio chega facilmente à armadura e a resistividade é suficientemente baixa para permitir elevadas velocidades de corrosão (Figura 2.12 b).

## 2.7.2 - Proporção de cloretos

A proporção de cloretos ou relação  $Cl^-/OH^-$ , é algo a que se deve estar atento nas estruturas de concreto armado, já que o aumento das concentrações de  $Cl^-$  além de diminuir a resistividade, devido a maior condutividade proporcionada por estes íons, podem também provocar o aumento da velocidade de corrosão.

Ainda que não se tenha estabelecida uma relação qualitativa entre proporção de cloretos e a velocidade de corrosão, pode-se deduzir na Figura 2.13 um aumento na velocidade de corrosão com o incremento da proporção de  $Cl^-$ . A Figura 2.13 mostra a variação da  $i_{corr}$  com o tempo para um testemunho submerso em água do mar, contendo armaduras com 1,5 e 7,5 cm de espessura de cobrimento. No período inicial a corrosão se situa abaixo de  $0,1 \mu A/cm^2$  indicando que os cloretos não chegaram à armadura em quantidade suficiente. Depois vê-se uma desp passivação brusca com um aumento da  $i_{corr}$  constante (Andrade, 1992).

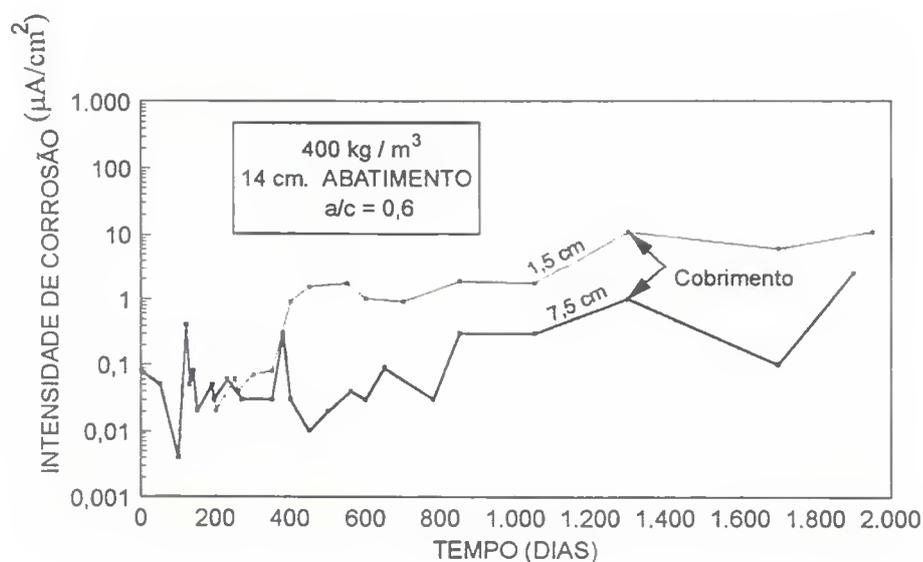


Figura 2.13- Variação da intensidade de corrosão de armaduras no concreto conservado parcialmente submerso em água do mar (Andrade, 1992).

Deve-se considerar que a relação  $Cl^-/OH^-$  pode ser aumentada pela redução dos íons  $OH^-$ , quando ocorre a carbonatação de estruturas contaminadas por cloretos. Neste caso, pode ocorrer também o aumento de cloretos livres devido a instabilidade dos cloroaluminatos com a redução do pH (Alonso & Andrade, 1988).

### **2.7.3 - Temperatura**

A temperatura tem papel duplo nos processos de deterioração. Por um lado, o aumento da temperatura estimula a mobilidade das moléculas, favorecendo seu transporte através da microestrutura do concreto (Goñi, citado por Figueiredo et al., 1993). Já a sua diminuição pode dar lugar a condensações no concreto ocasionando um aumento da umidade do material (Helene, 1983).

Raphael & Shalon (1971) mostram que a corrosão aumenta substancialmente com o aumento da temperatura acima de 20° C, e aumenta duas vezes mais a cada aumento de 20° C. O efeito é ainda mais pronunciado à altas umidades relativas. (Tuutti, 1982) examinou os efeitos da temperatura a -20° C e os resultados sugerem que a velocidade de corrosão é reduzida 10 vezes a cada redução de temperatura de 20 graus abaixo de 0° C.

É importante destacar que a umidade, o oxigênio e a temperatura podem ter efeitos opostos. Assim por exemplo, uma maior umidade facilita a corrosão mas impede o acesso de oxigênio, ou um incremento de temperatura acelera a corrosão, mas diminui a condensação.

### **2.7.4 - Formação da macrocélula de corrosão**

As macrocélulas de corrosão são as pilhas de corrosão formadas entre duas áreas distantes de, no máximo, alguns decímetros e de caráter distinto, onde uma é corroída e atua como ânodo e a outra mantém-se passiva e atua como cátodo. Quando essa situação ocorre, o efeito da ação das micropilhas se soma a ação da macropilha, aumentando a velocidade de corrosão.

A disposição geométrica do ânodo e do cátodo, além da relação entre as áreas anódicas e catódicas também tem influência na velocidade de corrosão devido às macrocélulas (Feliu et al., citados por Nepomuceno, 1992).

### 3 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1 - MATERIAIS

##### 3.1.1 - Cimento

Os cimentos foram selecionados em função de aspectos particulares na capacidade de proteção em ambientes contaminados por cloretos e carbonatação, conforme constatado na revisão bibliográfica. Selecionou-se três tipos de cimentos disponíveis no mercado nacional, conforme Tabela 3.1.

Tabela 3.1- Descrição dos cimentos utilizados.

<b>SIGLA</b>	<b>NOMENCLATURA</b>
CPH-F 32	Cimento portland composto com filer
CPH 32	Cimento portland de alto-forno
CPV-ARI-RS-MS	Cimento portland de alta resistência inicial resistente à sulfatos com adição de sílica micropulverizada.

O CPH-F 32 foi selecionado por ser o cimento mais utilizado na região e não possuir nenhuma adição pozolânica. O CPH 32 foi escolhido por possuir adição de escória de alto-forno, e o CPV-ARI-RS-MS por possuir adição de escória e microssílica.

##### 3.1.2 - Areia

A areia utilizada como agregado, no programa experimental, é uma areia natural oriunda do rio Corumbá (Goiás), e sua composição granulométrica é apresentada no gráfico 4.1.

### **3.1.3 - Armadura**

As armaduras destinadas aos ensaios acelerados de corrosão, foram de classe CA 60-B com 5 mm de diâmetro.

## **3.2 - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS**

O procedimento experimental foi realizado no Laboratório de Ensaio de Materiais da Universidade de Brasília (UnB). A caracterização dos materiais tem o objetivo de determinar os fatores que podem influenciar no comportamento frente aos agentes agressivos na corrosão das armaduras. Foram feitos os seguintes ensaios de caracterização segundo as normas brasileiras.

- Massa específica;
- Finura dos cimentos;
- Tempo de pega;
- Resistência mecânica.

Seus resultados são mostrados nas Tabela 4.1 e 4.2.

## **3.3 - DEFINIÇÃO DAS SÉRIES DE ENSAIOS**

O programa experimental buscou avaliar de forma comparativa a influência dos três tipos de cimentos na corrosão das armaduras, variando dois parâmetros:

- Relação água/cimento;
- Cura.

A variação da relação água/cimento teve o objetivo de avaliar o comportamento dos cimentos em diferentes condições microestruturais, já que a relação água/cimento é o principal parâmetro que influencia diretamente na porosidade (Mehta, 1986). Sendo assim, foram escolhidas relações água/cimento com significativa variação:  $a/c = 0,4$  e  $a/c = 0,7$ . Todos os corpos de prova tiveram as mesmas condições no estado fresco, isto é, foram confeccionados dentro de uma mesma faixa de trabalhabilidade: 260 a 320 mm, através do ensaio de consistência de argamassa (NBR 7215-91).

A prática de uma boa cura melhora as propriedades do concreto endurecido pois a porosidade do concreto também é função das condições de cura. Os tempos de cura escolhidos foram 7 e 28 dias, devido a serem os tempos tradicionalmente utilizados no estudo do comportamento mecânico dos concretos e argamassas.

As séries dos corpos de prova definidas a partir das variações acima relacionadas, foram confeccionadas para os ensaios acelerados de corrosão e ensaios complementares. Os ensaios complementares de absorção por imersão, absorção por capilaridade e resistência a compressão foram feitos em corpos de prova cilíndricos de acordo com a NBR 7215-91.

As séries de ensaios de corrosão foram subdivididas em séries normais e inversas e foram confeccionados dois corpos de prova de cada série. A determinação dos traços empregados, foi orientada no sentido de se ter a condição mínima de preenchimento dos vazios de areia para pasta em uma mesma faixa de trabalhabilidade.

### **3.3.1 - Séries normais**

As séries normais utilizadas nos ensaios de corrosão seguiram a seqüência mostrada na Figura 3.1, iniciando pelo ensaio de carbonatação e finalizando com o ensaio com cloretos, e estão descritas na Tabela 3.2.

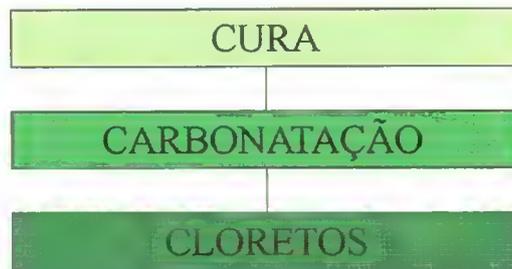


Figura 3.1- Fluxograma dos ensaios das séries normais.

Tabela 3.2- Denominação das séries normais.

SÉRIES	CIMENTO	A/C	CURA	TRAÇO	CONSUMO DE CIMENTO
A1	CPII-F 32	0,7	7	1:3	462 kg/m <sup>3</sup>
B1	CPII-F 32	0,7	28	1:3	462 kg/m <sup>3</sup>
C1	CPII-F 32	0,4	7	1:1,5	774 kg/m <sup>3</sup>
D1	CPII-F 32	0,4	28	1:1,5	774 kg/m <sup>3</sup>
A2	CPIII 32	0,7	7	1:3	462 kg/m <sup>3</sup>
B2	CPIII 32	0,7	28	1:3	462 kg/m <sup>3</sup>
C2	CPIII 32	0,4	7	1:1,5	774 kg/m <sup>3</sup>
D2	CPIII 32	0,4	28	1:1,5	774 kg/m <sup>3</sup>
A3	CPV-ARI-RS-MS	0,7	7	1:3	462 kg/m <sup>3</sup>
B3	CPV-ARI-RS-MS	0,7	28	1:3	462 kg/m <sup>3</sup>
C3	CPV-ARI-RS-MS	0,4	7	1:1,3	822 kg/m <sup>3</sup>
D3	CPV-ARI-RS-MS	0,4	28	1:1,3	822 kg/m <sup>3</sup>

### 3.3.2 - Séries inversas

As séries inversas utilizadas nos ensaios de corrosão, como o próprio nome define, seguiram o processo inverso dos ensaios das séries normais, isto é, submeteu-se os corpos de prova a cloretos e em seguida à carbonatação (Fig. 3.2). Foi estudada apenas uma idade de cura, considerando a limitação de prazo numa dissertação de mestrado. O tempo de cura de 7

dias foi escolhido por ser um tempo mais realista em condições de obra. As séries inversas encontram-se descritas na Tabela 3.3.

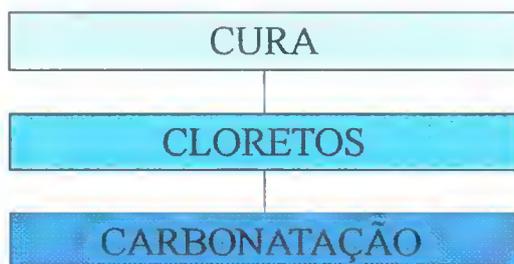


Figura 3.2- Fluxograma dos ensaios das séries inversas.

Tabela 3.3- Denominação das séries inversas.

SÉRIES	CIMENTO	A/C	CURA	TRAÇO	CONSUMO DE CIMENTO
E1	CPII-F 32	0,7	7	1:3	462 kg/m <sup>3</sup>
F1	CPII-F 32	0,4	7	1:1,5	774 kg/m <sup>3</sup>
E2	CPIII 32	0,7	7	1:3	462 kg/m <sup>3</sup>
F2	CPIII 32	0,4	7	1:1,5	774 kg/m <sup>3</sup>
E3	CPV-ARI-RS-MS	0,7	7	1:3	462 kg/m <sup>3</sup>
F3	CPV-ARI-RS-MS	0,4	7	1:1,3	822 kg/m <sup>3</sup>

### 3.4 - CORPOS DE PROVA

Foram confeccionados dois tipos de corpos de prova: os corpos de prova destinados aos ensaios de corrosão e os corpos de prova para os ensaios complementares (absorção por imersão, absorção por capilaridade e resistência a compressão). A moldagem dos corpos de prova dos ensaios complementares foram feitas de acordo com a NBR 7215-91, moldando-se portanto, cilindros de argamassa de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura nas mesmas proporções das séries de ensaios de corrosão.

### 3.4.1 - Ensaios de corrosão

Os corpos de prova para ensaios de corrosão, tinham forma prismática com dimensões reduzidas, empregando-se armaduras dispostas com cobrimentos definidos, feitos de argamassa de cimento e areia, variando-se os parâmetros que se desejava estudar: tipo de cimento, relação água/cimento e cura. Este tipo de corpo de prova segue a disposição empregada por diferentes pesquisadores (Andrade et al., 1986; Nepomuceno, 1992; Bauer, 1995), e suas dimensões reduzidas torna-os mais rapidamente susceptíveis à ação dos agentes agressivos.

As razões para o emprego de argamassa em vez de concreto, é explicado por entre outras razões, pelas pequenas dimensões dos corpos de prova inviabilizando a utilização de agregados graúdos, o que geraria dificuldades na moldagem. Considerando também que o agregado graúdo é uma fonte de heterogeneidade, e que estudos feitos por Winslow & Liu (1990) evidenciam que a pasta na argamassa possui estruturas de poros semelhante a estrutura da pasta no concreto. Podemos supor que a estrutura porosa da pasta na argamassa pode ser um modelo adequado ao estudo da porosidade da pasta no concreto, embora possa haver alguma influência da zona de transição.

Os corpos de prova do presente trabalho foram confeccionados nas dimensões de 60 x 80 x 25 mm, com duas barras de 5 mm de diâmetro, 100 mm de comprimento e com cobrimento de 10 mm conforme mostrada na Figura 3.3, e são ligeiramente maiores que os utilizados em outros trabalhos (Alonso & Andrade., 1988; Nepomuceno, 1992, Figueiredo, 1994), porém menores que os utilizados por Bauer (1995). Para cada material foram feitos dois corpos de prova, variando a relação água/cimento (0,4 e 0,7) e o tempo de cura (7 e 28 dias). A cura foi feita na câmara úmida. Depois de curados os corpos de prova permaneceram em ambiente de laboratório por 15 dias, com umidade relativa em torno de 50% e temperatura de aproximadamente 24°C.

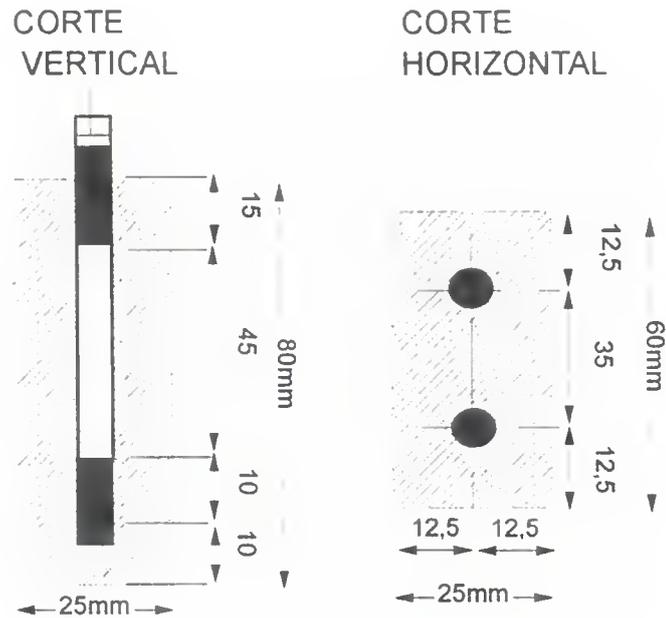


Figura 3.3- Cortes vertical e horizontal do corpo de prova.

#### 3.4.1.1 - Preparação das barras

As armaduras utilizadas nos corpos de prova sofreram um procedimento de limpeza específico, de modo a conferir a todas as barras as mesmas condições de superfície, já que são utilizadas como sensores de corrosão nos ensaios acelerados de corrosão.

O procedimento de limpeza empregado se baseia na norma ASTM C-1152/92 onde se emprega uma solução de ácido clorídrico 1:1 com 3,5 g/l de hexametilenotetramina. Esta solução remove os óxidos presentes não ocorrendo ataque ao metal. O procedimento é descrito a seguir:

- Imersão da barra na solução de ácido clorídrico e hexametilenotetramina por 15 minutos (Foto 3.1);
- Lavagem em água corrente e escovação para remoção final dos óxidos (Foto 3.2);
- Imersão das barras em acetona por dois minutos, para retirada de elementos gordurosos (Foto 3.3);
- Secagem das barras com jato de ar quente (Foto 3.4).

Uma vez executada a limpeza, a barra foi pesada em balança analítica. A área das barras exposta ao ataque, foi limitada através da colocação de fitas isolante colocadas nas suas extremidades, estabelecendo-se uma área em torno de 7,07 cm<sup>2</sup>. O diâmetro equivalente da barra se calculou através da massa específica, segundo a fórmula.

$$D = 1,28 \sqrt{\frac{m}{l}} \quad (3.1)$$

m - massa da barra em kg;

l - comprimento da armadura em metro.

Foram conectados fios flexíveis à extremidade livre das armaduras para as medidas eletroquímicas. Esta conexão foi protegida com fita isolante e sobre a fita isolante foi aplicada resina epoxi, como pode ser visto na Foto 3.5. O objetivo da resina epoxi foi de dificultar a penetração de agentes agressivos na parte superior dos corpos de prova e também proteger a parte exterior da armadura.

#### **3.4.1.2 - Moldagem**

A moldagem dos corpos de prova dos ensaios acelerados de corrosão, foi planejada para se ter o maior grau possível de homogeneidade e principalmente precisão de forma, dimensões e posicionamento da barra. Sua fôrma foi feita de plástico, facilitando assim a desmoldagem. Foi utilizado um misturador mecânico (argamassadeira) no procedimento de mistura da argamassa. O procedimento de moldagem foi feito de forma manual (Foto 3.6), com o lançamento e adensamento em duas camadas. Foi utilizado o uso do soquete no adensamento das camadas. Logo após o procedimento de moldagem, os corpos de prova foram colocados em câmara úmida e desmoldados após 24 horas, mantendo-os em cura até a idade determinada.



Foto 3.1- Imersão da barra na solução de ácido clorídrico e hexametenotetramina.

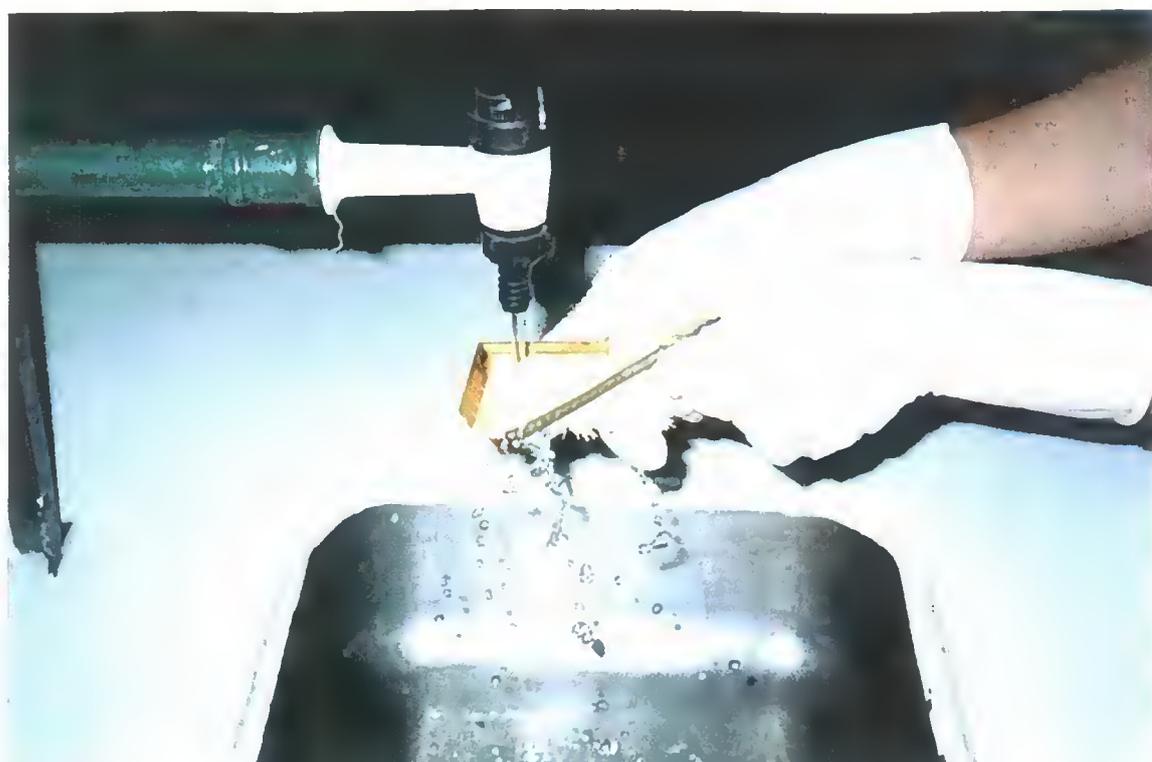


Foto 3.2- Lavagem e escovação da barra em água corrente.

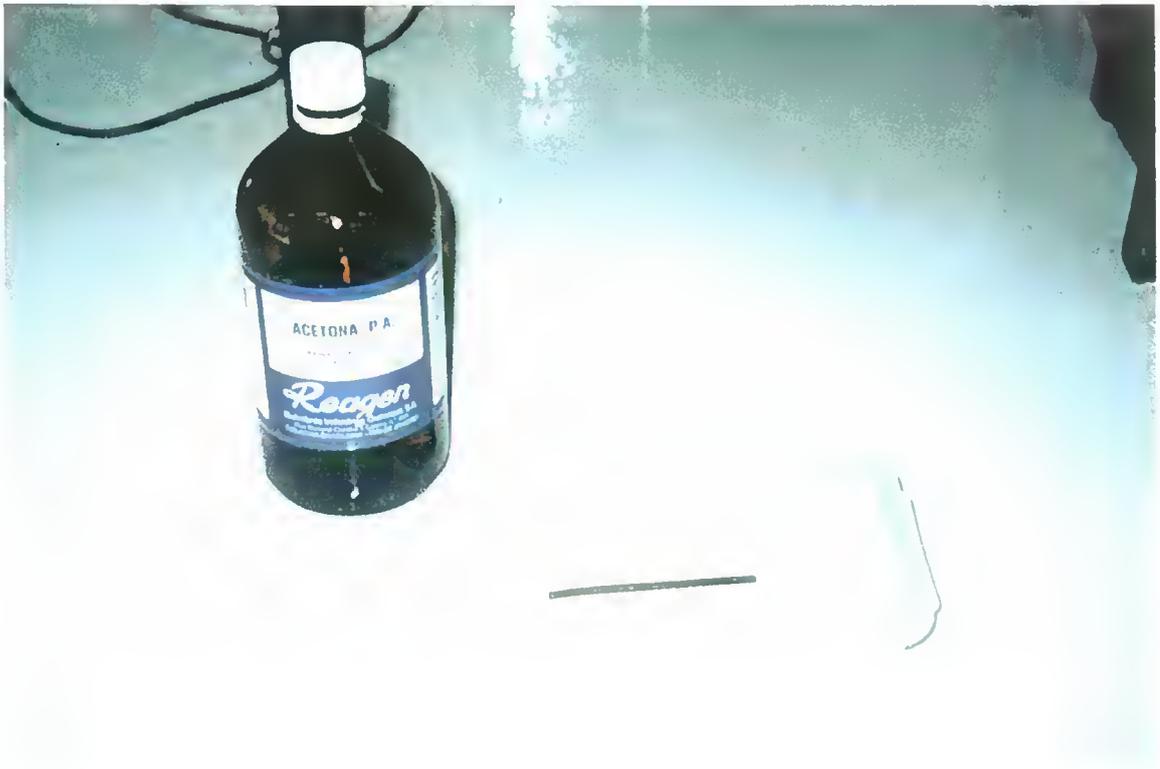


Foto 3.3- Imersão das barras em acetona.



Foto 3.4- Secagem das barras com jato de ar quente.



Foto 3.5- Capeamento dos corpos de prova.



Foto 3.6- Moldagem dos corpos de prova.

### 3.5 - ENSAIO DE CARBONATAÇÃO

Os ensaios acelerados de carbonatação são empregados sistematicamente na avaliação da corrosão das armaduras (Gonzalez et al., 1984; Helene, 1986; Nepomuceno, 1992; Figueiredo, 1994) com resultados satisfatórios. O procedimento consiste em utilizar uma câmara de carbonatação na qual introduz-se  $\text{CO}_2$  em teores superiores aos encontrados na atmosfera.

Existem diferentes formas de avaliar o avanço da frente de carbonatação. Uma das formas é por acompanhamento da evolução de massa. Quando ocorrem acréscimos de massa, podemos deduzir que a carbonatação está progredindo e conseqüentemente, quando há estabilização ou redução de massa, devido a evaporação da água formada, o processo estabilizou ou está muito lento. Outra forma simples, é o emprego de indicadores (fenolftaleína e timolftaleína) que indicam mudança de pH entre 8 e 11 permitindo mensurar a espessura carbonatada (Helene, 1986). Em geral a solução pode ser obtida com 1 g de fenolftaleína ou timolftaleína dissolvida em 99 g de álcool. Porém, esta determinação tem caráter destrutivo, pois é necessário fraturar os corpos de prova de modo a se aplicar o indicador sobre a superfície interna.

No presente trabalho, a carbonatação foi avaliada através de medidas de intensidade de corrosão, potencial de corrosão, resistência ôhmica e variação de massa, utilizada por vários pesquisadores (Alonso & Andrade, 1988; Gonzalez et al. 1985; Nepomuceno, 1992; Figueiredo, 1994; Bauer, 1995).

#### 3.5.1 - Câmara de carbonatação

A câmara de carbonatação desenvolvida por Bauer (1995) é ilustrada na Foto 3.7 O gás, na concentração de 100%, é injetada na câmara em sua parte inferior. Como a saída é posicionada na parte superior da câmara, o mesmo se desloca por entre os corpos de prova como é mostrado na Figura 3.4. Para evitar a contaminação do ambiente, o  $\text{CO}_2$  na saída se combina com uma solução de hidróxido sódico saturado. Para ser executado o controle da

umidade relativa na câmara, colocou-se um lastro composto de  $H_2SO_4$  na região inferior da câmara de carbonatação, segundo a norma ASTM E-104/92 que especifica as concentrações necessárias em função da umidade relativa desejada. A faixa de umidade entre 50 e 70%, corresponde aquela na qual se tem a maior velocidade de avanço da frente de carbonatação (Verbeck, 1958).

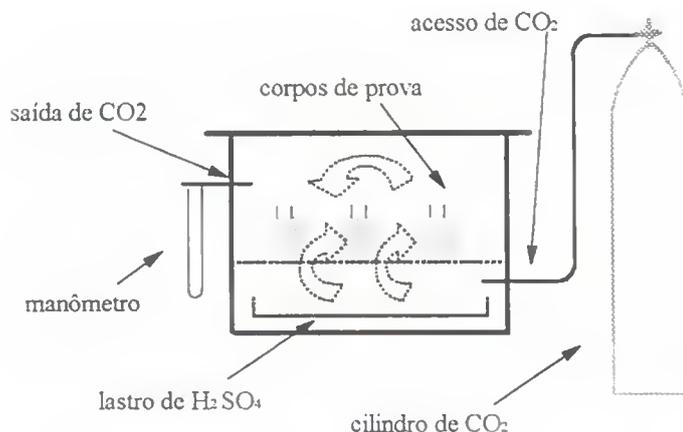


Figura 3.4- Representação esquemática da câmara de carbonatação (Bauer, 1995).

A câmara foi lacrada para ensaio, de modo a não haver saída de  $CO_2$  a não ser pelo orifício de saída. Foi feita também a medição da pressão para controle da vazão na saída da câmara.

### 3.5.2 - Metodologia

Os corpos de prova das séries normais, ao saírem da câmara úmida, encontravam-se saturados com superfície seca, e por isto, não possuíam condições de serem submetidos imediatamente à carbonatação devido aos poros se encontrarem cheios de água, dificultando o ingresso de  $CO_2$ . Sendo assim, fez-se necessário a execução de um procedimento de secagem em laboratório por 15 dias antes de começar o ensaio de carbonatação.

Nas séries inversas, o ensaio de carbonatação acelerada foi posterior ao ensaio com cloretos, mas também fez-se necessário um período de secagem antes do início da carbonatação, já que ao final do ensaio com cloretos os corpos de prova estavam na situação

de imersão parcial em NaCl e portanto com os poros cheios de água. Entretanto, como se verá no capítulo 5, esta etapa parece não ter sido suficiente.

Após o processo de secagem, os corpos de prova foram dispostos na câmara de carbonatação para início do processo de carbonatação acelerada. O procedimento de ensaio utilizado foi o desenvolvido por Bauer (1995), que consistiu na aplicação de fluxos intermitentes de CO<sub>2</sub>, que tinham duração de 8 minutos com o objetivo de se ter a renovação do ar para fluxo não contínuo. No desenvolvimento do ensaio, foram estabelecidos fluxos de 30 em 30 minutos até a despassivação de todas as armaduras, e logo a seguir, 3 fluxos diários. A despassivação da armadura é caracterizada pelo aumento da intensidade de corrosão ultrapassando a faixa de 0,1 a 0,2  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ . A frequência de medição das variáveis eletroquímicas foi inicialmente de 30 em 30 minutos, e depois, uma leitura diária quando eram feitos os 3 fluxos diários. No caso das séries inversas, não houve a preocupação com a despassivação das armaduras pois as armaduras já apresentavam com níveis elevados de corrosão devido aos cloretos. O final da fase de carbonatação acelerada, consistiu numa avaliação conjunta das grandezas ( $i_{\text{corr}}$ ,  $E_{\text{corr}}$ , Rohm e Mv). Uma vez terminada, os corpos de prova foram submetidos a imersão parcial. Nesta etapa ocorre, por absorção capilar, o ingresso de água de modo a favorecer o desenvolvimento da corrosão. Para isso, os corpos de prova foram dispostos na condição parcialmente submerso com água, a uma altura fixa (Foto 3.8).

### **3.5.3 - Medidas eletroquímicas dos corpos de prova submetidos a carbonatação**

Para as medidas das variáveis eletroquímicas, utilizou-se um potenciostato com compensação de queda ôhmica, acoplado a um sistema aquisitor de dados, voltímetros com sensibilidade de décimo de mV, eletrodo de referência (eletrodo de calomelano saturado, para medida de potencial de corrosão) e um contra-eletrodo de aço inoxidável colocado externamente ao corpo de prova. Como é mostrado nas Fotos 3.9. e 3.10.

A velocidade instantânea de corrosão,  $i_{\text{corr}}$ , foi determinada utilizando a expressão proposta por Stern & Geary.

$$i_{corr} = \frac{B}{AR_p} \quad (3.2)$$

Sendo  $B$  uma constante que depende das tangentes anódicas e catódicas de Tafel, e que varia com o tipo de aço, e com o ambiente em que está submetido.  $A$  é a área de exposição. Andrade & Gonzalez (1978) encontraram para as armaduras envolvidas pelo concreto valores de  $B$  entre 26 mV e 52 mV.

O valor de  $R_p$ , foi obtido através de um aquisitor de dados por meio de um software que calcula diretamente a tangente da curva de variação do potencial frente a variação da corrente, quando se aplica uma polarização anódica de 10 a 20 mV em relação ao potencial de corrosão, com uma varredura de 10 mV/min. A resistência ôhmica do sistema foi determinada através da compensação da queda ôhmica, através do potenciostato, no momento da medida da  $R_p$ .

As grandezas medidas ao longo do ensaio de carbonatação foram:

- Intensidade de corrosão ( $i_{corr}$ );
- Potencial de corrosão ( $E_{corr}$ );
- Resistência ôhmica ( $R_{ohm}$ );
- Variação de massa ( $M_v$ ).

A intensidade de corrosão ( $i_{corr}$ ) é o principal indicador de deterioração e avalia a cinética da reação de corrosão. O valor limite a partir do qual se considera o processo de corrosão ativo corresponde à faixa de 0,1 a 0,2  $\mu A/cm^2$  (Gonzalez et al., 1985). A fase de iniciação da corrosão é caracterizada quando os valores de  $i_{corr}$  ultrapassam a faixa de 0,1 a 0,2  $\mu A/cm^2$ , chamada de zona de passivação.



Foto 3.7- Aparato do ensaio de carbonatação.

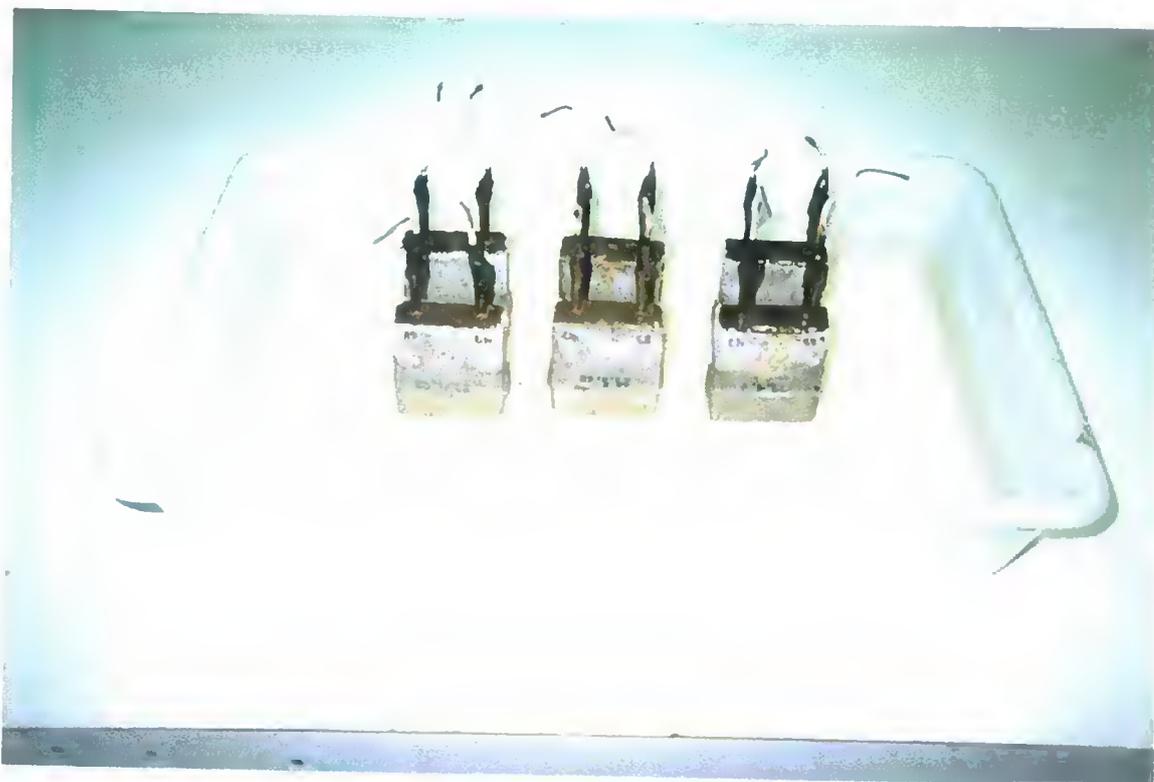


Foto 3.8- Condição parcialmente submerso em água após ensaio de carbonatação.

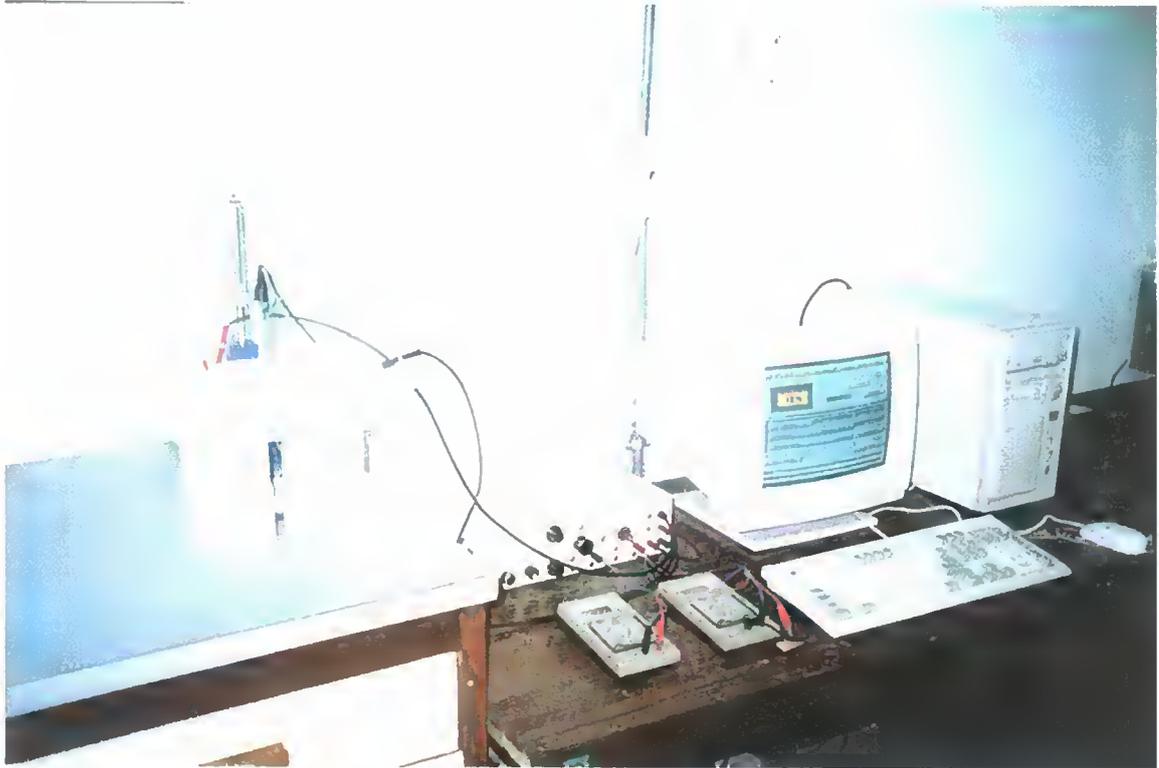


Foto 3.9- Aparato de aquisição de dados.



Foto 3.10- Detalhe do corpo de prova na aquisição de dados.

O potencial de corrosão ( $E_{\text{corr}}$ ) juntamente com  $i_{\text{corr}}$ , pode ser considerado um indicador de deterioração e avalia os aspectos termodinâmicos associados à corrosão. A norma ASTM C-876/92 associa uma probabilidade superior a 95% de corrosão para valores de potenciais inferiores a -275 mV, para eletrodo de calomelano saturado (ECS).

A resistência ôhmica permite avaliar como as alterações das condições de exposição, principalmente relativa a umidade, interferem na intensidade de corrosão.

A variação de massa ( $M_v$ ) indica alteração no grau de umidade dos poros e, conseqüentemente, alteração na resistividade.

### 3.6 - ENSAIO COM CLORETOS

Na definição da metodologia mais adequada para o estudo da corrosão com cloretos, fez-se necessário avaliar qual a forma mais adequada de acelerar o processo de ingresso de cloretos.

O mecanismo de ingresso de cloretos varia muito significativamente conforme o tipo de ensaio e das condições de umidade dos corpos de prova. Foi escolhida a condição de imersão parcial em NaCl com semi-ciclos de secagem e imersão parcial, pois além do transporte dos agressivos por absorção capilar, pode ocorrer ingresso de cloretos por difusão. As metodologias que envolvem os ciclos de secagem e umectação ou contato com solução de NaCl, correspondem ao regime mais severo de penetração de cloretos (Page et al, 1991).

Ao estudar a corrosão das armaduras, Bauer (1995), utilizou ensaios cíclicos caracterizados por um semi-ciclo de secagem em estufa a 50°C durante 14 dias, e um semi-ciclo de imersão parcial em NaCl a 3% por 7 dias, para corpos de prova nas dimensões de 115 x 64 x 110 mm, com bons resultados.

### 3.6.1 - Metodologia

Os corpos de prova das séries normais, ao término do ensaio de carbonatação acelerada, foram submetidos a ação de cloretos. Já os corpos de prova das séries inversas, depois de devidamente curados e secados em laboratório por 15 dias, foram submetidos diretamente ao ensaio com cloretos e após 7 dias ao ensaio de carbonatação.

A metodologia utilizada foi de submeter os corpos de prova a semi-ciclos de secagem e umectação em solução de 5% de NaCl. Os semi-ciclos caracterizam-se conforme a Tabela 3.4.

Tabela 3.4- Etapas do ensaio cíclico.

<b>SEMI-CICLO</b>	<b>CONDIÇÃO</b>	<b>DURAÇÃO</b>
Secagem	Estufa	5 dias
Umectação	Parcialmente submerso	2 dias

A condição de secagem consiste em dispor os corpos de prova em estufa ventilada, mantendo-se a temperatura em 50°C. Na condição de parcialmente submerso, manteve-se o nível da solução do recipiente em uma posição que corresponde à metade da altura da área de exposição da barra. Deste modo, tem-se absorção por capilaridade e, uma vez que ocorra a saturação, tem-se o processo de difusão. A medição das variáveis estudadas, era feita ao final de cada semi-ciclo.

Os corpos de prova das séries A, B, C, D e E, depois de 6 ciclos, já haviam permitido a despassivação das armaduras. As séries F foram submetidas a 10 ciclos, uma vez que ao final de 6 ciclos, nem todas as barras tinham se despassivado. A série E, apesar de ter todas as suas barras despassivadas ao final dos 6 ciclos, continuou o ensaio por mais 3 ciclos, a fim de se fazer algumas averiguações que serão discutidas no próximo capítulo.

### **3.6.2 - Medidas eletroquímicas dos corpos de prova submetidos a ensaios com cloretos**

As medidas das variáveis eletroquímicas foram executadas da mesma maneira do ensaio de carbonatação. As grandezas foram medidas ao final de cada semi-ciclo, e são as mesmas do ensaio de carbonatação, ou seja:

- Intensidade de corrosão ( $i_{corr}$ );
- Potencial de corrosão ( $E_{corr}$ );
- Resistência ôhmica ( $R_{ohm}$ );
- Variação de Massa ( $M_v$ ).

### **3.7 - ENSAIOS COMPLEMENTARES**

Os ensaios complementares foram executados para melhor compreender os processos de corrosão dos ensaios acelerados de corrosão descritos anteriormente. Os mais significativos neste presente trabalho (absorção capilar e absorção por imersão) são descritos a seguir.

#### **3.7.1 - Absorção capilar**

O procedimento adotado no programa experimental baseou-se na norma NBR 9779-87, sendo ensaiados corpos de prova de argamassa (cilíndricos) com as mesmas dosificações dos corpos de prova das séries de corrosão.

A norma NBR 9779-87 especifica um procedimento de condicionamento que consiste na secagem em estufa a 40°C por um período de 14 dias. Após esta etapa, os corpos de prova são colocados em dessecador (mantidos à temperatura ambiente onde ocorre o esfriamento), pesados, e colocados em contato com a água, monitorando-se as evoluções de peso nas idades de 3 h, 6 h, 24 h, 48 h, e 72 h. Também foram monitoradas as evoluções de peso nas idades de

1 h e 2 h, que apesar de não constar na norma são muito significativas segundo o estudo feito por ( Sato et al, 1995) que concluíram que nas primeiras horas dá-se a maior absorção capilar. A absorção capilar, conforme prescrito pela norma, é obtida dividindo-se o aumento de peso (peso a 72 h menos o peso seco) pela área de contato com a água. Os resultados encontrados para absorção capilar estão descritos no capítulo 4.

A absorção por capilaridade foi importante, seja nos ensaios acelerados com cloretos, onde a mesma atuou na imersão parcial, seja nos ensaios acelerados de carbonatação, atuando na fase de parcialmente submerso após a etapa de carbonatação.

### 3.7.2 - Absorção por imersão

A determinação da absorção por imersão, destina-se a uma avaliação do volume total de poros. O procedimento adotado, de acordo com a norma NBR 9778-87 consiste na secagem dos corpos de prova em estufa a 105°C até constância de massa e então imersão em água. Os resultados encontram-se dispostos no próximo capítulo.

## 3.8 - PERDA GRAVIMÉTRICA

Ao final dos ensaios, os corpos de prova foram rompidos, e as armaduras limpas com o mesmo procedimento utilizado anteriormente. Após a limpeza, foram pesadas, e as perdas gravimétricas comparadas com as perdas eletroquímicas, utilizando a integração da curva  $i_{corr}$  x tempo conforme mostrado no capítulo 2. Fazendo a transformação em perda de massa mediante a lei de Faraday, resulta na equação abaixo (Andrade & Gonzalez, 1978). Os resultados encontram-se no próximo capítulo.

$$P_{elet} = 0,025 \int i_{corr} dt \quad (3.3)$$

## 4 - RESULTADOS

### 4.1 - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

#### 4.1.1 - Caracterização química

##### 4.1.1.1 - Análise química

Os resultados referentes a análise química dos cimentos estão listados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1- Análise química dos materiais.

DETERMINAÇÕES (%)	CPII-F 32	CPIII 32		CPV-ARI-RS-MS		
		clínquer	escória	clínquer	escória	MS
Perda ao fogo	5,83	----	---	0,29	1,35	6,55
Resíduo Insolúvel	----	----	---	---	---	---
Trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )	2,59	0,88	0,06	1,09	---	---
Óxido de magnésio (MgO)	3,37	---	6,52	1,82	6,63	2,51
Óxido de silício (SiO <sub>2</sub> )	17,74	21,51	35,54	21,14	34,20	80,74
Óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2,82	3,12	0,74	3,48	3,10	2,48
Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4,68	6,06	13,12	4,67	11,82	1,06
Óxido de cálcio (CaO)	62,60	66,23	42,92	65,82	42,35	3,49
Óxido de cálcio livre (CaO)	1,26	1,19	---	---	---	---
Óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)	0,11	---	---	---	---	---
Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)	0,35	---	---	---	---	---

\* Dados fornecidos pelos fabricantes

##### 4.1.1.2 - Teor de escória e microssilica

O cimento de alto-forno (CPIII 32) segundo o fabricante tem um teor de escória de 37,7%, o que corresponde a sua classificação pela norma brasileira NBR 5735-91.

O cimento CPV-ARI-RS-MS também tem, segundo o fabricante, um teor de escória de 25% e um teor de microssilica de 5%.

## 4.1.2 - Caracterização física

### 4.1.2.1 - Propriedades físicas dos cimentos

Na Tabela 4.2 estão descritas as principais propriedades físicas dos cimentos.

Tabela 4.2- Propriedades físicas dos cimentos.

CARACTERÍSTICAS		NORMA	CPII-F 32	CPIII 32	CPV-ARI-RS-MS
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		NBR 6474-84	2,97	2,94	3,10
Finura	P # 200	NBR 7215-91	5,48%	1,8%	1,96%
	*Blaine	NBR 7224-84	340 m <sup>2</sup> /kg	424 m <sup>2</sup> /kg	685 m <sup>2</sup> /kg
Tempo de pega	Inicial	NBR 11581-91	164 min	170 min	151 min
	Final	NBR 11581-91	264 min	313 min	394 min
Resistência à Compressão	3 dias	NBR 7215-91	22,7 MPa	15,2 MPa	30,2 MPa
	7 dias	NBR 7215-91	32,9 MPa	23,2 MPa	38,1 MPa
	28 dias	NBR 7215-91	34,2 MPa	37,3 MPa	43,9 MPa

\* Dados fornecidos pelos fabricantes

### 4.1.2.2 - Granulometria das areias

A Figura 4.1 representa a composição granulométrica da areia utilizada no presente trabalho (NBR 7217-87). Esta composição enquadra-se na zona 4, que no gráfico está representada por linhas tracejadas, segundo a norma brasileira NBR 7211-83.

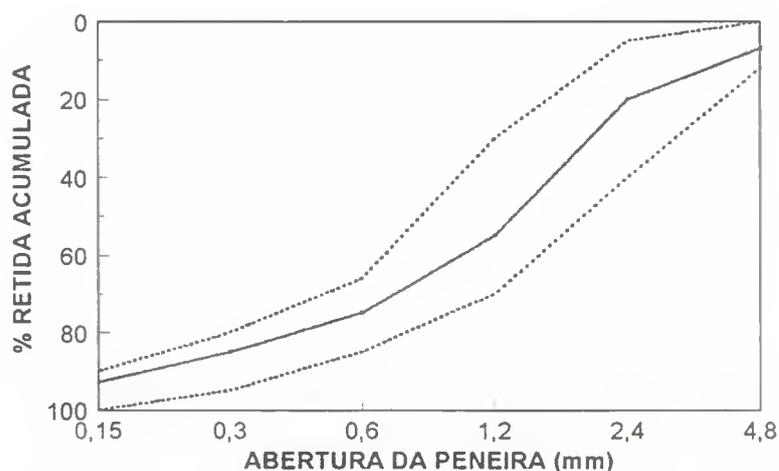


Figura 4.1- Composição granulométrica das areias.

## 4.2 - ENSAIOS DE CORROSÃO DAS SÉRIES NORMAIS CURADAS 28 DIAS

São mostrados neste item os resultados das séries normais com idade de cura 28 dias. Primeiro estão apresentados os resultados dos ensaios de carbonatação acelerada e logo a seguir o resultados dos ensaios acelerados com cloretos para os três tipos de cimentos estudados.

Nestes ensaios, são mostradas as evoluções das grandezas ( $i_{\text{corr}}$ ,  $E_{\text{corr}}$ ,  $R_{\text{ohm}}$  e  $Mv$ ) em função do tempo. Para cada grandeza estudada, são descritos os comportamentos de argamassas com relações água/cimento 0,4 e 0,7, para uma mesma faixa de trabalhabilidade.

O critério utilizado para avaliar a evolução das grandezas citadas anteriormente para cada tipo de cimento, foi a média dos valores das variáveis eletroquímicas das barras dos corpos de prova de cada série. Os valores apresentados para as grandezas citadas anteriormente representam a média dos 4 valores medidos nas barras dos corpos de prova de cada série.

### 4.2.1 - Ensaios de carbonatação

São apresentados os resultados referentes à etapa de carbonatação acelerada e, consecutivamente, os resultados da etapa de parcialmente submerso. As linhas contínuas na horizontal do gráfico de evolução de intensidade de corrosão, limitam a zona de passivação da armadura. Velocidades superiores a valores de  $0,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  já são consideradas prejudiciais para a vida útil da estrutura (Andrade et al., 1990). A fase de iniciação da corrosão é caracterizada quando os valores de  $i_{\text{corr}}$  ultrapassam a faixa de 0,1 a  $0,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  chamada de zona de passivação.

#### 4.2.1.1 - Evolução da intensidade de corrosão ( $i_{corr}$ )

O acompanhamento dos valores de  $i_{corr}$  ao longo do ensaio acelerado permite a avaliação cinética do processo de corrosão das armaduras.

As Figuras 4.2 e 4.3 apresentam a evolução da  $i_{corr}$  ao longo do tempo para as relações água/cimento 0,4 e 0,7 respectivamente. Em cada figura acham-se representadas os valores de  $i_{corr}$  comparando-se o desempenho dos três cimentos utilizados no presente trabalho.

Na Figura 4.2 ( $a/c=0,4$ ), a série feita com o cimento CII-F 32 apresenta os menores valores de  $i_{corr}$  em relação as séries feitas com os outros cimentos. Estes valores não ultrapassam  $0,3 \mu A/cm^2$  durante todo o ensaio. Já as séries confeccionadas com os cimentos CIII 32 e CPV-ARI-RS-MS apresentam maiores valores de  $i_{corr}$  que chegam a atingir até  $1 \mu A/cm^2$ , sendo que na condição de parcialmente submerso a série feita com o CIII 32 é a que apresenta maiores valores de  $i_{corr}$ .

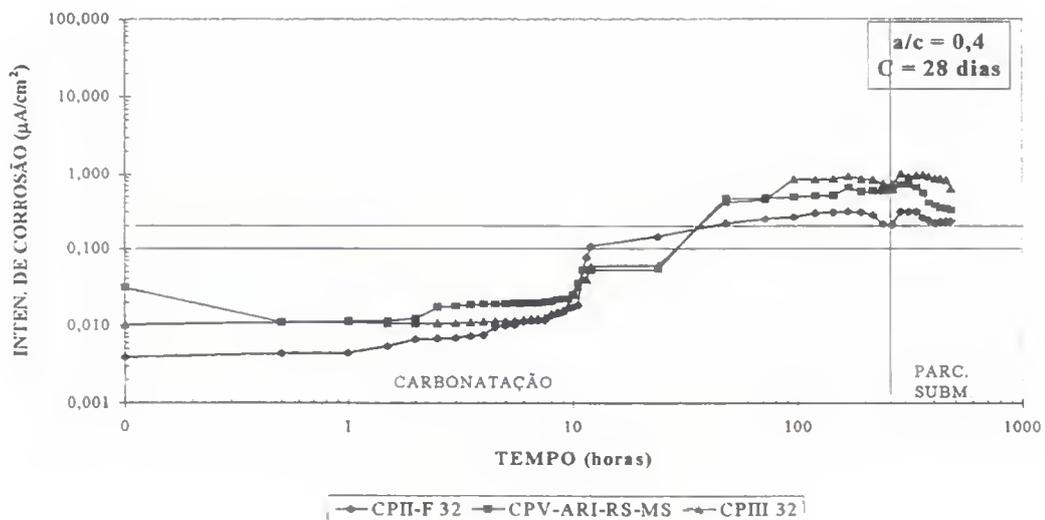


Figura 4.2- Evoluções das intensidades de corrosão das séries normais na carbonatação, para  $a/c=0,4$  e cura de 28 dias.

Na Figura 4.3 são mostrados os resultados para a relação água/cimento 0,7. Observa-se em geral que os valores de  $i_{corr}$  são superiores aos valores das séries equivalentes para a relação água/cimento 0,4. Observa-se também que ocorre uma diminuição da fase de iniciação

da corrosão, que é quando os valores de  $i_{corr}$  ultrapassam a faixa de 0,1 a 0,2  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , em relação às séries com relação água/cimento 0,4.

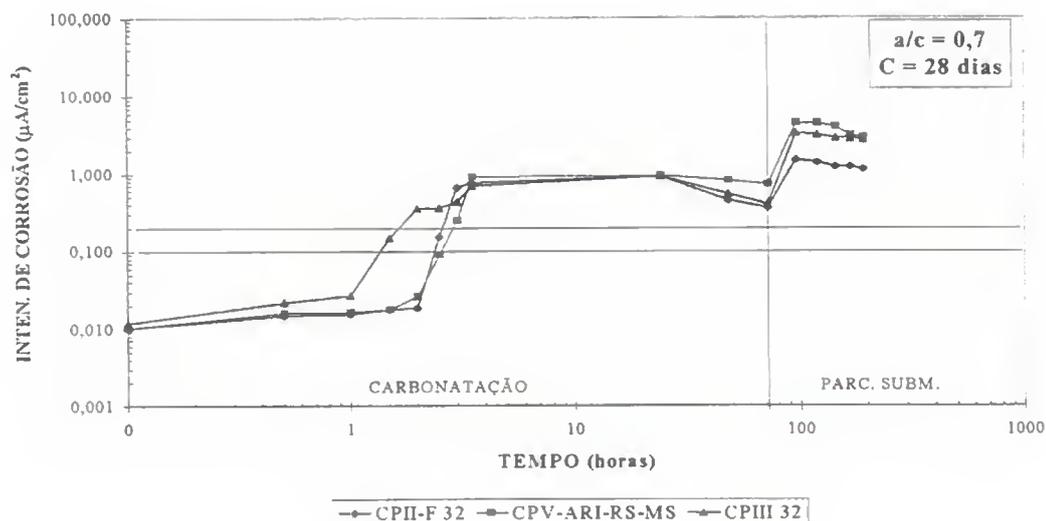


Figura 4.3- Evoluções das intensidades de corrosão das séries normais na carbonatação, para  $a/c=0,7$  e cura de 28 dias.

Aqui novamente observa-se que os corpos de prova confeccionados com o cimento CII-F 32 apresentam os menores valores de  $i_{corr}$ , na etapa de parcialmente submerso demonstrando ter melhor desempenho em relação aos outros cimentos.

#### 4.2.1.2 - Evolução do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ )

A avaliação do processo de corrosão através do potencial de corrosão, que é de natureza termodinâmica, permite inferir sobre a possibilidade de ocorrência da reação de corrosão.

As Figuras 4.4 e 4.5 apresentam os resultados de diferentes relações água/cimento (0,4 e 0,7). Observa-se nitidamente que ao se aumentar a relação água/cimento, a tendência dos valores é de uma diminuição mais abrupta.

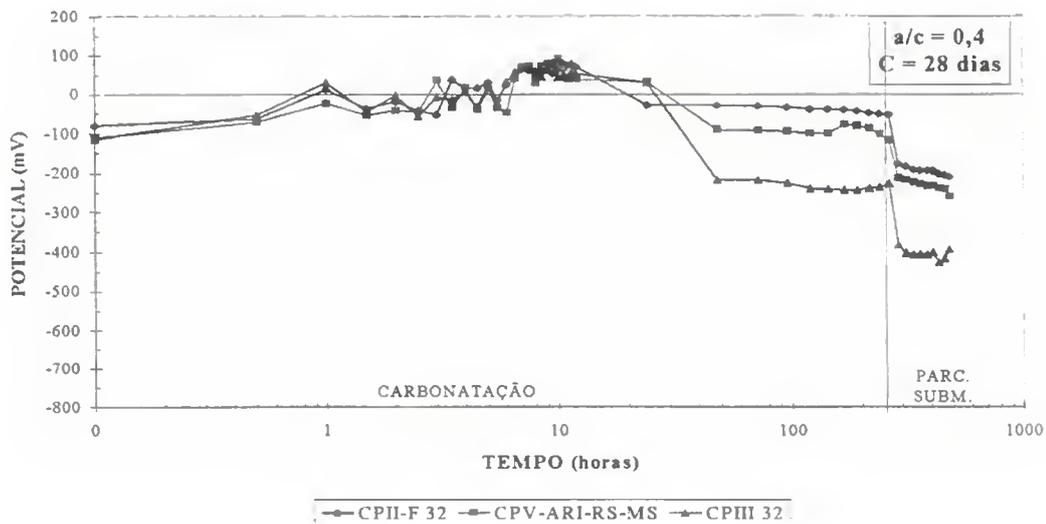


Figura 4.4- Evoluções dos potenciais de corrosão das séries normais na carbonatação, para  $a/c=0,4$  e cura 28 dias.

Na Figura 4.4 ( $a/c=0,4$ ), observa-se que os valores de potencial para a série confeccionada com o cimento CII-F 32 não ultrapassa  $-100$  mV durante a fase de carbonatação, porém, na condição de parcialmente submerso, há uma redução brusca que chega a atingir valores próximos a  $-200$  mV, mas ainda assim com valores mais positivos que os demais correspondendo a valores de  $i_{corr}$  de  $0,3 \mu A/cm^2$ . A série feita com o cimento CIII 32 apresenta valores significativamente inferiores aos outros cimentos principalmente com 50 horas de ensaio. Esta tendência é a mesma apresentada pelos três tipos de cimento em relação à  $i_{cor}$ .

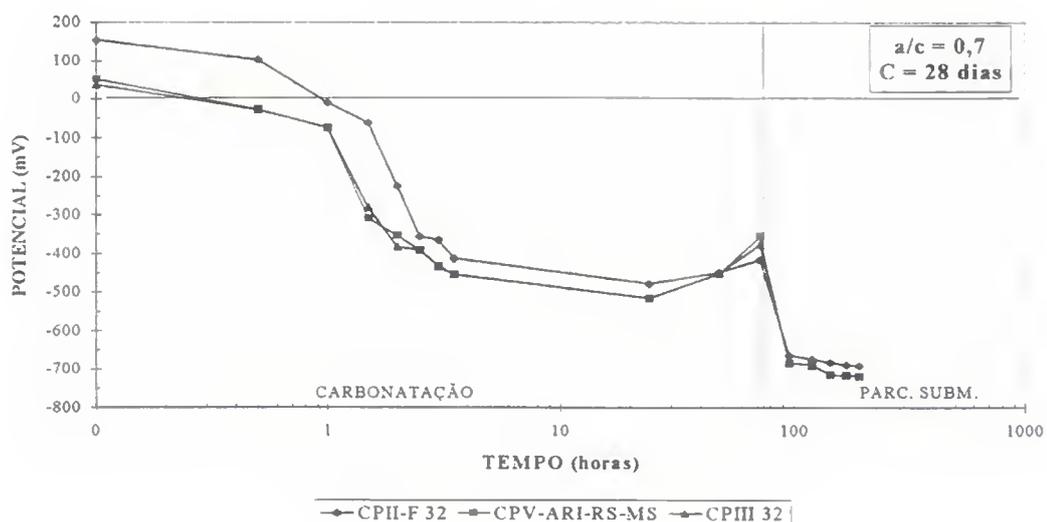


Figura 4.5- Evoluções dos potenciais de corrosão das séries normais na carbonatação, para  $a/c=0,7$  e cura 28 dias.

A Figura 4.5 ( $a/c=0,7$ ), apresenta perfis de evolução de potencial similares para todos os cimentos. Verifica-se também uma redução rápida dos valores de potencial de corrosão atingindo valores muito mais negativos ao final do ensaio.

Em geral é confirmada a tendência verificada para  $i_{\text{corr}}$  nas figuras das séries equivalentes, mas não é possível estabelecer qual o cimento mais protetor observando apenas o potencial de corrosão, para relações água/cimento mais elevada.

#### 4.2.1.3 - Evolução da resistência ôhmica (Rohm)

Os resultados encontrados para as relações água/cimento 0,4 e 0,7 são mostrados nas Figuras 4.6 e 4.7. Constata-se especialmente para relação  $a/c=0,7$ , uma tendência de diminuição da resistência ôhmica com o processo de carbonatação, face a água produzida no processo, e que é observado em menor ou maior grau em todas as séries.

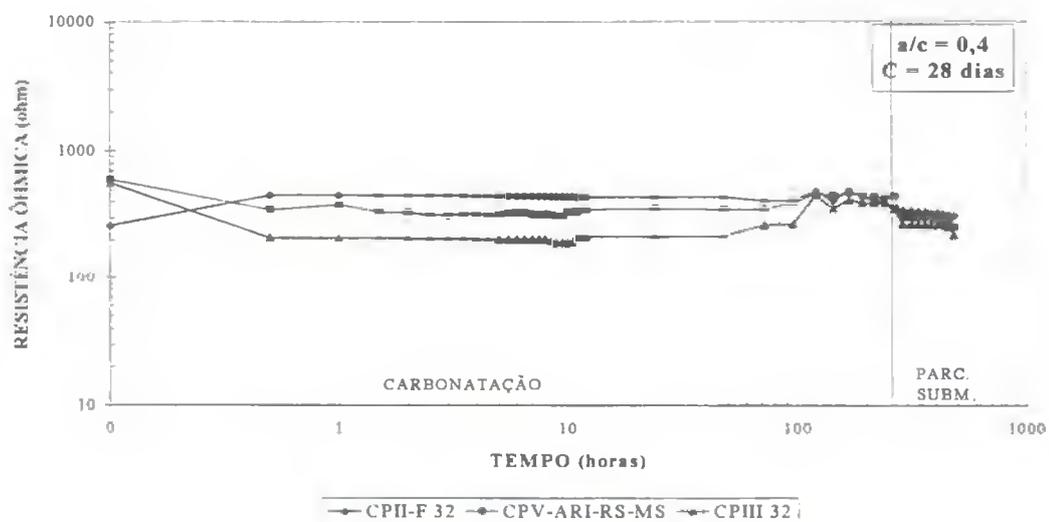


Figura 4.6- Evoluções das resistências ôhmica das séries normais na carbonatação, para  $a/c=0,4$  e cura 28 dias.

Na Figura 4.6, observa-se que os valores de Rohm para as séries de relação água/cimento 0,4, mantêm-se constante para todos os cimentos durante o ensaio, e reduzem após a condição de parcialmente submerso. A série confeccionada com o cimento CPIII 32 apresenta os menores valores de Rohm em relação as outras séries dos outros cimentos.

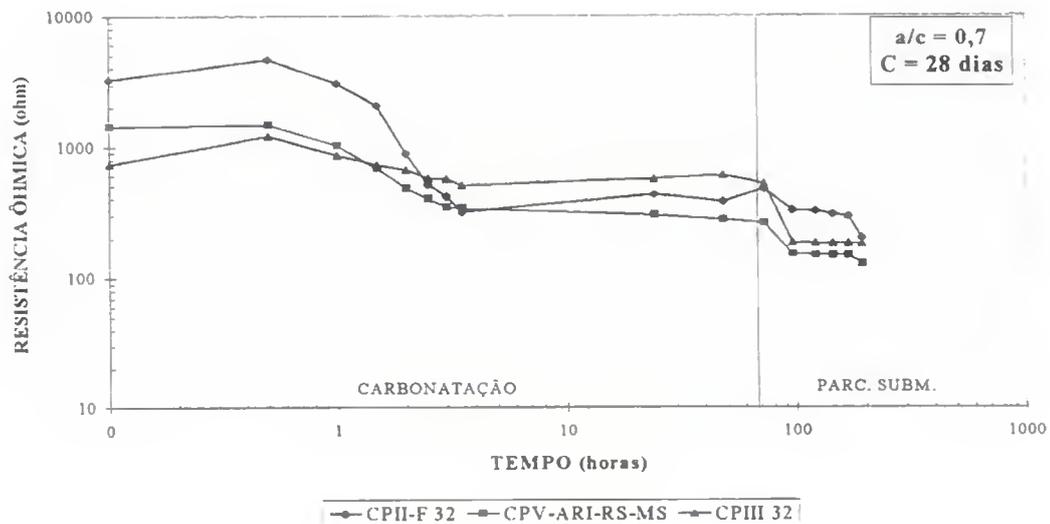


Figura 4.7- Evoluções das resistências ôhmica das séries normais na carbonatação, para  $a/c=0,7$  e cura 28 dias.

Na Figura 4.7, referentes a relação água/cimento igual a 0,7, a série confeccionada com o cimento CII-F 32 apresenta valores superiores aos outros cimentos. Os corpos de prova feitos com o cimento CPV-ARI-RS-MS apresentam os menores valores de  $R_{ohm}$  durante o ensaio.

Constata-se de uma forma geral, que os valores de resistência ôhmica, em séries equivalentes, mostraram-se superiores para o caso do emprego do cimento CII-F 32, o que contribui para os menores valores de  $i_{corr}$  apresentados pelas armaduras protegidas por argamassas feitas com este cimento.

#### 4.2.1.4 - Evolução da variação de massa (Mv)

As Figuras 4.8 e 4.9 apresentam os resultados da evolução de massa para as relações água/cimento 0,4 e 0,7.

O aumento de massa dos corpos de prova no ensaio acelerado de carbonatação, é decorrente do próprio processo de carbonatação com fixação de  $CO_2$  e liberação de água. Na condição de parcialmente submerso, posterior à carbonatação, há um incremento de massa devido a absorção capilar.

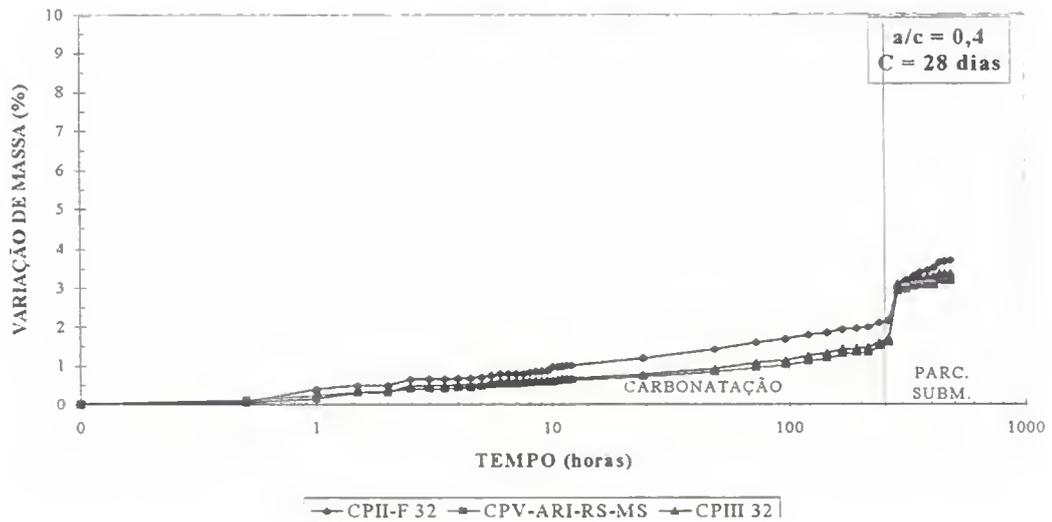


Figura 4.8- Evoluções das variações de massa das séries normais na carbonatação, para  $a/c=0,4$  e cura 28 dias.

Na Figura 4.8, observa-se que a série confeccionada com o cimento CPII-F 32 com relação água/cimento 0,4, apresenta valores de variação de massa ligeiramente maiores que os outros cimentos durante a carbonatação. Já as séries confeccionadas com os cimentos CPIII 32 e CPV-ARI-RS-MS apresentam valores de variação de massa semelhantes durante todo o ensaio.

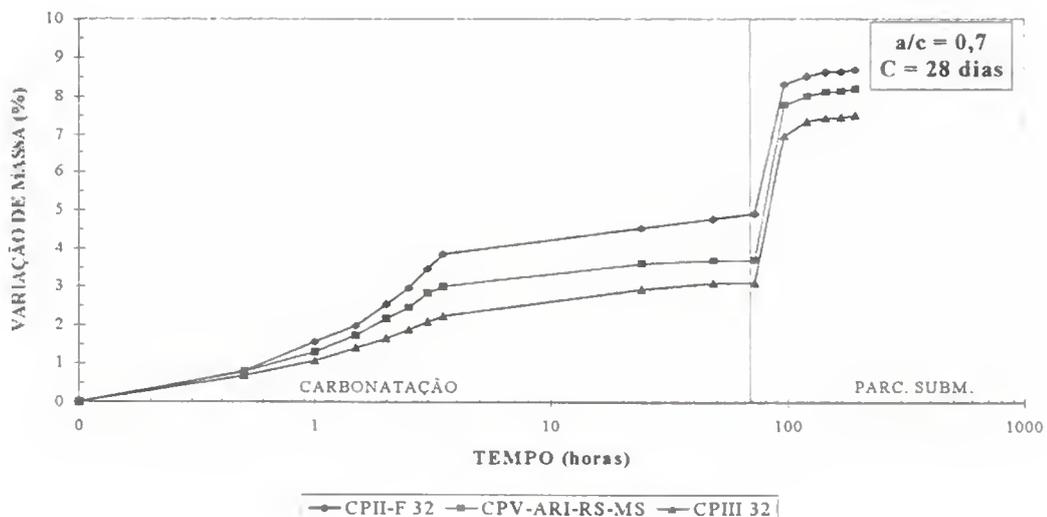


Figura 4.9- Evoluções das variações de massa das séries normais na carbonatação, para  $a/c=0,7$  e cura 28 dias.

Na Figura 4.9, observa-se que para relações água/cimento 0,7, há um maior ganho de massa para todos os tipos de cimento comparativamente à relação água/cimento 0,4. Os

corpos de prova com o cimento CPIII 32, são os que têm menor ganho de massa durante a etapa de carbonatação, apesar da  $i_{\text{corr}}$  ser maior conforme Figura 4.3, apresentando menor variação de massa devido provavelmente a menor quantidade de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

É interessante observar que o aumento de massa é proporcional à maior quantidade de clínquer tanto para a série com  $a/c=0,4$  como para  $0,7$ , já que o CPII-F 32 tem 0% de adição o CPV-ARI-RS-MS 30% e o CPIII 37,7% segundo informações do fabricante.

#### **4.2.2 - Ensaios com cloretos, após a carbonatação**

Os resultados relativos ao ensaio acelerado com cloretos após a carbonatação, são apresentados através da evolução das grandezas  $i_{\text{corr}}$ ,  $E_{\text{corr}}$ ,  $R_{\text{ohm}}$  e  $M_v$ , em função do tempo. Para cada grandeza estudada, são descritos os comportamentos encontrados para as diferentes relações água/cimento ( $0,4$  e  $0,7$ ), para uma mesma faixa de trabalhabilidade, para os três tipos de cimentos.

##### **4.2.2.1 - Evolução da intensidade de corrosão ( $i_{\text{corr}}$ )**

As Figuras 4.10 e 4.11 apresentam a evolução de  $i_{\text{corr}}$  para as relações água/cimento  $0,4$  e  $0,7$ , respectivamente. Uma vez que os valores de  $i_{\text{corr}}$  são obtidos ao final da etapa de secagem e ao final da etapa de imersão parcial, observa-se que existe uma amplitude de variação entre os respectivos valores, sendo que esta amplitude aumenta significativamente com o aumento da relação água/cimento.

Na figura 4.10 pode-se observar que a série executada com o cimento CPII-F 32 com relação água/cimento  $0,4$ , tarda mais tempo a sobrepassar a faixa  $0,1-0,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  em relação aos outros cimentos, o que ocorre ao final do sexto ciclo.

Em geral, as séries confeccionadas com o cimento CII-F 32 apresentam menores valores de  $i_{corr}$  tanto para relação água/cimento 0,4 como para 0,7 demonstrando assim o melhor desempenho em relação aos outros cimentos estudados.

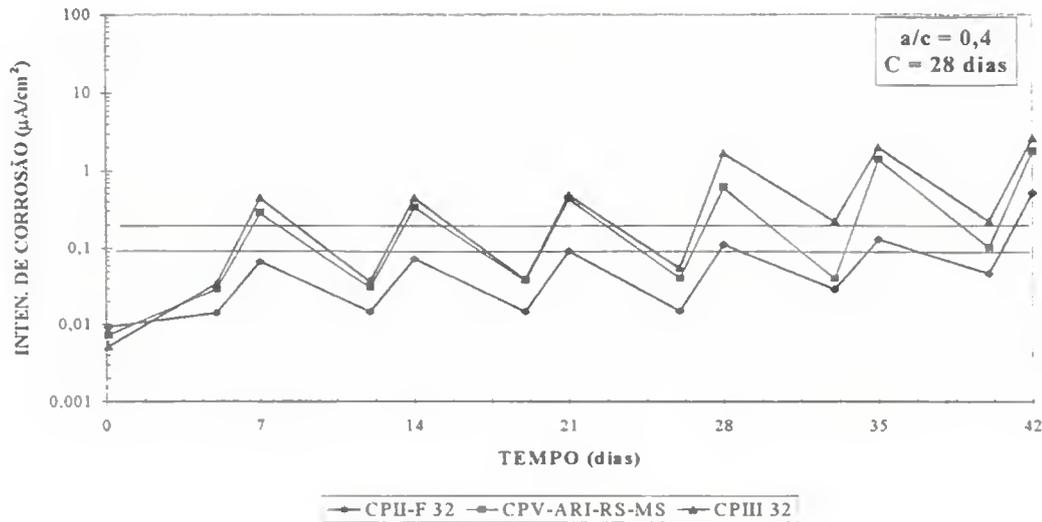


Figura 4.10- Evoluções das intensidades de corrosão das séries normais no ensaio com cloretos, para a/c=0,4 e cura 28 dias.

Deve-se observar que os valores da etapa de secagem são crescentes e permanecem superiores a  $0,1-0,2 \mu A/cm^2$ , para relação água/cimento 0,7. Isto comprova a crescente agressividade do ensaio provavelmente devido ao aumento da quantidade de cloreto.

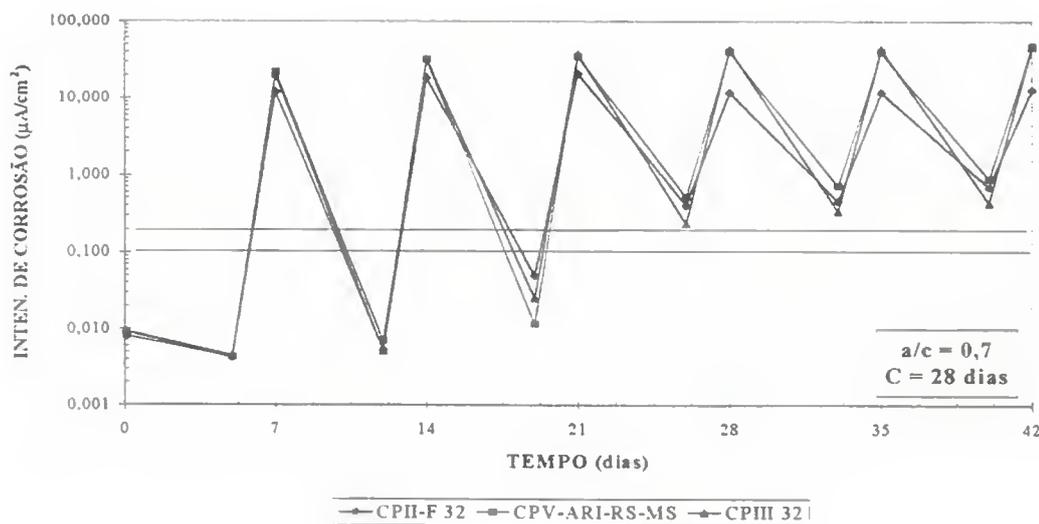


Figura 4.11- Evoluções das intensidades de corrosão das séries normais no ensaio com cloretos, para a/c=0,7 e cura 28 dias.

#### 4.2.2.2 - Evolução do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ )

Nas Figuras 4.12 e 4.13 são apresentados os resultados para o potencial de corrosão para as relações água/cimento 0,4 e 0,7 respectivamente.

Na etapa de secagem a 50°C, em função da perda de água e conseqüente redução de volume de eletrólito nos poros, observa-se valores superiores (mais positivos) de potencial de corrosão nas medições realizadas.

Na Figura 4.12 ( $a/c=0,4$ ), os corpos de prova executados com o cimento CII-F 32 apresentam uma menor amplitude nos valores de  $E_{corr}$  em relação aos outros cimentos. Já na série feita com o cimento CPV-ARI-RS-MS observa-se a maior amplitude de variação de  $E_{corr}$ .

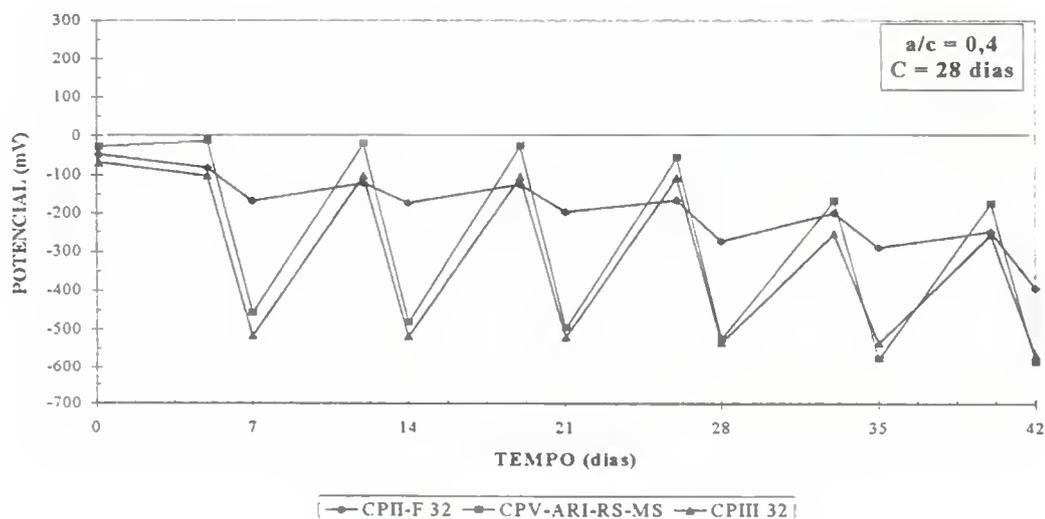


Figura 4.12- Evoluções dos potenciais de corrosão das séries normais no ensaio com cloretos, para  $a/c=0,4$  e cura 28 dias.

Na Figura 4.13, para relação água/cimento 0,7, todos os cimentos mostram amplitudes similares. Quanto aos valores de potencial na fase de imersão parcial, observa-se que os mesmos estabilizam próximo a -600 mV.

Na análise do potencial de corrosão, observa-se também a tendência dos valores medidos na etapa de secagem tenderem a mais negativos indicando uma maior probabilidade de corrosão.

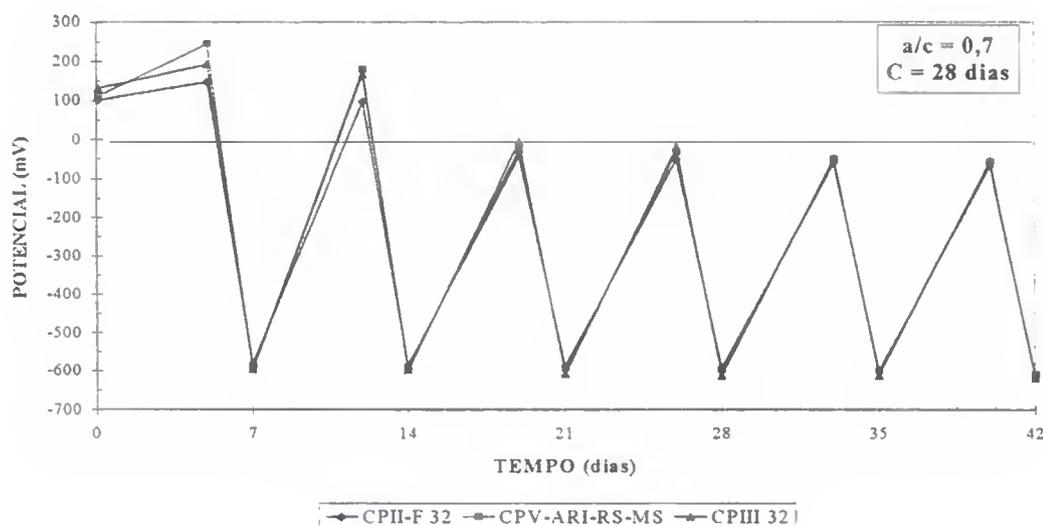


Figura 4.13- Evoluções dos potenciais de corrosão das séries normais no ensaio com cloretos, para  $a/c=0,7$  e cura 28 dias.

#### 4.2.2.3 - Evolução da resistência ôhmica (Rohm)

A evolução da resistência ôhmica para as séries produzidas com relação água/cimento 0,4 pode ser observada na Figura 4.14. A amplitude de variação é menor na série executada com o cimento CII-F 32 em relação as séries executadas com os outros cimentos, principalmente no início do ensaio. Ao final, os valores se igualam, aos demais cimentos, tal como ocorre com a  $i_{corr}$ . Isto mostra a interdependência da  $i_{corr}$  com a Rohm ou que as duas grandezas ( $i_{corr}$  e Rohm) são afetadas da mesma forma pelos condicionamentos do ensaio acelerado.

Na Figura 4.15 ( $a/c=0,7$ ), em geral, é interessante notar que os valores de Rohm na etapa de secagem diminuem gradativamente com o transcurso do ensaio, o que pode indicar o aumento da penetração de cloretos que diminui a resistividade e possibilita o aumento da  $i_{corr}$ , acompanhado da diminuição da variação de massa na secagem conforme Figura 4.17.

Ao se aumentar a relação água/cimento, contata-se que ocorrem aumentos da resistência ôhmica na fase de secagem, principalmente nos ciclos iniciais, indicando uma maior facilidade de perda de água do sistema de poros.

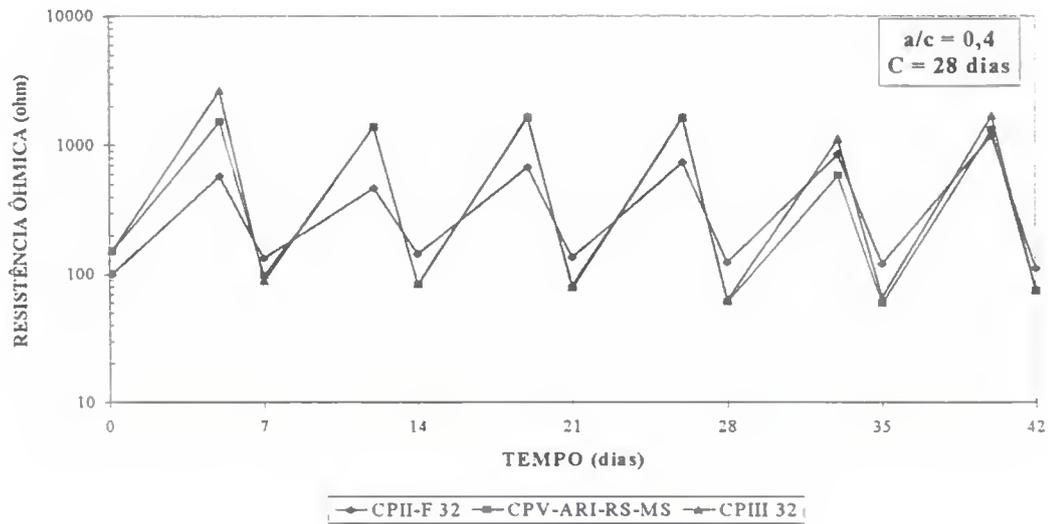


Figura 4.14- Evoluções das resistências ôhmica das séries normais no ensaio com cloretos, para  $a/c=0,4$  e cura 28 dias.

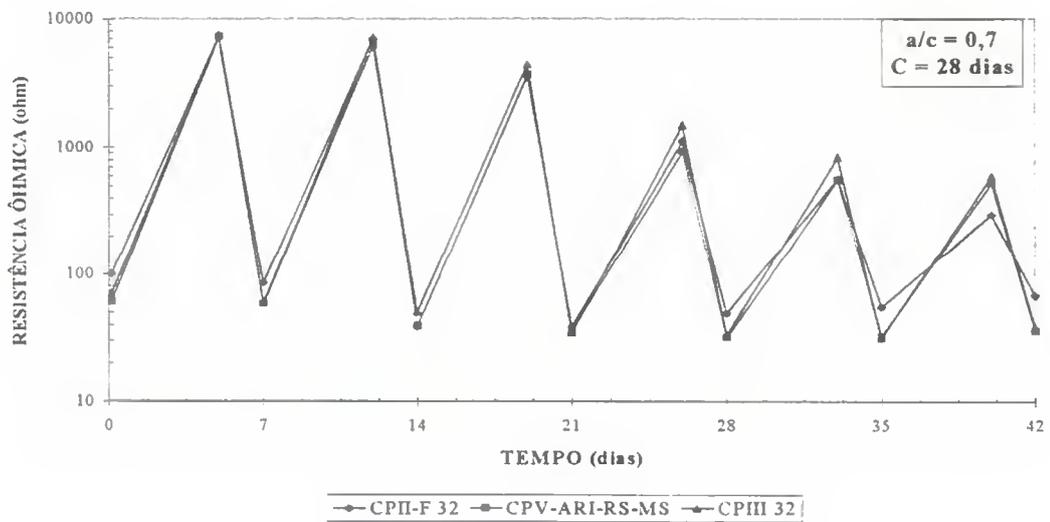


Figura 4.15- Evoluções das resistências ôhmica das séries normais no ensaio com cloretos, para  $a/c=0,7$  e cura 28 dias.

#### 4.2.2.4 - Evolução da variação de massa (Mv)

As Figuras 4.16 e 4.17, representam a evolução da variação de massa para as relações água/cimento 0,4 e 0,7. Observa-se que com o aumento da relação água/cimento, cresce a

amplitude de variação em ciclos equivalentes. Este comportamento significa que séries com maior relação água/cimento perdem mais água na secagem e absorvem mais na etapa de imersão parcial.

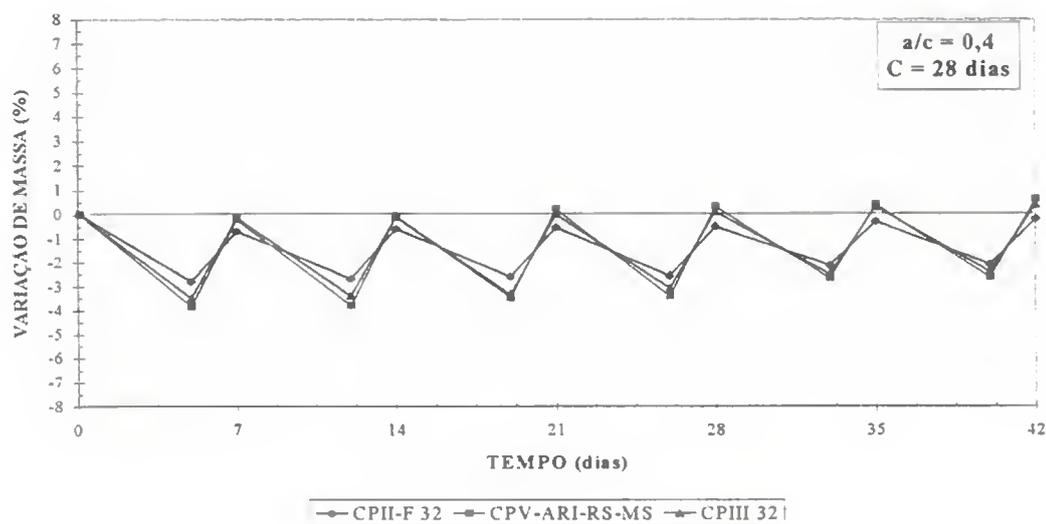


Figura 4.16- Evoluções das variações de massa das séries normais no ensaio com cloretos, para a/c=0,4 e cura 28 dias.

Para ambas relações água/cimento, os corpos de prova confeccionados com o CPII-F 32 apresentaram menor amplitude de variação com os menores valores de Mv em relação aos outros cimentos.

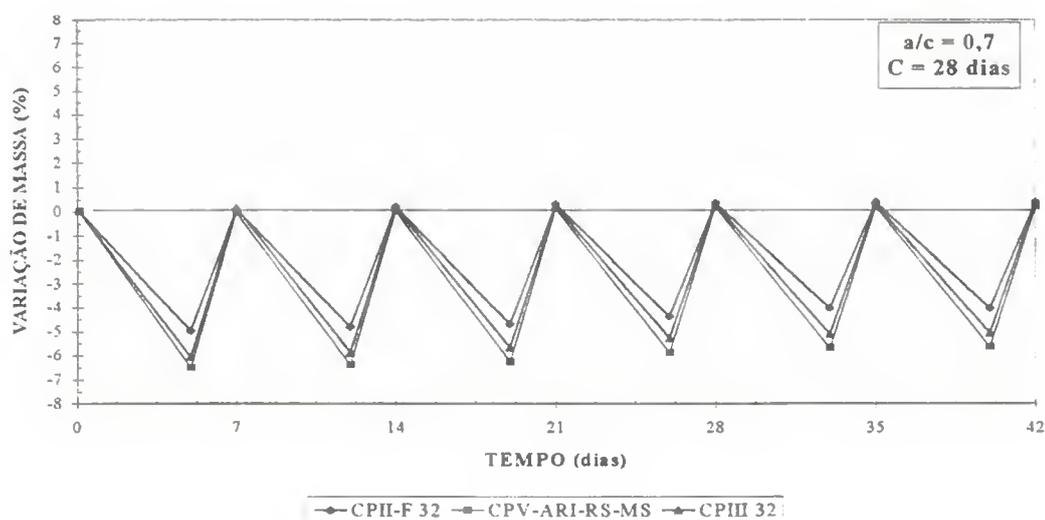


Figura 4.17- Evoluções das variações de massa das séries normais no ensaio com cloretos, para a/c=0,7 e cura 28 dias.

Observa-se também que existe uma tendência à uma menor perda da massa na secagem no final do ensaio, o que pode significar o crescimento da higroscopicidade com a maior penetração de cloretos. Nas etapas de imersão parcial nota-se insignificantes ganhos de massa durante todo o ensaio, devido provavelmente a secagem que não foi suficiente, já que os corpos de prova no começo do ensaio estavam cheios de água pois acabavam de sair da etapa de parcialmente submerso do ensaio de carbonatação.

### **4.3 - ENSAIOS DE CORROSÃO DAS SÉRIES NORMAIS CURADAS 7 DIAS**

São mostrados neste item os resultados das séries normais com idade de cura 7 dias. Primeiro estão apresentados os resultados dos ensaios de carbonatação acelerada e logo a seguir o resultados dos ensaios acelerados com cloretos para os três tipos de cimentos estudados.

Nestes ensaios, são mostradas as evoluções das grandezas ( $i_{\text{corr}}$ ,  $E_{\text{corr}}$ ,  $R_{\text{ohm}}$  e  $M_v$ ) em função do tempo. Para cada grandeza estudada, são descritos os comportamentos encontrados para relações água/cimento 0,4 e 0,7, para uma mesma faixa de trabalhabilidade.

O critério utilizado para avaliar a evolução das grandezas citadas anteriormente para cada tipo de cimento, foi a média dos valores das variáveis eletroquímicas das barras dos corpos de prova de cada série. Os valores apresentados para as grandezas citadas anteriormente representam a média dos 4 valores medidos nas barras dos corpos de prova de cada série.

#### **4.3.1 - Ensaio de carbonatação acelerada**

São apresentados os resultados referentes à etapa de carbonatação acelerada e, consecutivamente os resultados da etapa de parcialmente submerso após à carbonatação. Em geral, há um pior desempenho de todas as séries em relação aos ensaios das séries normais curadas 28 dias.

#### 4.3.1.1 - Evolução da intensidade de corrosão ( $i_{corr}$ )

As Figuras 4.18 e 4.19 apresentam a evolução de intensidade de corrosão, para a relações água/cimento 0,4 e 0,7 respectivamente. Em cada figura são representados os valores de  $i_{corr}$  comparando-se o desempenho dos três tipos de cimentos utilizados no presente trabalho.

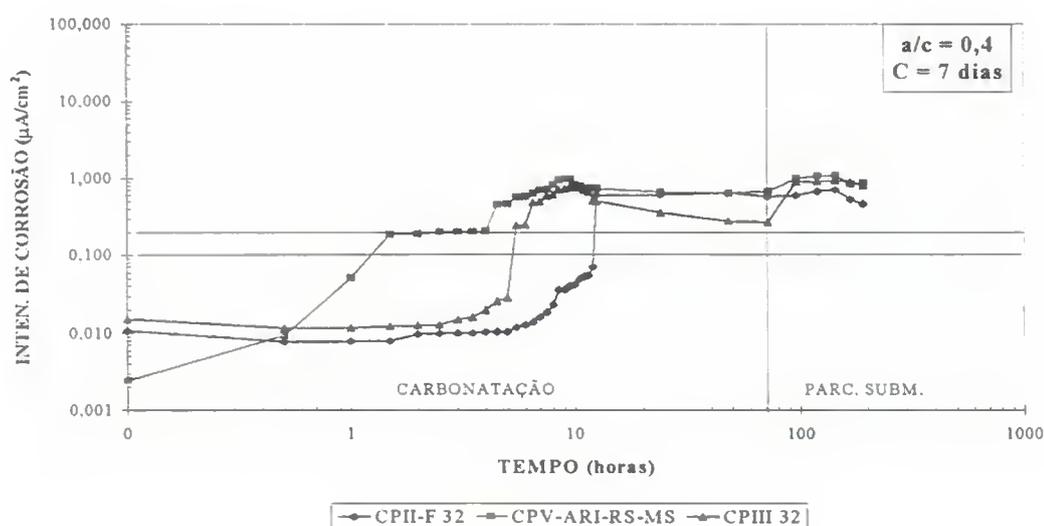


Figura 4.18- Evoluções das intensidades de corrosão das séries normais na carbonatação, para  $a/c=0,4$  e cura 7 dias.

Para a relação água/cimento 0,4 (Fig. 4.18), pode-se observar que a fase de iniciação (período de tempo a partir do início do ensaio em que a  $i_{corr}$  sobrepassa a faixa de  $0,1 - 0,2 \mu A/cm^2$ ) da série relativa ao cimento CPV-ARI-RS-MS é significativamente menor que a da série relativa ao cimento CIII 32, mas no decorrer do ensaio, este atinge patamares de  $i_{corr}$  apenas um pouco menor que o CPV-ARI-RS-MS. O cimento CII-F 32 é o que apresenta maior período de iniciação.

A Fig. 4.19 mostra a evolução da intensidade de corrosão das barras embebidas em argamassas com relação água/cimento 0,7. Os corpos de prova produzidos com o CII-F 32, apresentam maior capacidade de proteção, já que o período de início de despassivação das armaduras é maior e os valores de intensidade de corrosão das barras são aproximadamente cerca de 25% dos valores apresentados por aquelas protegidas pelos outros cimentos. Isto evidencia uma menor capacidade de proteção dos cimentos com adições de escória e de

microsilica em ambientes contaminados com CO<sub>2</sub>. Ao se empregar a relação água/cimento 0,7, constata-se que a fase de iniciação é reduzida, e se observa um desenvolvimento de corrosão mais intenso. Os valores de  $i_{corr}$  atingem patamares bem mais elevados, comparando-se com a relação água/cimento 0,4, quando os corpos de prova são colocados na condição de parcialmente submersos, chegando a, aproximadamente 8  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  no caso do CPV-ARI-RS-MS.

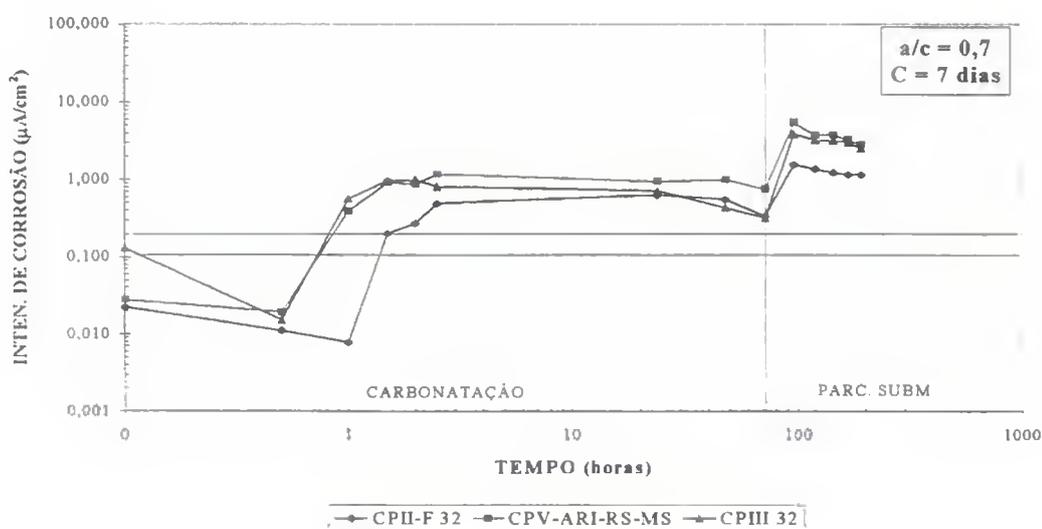


Figura 4.19- Evoluções das intensidades de corrosão das séries normais na carbonatação, para  $a/c=0,7$  e cura 7 dias.

#### 4.3.1.2 - Evolução do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ )

As Figuras 4.20 e 4.21 apresentam a evolução do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ), variando-se a relação água/cimento 0,4 e 0,7 respectivamente.

Observa-se na Figura 4.20 ( $a/c=0,4$ ), que os corpos de prova feitos com o cimento CII-F 32 apresentam valores de potencial superiores aos corpos de prova feitos com outros cimentos, demonstrando assim melhor desempenho e confirmando os resultados encontrados de  $i_{corr}$  conforme Figura 4.18. Na série que emprega o cimento CIII 32, observa-se uma queda rápida de potencial nos instantes iniciais, sendo que o mesmo se estabiliza próximo a -350 mV e só volta a cair na condição de parcialmente submerso. No caso do cimento CPV-ARI-RS-MS, com o início do processo de carbonatação, constata-se que o potencial de corrosão cai gradativamente, e na condição de parcialmente submerso, atinge valores bem menores.

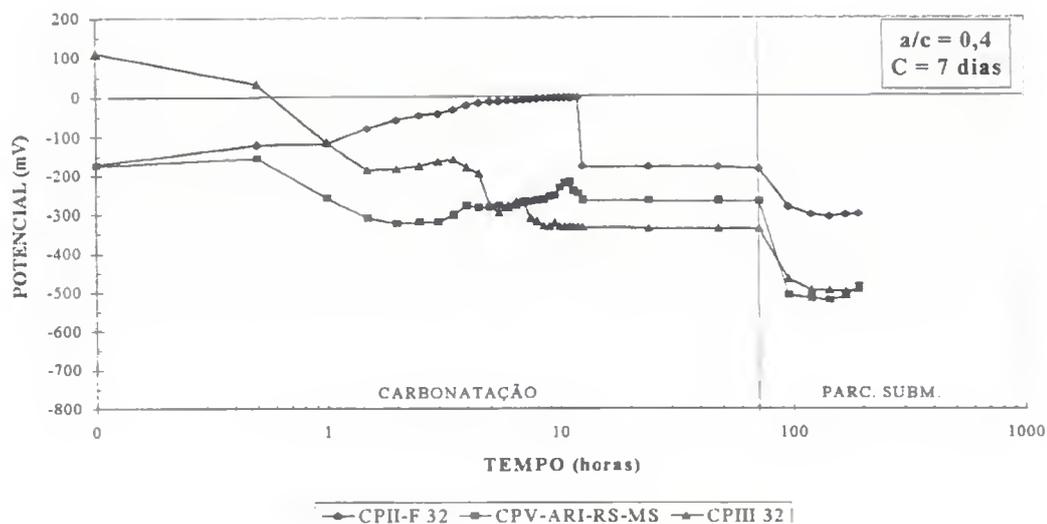


Figura 4.20- Evoluções dos potenciais de corrosão das séries normais na carbonatação, para a/c=0,4 e cura 7 dias.

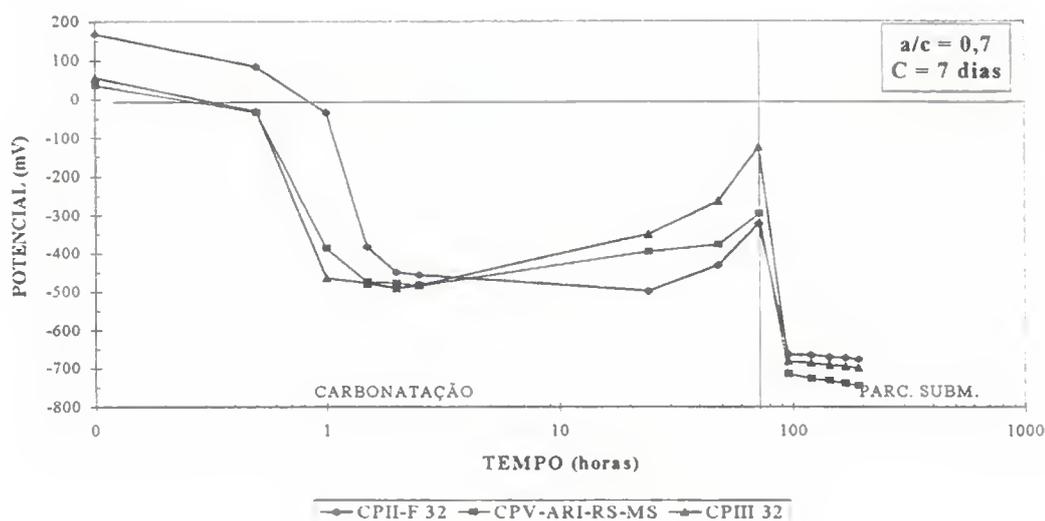


Figura 4.21- Evoluções dos potenciais de corrosão das séries normais na carbonatação, para a/c=0,7 e cura 7 dias.

No caso da relação água/cimento 0,7 (Fig. 4.21), para todos os cimentos verifica-se uma redução rápida dos valores de potencial de corrosão, e que se tornam muito negativos ao final do ensaio. Observa-se nitidamente que, ao se aumentar a relação água/cimento, os valores de  $E_{corr}$  têm uma diminuição mais abrupta.

De uma forma geral, os valores de potencial são mais nobres (superiores) para as séries que empregam o cimento CII-F 32 do que para as séries confeccionadas com os outros tipos de cimentos.

#### 4.3.1.3 - Evolução da resistência ôhmica (Rohm)

Na Figura 4.22, são mostrados os resultados para a relação água/cimento 0,4. Observa-se que os corpos de prova das séries feitas com os cimentos CII-F 32 e CPV-ARI-RS-MS, apresentam uma certa tendência a valores constantes em todo ensaio de carbonatação sem entretanto apresentar o mesmo aspecto apresentado pela mesma série curada 28 dias (Figura 4.6). Já os corpos de prova feitos com o cimento CIII 32 apresentam os menores valores de resistência ôhmica durante o ensaio de carbonatação. Apesar dos cimentos CII-F 32 e CIII 32 apresentarem praticamente os mesmos valores de Rohm os valores de  $i_{corr}$  do CII-F 32 são bastante inferiores.

Na Figura 4.23 estão apresentados os resultados para a relação água/cimento 0,7. Observa-se que as evoluções de resistência ôhmica são muito semelhantes em todas as séries, sendo no entanto um pouco maior para os corpos de prova feitos com o cimento CII-F 32, na condição de parcialmente submerso.

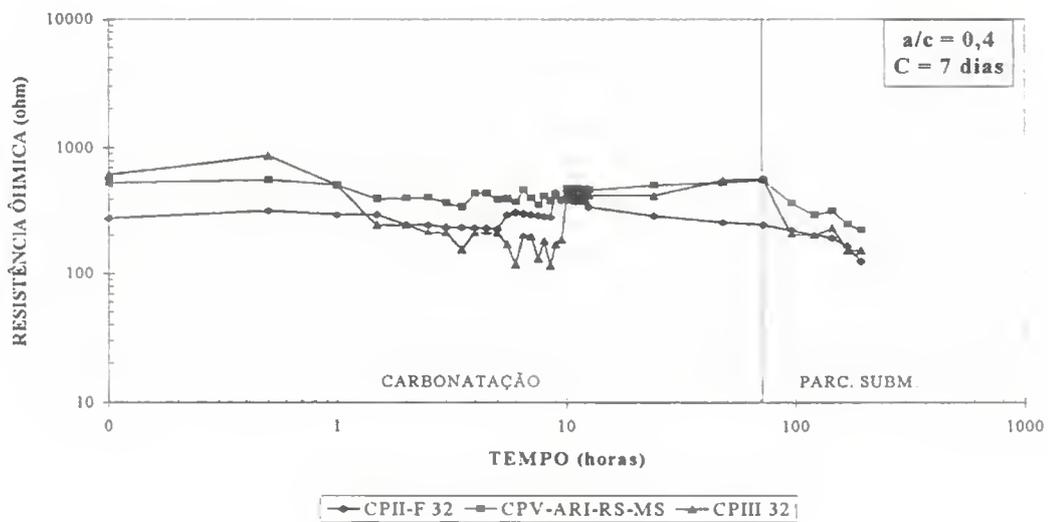


Figura 4.22- Evoluções das resistências ôhmica nas séries normais na carbonatação, para  $a/c=0,4$  e cura 7 dias.

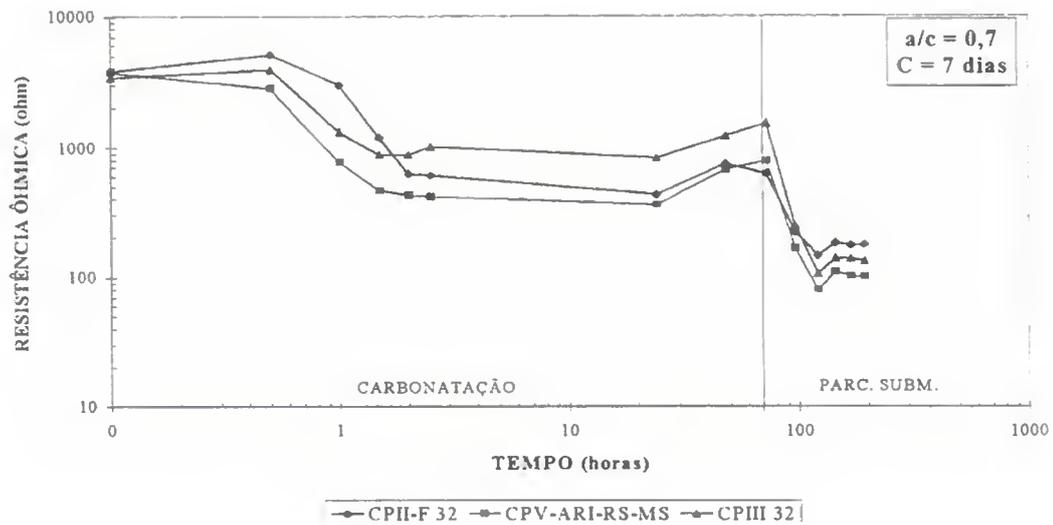


Figura 4.23- Evoluções das resistências ôhmica das séries normais na carbonatação, para  $a/c=0,7$  e cura 7 dias.

#### 4.3.1.4 - Evolução da variação de massa (Mv)

A Figura 4.24 ( $a/c=0,4$ ), apresenta valores de variação de massa similares em todas as séries na etapa de carbonatação. Havendo apenas um aumento da variação de massa superior para a série do cimento CIII 32 na condição de parcialmente submerso.

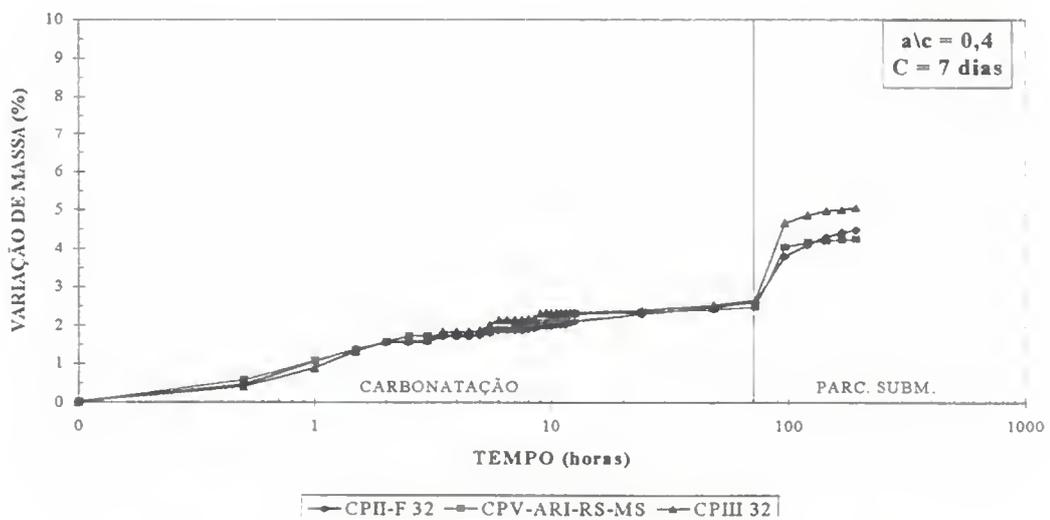


Figura 4.24- Evoluções das variações de massa das séries normais na carbonatação, para  $a/c=0,4$  e cura 7 dias.

A Figura 4.25 ( $a/c=0,7$ ), também apresenta perfis de evolução de variação de massa similares em todas as séries na etapa de carbonatação. A série executada com o cimento CIII

32, apresenta os menores valores de variação de massa durante a etapa de carbonatação em relação aos outros cimentos. Observa-se que os cimentos com menor teor de clínquer apresentam menos aumento de massa, indicando que tem menos matéria para carbonatar.

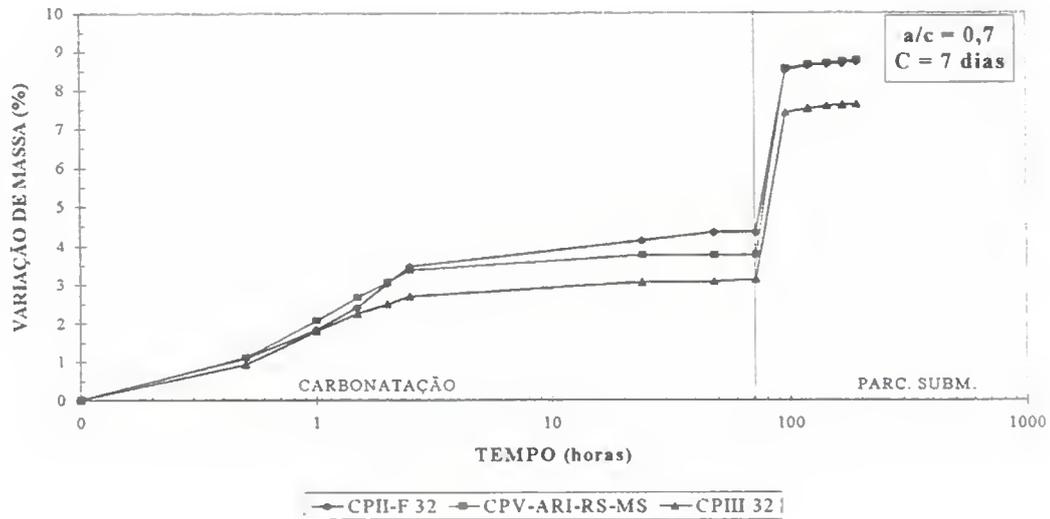


Figura 4.25- Evoluções das variações de massa das séries normais na carbonatação, para  $a/c=0,7$  e cura 7 dias.

#### 4.3.2 - Ensaio com cloretos, após a carbonatação

Os resultados pertinentes ao ensaio acelerado com cloretos, após a carbonatação, acham-se ordenados colocando-se a evolução das variáveis  $i_{corr}$ ,  $E_{corr}$ ,  $Rohm$  e  $Mv$ , em função do tempo. Para cada variável estudada, são descritos os comportamentos encontrados para diferentes relações água/cimento (0,4 e 0,7), para uma mesma faixa de trabalhabilidade, dos três tipos de cimentos estudados.

Em geral, observa-se um aumento de amplitude dos valores medidos durante ensaios com a diminuição do tempo de cura.

##### 4.3.2.1 - Evolução da intensidade de corrosão ( $i_{corr}$ )

Na Figura 4.26, observa-se que as armaduras dos corpos de prova feitos com o cimento CPIII 32, com relação água/cimento 0,4, atingem até três vezes os valores medidos de

$i_{\text{corr}}$  dos corpos de prova de cimento CPV-ARI-RS-MS durante boa parte do ensaio. Já a série confeccionada com o cimento CII-F 32 apresenta os menores valores de  $i_{\text{corr}}$  até o sexto ciclo, tendo sido por isto prosseguido o ensaio por mais três ciclos para verificar se continuava a sua tendência de aumento. Observa-se que ao final do nono ciclo seus valores de  $i_{\text{corr}}$  são um pouco superiores.

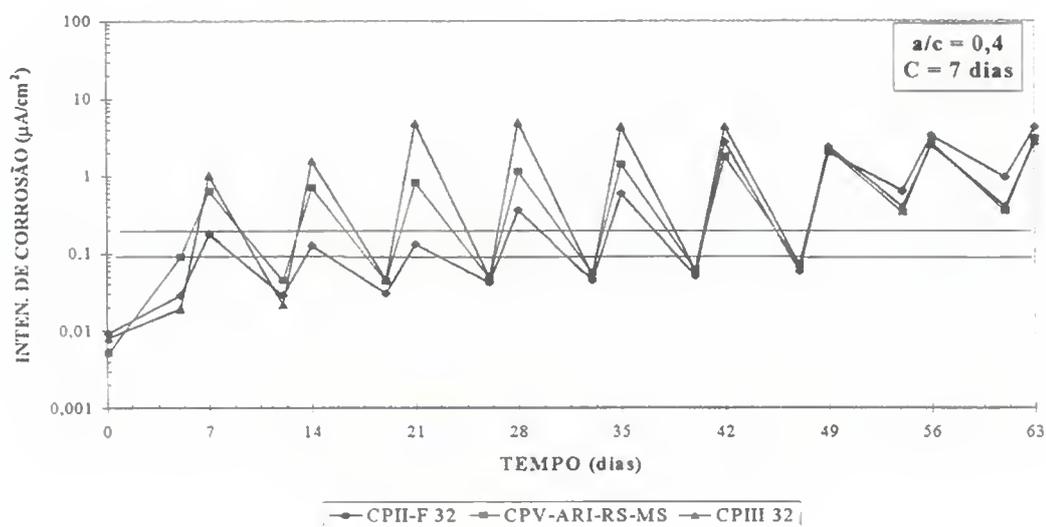


Figura 4.26- Evoluções das intensidades de corrosão das séries normais no ensaio com cloretos, para  $a/c=0,4$  e cura 7 dias.

Na Figura 4.27 ( $a/c=0,7$ ), observa-se que as armaduras embutidas em argamassas dos três tipos de cimentos ultrapassam a faixa  $0,1-0,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  já no primeiro ciclo, numa situação bastante pior que os corpos de prova executados com relação água/cimento 0,4, o que evidencia uma redução da vida útil das armaduras com o aumento da relação  $a/c$ . Constata-se também que os valores de  $i_{\text{corr}}$ , ao final do ensaio, para a série de cimento CPV-ARI-RS-MS, foram um pouco maior do que os valores obtidos para os outros cimentos, mostrando um comportamento pior comparado com valores das séries equivalentes com a relação água/cimento 0,4. Os valores de  $i_{\text{corr}}$  são extremamente elevados nestas condições de ensaio, chegando a até  $70 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Nota-se para as duas relações  $a/c$ , que a intensidade de corrosão na etapa de secagem tem valores cada vez mais elevados.

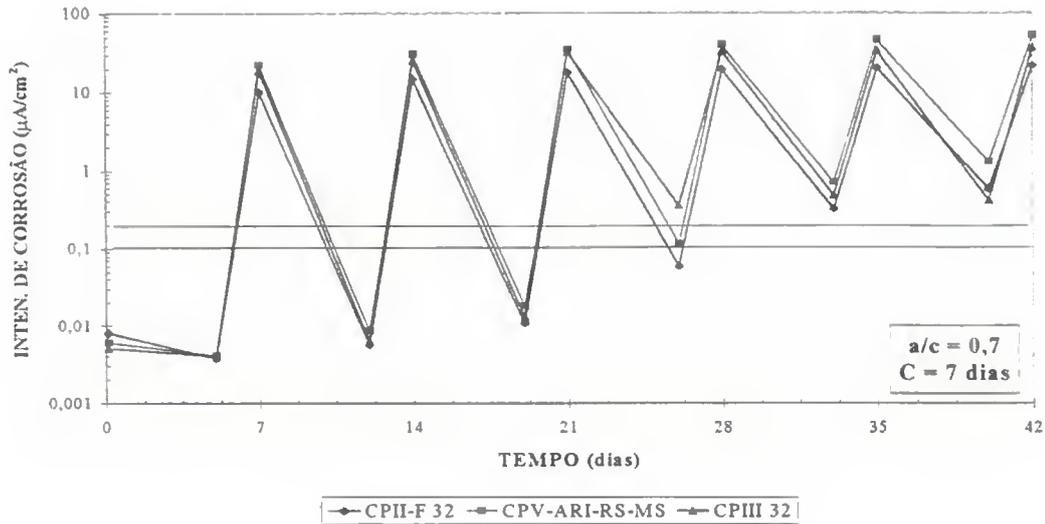


Figura 4.27- Evoluções das intensidades de corrosão das séries normais no ensaio com cloretos, para  $a/c=0,7$  e cura 7 dias.

#### 4.3.2.2 - Evolução do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ )

Estão representadas nas Figuras 4.28 e 4.29 a evolução do  $E_{corr}$  para as relações água/cimento 0,4 e 0,7 respectivamente.

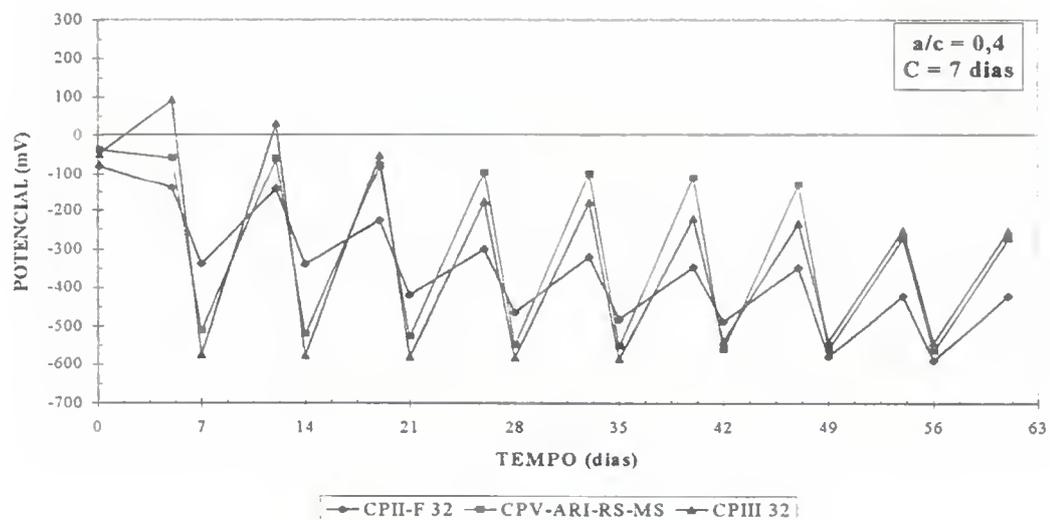


Figura 4.28- Evoluções dos potenciais de corrosão das séries normais no ensaio com cloretos, para  $a/c=0,4$  e cura 7 dias.

Na Figura 4.28 ( $a/c=0,4$ ), observa-se que os corpos de prova executados com o cimento CPIII 32 e CPV-ARI-RS-MS apresentam as maiores variações de amplitude,

comparadas com o cimento CII-F 32, confirmando assim os resultados encontrados com  $i_{corr}$  nas séries equivalentes.

A Figura 4.29 apresenta perfis de  $E_{corr}$  similares para todos os cimentos. Contata-se um aumento significativo da amplitude com o aumento da relação água/cimento.

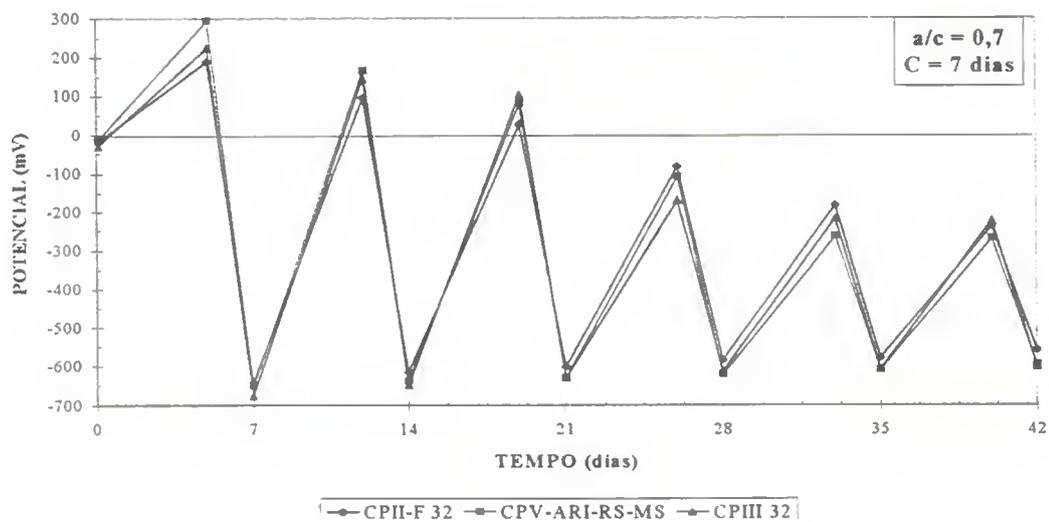


Figura 4.29- Evoluções dos potenciais de corrosão das séries normais no ensaio com cloretos, para  $a/c=0,4$  e cura 7 dias.

#### 4.3.2.3 - Evolução da resistência ôhmica (Rohm)

Na Figura 4.30, está representada a evolução da Rohm com relação água/cimento 0,4. Observa-se nitidamente uma diminuição gradual da Rohm na etapa de secagem para a série confeccionada com o cimento CII-F 32. A série feita com os cimento CPV-ARI-RS-MS apresenta maior variação de amplitude em relação a série feita com o CII-F 32.

A Figura 4.31 mostra a evolução da Rohm para a relação água/cimento 0,7. Podemos observar uma diminuição gradativa dos valores tanto na etapa de secagem como na etapa de imersão parcial durante todo o ensaio, para todos os tipos de cimento. Esta redução é devido provavelmente, como já citado anteriormente, por um maior aumento de quantidade de cloreto, que é condutor e higroscópico, o que contribui para redução da Rohm, com o aumento de  $i_{corr}$ .

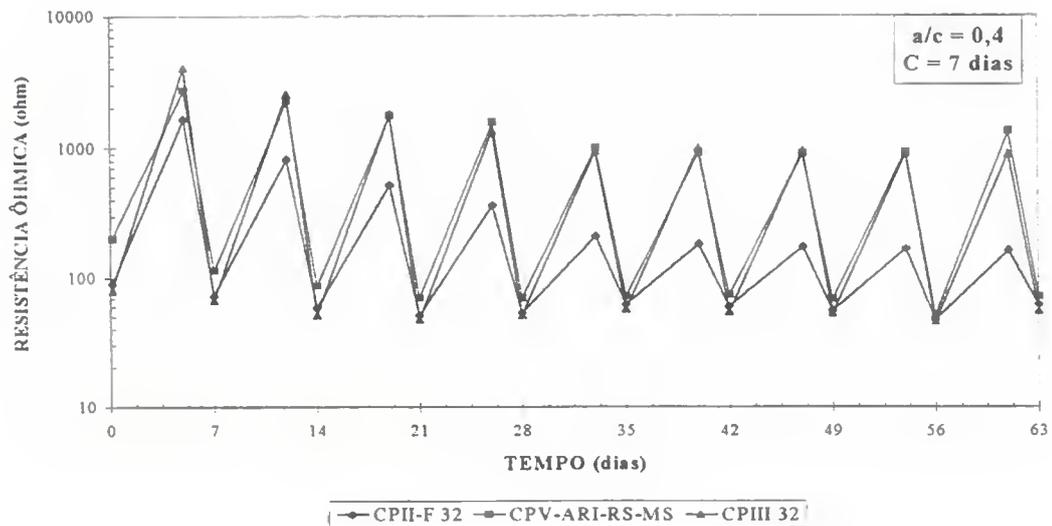


Figura 4.30- Evoluções das resistências ôhmica das séries normais no ensaio com cloretos para a/c=0,4 e cura 7 dias.

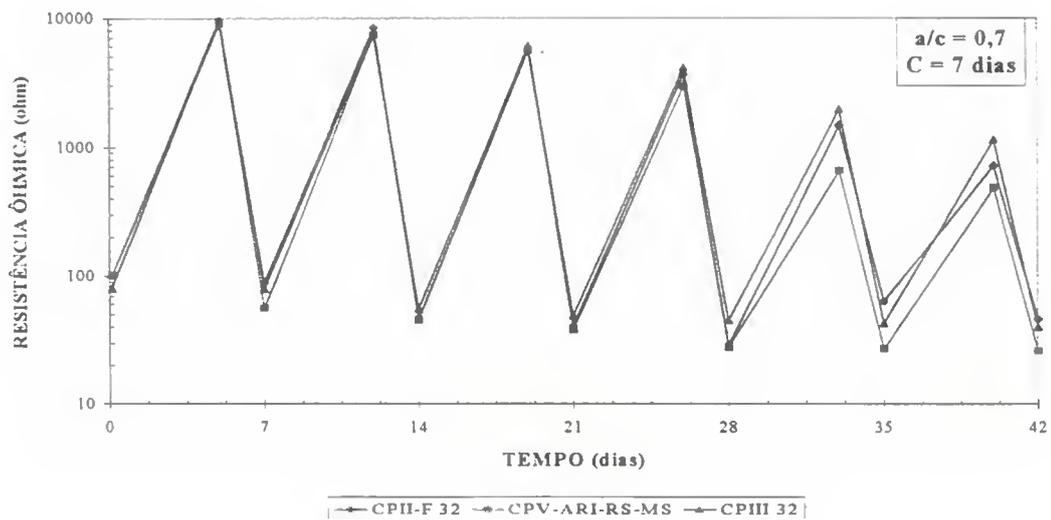


Figura 4.31- Evoluções das resistências ôhmica das séries normais no ensaio com cloretos, para a/c=0,7 e cura 7 dias.

#### 4.3.2.4 - Evolução da variação de massa (Mv)

Nas Figuras 4.32 e 4.33 estão apresentados as evoluções de massa executadas com as relações água/cimento 0,4 e 0,7 respectivamente. Observa-se um comportamento parecido ao encontrado nas séries equivalentes curadas 28 dias (Figuras 4.16 e 4.17), onde nota-se insignificantes ganhos de massa durante todo o ensaio nas etapas de imersão parcial, o que pode significar uma secagem ineficiente segundo explicado anteriormente.

Observa-se que a elevação da relação água/cimento, aumenta significativamente a amplitude de variação de massa que, em geral, as séries confeccionadas com o cimento CPII-F 32 apresentam as menores variações de massa em relação as séries confeccionadas com os outros cimentos. Já as séries feitas com o cimento CPV-ARI-RS-MS, em ambos os casos apresentam as maiores variações de massa.

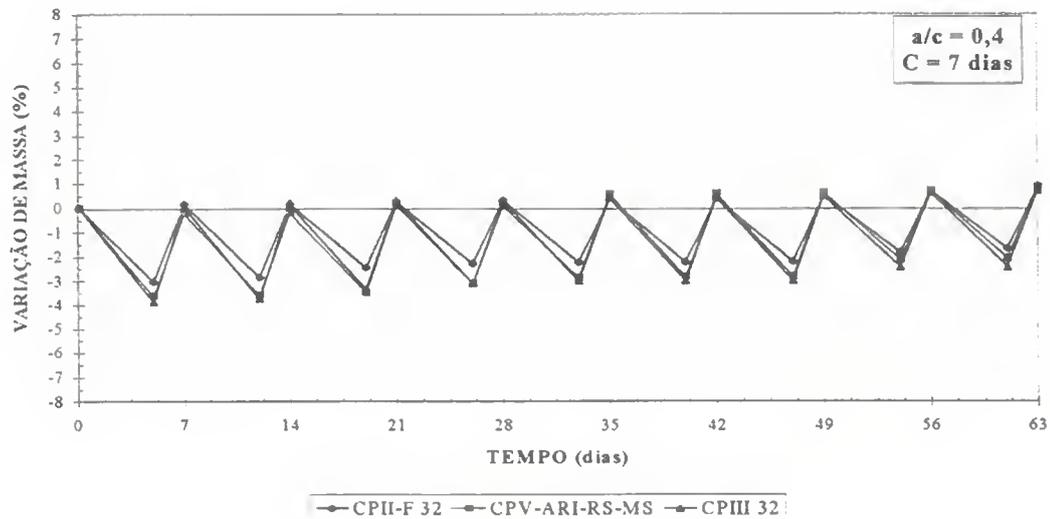


Figura 4.32- Evoluções das variações de massa das séries normais no ensaio com cloretos, para a/c=0,4 e cura 7 dias.

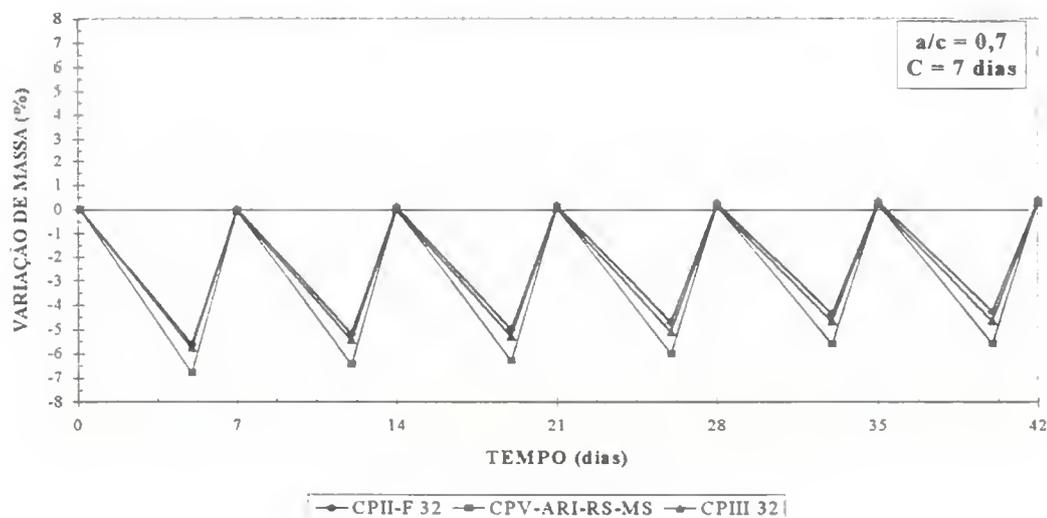


Figura 4.33- Evoluções das variações de massa das séries normais no ensaio com cloretos, para a/c=0,7 e cura 7 dias.

## 4.4 - SÉRIES INVERSAS

As séries inversas foram curadas 7 dias, e os seus resultados estão apresentados conforme a seqüência do ensaio. Inicialmente, são mostrados os resultados do ensaio acelerado com cloretos, e logo a seguir, os resultados do ensaio de carbonatação acelerada, comparando-se o desempenho dos três tipos de cimentos estudados.

Nestes ensaios, são mostradas as evoluções das variáveis  $i_{corr}$ ,  $E_{corr}$ ,  $Rohm$  e  $Mv$ , em função do tempo. Para cada parâmetro estudado são descritos os comportamentos observados para relações água/cimento 0,4 e 0,7, para uma mesma faixa de trabalhabilidade.

Como mencionado no capítulo 3, o procedimento utilizado para avaliar as variáveis citadas anteriormente, é o mesmo utilizado para as séries normais.

### 4.4.1 - Ensaio com cloretos

Os resultados relativos ao ensaio acelerado com cloretos, são apresentados através do comportamento das variáveis  $i_{corr}$ ,  $E_{corr}$ ,  $Rohm$  e  $Mv$ , em função do tempo. Para cada variável estudada, são descritos os comportamentos encontrados para as diferentes relações água/cimento (0,4 e 0,7), para os três tipos de cimentos com a mesma faixa de trabalhabilidade.

#### 4.4.1.1 - Evolução da intensidade de corrosão ( $i_{corr}$ )

Nas Figuras 4.34 e 4.35, estão apresentadas as evoluções de  $i_{corr}$  para as relações água/cimento 0,4 e 0,7 respectivamente. Em geral, observa-se que, com o aumento da relação água/cimento, há um aumento na variação de amplitude de  $i_{corr}$ .

Na Figura 4.34, que mostra o comportamento das séries feitas com relação  $a/c=0,4$ , observa-se nitidamente que a série confeccionada com o cimento CII-F 32 apresenta um

menor período de iniciação (que é quando os valores de  $i_{\text{corr}}$  ultrapassam a faixa de 0,1 a 0,2  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) e os maiores valores de  $i_{\text{corr}}$ . Os demais cimentos, apresentam um maior período de iniciação, despassivando só no sétimo ciclo.

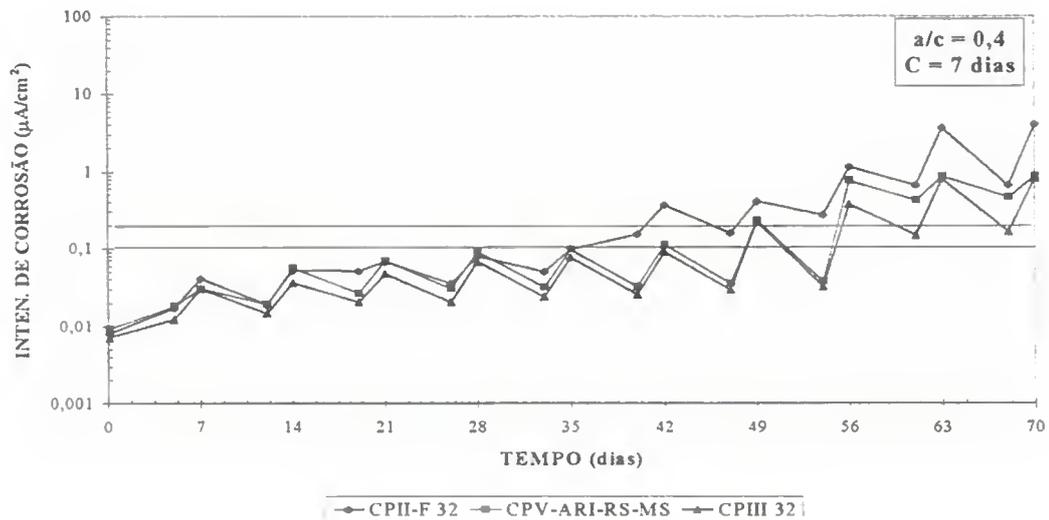


Figura 4.34- Evoluções das intensidades de corrosão das séries inversas no ensaio com cloretos, para  $a/c=0,4$ .

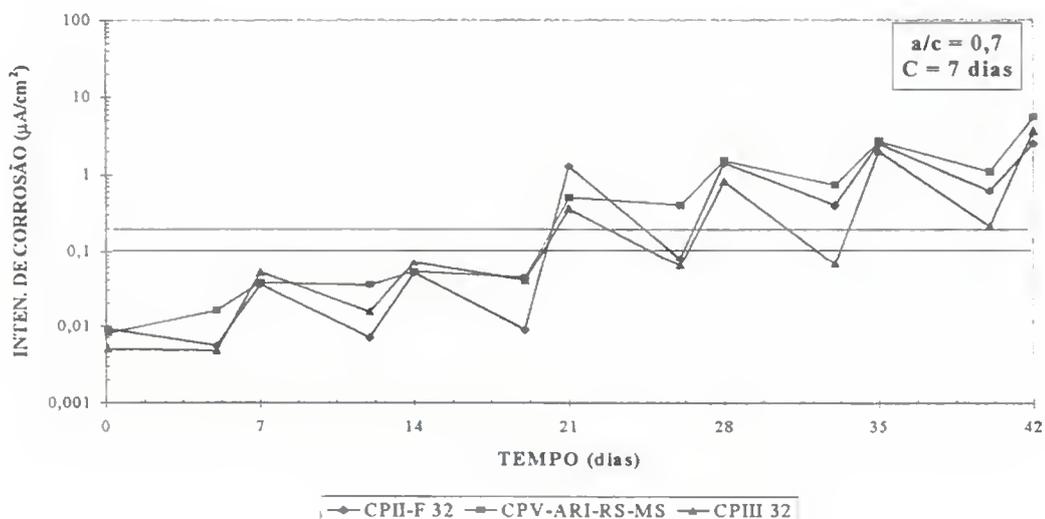


Figura 4.35- Evoluções das intensidades de corrosão das séries inversas no ensaio com cloretos, para  $a/c=0,7$ .

Ao observar o comportamento das séries feitas com relação água/cimento 0,7 (Fig. 4.35), podemos notar que todos os corpos de prova despassivam já no terceiro ciclo. A redução da fase de iniciação ocorre para todos os cimentos com o aumento da relação água/cimento. É importante observar o crescimento dos valores de  $i_{\text{corr}}$  na etapa de secagem

para todos os cimento, tal como observado também nas séries normais (corpos de prova já carbonatados). Este fenômeno ocorre para as demais variáveis estudadas ( $E_{corr}$ , Rohm e Mv), o que comprova uma maior capacidade de retenção de água, provavelmente devido ao aumento da quantidade de cloreto, que é higroscópico.

#### 4.4.1.2 - Evolução do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ )

A Figura 4.36 apresenta evoluções de potencial de corrosão com a relação água/cimento 0,4. A série executada com o cimento CII-F 32 apresenta os menores valores de potencial que chegam a atingir -600 mV. Já a série executada com o cimento CIII 32 apresenta valores superiores que não ultrapassam -500 mV.

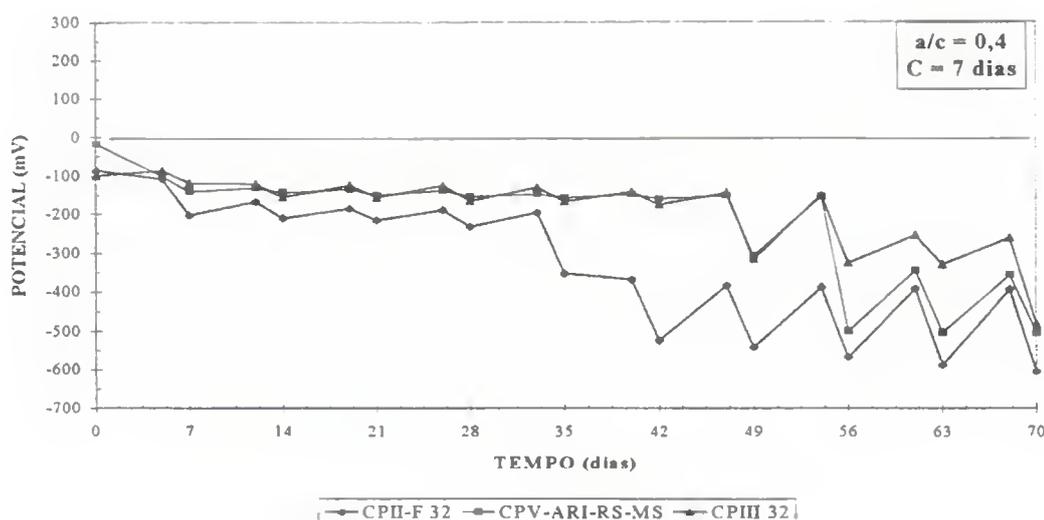


Figura 4.36- Evoluções dos potenciais de corrosão das séries inversas no ensaio com cloretos, para a/c=0,4.

A Figura 4.37 apresenta resultados com a relação água/cimento 0,7. Em geral, os perfis de evolução do  $E_{corr}$  são bastantes parecidos até o terceiro ciclo, e diferem nos ciclos seguintes principalmente na série feita com o cimento CIII 32, que apresenta valores significativamente inferiores (menos negativos) em relação aos outros cimentos.

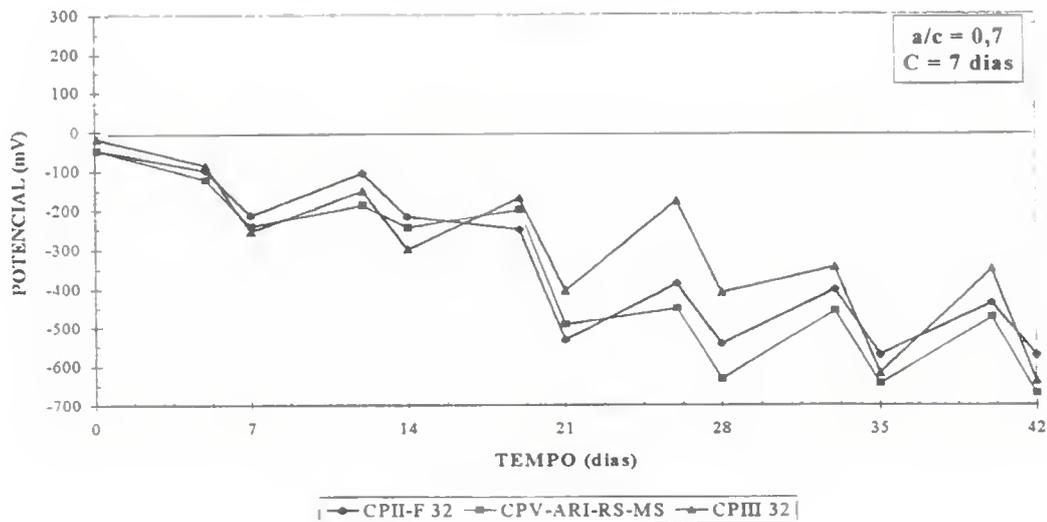


Figura 4.37- Evoluções dos potenciais de corrosão das séries inversas no ensaio com cloretos, para  $a/c=0,7$ .

#### 4.4.1.3 - Evolução da resistência ôhmica (Rohm)

As Figuras 4.38 e 4.39 apresentam as evoluções de Rohm para as diferentes relações água/cimento 0,4 e 0,7 respectivamente. Em geral, pode-se observar que com o aumento da relação água/cimento há um aumento nas variações de amplitude de Rohm.

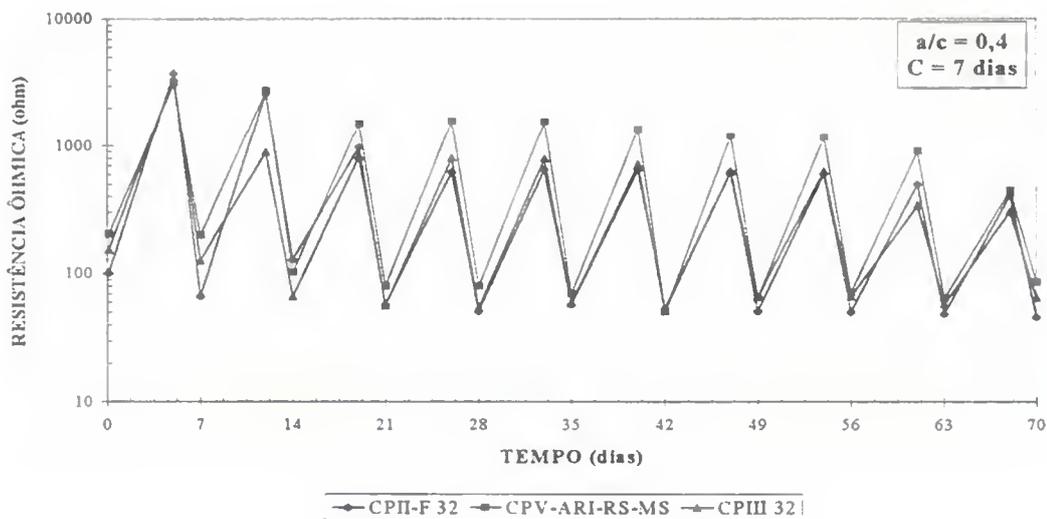


Figura 4.38- Evoluções das resistências ôhmica das séries inversas no ensaio com cloretos, para  $a/c=0,4$ .

Para a série confeccionada com o cimento CPV-ARI-RS-MS para relação  $a/c=0,4$  (Fig. 4.38), temos os maiores valores de Rohm na etapa de secagem em relação aos outros cimentos.

Na Figura 4.39 ( $a/c=0,7$ ), é interessante notar que a série confeccionada com o cimento CPV-ARI-RS-MS, apresenta os menores valores de Rohm na etapa de secagem em relação aos outros cimentos, apresentando um comportamento oposto ao da Figura 4.38. Em geral, para todos os cimentos, a variação de amplitude decresce gradativamente na etapa de secagem, e se mantém constante na etapa de imersão parcial a partir do terceiro ciclo.

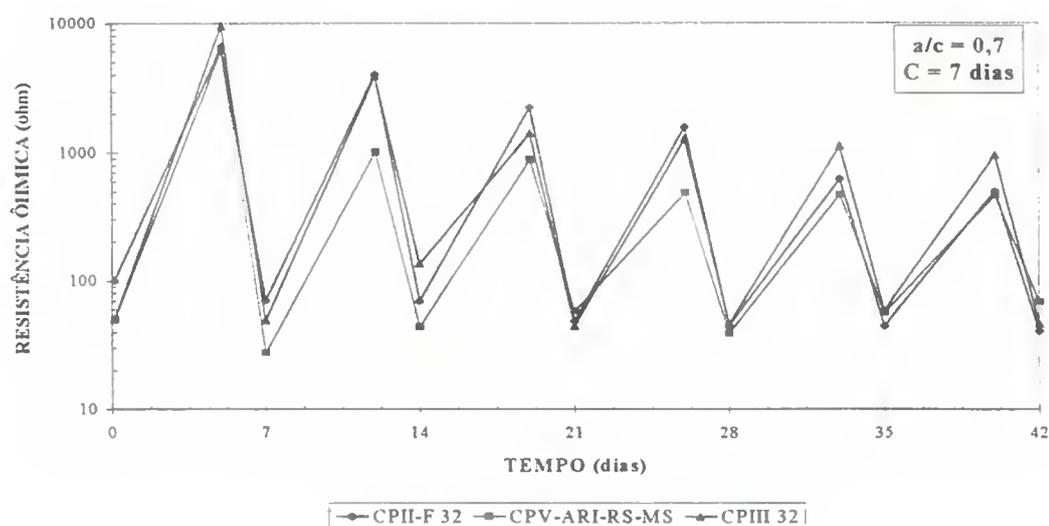


Figura 4.39- Evoluções das resistências ôhmica das séries inversas no ensaio com cloretos, para  $a/c=0,7$ .

#### 4.4.1.4 - Evolução da variação de massa (Mv)

As evoluções de variação de massa para diferentes relações água/cimento são mostradas nas Figuras 4.40 e 4.41.

A série feita com o cimento CPV-ARI-RS-MS com relação água/cimento 0,4, apresenta do sexto ciclo em diante, as maiores variações de massa. A série feita com o cimento CPIII 32, é que apresentou as menores variações de massa em relação aos outros cimentos.

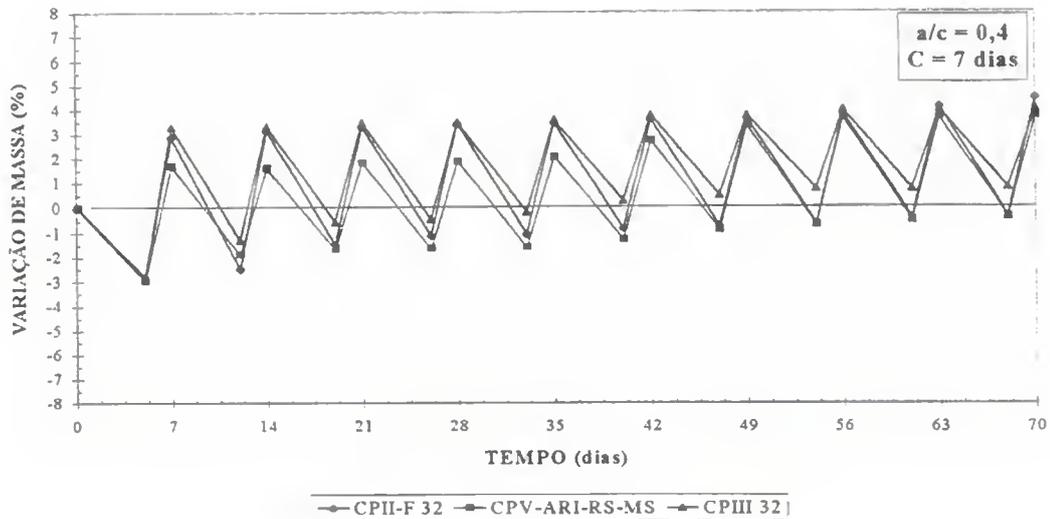


Figura 4.40- Evoluções das variações de massa das séries inversas no ensaio com cloretos, para relação  $a/c=0,4$ .

É interessante observar que o comportamento nesta etapa é bastante diferente do apresentado para as séries normais (Figuras 4.32 e 4.33) quando na imersão parcial, para todos os ciclos, a massa era praticamente igual à massa inicial. Isto comprova que para aquelas séries poderia ser mais interessante fazer primeiro a secagem.

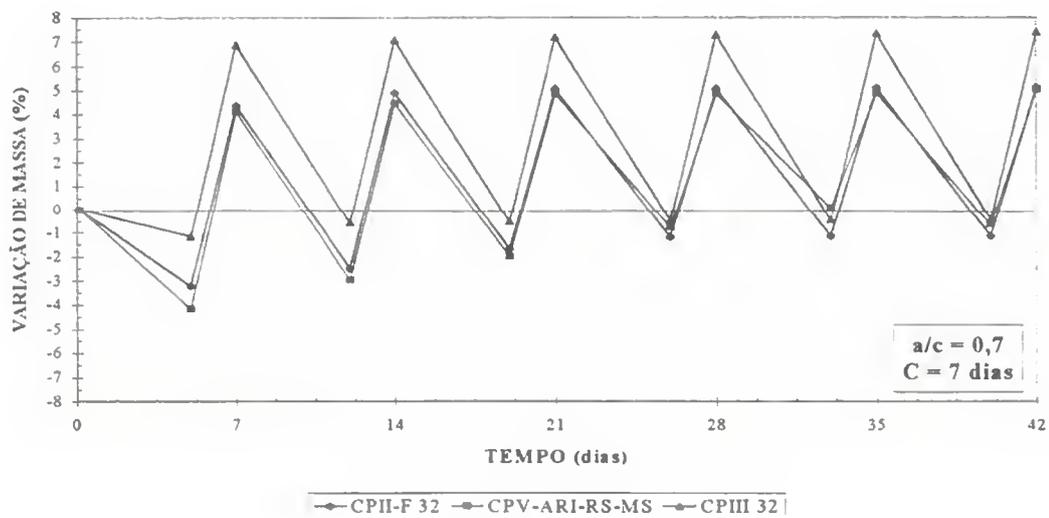


Figura 4.41- Evoluções das variações de massa das séries inversas no ensaio com cloretos, para  $a/c=0,7$ .

Nota-se, para relação água/cimento 0,7, variações de amplitude similares para as séries confeccionadas com os cimentos CPII-F 32 e CPV-ARI-RS-MS. Os corpos de prova feitos

com o cimento CPIII 32 apresentam as maiores variações de massa em relação aos demais cimentos.

#### 4.4.2 - Ensaio de carbonatação acelerada

Nas séries inversas, o ensaio de carbonatação foi feito após o ensaio com cloretos. São apresentados os resultados referentes à carbonatação acelerada e parcialmente submerso, que é uma etapa posterior a carbonatação.

##### 4.4.2.1 - Evolução da intensidade de corrosão ( $i_{corr}$ )

As evoluções de  $i_{corr}$  para diferentes relações água/cimento (0,4 e 0,7) são mostradas nas Figuras 4.42 e 4.43.

Mais uma vez foi comprovada a influência negativa das adições no ensaio de carbonatação acelerada. Para ambas as relações água/cimento, o CPII-F 32 mostrou ter o melhor desempenho em relação aos outros cimentos.

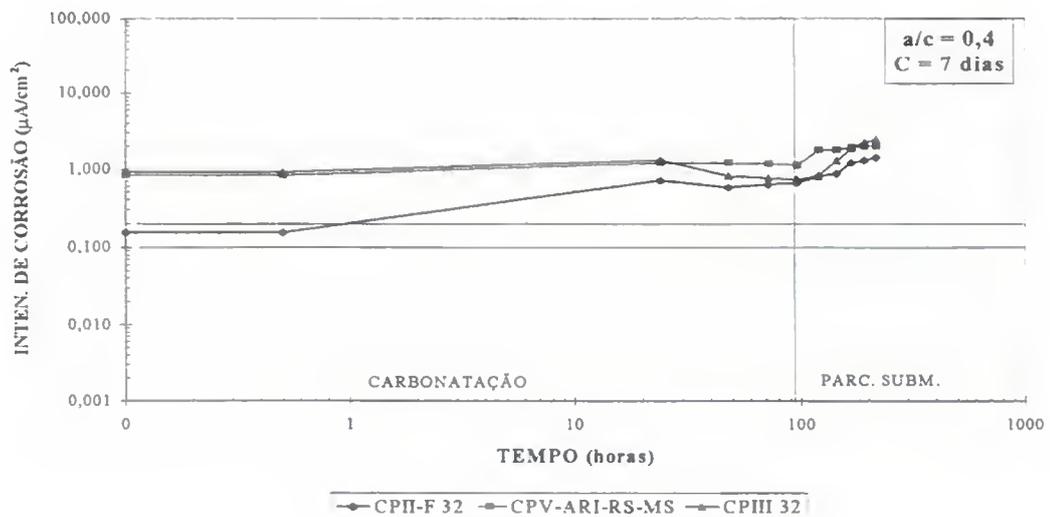


Figura 4.42- Evoluções das intensidades de corrosão das séries inversas na carbonatação, para  $a/c=0,4$ .

Observa-se na Figura 4.42 que a intensidade de corrosão apresenta valores elevados já no início do ensaio, apesar dos 7 dias que permaneceram em ambiente de laboratório. Isto indica que os corpos de prova continham uma umidade interna que necessitava uma secagem mais efetiva devido à higroscopicidade dos cloretos.

Observa-se na Figura 4.43, que apresenta os resultados para os cimentos com relação água/cimento 0,7, que a série executada com o cimento CPV-ARI-RS-MS apresentou os maiores valores de  $i_{corr}$  durante todo o ensaio. A intensidade de corrosão alcançada é bastante superior à apresentada pelas séries com relação água/cimento 0,4.

Observa-se que ao final do ensaio as intensidades de corrosão para as séries inversas (cloreto-carbonatação) são bastante similares às das séries normais (carbonatação-cloreto), tanto para relação água/cimento 0,4 como 0,7.

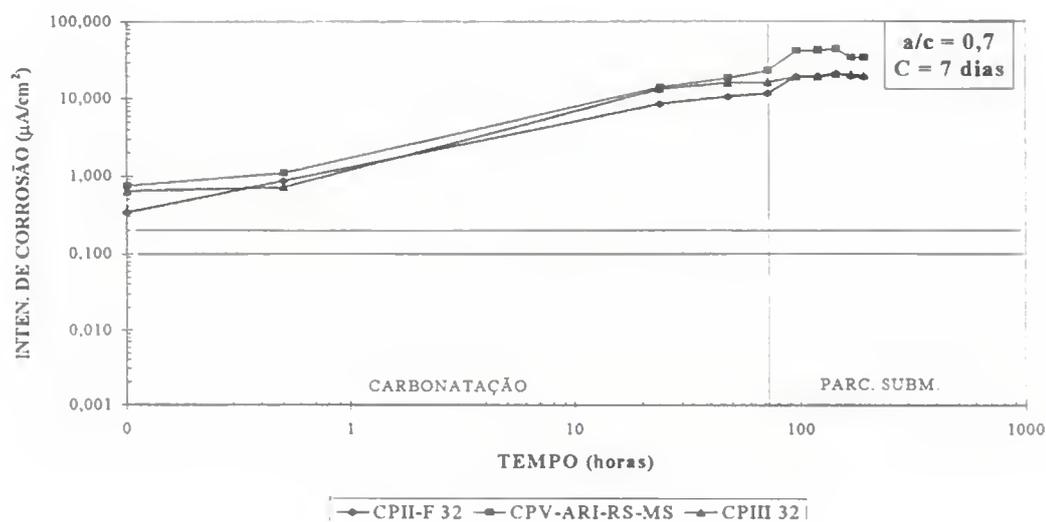


Figura 4.43- Evoluções das intensidades de corrosão das séries inversas na carbonatação, para  $a/c=0,4$ .

#### 4.4.2.2 - Evolução do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ )

As evoluções de  $E_{corr}$  para as diferentes relações água/cimento são mostradas na Figura 4.44 e 4.45.

Para todas as séries com relação  $a/c=0,4$ , os valores de potencial de corrosão não ultrapassam  $-600$  mV durante todo o ensaio. É importante salientar, que desde o início, os corpos de prova de todas as séries já apresentavam valores de potencial inferiores a  $-250$  mV.

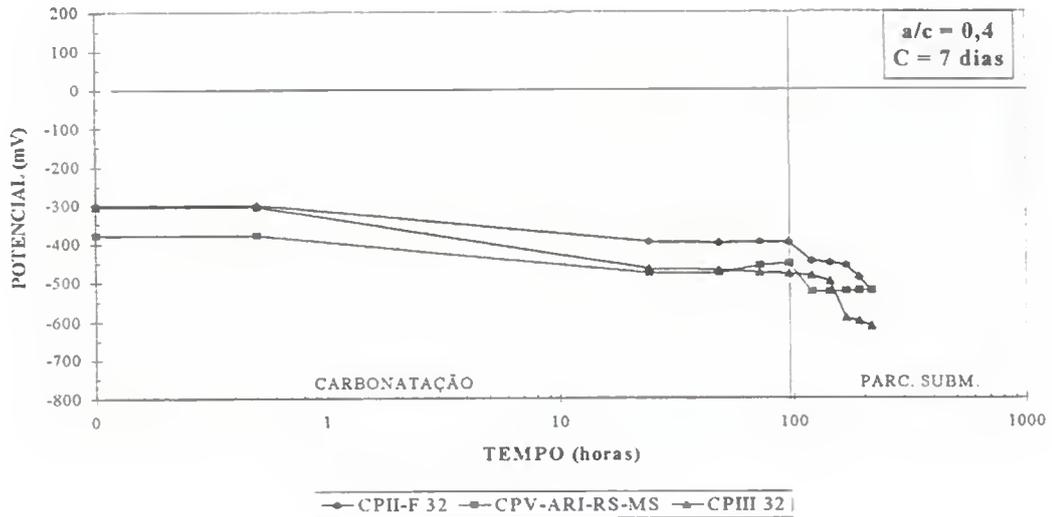


Figura 4.44- Evoluções dos potenciais de corrosão das séries inversas na carbonatação, para  $a/c=0,4$ .

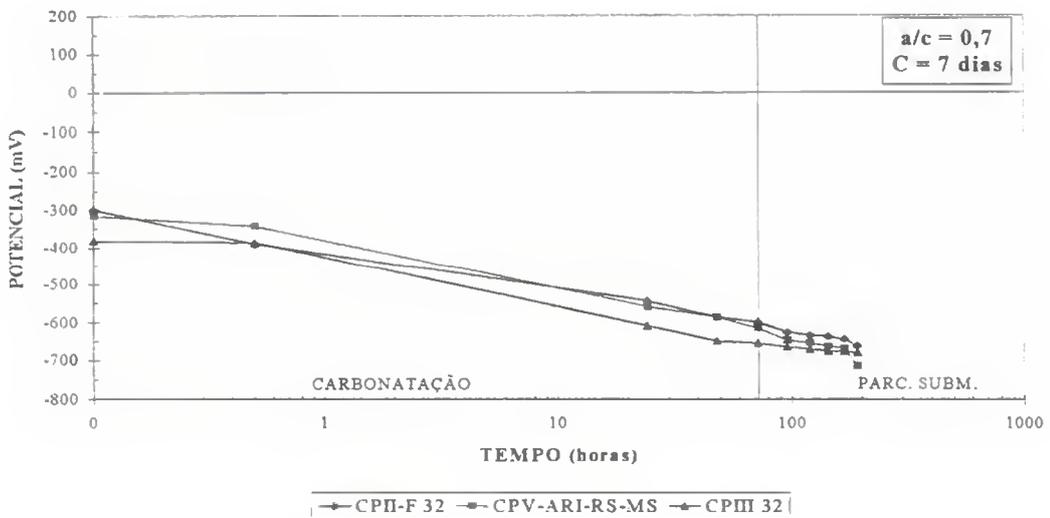


Figura 4.45- Evoluções dos potenciais de corrosão das séries inversas na carbonatação, para  $a/c=0,7$ .

Observa-se na Figura 4.45 ( $a/c=0,7$ ), que com o aumento da relação água/cimento, há uma diminuição mais acentuada dos valores de  $E_{corr}$  em relação as séries feitas com relação água/cimento 0,4. Estes valores chegaram a atingir  $-700$  mV na condição de parcialmente submerso.

#### 4.4.2.3 - Evolução da resistência ôhmica (Rohm)

Nas Figuras 4.46 e 4.47, são apresentadas as evoluções de Rohm para as relações água/cimento 0,4 e 0,7 respectivamente.

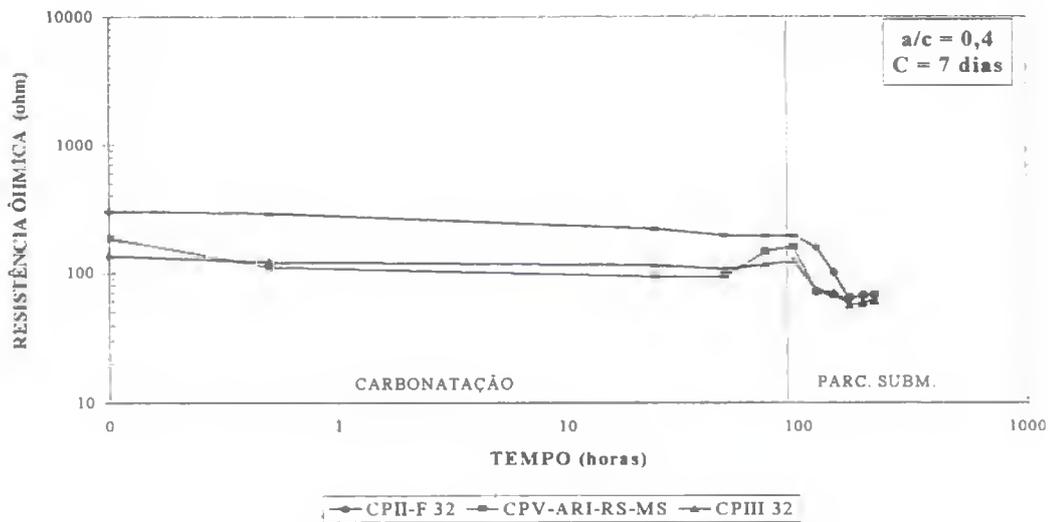


Figura 4.46- Evoluções das resistências ôhmica das séries inversas na carbonatação, para  $a/c=0,4$ .

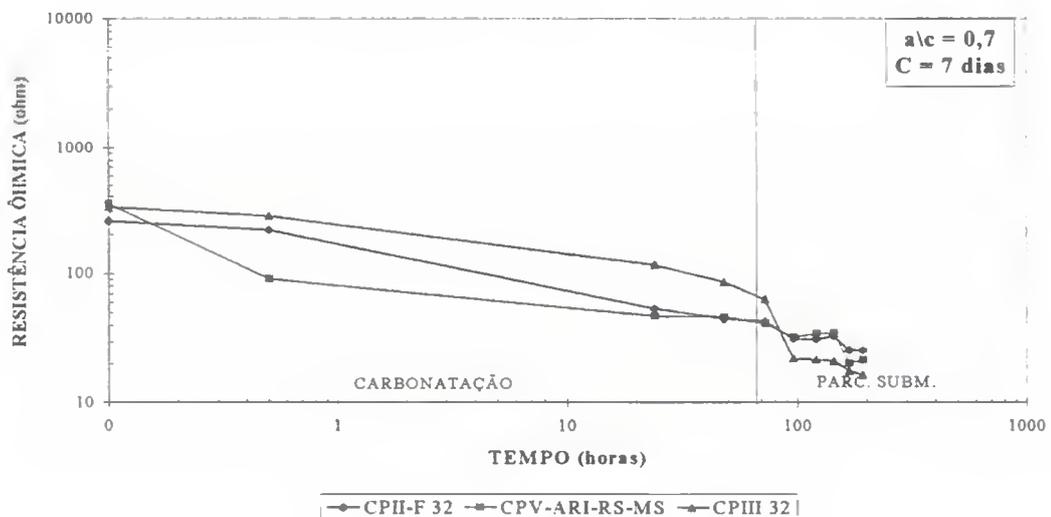


Figura 4.47- Evoluções das resistências ôhmica das séries inversas na carbonatação, para  $a/c=0,7$ .

Pode-se observar nitidamente que as séries feitas com os cimentos CPV-ARI-RS-MS e CIII 32, com relação água/cimento 0,4, obtiveram os menores valores de Rohm durante todo o ensaio.

A série feita com o cimento CPIII 32, para relação água/cimento 0,7, durante a carbonatação, obteve os maiores valores de Rohm em relação aos outros cimentos, mas na condição de parcialmente submerso, o mesmo atinge valores bem inferiores que os demais.

#### 4.4.2.4 - Evolução da variação de massa (Mv)

Nas Figuras 4.48 e 4.49, são mostradas as evoluções de variação de massa para as relações água/cimento 0,4 e 0,7 respectivamente.

Na Figura 4.48, observa-se que a série executada com o cimento CPII-F 32, com relação água/cimento 0,4, apresenta os maiores valores de variação de massa em relação aos outros cimentos, na etapa de carbonatação e especialmente na condição de parcialmente submerso, sem que isto tenha significado maiores valores de  $i_{corr}$  (Fig. 4.42).

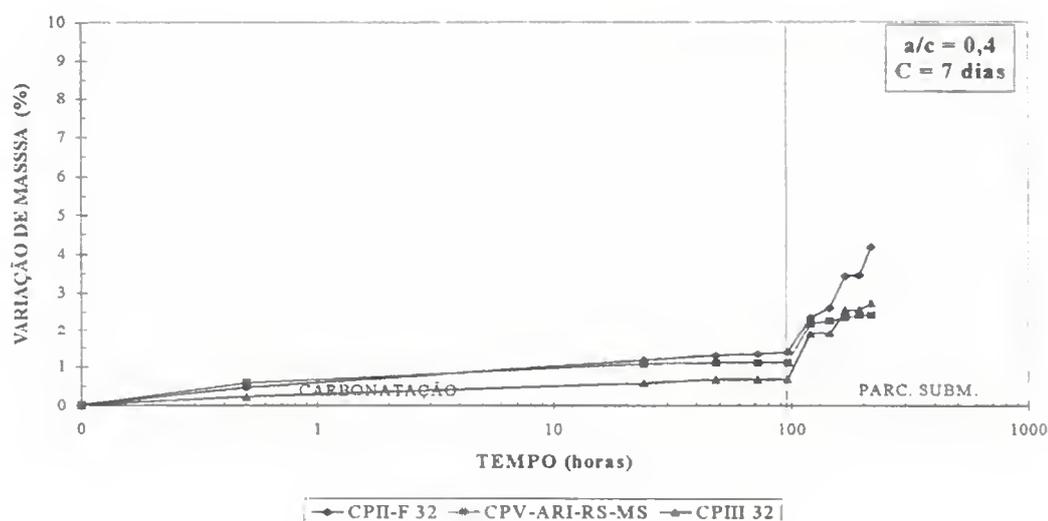


Figura 4.48- Evoluções das variações de massa das séries inversas na carbonatação, para  $a/c=0,4$ .

Para a relação água/cimento 0,7, as séries executadas com os cimentos CPII-F 32 e CPV-ARI-RS-MS, conforme a Figura 4.49, atingem percentuais de variação de massa bastante superiores na carbonatação. Porém, na condição de parcialmente submerso, todas as séries obtêm valores similares de variação de massa.

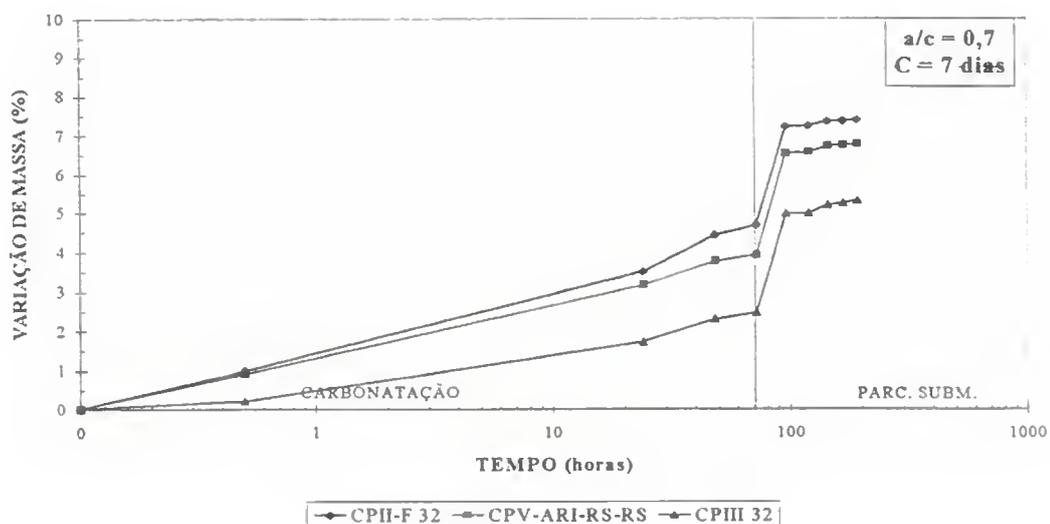


Figura 4.49- Evoluções das variações de massa das séries inversas na carbonatação, para  $a/c=0,7$ .

## 4.5 - ENSAIOS COMPLEMENTARES

### 4.5.1 - Absorção Capilar

São apresentados os resultados encontrados para a absorção capilar em função da raiz quadrada do tempo.

#### 4.5.1.1 - Cura 28 dias

A absorção capilar em função da raiz quadrada do tempo para os corpos de prova curados 28 dias está descrita na Figura 4.50.

É interessante notar, que os corpos de prova feitos com o cimento CPV-ARI-RS-MS com a relação água/cimento 0,4, têm a menor absorção capilar em relação aos outros cimentos das séries equivalentes ao final do ensaio. Entretanto quando a relação água/cimento é 0,7, isto não se repete.

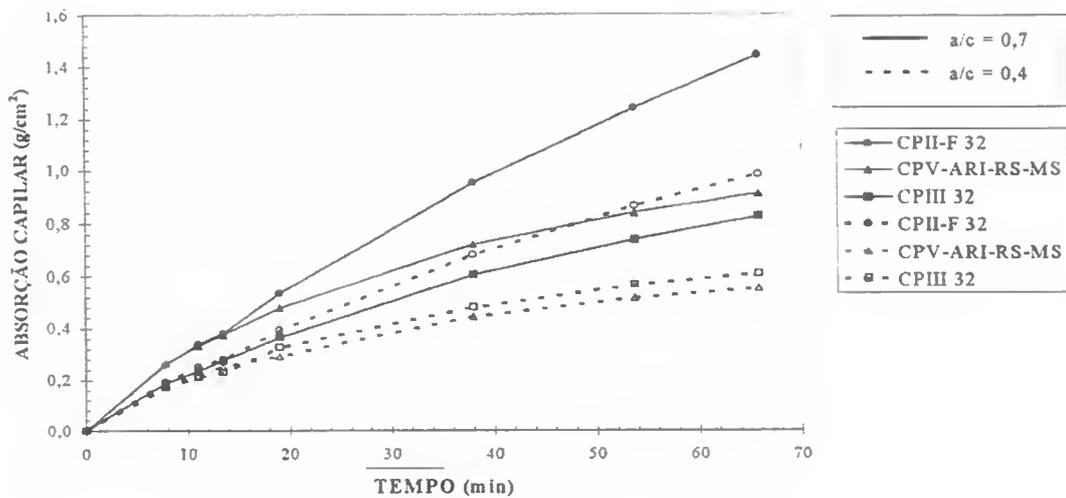


Figura 4.50- Absorção capilar em função da raiz quadrada do tempo para os corpos de prova curados 28 dias.

#### 4.5.1.2 - Cura 7 dias

Na Figura 4.51, temos a absorção capilar em função da raiz quadrada do tempo para todos os cimentos estudados, e executados com diferentes relações água/cimento, curados 7 dias. Com este tempo de cura todos cimentos têm um comportamento semelhante tanto para relação  $a/c=0,4$  como  $0,7$ . Não se observa uma diferença significativa na absorção capilar para as duas idades de cura.

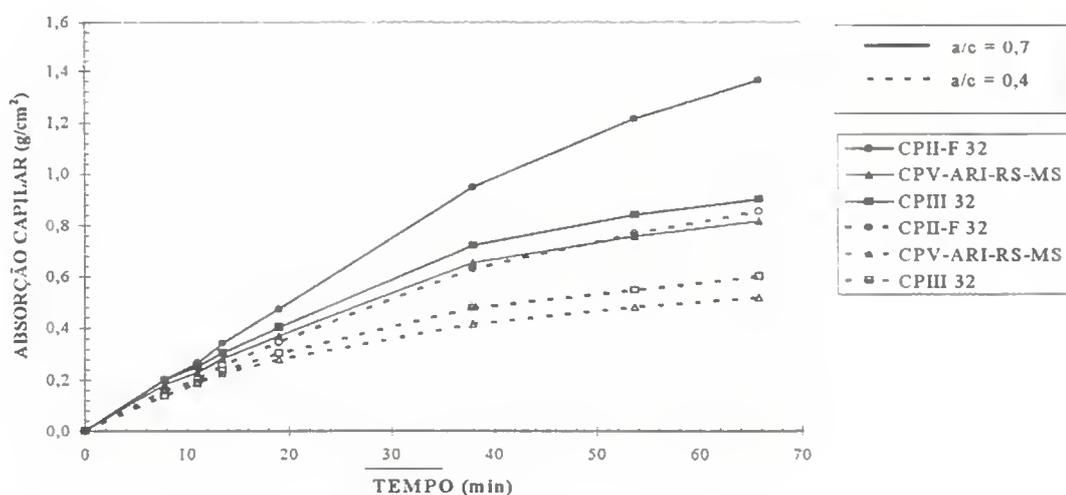


Figura 4.51- Absorção capilar em função da raiz quadrada do tempo para os corpos de prova curados 7 dias.

## 4.5.2 - Absorção por imersão

### 4.5.2.1 - Cura 28 dias

A absorção por imersão total está descrita na Figura 4.52. Deve se destacar, que as séries feitas com o cimento CPV-ARI-RS-MS, para ambas relações água/cimento, apresentam valores superiores em relação as séries equivalentes.

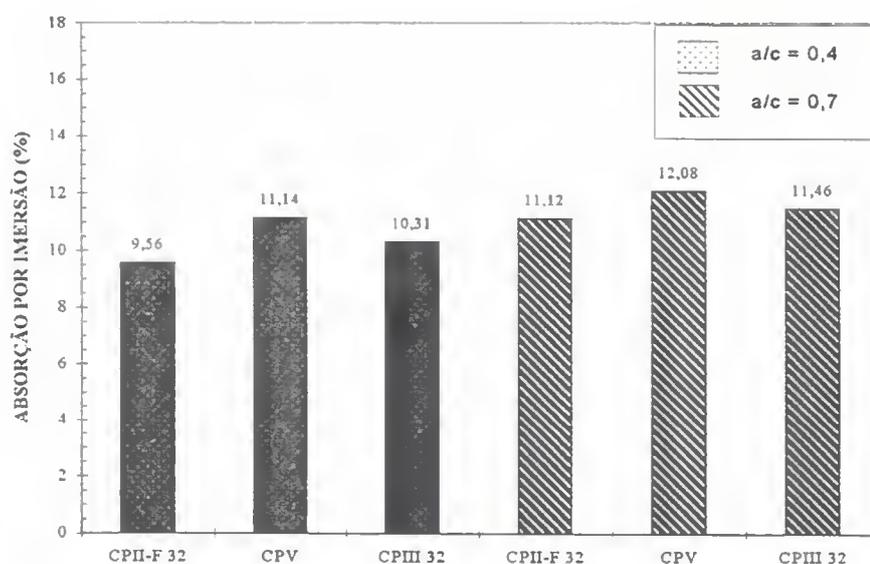


Figura 4.52- Absorção por imersão total para os corpos de prova curados 28 dias.

### 4.5.2.2 - Cura 7 dias

A Figura 4.53 apresenta os resultados da absorção por imersão total. Podemos observar nas séries que utiliza o cimento CII-F 32, em ambas situações, apresentam valores inferiores em relação as séries equivalentes. Esta situação é inversa dos resultados obtidos para absorção capilar.

Nota-se também que a absorção por imersão não tem alteração significativa com o aumento da relação água/cimento para todos os cimentos.

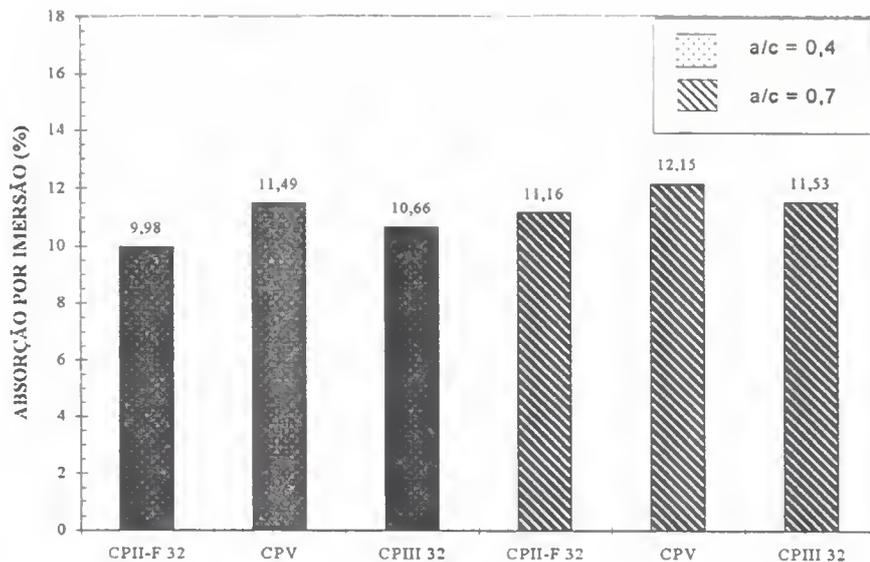


Figura 4.53 Absorção por imersão total para os corpos de prova curados 7 dias.

#### 4.6 - PERDA DE MASSA ELETROQUÍMICA X GRAVIMÉTRICA

Nas Figuras 4.54 e 4.55, estão apresentadas a comparação entre os valores de perda de massa eletroquímica e gravimétrica, para as relações água/cimento 0,4 e 0,7 respectivamente. O objetivo desta comparação é a avaliação da precisão da metodologia utilizada. As linhas contínuas identificam o limite de validade da técnica de Resistência de polarização.



Figura 4.54- Perda eletroquímica x gravimétrica dos corpos de prova com a/c=0,4.

A Figura 4.54 apresenta a comparação entre os valores de perda de massa eletroquímica e gravimétrica, para todas as séries com a relação água/cimento 0,4. Como se pode observar, a correlação obtida apresenta valores de perda gravimétrica maiores que as eletroquímicas, principalmente por causa da corrosão sob a fita de proteção, que não é medida pela técnica da Rp. Esta corrosão sob a fita foi observada ao final do ensaio após a quebra dos corpos de prova.

A Figura 4.55 apresenta a comparação entre os valores de perda de massa eletroquímica e gravimétrica para todas as séries feitas com a relação água/cimento 0,7. Deve ser salientada a boa relação encontrada situando quase todos os valores dentro da faixa de validade da técnica.

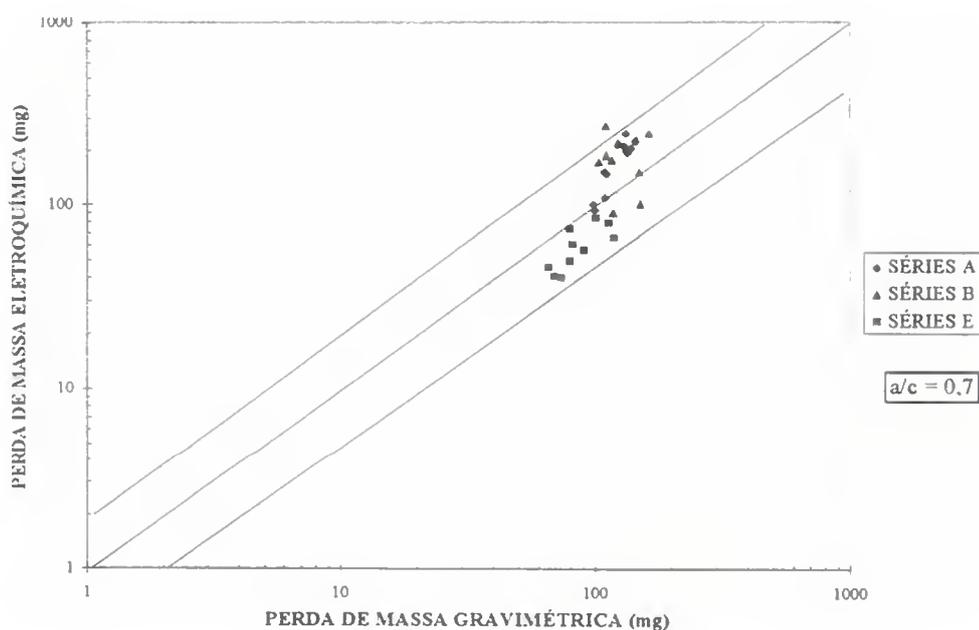


Figura 4.55- Perda eletroquímica x gravimétrica dos corpos de prova com  $a/c=0,7$ .

## 5 - DISCUSSÃO

### 5.1 - METODOLOGIA UTILIZADA

#### 5.1.1 - Introdução

Como se comentou anteriormente, vários são os fatores que influenciam na penetração dos agentes agressivos e no processo de corrosão. A determinação de todos eles no estudo de cimentos com características diferentes é de difícil realização, exigindo às vezes equipamentos mais sofisticados. Entretanto, a utilização da técnica de Resistência de polarização ( $R_p$ ), que nos possibilita determinar a  $i_{corr}$  a cada momento do ensaio permitiu avaliar o comportamento dos cimentos do ponto de vista de proteção contra corrosão mediante a utilização de armaduras que funcionaram como sensores. O entendimento do fenômeno foi facilitado pela análise de variáveis e ensaios complementares como o potencial ( $E_{corr}$ ), a resistência ôhmica ( $R_{ohm}$ ), variações de massa ( $M_v$ ), absorção capilar, e absorção por imersão.

Entretanto alguns aspectos merecem ser comentados, pois embora não tenham comprometido o estudo podem ser analisados em trabalhos futuros.

O tamanho de corpos de prova ligeiramente maior que o utilizado em trabalhos anteriores (Alonso & Andrade, 1988; Constantinou, 1991; Nepomuceno, 1992; Figueiredo, 1994) e inferior ao utilizado por Bauer (1995) parecem ter atendido satisfatoriamente o rápido equilíbrio de umidade sem necessidade de secagem em estufa. Entretanto como as condições de ensaio nos trabalhos acima citados são distintas é necessário um estudo comparativo para uma melhor apreciação.

Entre uma etapa e outra do ensaio, por exemplo, no ensaio das séries inversas (cloreto-carbonatação) parece ser que a etapa de secagem após a etapa de cloretos não foi suficiente para o equilíbrio de umidade, especialmente considerando que o cloreto tem características higroscópicas.

### **5.1.2 - Precondicionamento dos corpos de prova antes dos ensaios**

Depois de curados todos os corpos de prova foram mantidos em ambiente de laboratório para secagem e equilíbrio entre a umidade ambiental e a umidade do interior do corpo de prova. Devido as pequenas dimensões e pequeno cobrimento este equilíbrio foi feito com relativa rapidez, sendo observado pelo monitoramento da variação de massa.

### **5.1.3 - $i_{corr}$ como parâmetro principal de avaliação da corrosão**

Através da evolução da intensidade de corrosão pôde ser avaliado de forma comparativa o desempenho dos três tipos de cimentos utilizados, como também a duração da fase de iniciação de corrosão, nos dando informações sobre a possível vida útil das séries confeccionadas com os diferentes materiais utilizados.

#### **5.1.3.1 - Fase de iniciação**

A fase de iniciação em todos os ensaios foi detectada através da elevação brusca da  $i_{corr}$  quando sobrepassava a faixa de 0,1 a 0,2  $\mu A/cm^2$  e da queda do  $E_{corr}$  que corresponde ao rompimento da película passivadora (Gonzalez & Andrade, 1980).

Nepomuceno (1992) estudando o desempenho de diversos materiais de reparo frente à carbonatação acelerada, concluiu através da análise individual dos dados de porosidade, conteúdo de cimento e composição química da fase aquosa, que não existe um fator dominante que influencia a fase iniciação mas que a combinação de todos estes fatores controla o fenômeno.

Nas Figura 5.1 e 5.2 temos a duração da fase de iniciação para corpos de prova submetidos a ambientes contaminados por  $CO_2$  e posteriormente por cloretos, curados 7 e 28 dias respectivamente. Observa-se em geral uma menor fase de iniciação para os corpos de prova feitos com os cimentos CPIII 32 e CPV-ARI-RS-MS em relação ao cimento CPII-F 32,

apresentando apenas um comportamento diferenciado na Figura 5.1 para relação água/cimento 0,7 onde o cimento CPIII 32 teve a mesma fase de iniciação do cimento CPII-F 32.

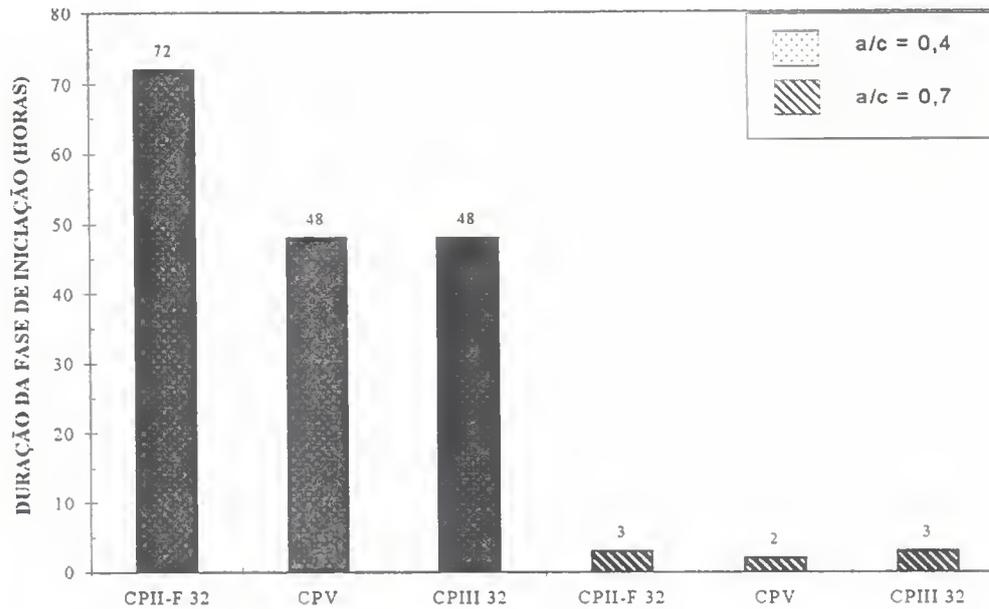


Figura 5.1- Duração da fase de iniciação em horas para corpos de prova submetidos a ambientes contaminados por CO<sub>2</sub> e posteriormente por cloretos, curados 28 dias.

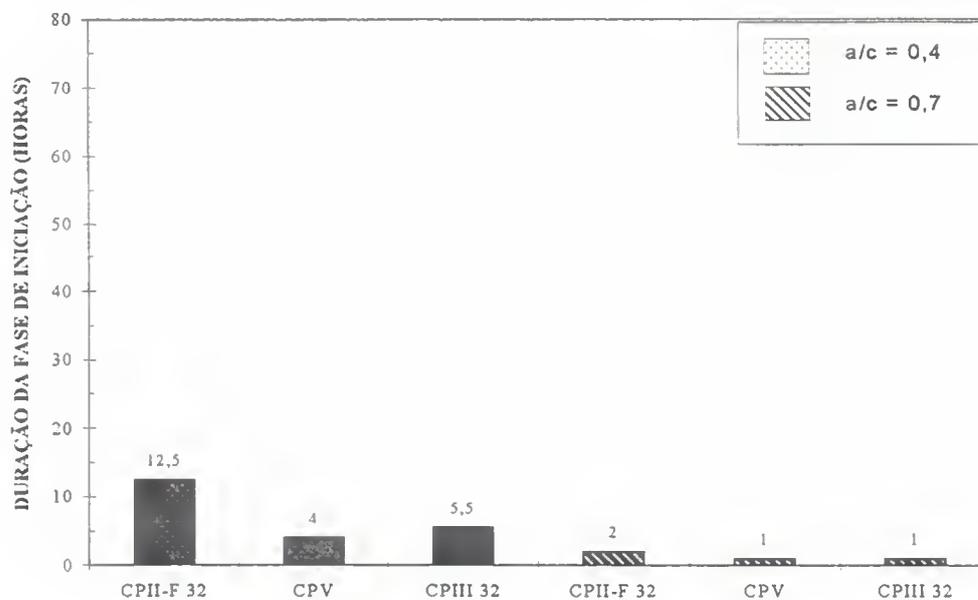


Figura 5.2- Duração da fase de iniciação em horas para corpos de prova submetidos a ambientes contaminados por CO<sub>2</sub> e posteriormente por cloretos, curados 7 dias.

Observa-se na Figura 5.3, a duração da fase de iniciação para corpos de prova submetidos a ambientes contaminados por cloretos e posteriormente por CO<sub>2</sub>, curados 7 dias.

É interessante observar que para corpos de prova com relação água/cimento 0,4, os cimentos CPIII 32 e CPV-ARI-RS-MS apresentam a mesma fase de iniciação, que é superior a do cimento CII-F 32 e fica claro que para a relação água/cimento 0,7 o tipo de cimento parece não influenciar a fase de iniciação, já que os três tipos de cimento despassivam ao mesmo tempo.

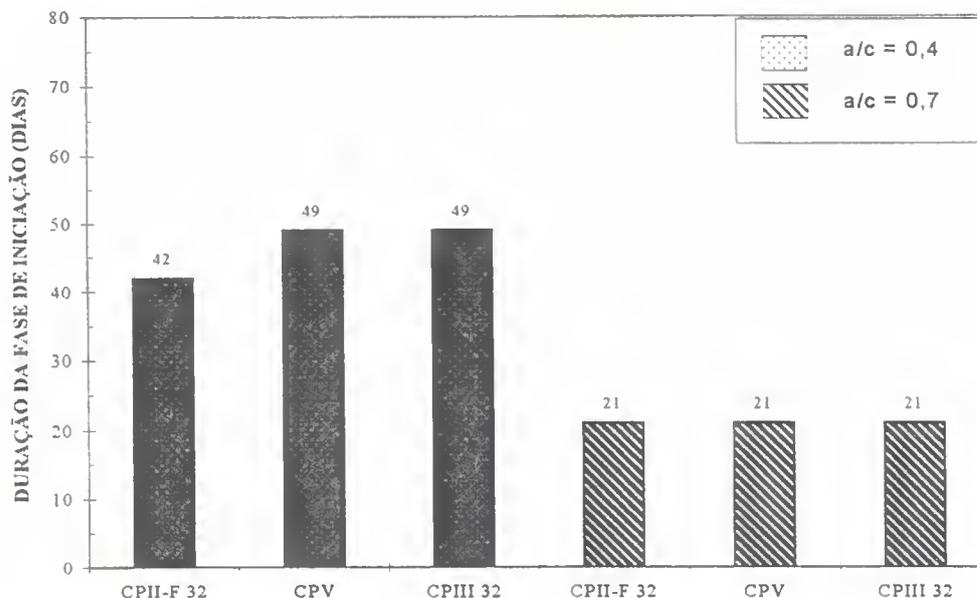


Figura 5.3- Duração da fase de iniciação em horas para corpos de prova submetidos a ambientes contaminados por cloretos e posteriormente por CO<sub>2</sub>, curados 7 dias.

### 5.1.3.2 - Fase de propagação

O comportamento dos materiais depois da despassivação corresponde ao período de “propagação”. Neste período foi possível verificar os valores de  $i_{corr}$  dos três tipos de cimentos estudados durante as diversas etapas do ensaio. A comparação entre estes gráficos (Fig. 5.4 a 5.6) só é válida entre os corpos de prova submetidos aos mesmos ensaios.

Nas Figura 5.4 e 5.5 temos a intensidade de corrosão total para corpos de prova submetidos a ambientes contaminados por CO<sub>2</sub> e posteriormente por cloretos, curados 7 e 28 dias respectivamente. Observa-se em geral valores de intensidade de corrosão total superiores para os cimentos CPIII 32 e CPV-ARI-RS-MS em relação ao cimento CII-F 32.

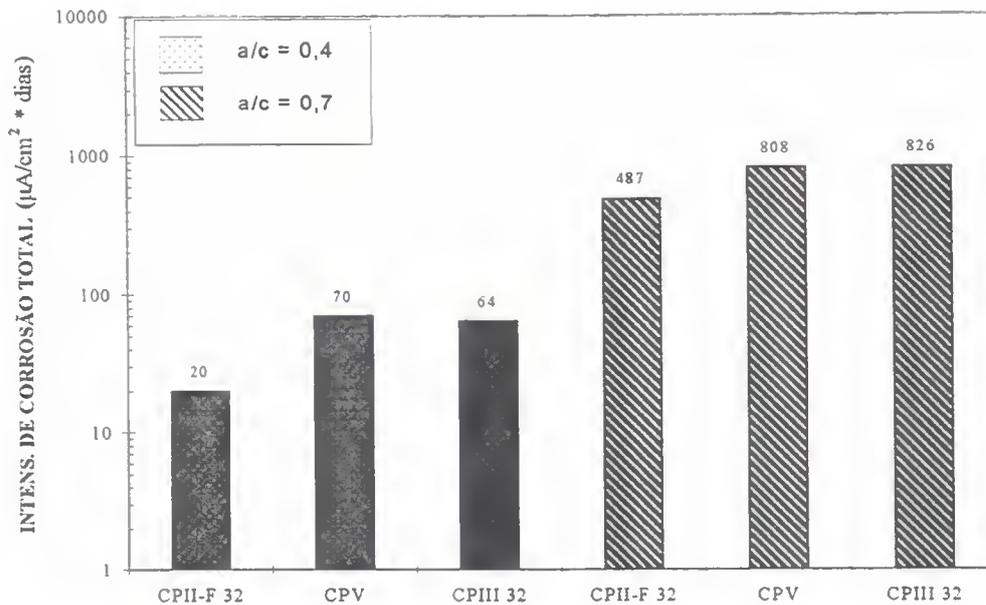


Figura 5.4- Intensidade de corrosão total para corpos de prova submetidos a ambientes contaminados por CO<sub>2</sub> e posteriormente por cloretos, curados 28 dias.

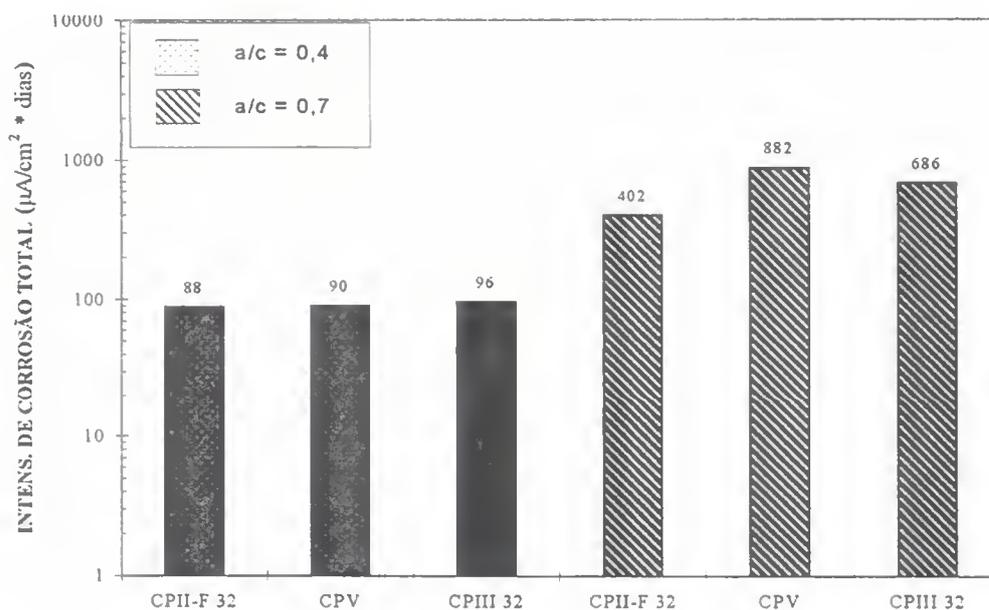


Figura 5.5- Intensidade de corrosão total para corpos de prova submetidos a ambientes contaminados por CO<sub>2</sub> e posteriormente por cloretos, curados 7 dias.

Observa-se na Figura 5.6, valores de intensidade de corrosão total para corpos de prova submetidos a ambientes contaminados por cloretos e posteriormente por CO<sub>2</sub>, curados 7 dias, onde o cimento CPII-F 32 apresentou valores de intensidade de corrosão total um pouco maior em relação aos outros cimentos estudados.

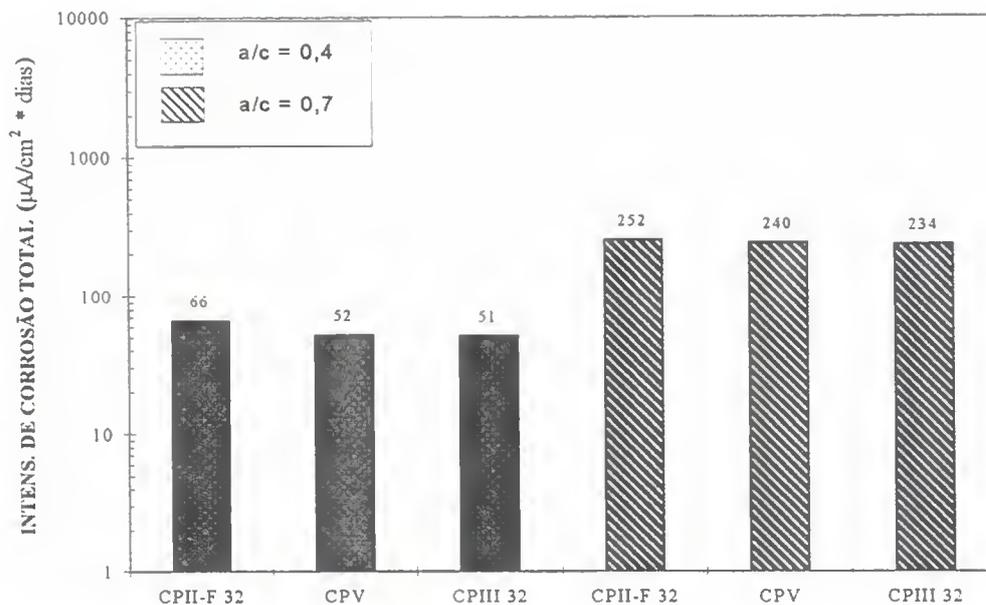


Figura 5.6- Intensidade de corrosão total para corpos de prova submetidos a ambientes contaminados por cloretos e posteriormente por CO<sub>2</sub>, curados 7 dias.

Deve-se ressaltar a boa relação encontrada para os valores de intensidade de corrosão total (perda de massa eletroquímica) quando comparados com a perda de massa gravimétrica nas Figura 4.56 e 4.57.

#### 5.1.4 - $E_{corr}$ , $R_{ohm}$ e $M_v$ .

Estas variáveis medidas durante todo o ensaio nos deram informações complementares, que permitiram uma avaliação mais completa do comportamento comparativo dos materiais.

O potencial de corrosão nos deu informações sobre a possibilidade de ocorrência da reação de corrosão, porém não nos deu informações sobre a velocidade de corrosão. Devido as características distintas dos três tipos de cimento estudados, observou-se em algumas etapas do ensaio diversos valores de  $i_{corr}$  para um mesmo valor de  $E_{corr}$ . Comprovando que o potencial de corrosão tem suas limitações e deve aplicado apenas como um ensaio complementar.

A resistência ôhmica foi mais significativa na avaliação do processo de corrosão, principalmente na fase de propagação, nos dando informações valiosas para entender a cinética

do processo de corrosão. Por exemplo, nos ciclos de cloreto, na etapa de secagem, a resistência ôhmica permitiu entender o comportamento da  $i_{corr}$ , sempre crescente, quando analisada juntamente com as variações de massa. Apesar de não haver um aumento de massa significativo de um ciclo a outro, a resistência ôhmica foi cada vez menor indicando um provável aumento de cloretos com o conseqüente aumento da intensidade de corrosão.

## **5.2 - COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS**

### **5.2.1 - Em relação a estrutura física**

A estrutura física de um material varia de um material para outro e de série a série. As diferenças na absorção por capilaridade e absorção por imersão são salientadas através das metodologias dos ensaios acelerado de corrosão tanto na carbonatação como também no ensaio com cloretos.

Na carbonatação estas diferenças nos obrigam a realização de um procedimento de secagem antes, de modo a padronizar as condições de umidade da fase porosa. Na etapa de parcialmente submerso, após a carbonatação acelerada, as características de porosidade diferenciam um material do outro.

No ensaio com cloretos, a etapa de secagem a 50° que acontece nos ciclos de secagem para todos os corpos de prova têm sua eficácia diretamente relacionada com a estrutura física dos materiais, já a evaporação está associada a porosidade (volume e dimensões dos poros), sendo mais efetiva numa série do que em outra. A estrutura física também influencia a etapa de imersão parcial pois o ingresso de cloretos é feito tanto por absorção capilar como também por difusão.

### 5.2.1.1 - Absorção capilar

A absorção capilar é um dos aspectos mais importantes no desenvolvimento da corrosão, já que o aumento do grau de umidade influencia diretamente na resistência ôhmica e indiretamente na intensidade de corrosão.

Os resultados mostram que, para todos os tipos de cimentos, os valores de absorção capilar aumentam com a relação água/cimento (Figuras 4.51 e 4.53), o que coincide com os valores encontrados por Parrott (1992). Podemos observar também, para todos os casos, que as séries que empregam adições de escória e escória/microsilica apresentam valores inferiores de absorção em relação as séries que utilizam o cimento CII-F 32. Estes resultados divergem dos encontrados por Parrott (1992), que observou valores de absorção capilar superiores para cimentos com adição de escória. É importante ressaltar que nos cimentos estudados por Parrott se utilizou o mesmo clínquer, o que permite uma comparação efetiva entre eles. Também Bauer (1995), ao utilizar cimentos com um mesmo clínquer, em estudo da absorção capilar de cimentos com e sem escória, encontrou que a escória aumenta a absorção capilar de argamassas feitas com estes cimentos. Porém, no presente trabalho se utilizou cimentos comerciais de distintos fabricantes e conseqüentemente com clínquer diferenciados como se pode observar na tabela 4.1, o que torna difícil a análise deste comportamento. Entretanto, nos cimentos com adições é sabido que o volume total dos poros é maior, porém a grande parte é formada por poros pequenos e provavelmente descontínuos (Uchikawa, 1986).

É interessante observar que no ensaio de carbonatação das séries normais, na etapa de parcialmente submerso, os corpos de prova feitos com o cimento CII-F 32 apresentaram uma absorção capilar inferior aos outros dois cimentos, especialmente para a cura de 28 dias conforme pode ser visto nas Figuras 5.7 e 5.8. Isto pode ser explicado provavelmente pela maior disponibilidade de  $\text{Ca(OH)}_2$  no CII-F 32, o que resulta numa maior colmatação dos poros capilares.

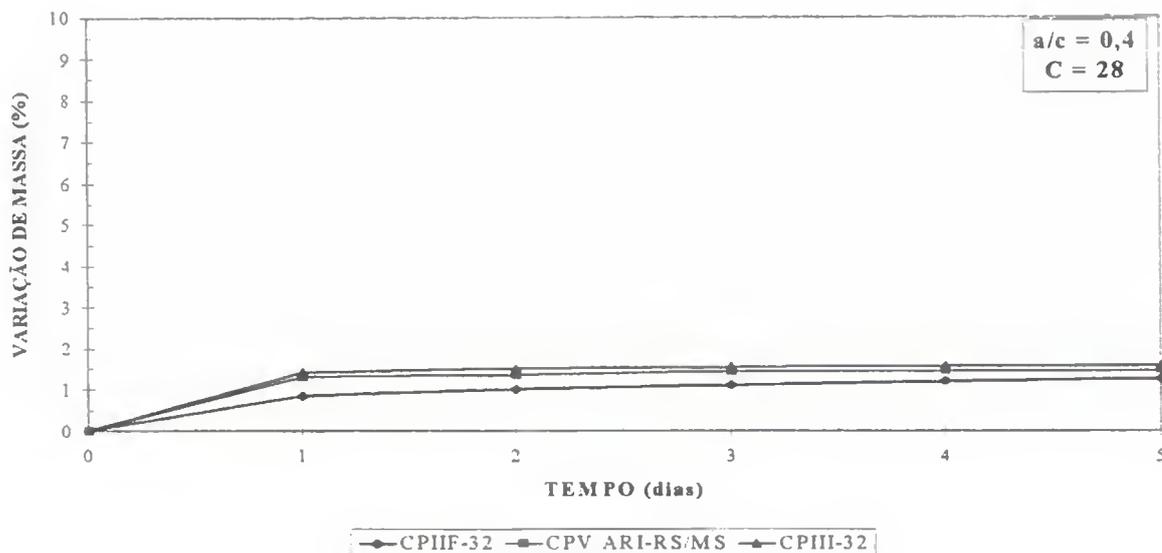


Figura 5.7- Variação de massa da etapa de parcialmente submerso no ensaio de carbonatação para os corpos de prova curados 28 dias com relação água/cimento 0,4.

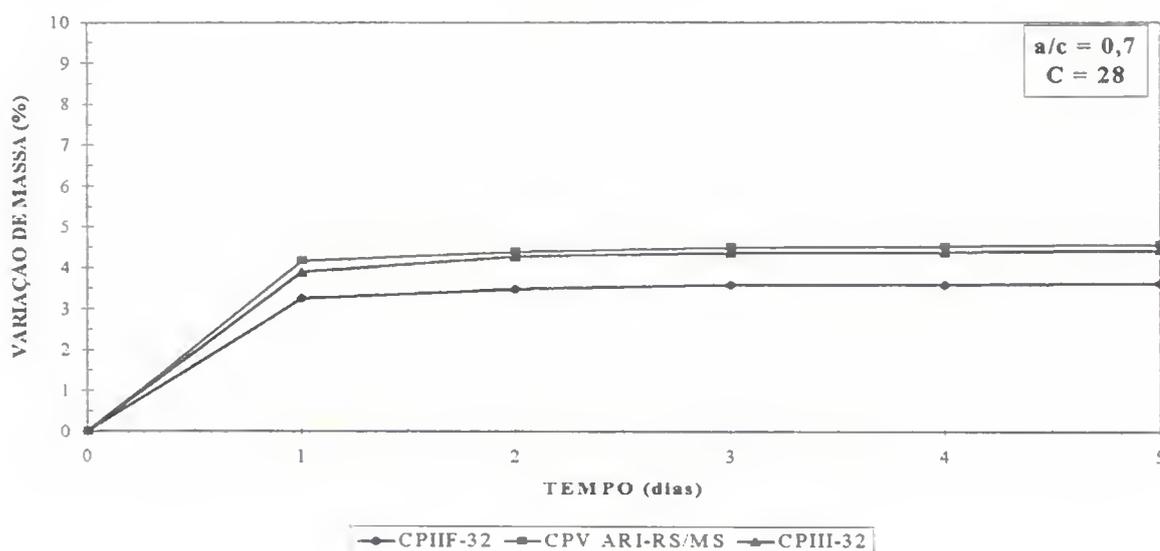


Figura 5.8- Variação de massa da etapa de parcialmente submerso no ensaio de carbonatação para os corpos de prova curados 28 dias com relação água/cimento 0,7.

#### 5.2.1.2 - Absorção por imersão

Observa-se obviamente o aumento do volume de poros totais com o aumento da relação água/cimento. Como era de se esperar, os cimentos com adições de escória e escória/microsilica têm, para as duas relações água/cimento estudadas, uma maior absorção total, provavelmente por um maior volume total de poros (Calleja, 1986). É interessante notar, que os corpos de prova com adição de escória/microsilica, em todos os casos,

apresentaram valores de absorção por imersão superiores aos corpos de prova somente com adição de escória. Este fato não pode ser explicado com os dados disponíveis devido às diferenças entre o clínquer e as adições utilizadas, o que sugere um estudo mais detalhado, principalmente de porosimetria.

## **5.2.2 - Em ambientes contaminados por CO<sub>2</sub> e posteriormente por cloretos**

### **5.2.2.1 - Iniciação da corrosão**

A fase de iniciação da corrosão dos cimentos com adição de escória e escória/microssilica foi sempre menor que a do cimento sem adição conforme Figuras 5.1 e 5.2, comprovando que a redução da reserva alcalina é um dos principais fatores controladores da vida útil das estruturas de concreto armado.

Pode-se observar em geral, que os cimentos com adições de escória e escória/microssilica apresentaram o pior desempenho em relação ao cimento sem adição, do ponto de vista da corrosão, o que confirma resultados anteriores (Alonso & Andrade, 1988; Bauer, 1995). Este fenômeno já amplamente estudado se deve à redução da reserva alcalina pelas reações pozolânicas conforme visto anteriormente devido ao menor teor proporcional de clínquer.

### **5.2.2.2 - Ingresso de cloretos nos corpos de prova carbonatados**

Como já foi visto no capítulo 2, os principais fatores que influenciam o ingresso de cloretos são: relação água/cimento, composição química do cimento, compactação, cura, temperatura, fissuras e carbonatação. Uma certa quantidade de cloretos pode ser tolerada sem risco de corrosão, já que é a relação  $CL/OH^-$  que controla a intensidade de corrosão. A quantidade de cloretos na fase aquosa depende tanto da absorção por capilaridade e facilidade de difusão, como da capacidade de combinação dos íons cloreto com o C<sub>3</sub>A do cimento, é da adsorção dos íons nas paredes dos poros. Entretanto, quando a matriz de cimento está carbonatada outros fatores podem influir na intensidade de corrosão.

O comportamento dos corpos de prova carbonatados, quando submetidos a ciclos de secagem e umedecimento em solução de cloreto de sódio a 5 %, é semelhante ao obtido por Dhir et al. (1993) onde, concretos com adição de cinza volante tiveram seu coeficiente de difusão aumentado em cerca de 100% em relação ao concreto sem adição. No presente trabalho, as maiores intensidades de corrosão são das armaduras embutidas em corpos de prova executados com cimentos que contêm adições de escória/microsilica e de escoria. Este fenômeno pode ser explicado por uma menor alcalinidade da fase aquosa destes cimentos e por uma menor capacidade de fixação de cloretos já que, como verificado por Alonso & Andrade (1988), os produtos resultantes da combinação com cloreto são mais estáveis em soluções saturadas de  $\text{Ca(OH)}_2$ . O cimento CII-F 32 que pode ainda ter maior alcalinidade é o que apresentou menores valores de intensidade de corrosão.

Durante a fase de propagação da corrosão os valores de resistência ôhmica diminuem com a evolução dos ciclos. Sabe-se que a resistência ôhmica depende principalmente do teor de umidade dos corpos de prova e da porosidade. Entretanto analisando a variação de massa verifica-se que a redução da resistividade não se deve ao aumento de umidade, o que nos leva a crer que é um aumento de íons cloretos que provoca esta redução.

### **5.2.2.3 - Influência da relação água/cimento**

Comparando-se os perfis de evolução de intensidade de corrosão na etapa de carbonatação, pode-se observar alguns comportamentos semelhantes para todas as séries. Observou-se valores de intensidade de corrosão inferiores com a redução da relação água/cimento, devido provavelmente a redução da porosidade que restringe a entrada do dióxido de carbono. Pode-se notar também, que os cimentos com adições aqui estudados proporcionam uma fase de iniciação menor e este efeito se nota com maior intensidade para relação água/cimento mais elevada concordando com os resultados de outros trabalhos (Parrott, 1987; Ho & Lewis, 1987; Bauer, 1995).

Na etapa de ingresso de cloretos, analisando-se as séries feitas com relação água/cimento 0,4, constata-se um retardamento para o cimento CII-F 32 para sobrepassar a

faixa 0,1 a 0,2  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , em relação aos outros cimentos. Isto pode ser explicado por ser este o cimento que provavelmente tem maior alcalinidade e conseqüentemente maior concentração de  $\text{OH}^-$ , que torna um fator predominante para baixar a relação  $\text{CL}^-/\text{OH}^-$  e diminuir a intensidade de corrosão, o que coincide com trabalhos de Al-Gahtani et al. (1994). Já nas séries feitas com relação água/cimento 0,7, todos os cimentos logo no primeiro ciclo de ensaio têm valores elevados, mostrando assim, que o tipo de cimento não tem uma influência significativa para baixar a relação  $\text{CL}^-/\text{OH}^-$ , provavelmente por se ter um maior ingresso de cloretos em razão da elevada porosidade. Esta elevada porosidade explica também a maior amplitude de variação de intensidade de corrosão das séries com relação água/cimento 0,7, em relação as séries com relação água/cimento 0,4. Isto pode ser explicado pelo aumento do diâmetro e volume dos poros, resultante do aumento da relação água/cimento, tornando a etapa de secagem mais efetiva. Deve-se ressaltar que o aumento da relação água/cimento também aumenta a absorção capilar, aumentando a potencialidade de ingresso de cloretos, e conseqüentemente aumentando assim os valores de intensidade de corrosão.

#### **5.2.2.4 - Influência do período de cura**

Avaliando-se a influência do período de cura na etapa de carbonatação, observa-se em geral, que os corpos de prova curados 7 dias apresentaram piores resultados em relação a proteção contra corrosão comparando-se com os corpos de prova curados 28 dias, o que está de acordo com resultados encontrados na literatura. Fatthui (1986) observou que, quando o período inicial de cura foi aumentado de 1 para 3, 7, 21 e 28 dias, a profundidade de carbonatação foi reduzida 61, 43, 25 e 17%, respectivamente.

Pode-se observar nitidamente que com a diminuição do período de cura houve uma redução da fase de iniciação de corrosão por carbonatação para todas as séries. Esta redução é mais marcante nas séries com relação água/cimento 0,4, principalmente nos cimentos com adições de escória e escória/microssílica. Podemos concluir que a porosidade e o período de cura estão relacionados intimamente com a fase de iniciação da corrosão, e relacionados com a profundidade de carbonatação.

É sabido que a característica de hidratação lenta da maioria das adições minerais requer mais atenção no período de cura e que uma deficiência nesta etapa provavelmente leva a alterações nas regiões próximas a superfície do cimento, conseqüentemente facilitando o ingresso de CO<sub>2</sub> (Osborne, citado por Bauer, 1995).

Analisando a influência do período de cura na etapa de penetração por cloretos, verifica-se que o período de cura só influencia as séries com baixa relação água/cimento. Observa-se que nas séries com relação água/cimento 0,7 (curadas 7 e 28 dias) contata-se um desempenho semelhante para todos os cimentos e valores finais de intensidade de corrosão com mesma ordem de grandeza. Tal comportamento se explica pelo fato de que o período de cura influencia a porosidade da camada superficial e para elevadas relações água/cimento têm-se uma maior penetração de cloretos que provavelmente alcança uma maior profundidade dentro da estrutura. Segundo Jaergermann (1990), a porosidade dentro concreto é governada principalmente pela relação água/cimento, e quanto mais profundo os cloretos estão no concreto menos serão afetados pelas propriedades da camada superficial.

Em relação ao desempenho dos cimentos, nota-se que com o aumento do período de cura há um aumento do tempo em que os corpos de prova executados com cimento CP II-F 32, sobrepassa a faixa de 0,1 a 0,2  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , em relação aos cimentos com adições de escória e escória/microsilica. Tal comportamento se mostrou de acordo com o encontrado por Kayyali & Haque (1988) estudando argamassas com e sem adição de cinza-volante, observaram que prolongando o período de cura melhorou a capacidade de retenção de cloretos para a argamassa sem adição de cinza-volante, para corpos de prova em que foi adicionado cloretos e em seguida carbonatado.

#### **5.2.2.5 - Relação entre intensidade de corrosão e potencial de corrosão**

A relação entre a intensidade de corrosão e o potencial de corrosão nos ensaios de carbonatação segue uma função semi-logarítmica. As Figuras 5.9 e 5.10 apresentam os gráficos desta relação para ambas relações água/cimento empregadas, curadas 28 e 7 dias respectivamente. Podemos observar nas séries que menos corroeram sob efeito de carbonatação (Figuras 5.9 a e 5.10 a), referentes as séries feitas com a relação água/cimento

0,4, uma maior dispersão onde a maioria dos pontos acham-se agrupados em uma única região do gráfico, ocorrendo algumas alterações com o decorrer do ensaio. Já as séries feitas com relação água/cimento 0,7 (Figuras 5.9 b e 5.10 b), apresentaram dispersão variável em alguns casos com relações distintas em função da natureza do cimento.

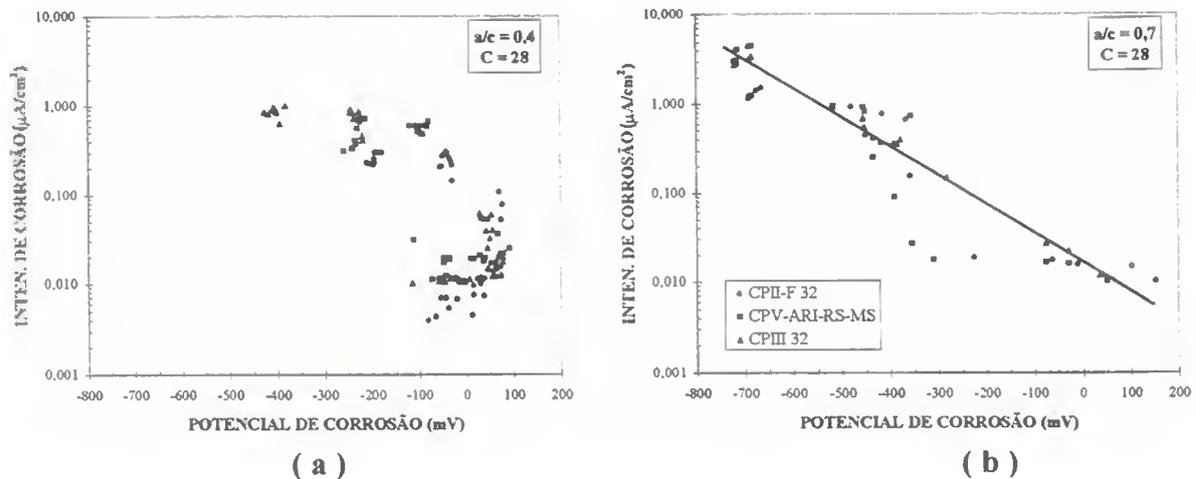


Figura 5.9- Relação entre intensidade de corrosão e potencial de corrosão na carbonatação, para séries normais curadas 28 dias com relação água/cimento 0,4 e 0,7.

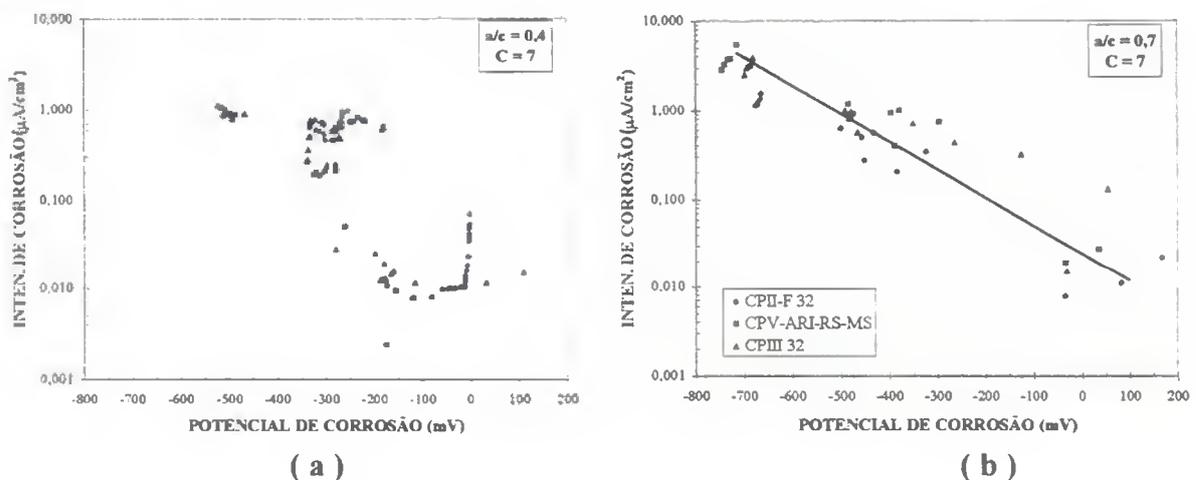
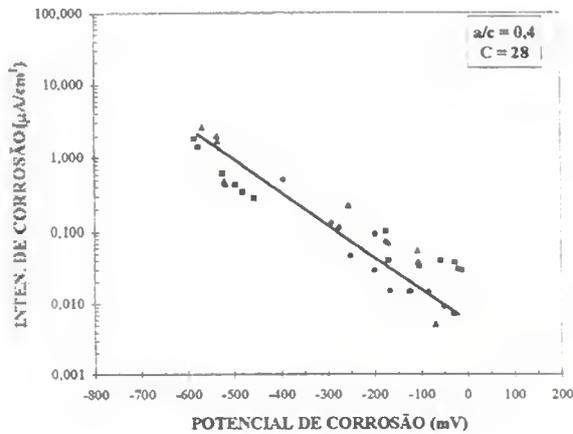
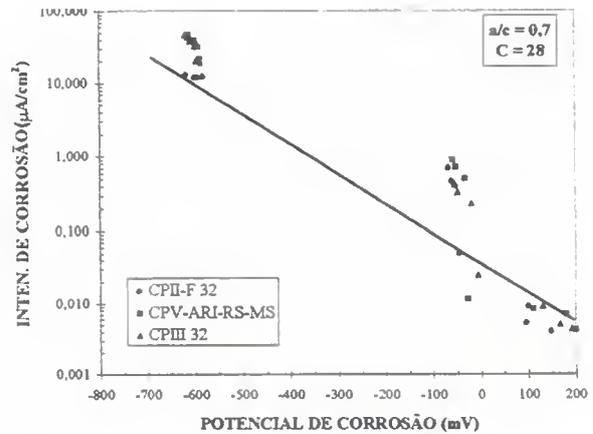


Figura 5.10- Relação entre intensidade de corrosão e potencial de corrosão na carbonatação, para séries normais curadas 7 dias com relação água/cimento 0,4 e 0,7.

A relação entre intensidade de corrosão e potencial de corrosão referentes ao ensaio com cloretos têm um comportamento semi-logaritmico parecido ao encontrado nos ensaios de carbonatação, conforme pode ser visto nas Figuras 5.11 e 5.12. Em geral, através dos resultados não pode-se observar diferenças nítidas em relação ao tipo de cimento empregado.

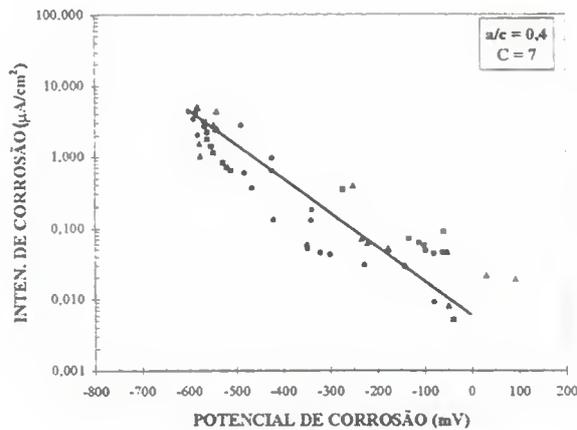


( a )

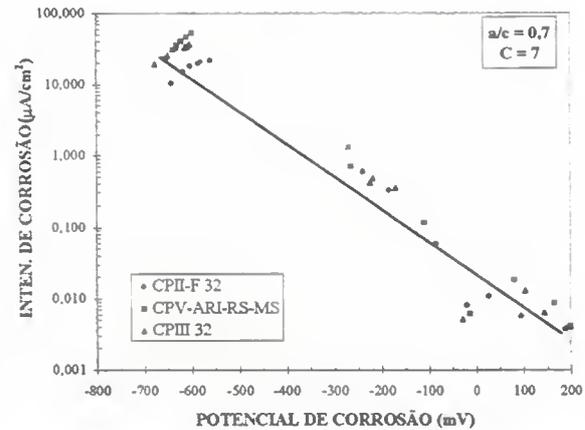


( b )

Figura 5.11- Relação entre intensidade de corrosão e potencial de corrosão no ensaio com cloretos, para séries normais curadas 28 dias com relação água/cimento 0,4 e 0,7.



( a )



( b )

Figura 5.12- Relação entre intensidade de corrosão e potencial de corrosão no ensaio com cloretos, para séries normais curadas 7 dias com relação água/cimento 0,4 e 0,7.

É interessante observar nas Figuras 5.11 b e 5.12 b, referentes a argamassas feitas com elevada relação água/cimento, que os resultados estão dispostos nitidamente em 2 grupos, valores relativos à secagem e a imersão parcial, e que a dispersão maior é correspondente a etapa de secagem provavelmente em função dos altos valores de resistência ôhmica referentes a esta etapa. O que está de acordo com Bauer (1995) que constatou a influência da relação água/cimento nos ensaios acelerados com cloretos, devido a secagem ser mais eficiente com o aumento da relação água/cimento. Enquanto que, para baixas relações água/cimento (Figuras 5.11 a e 5.12 a), os resultados estão distribuídos de forma mais ou menos uniforme em toda faixa de resultados medidos.

### 5.2.2.6 - Relação entre intensidade de corrosão e resistência ôhmica na carbonatação

O grau de umidade presente nos poros, influenciando a resistividade elétrica, relaciona-se diretamente com a intensidade de corrosão na carbonatação (Bauer, 1995). Nepomuceno (1992), observou nos seus estudos sobre materiais de reparação, que praticamente todas as armaduras em materiais depois de carbonatados apresentaram valores significativos de intensidade de corrosão quando a resistividade está numa faixa entre 1000 e 5000 ohm m, confirmando-se assim, que a intensidade de corrosão é controlada pela resistividade no ensaio de carbonatação.

Nas Figuras 5.13 e 5.14, são mostradas as relações entre intensidade de corrosão e resistência ôhmica para as relações água/cimento aqui estudadas, curadas 28 e 7 dias respectivamente no ensaio de carbonatação. Podemos observar que a relação não é clara para as relações água/cimento 0,4 (Figuras 5.13 a e 5.14 a). Isto pode ser explicado provavelmente pelas características de porosidade e por uma maior dificuldade de liberação de água formada no processo de carbonatação.

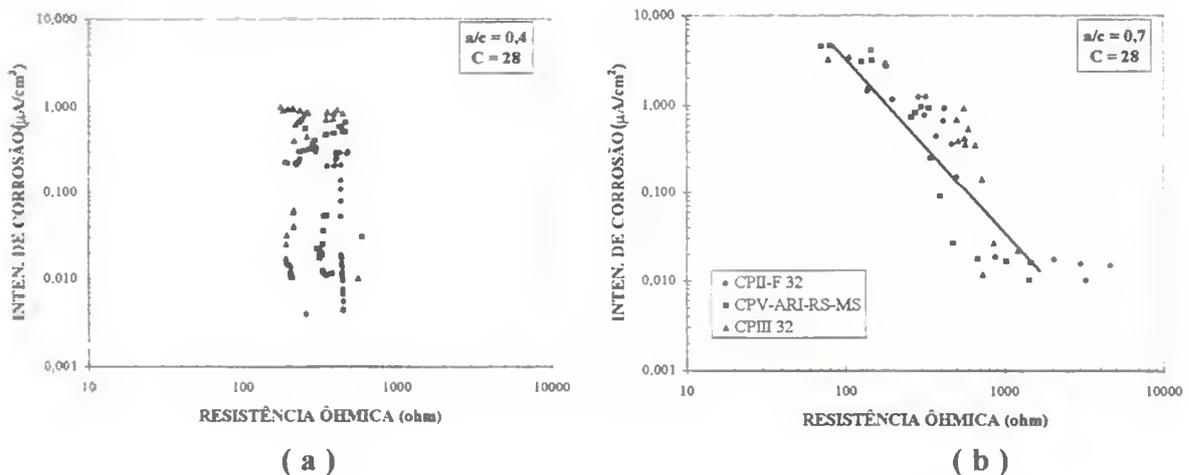


Figura 5.13- Relação entre intensidade de corrosão e resistência ôhmica na carbonatação, para séries normais curadas 28 dias com relação água/cimento 0,4 e 0,7.

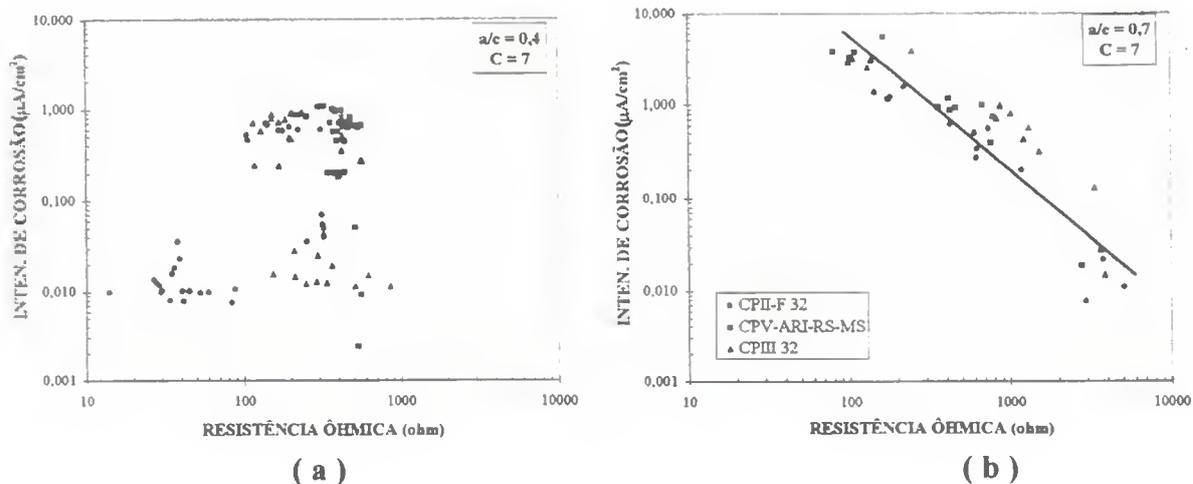


Figura 5.14- Relação entre intensidade de corrosão e resistência ôhmica na carbonatação, para séries normais curada 7 dias com relação água/cimento 0,4 e 0,7.

### 5.2.3 - Em ambientes contaminados por cloretos e posteriormente por CO<sub>2</sub>

#### 5.2.3.1 - Ingresso de cloretos

É interessante observar que corpos de prova não carbonatados, apresentaram intensidades de corrosão bastante inferiores em relação aos corpos de prova semelhantes carbonatados, quando submetidos às mesmas condições de ciclos em uma solução de cloretos com mesma concentração, o que está de acordo com Dhir et al. (1993), que verificou intensidades de corrosão por ataque de cloretos 2 a 3 vezes maiores nos concretos carbonatados. Comparando o desempenho dos três tipos de cimentos estudados em relação a corrosão das armaduras por cloretos, notou-se em geral um melhor desempenho das séries confeccionadas com os cimentos com adições de escória e escória/microsilica. Este comportamento mostra-se de acordo com o comportamento encontrado por (Al-Amoudi et al., 1992; Bauer, 1995). No caso do CPIII-32, isto é devido provavelmente a melhor capacidade de fixação de cloretos, já que ele tem um maior teor de aluminatos (Tabela 4.1). Já no CPV-ARI-RS-MS, pode-se deduzir que o efeito de refinamento dos poros contribui também para dificultar o ingresso de cloretos, pois este cimento foi o que apresentou menor absorção capilar, conforme visto no capítulo 4.

### **5.2.3.2 - Evolução da intensidade de corrosão na etapa de carbonatação**

Em geral, os cimentos com adições de escória e escória/microssilica apresentaram o pior desempenho em relação ao cimento sem adição, apresentando comportamento similar ao encontrado para as séries normais, que foram submetidas a ambientes contaminados por CO<sub>2</sub> e posteriormente por cloretos.

Apesar de aparentemente o CPII-F 32 apresentar mais cloretos livres, provavelmente a sua maior reserva alcalina proporcionou menores valores de intensidade de corrosão em relação aos demais cimentos, especialmente na etapa de parcialmente submerso.

É interessante observar, que os valores finais de intensidade de corrosão atingiram patamares superiores quando comparados com os valores obtidos nas séries normais, o que se mostrou de acordo com Alonso & Andrade (1988). Segundo estes autores a presença simultânea de cloretos e carbonatação têm um efeito adicional na velocidade de corrosão nas armaduras das argamassas e resulta em valores maiores do que se agissem separadamente.

### **5.2.3.3 - Influência da relação água/cimento**

Avaliando-se a influência da relação água/cimento no ensaio com cloretos, observa-se um aumento da fase de iniciação da corrosão nas séries feitas com os cimentos com adições de escória e escória/microssilica em relação as séries feitas com o cimento CPII-F 32, apenas para as séries executadas com a relação água/cimento 0,4. Tal comportamento não foi repetido nas séries feitas com relação água/cimento 0,7, já que os três cimentos apresentaram a mesma fase de iniciação, despassivando todos ao mesmo tempo. Donde conclui-se que o efeito benéfico das adições na capacidade de retenção de cloretos, o que aumentaria a duração da fase de iniciação da corrosão, só é significativo para baixas relações água/cimento. Sabe-se que a capacidade de retenção de cloretos é relativa aos fenômenos de transporte, e que provavelmente o coeficiente de difusão de cloretos para os cimentos com adições é significativamente menor para baixas relações água/cimento. Este comportamento se mostrou de acordo com o encontrado por Bauer (1995) que observou para elevadas relações

água/cimento ( $a/c \geq 0,5$ ) para as séries que empregavam escória, a capacidade de fixação de cloretos não foi capaz de influenciar beneficemente na duração da fase de iniciação e que tanto para os cimentos com e sem adição foi verificado um coeficiente de difusão de cloretos com a mesma ordem de grandeza.

Em geral, na etapa de carbonatação, observou-se valores de intensidade de corrosão inferiores com a redução da relação água/cimento tal qual aconteceu para as séries normais, as quais foram submetidas a ambientes contaminados por  $\text{CO}_2$  e posteriormente por cloretos. Já nas séries feitas com relação água/cimento 0,4, pode-se observar a maior fase de iniciação de corrosão do cimento CPII-F 32 em relação aos outros cimentos. Porém, nas séries feitas com relação água/cimento 0,7, nada pode-se afirmar em relação a fase de iniciação, devido as armaduras já estarem com  $i_{\text{corr}}$  elevadas antes do início do ensaio mostrando que o tipo de cimento teve pouca influência na carbonatação por elas já estarem corroídas.

#### 5.2.3.4 - Relação entre intensidade de corrosão e potencial de corrosão

Pode-se notar nas séries submetidas ao ensaio com cloretos (Figura 5.15) comportamentos semelhantes para ambas relações água/cimento aqui estudadas. Isto é, resultados dispostos de forma contínua na faixa de valores medidos. Observa-se também na Figura 5.15 a, que alguns valores estão sobrepostos, não podendo diferenciar claramente os três tipos de cimento usados.

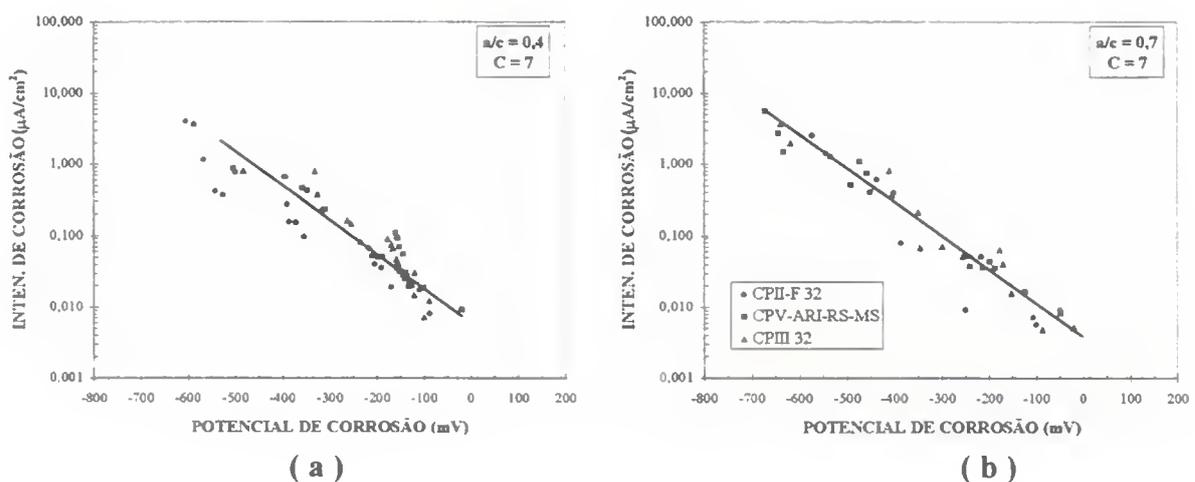


Figura 5.15- Relação entre intensidade de corrosão e potencial de corrosão no ensaio com cloretos, para séries inversas com relação água/cimento 0,4 e 0,7.

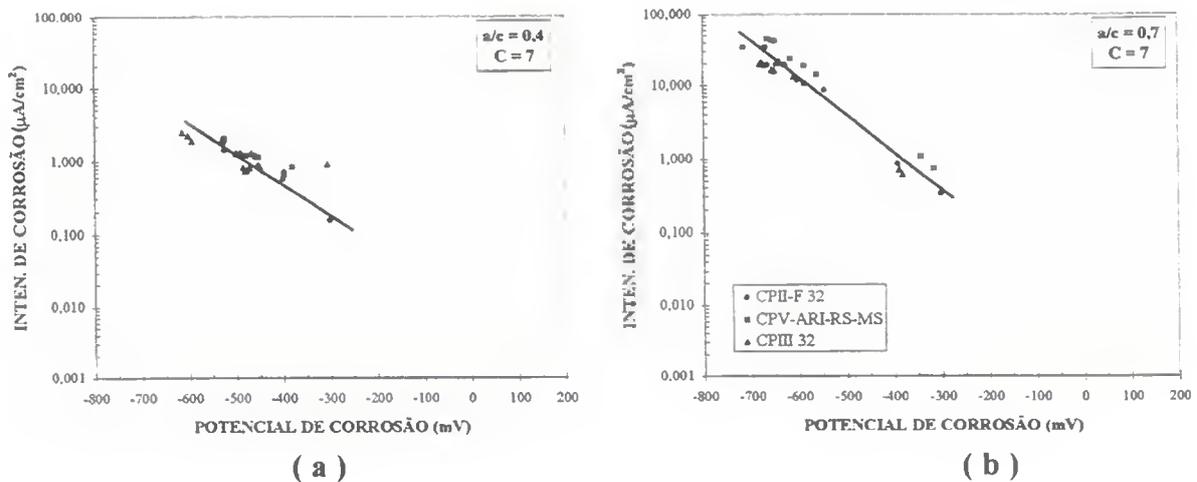


Figura 5.16- Relação entre intensidade de corrosão e potencial de corrosão na carbonatação, para séries inversas com relação água/cimento 0,4 e 0,7.

Comparando-se as relações de intensidade de corrosão e o potencial de corrosão das séries submetidas ao ensaio de carbonatação para as relações água/cimento aqui estudadas (Figura 5.16), constata-se comportamento muito similar entre as séries confeccionadas com os três tipos de cimentos.

### 5.2.3.5 - Relação entre intensidade de corrosão e resistência ôhmica na carbonatação

De uma forma geral, as alterações de resistência ôhmica que podem ser em função da água gerada na carbonatação ou da água proveniente da etapa de parcialmente submerso são correspondidas por alterações respectivas na intensidade de corrosão, o que é uma evidência do controle da resistividade na intensidade de corrosão.

Pode-se então comprovar uma dependência da intensidade de corrosão com a resistência ôhmica nas séries submetidas à carbonatação, para ambas relações água/cimento (Figura 5.17).

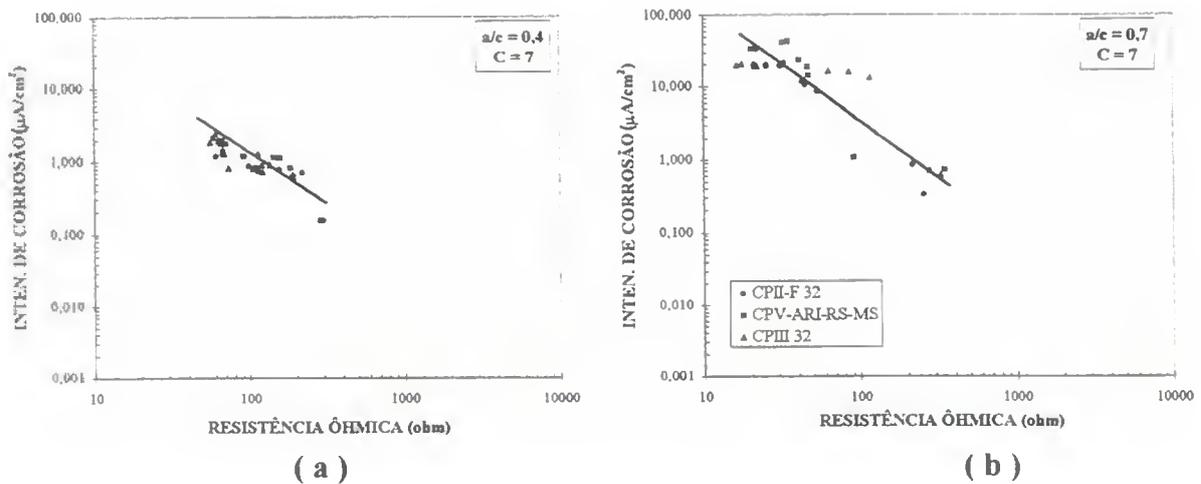


Figura 5.17- Relação entre intensidade de corrosão e resistência ôhmica, na carbonatação para séries inversas com relação água/cimento 0,4 e 0,7.

### 5.3 - IMPORTÂNCIA DO ESTUDO PARA A VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS

Com o desenvolvimento da tecnologia do cimento, que proporciona várias alternativas de produtos com características físicas e químicas diferentes, é possível se obter concretos com resistências muito mais elevadas com maiores relações água/cimento e uma conseqüente redução no consumo de cimento. Considerando que as estruturas usuais de concreto armado são dimensionadas com  $f_{ck}$  entre 18 e 20 MPa, e que as relações água/cimento que alcançam estas resistências estão na faixa de 0,7 a 0,6, é de se supor que a vida útil das obras está diminuindo, o que pode ser verificado na grande quantidade de obras sendo reparadas. Para minimizar isto é necessário um esforço dos profissionais envolvidos com projetos estruturais e execução de obras para aumentar o  $f_{ck}$  das estruturas de concreto, levando em consideração a vida útil e a manutenção das estruturas. É importante que a NBR 6118, em fase de revisão, leve em consideração estes aspectos na definição dos parâmetros de durabilidade.

É interessante levar em consideração também que as estruturas não são curadas normalmente por um período de 28 dias e a utilização desta idade como referência de durabilidade tal como ocorre com a resistência a compressão não parece ser adequada haja vista a grande diferença de comportamento encontrada nos ensaios de séries curadas com 7 e 28 dias.

Outros aspectos importantes a ser considerado na durabilidade das estruturas é a especificação adequada dos cimentos pois a potencialidade de proteção fica comprometida para relação água/cimento elevada, conforme observado nos ensaios realizados.

## 6 - CONCLUSÕES

### 6.1 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando as condições de ensaio aqui apresentadas podemos concluir para os cimentos estudados:

- Em todos os casos, os cimentos CPIII 32 e CPV-ARI-RS-MS têm um pior desempenho em relação à carbonatação.
- Argamassas feitas com os três cimentos contaminadas por cloretos na carbonatação, apresentaram um pior desempenho em relação as argamassas semelhantes não contaminadas.
- A redução da relação água/cimento melhora o desempenho dos três tipos de cimentos utilizados, mesmo que eles estejam carbonatados.
- O aumento do período de cura melhora o desempenho dos três tipos de cimentos, principalmente quando se utiliza baixa relação água/cimento.
- O desempenho dos três tipos de cimentos submetidos a corrosão por cloretos é significativamente melhor quando as argamassas não estão carbonatadas.
- Os cimentos CPIII 32 e CPV-ARI-RS-MS têm um melhor desempenho em relação a corrosão por cloretos, principalmente para relação água/cimento 0,4.
- Com a técnica de Resistência de Polarização utilizada, podemos classificar os três cimentos estudados em ordem decrescente de desempenho :
  - a) Ambientes carbonatados contaminados com cloretos- CPIX-F 32, CPIII 32 e CPV-ARI-RS-MS.
  - b) Ambientes somente contaminados com cloretos- CPIII 32, CPV-ARI-RS-MS e CPIX-F 32

c) Ambientes contaminados com cloretos carbonatados- CII-F 32, CIII 32 e CPV-ARI-RS-MS

## 6.2 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Através do presente tema, sugere-se alguns assuntos para estudos futuros que seriam enriquecedores para um melhor conhecimento da capacidade de proteção dos cimentos quanto ao fenômeno de corrosão de armaduras.

- Estudo da fixação de cloretos em concretos carbonatados e não carbonatados.
- Estudo detalhado da microestrutura e reserva alcalina da fase aquosa, para vários tipos de cimentos com adições.
- Ensaio de carbonatação não acelerada, variando relação água/cimento e período de cura.
- Análise da influência do período de cura em ambientes contaminados por cloretos e carbonatados.
- Desenvolvimento e aplicação de metodologia para avaliação das dimensões dos corpos de prova para ensaios de carbonatação acelerada.
- Estender o presente estudo para outros tipos de cimentos nacionais.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AL-AMOUDI, O.S., RASHEEDUZZAFAR & MASLEHUDDIN, M. (1991). "Carbonation and Corrosion of rebars in salt contaminated OPC/PFA concretes." *Cement and Concrete Research*. Vol. 21, pp. 38-50.

AL-AMOUDI, O.S., RASHEEDUZZAFAR, ABDULJAUWAD, S. & MASLEHUDDIN, M. (1992). "Effect of chloride-sulfate ions on reinforcement corrosion and sulfate deterioration in blended cements." Malhotra, V.M. ed. *Canmet/ACI International Conference on Fly ash. Silica fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, 4., Stambul, Proceedings. Detroit, ACI, pp.1105-1123.

AL-AMOUDI, O.S., RASHEEDUZZAFAR, MASLEHUDDIN, M. & AL-MANA A.I. (1993). "Prediction of long-term corrosion resistance of plain and blended cement concretes." *ACI Materials Journal*, Vol. 90, N° 6, novembro-dezembro.

AL-GAHTANI, A.S., RASHEEDUZZAFAR & HUSSAN, S.E. (1994). "Effect of alkali content of cement on chloride binding and corrosion of reinforcement steel." SWAMY, R.N. ed. *Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete*. Proceedings. Sheffield, Sheffield Academic Press, pp. 472-481.

ALONSO, C. & ANDRADE, C. (1988). "Corrosion of Steel reinforcement in carbonated mortar containing Chlorides." *Advances in Cement Research* Vol. 1, N° 3, July, pp.155-163.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 876 (1992). "Standard test method for half cell potential of uncoated reinforcing steel in concrete." *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia.

\_\_\_\_\_.ASTM C 1152 (1992). "Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete." *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia.

\_\_\_\_\_.ASTM E 104 (1992). "Standard practice for maintaining constant relative humidity by means of aqueous solutions." *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia.

ANDRADE, C. & GONZÁLEZ, J.A. (1978). "Quantitative Measurements of Corrosion Rate of Reinforcing Steels Embedded in Concrete Using Polarization Resistance Measurements." *Werkstoffe und korrosion* 29, pp. 515-519.

ANDRADE, C. & GOÑI, S. (1990). "Synthetic Concrete Pore Solution Chemistry and Rebar Corrosion Rate in Presence of Chlorides." *Cement and Concrete Research*, Vol. 20, pp. 525-539.

ANDRADE, C. & ALONSO C. (1992). "On-site monitoring of concrete repairs by polarisation resistance." *Proceedings of the International RILEM/CSIRO/ACRA Conference*, Melbourne, Australia, pp.51-60.

ANDRADE, C. (1973). "*Nueva Técnica Eletroquímica de Medida de la Corrosión de Armaduras en Hormigones Armados y Pretensados. Empleo de Aditivos Inhibidores como Método de Protección.*" Tese de Dotorado, Fac. C. Químicas, Univ. Complutense de Madrid, 129p.

ANDRADE, C. (1984). "*Corrosión Localizada del Acero en Contacto con el Hormigón.*" Rev. Iberoamericana de Corrosión y Protección, Vol. 15, Nº 4, pp. 27-34.

ANDRADE, C. (1992). "*Manual para Diagnóstico de Obras Deterioradas por Corrosão de Armaduras.*" Editora Pini, São Paulo, 104p.

ANDRADE, C., CASTELO, V., ALONSO, C. & GONZÁLEZ, J.A. (1986). "*Determination of the Corrosion Rate of Steel Embedded in Concrete by the Polarization Resistance and A.C. Impedance Methods.*" Special technical publication 906, American Society for Testing and Materials.

ANDRADE, C., ALONSO, M.C. & GONZALEZ, M. (1990). "*An inition effort to use the corrosion rate measuements for estimating rebar durability.*" BERKE, N.S., CHAKER, V., WRITING, P., eds. Corrosion Rates of Steel in Concrete. Philadelphia, ASTM, pp. 29-37 (STP-1065).

ANDRADE, C. & FELIU, S. (1991). "*Corrosión y proteccion metalicas.*" Madrid, CSIC.

ANDRES, P.R. (1989). "*A influência da natureza do aglomerante e suas adições na carbonatação de argamassas e concretos.*" Reparos, Reforços e Proteção das Estruturas de Concreto. Anais. EPUSP, São Paulo-SP, pp. 20-44.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215 (1991). "*Cimento Portland- Determinação da resistência à compressão.*" Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_.NBR 11581 (1991). "*Cimento Portland-Determinação dos tempos de pega.*" Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_.NBR 5735 (1991). "*Cimento Portland de Alto-forno.Especificação.*" Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_.NBR 6474 (1984). "*Cimento Portland e outros materiais em pó-Determinação da massa específica.*" Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_.NBR 7211 (1983). "*Agregado para concreto.*" Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_.NBR 7217 (1987). "*Determinação da composição granulométrica.*" Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_.NBR 7224 (1984). "*Cimento Portland e outros materiais em pó-Determinação da área específica.*" Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_.NBR 9778 (1987). "*Determinação da absorção de água por imersão-Índice de vazios e massa específica.*" Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_.NBR 9779 (1987). “*Argamassa e concreto endurecidos-Determinação da absorção de água por capilaridade.*” Rio de Janeiro.

BAUER, E. & SOUZA, K.R. (1989). “*Monitoramento do estado de corrosão das armaduras de concreto armado através da avaliação de potencial de eletrodo.*” Simpósio sobre Patologia das Edificações: Prevenção e Recuperação, Porto Alegre, Anais. UFRGS/CPGEC, 1989, pp. 341-364.

BAUER, E. (1995). “*Avaliação comparativa da influência da adição de escória de alto forno na corrosão das armaduras através de técnicas eletroquímicas.*” São Paulo, Tese de Doutorado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP, 236p.

BISHARA, S.W. (1991). “*Rapid, accurate method for determining water-soluble chloride in concrete, cement, mortar, and aggregate: application to quantitative study of chloride ion distribution in aged concrete.*” ACI Materials Journal, Vol. 88, N° 3, May-June.

CALLEJA, J. (1986). “*Future trends in the research of the structure, properties and behaviour of blended cements.*” Congresso Internacional de Química do Cimento, Rio de Janeiro, Anais. Vol. 1, pp.233-248.

CARMONA, A. & MAREGA, A. (1988). “*Retrospectiva da patologia no Brasil, estudo estatístico.*” Colloquia 88, Jornada en Español y Portugues sobre Estructuras Y Materiales, Vol. VI, Madrid, p. 101-123, maio.

CEB (1984). “*Durability of Concrete Structures.*” Report of CEB-RILEM International Workshop. Copenhagen, Mai, 1983; também CEB-Bulletin D’Information, N° 152.

CEB (1989). “*CEB Design guide: Durable concrete structures.*” Bulletin d’Information N° 182, Junho.

CHAMOSA, J.A.V & ORTIZ, J.L.R. (1985). “*Datos orientativos sobre la evolución de defectos en la construcción, en España.*” Hormigon e Acero, N° 157, p.101-110.

CIB W 80/RILEM 71-PSL. (1983). (Conseil International du Batment Pour la Recherche L’étude et la Documentation & Réunion Internationale des Laboratoires D’essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions). “*Prediction of service life of building materials and components.*” Rotterdam, 98p.

CINCOTTO, M.A., (1988). “*A Influência do Pó Calcário nas Propriedades do Cimento Portland Comum.*” A Construção São Paulo. N.º 2095.

COLLEPARDI, M., MARCIALIS, A. AND TURRIZIANI, R. (1972). “*Penetration of Chloride Ions into Cement Pastes and Concretes.*” Journal of the American Ceramic Society, Vol. 55, N.º 10, pp.533-535.

CONSTANTINOU, A. (1991). “*Laboratory and Field Investigation of the Corrosion of the Steel in Concrete.*” Dissertação de Mestrado, Imperial College of Science, 127p.

- DHIR, R.K., JONES, M.R. & McCARTHY, M.J. (1993). "PFA concrete: Chloride ingress and corrosion in carbonated cover." Proc. Instn Civ. Engrs Structs & Bldgs, May, pp.167-172.
- FARIAS R.F.S. & TEZUKA Y. (1992). "Corrosão das Armaduras do Concreto: Mecanismos e Concreto." Boletim Técnico N° 69. Escola Politécnica da USP, São Paulo.
- FATTHUI, N.I. (1986). "Carbonation of concrete as affected by mix constituents and initial water curing period." Materiaux et Constructions, Vol. 19, pp. 131-136.
- FIGUEIREDO, E.J.P., HELENE, P. & ANDRADE, C. (1993). "Fatores Determinantes da Iniciação e Propagação da Corrosão da Armadura do Concreto." Boletim Técnico N° 121. Escola Politécnica da USP, São Paulo.
- FIGUEIREDO, E.J.P. (1994). "Avaliação do desempenho de revestimentos para proteção da armadura contra a corrosão através de técnicas eletroquímicas- contribuição ao estudo de reparo de estruturas de concreto armado." Tese Doutorado- Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- GJORV, O.E. ET AL. (1977). "Electrical resistivity of concrete in the oceans." In.: Offshore Technology Conference, Houston, May, Vol. 1, p. 581-88.
- GJORV, O.E. & VENNESLAND, O. (1979). "Diffusion of Chloride Ions from Seawater into Concrete." Cem. Conc. Research, Vol. 9, pp. 229-238.
- GONZALEZ, J.A. & ANDRADE, C. (1980). "Relaciones cuantitativas entre la carbonatación del hormigón y la corrosión de las armaduras." Revista Iberoamericana Corrosion y Protection, Vol. 11, N°1, pp. 15-24.
- GONZALEZ, J.A., MOLINA, A., ESCUDERO, M.L. & ANDRADE, C. (1985). "Errors in the electrochemical evaluation of very small corrosion rates - I. Polarization Resistance method applied to corrosion of steel in concrete." Corrosion Science. Vol. 25, N°10, pp. 917-930.
- GONZALEZ, J.A., ANDRADE, C., ESCUDERO, M.L. (1984). "Corrosion de las armaduras por carbonatación del hormigón." Revista Iberoamericana Corrosion Y Protection, Vol. 15, N°. 4, pp. 11-19.
- HART, G. & LUKAS, W. (1987). "Investigations on the Penetration of Chloride into Concrete and on the Effect of Cracks on Chloride-Induced Corrosion of Reinforcement." Bet. + Fert. - Technick, pp. 497-505.
- HAUSMAN, D.A. (1967). "Steel Corrosion in Concrete; How does it occur?." Materials Protection, Nov., pp. 19-23.
- HELENE, P.R.L. (1983). "Corrosión de las Armaduras en el Hormigón Armado." Cemento-Hormigón, N° 583, abril.

HELENE, P.R.L. (1986). "*Corrosão Em Armaduras para Concreto Armado.*" Editora Pini, São Paulo, 46p.

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

HO, D.W.S. & LEWIS, R.K. (1987). "*Carbonation of concrete and its prediction*" Cem. Conc. Research, Vol. 17, pp. 489-504.

JAEGERMANN, C. (1990). "*Effect of water-cement ratio and curing on chloride penetration into concrete exposed to mediterranean sea climate.*" ACI Materials Journal, Vol.87, N° 4, Julho- Agosto.

JOHN, D.G., SEARSON, P.C. & DAWSON, J.L. (1981). Br. Corrosion J., 5, Vol. 16, N° 2.

JONES, M.R., MCCARTHY, M.J. & DHIR, R.K. (1994). "*Chloride ingress and reinforcement corrosion in carbonated and sulphated concrete.*" SWAMY, R.N. ed. Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete. Proceedings. Sheffield, Sheffield Academic Press, pp. 365-376.

KAYYALI, O.A. & HAQUE, M.N. (1988). "*Effect of carbonation on the chloride concentration in pore solution of mortars with and without flyash.*" Cement and Concrete Research. Vol. 18, pp.636-648.

LAMBERT, P., PAGE, C.L. & VASSIE, P.R. (1991). "*Investigations of reinforcement corrosion.2. Electrochemical monitoring of steel in chloride-contaminated concrete.*" Materials and Structures, Vol.24, pp. 351-358.

LITVAN, G.G. & MEYER, A. (1986). "*Carbonation of granulated blast furnace slag cement concrete during twenty years of field exposure.*" Malhotra, V.M. ed. Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, 2°, Madrid. Proceedings. Detroit, ACI, pp.1445-1462. (SP-91).

MEHTA, P.K. (1983). "*Pozzolanic and cementitious by-products as mineral admixtures for concrete- a critical review.*" Malhotra, V.M. ed. Fly ash, silica fume, slag and other mineral by-products in concrete. Detroit. Proceedings. ACI, pp. 1-45 (SP-79).

MEHTA, P.K. (1986). "*Concrete: Structure, Properties and Materials.*" New Jersey, Prentice-Hall.

MEHTA, P.K. (1989). "*Pozzolanic and cementitious by-products in concrete-another look.*" Malhotra, V.M. ed. - Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in concrete, 3, Trondheim. Proceedings. detroit, ACI, Vol.2, (SP-114).

MEHTA, P.K. (1994). "*Concreto, Estrutura, Propriedades e Materiais.*" Editora Pini, São Paulo, 573p.

- MILLARD, S.G., GHASSEMI, M.H. & BUNGEY, J.H., JAFAR, M.I., (1990). "Assesing the electrical resistivity of concrete structures for corrosion durability studies." 3rd Int. Sympium on Corrosion of Reinforcement in Concrete, Ed. Page, pp 303-313.
- MOSKVIN, V., IVANOV, F., ALEKSEYER, S. & GUZEYEV, E. (1983). "Concrete and Reinforced Concrete Deterioration and Protection." Moscow, 399p.
- NEPOMUCENO, A.A. (1992). "Comportamiento de Morteros de Reparacion Frente a la Carbonatacion y la Penetracion de Cloruros en Estructuras de Hormigon Armado Dañadas por Corrosion de armaduras. Estudio Mediante la Resistencia de Polarizacion." Tese de Doutorado, Universid Politecnica de Madrid, Instituto de Ciencias de la Construccion "Eduardo Torroja"- CSIC, Madrid, Espanha, 371p. Novembro.
- NEVILLE, A.M. (1982). "Propriedade do concreto." Editora Pini, São Paulo, 738p.
- NINCE, A.A. (1996). "Levantamento de dados sobre a deterioração de estruturas na região Centro-Oeste" Dissertação de Mestrado, Departamento em Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 160p.
- NISHER, P. (1984). "Effec of enviroment and concrete quality on carbonation." Bet. + Fert. - Technick, pp. 752-757.
- PAGE, C.L. & SHORT, N.R.. (1981). "Diffusion of Chloride Ions in Hardened Cement Pastes." Cem. Conc. Research, Vol. 11, pp. 395-406.
- PAGE, C.L., SHORT, N.R. & HOLDEN, W.R.. (1986). "The influence of different cements on choloride-induced corrosion of reinforcing steel." Cement and Concrete Research, Vol. 16, pp. 79-86.
- PAGE, C.L. (1988). "Basic principles of corrosion." In: SCHIESSL, P. (ed). Corrosion of Steel in Concrete, RILEM Technical Comittee 60-CSC, London, Chapman e Hall.
- PAGE, C.L., LAMBERT, P., & VASSIE, P.R. (1991). "Investigations of reinforcement corrosion. 1. The pore electrolyte phase in chloride-contaminated concrete." Materials and Structures, Vol. 24, pp.243-252.
- PARROTT, L.J. (1987). "A Review of Carbonation in Reinforced Concrete." C&CA, July, 68p.
- PARROTT, L.J. (1992). " Water absortion in cover concrete. Materials and Structures." Vol. 25, pp. 284-292.
- PETTERSON, K. (1994). "Chloride threshold value and the corrosion rate in reinforced concrete." SWAMY, R.N. ed. Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete. Proc. Sheffield, Sheffield Academic Press, pp. 461-474.
- PREECE, C.M., GRONVOLD, F.O. & FROLUND, T. (1983). "The Influence of Cement Type on the Electrochemical Behaviour of Steel in Concrete." Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction. Editado por Crane, A. P., Ellis Horwwod Hd.

- RAMACHANDRAN, V.S. & CHUN-MEI, Z. (1986). "Cement with calcium carbonate additions." International Congress on the chemistry of cement. 8th. Rio de Janeiro, V. VI., p.178-182.
- RAPHAEL, M. & SHALON, R. (1971). "A Study of the Influence of Climate on Corrosion of Reinforcement." Conc & RC in hot Coutry, Haifa V1 77-96.
- RASHEEDUZZAFAR, AL-SAADOUN, S.S., AL-GAHTANI, A.S. & DAKHIL, F.H. (1990). "Effect of tricalcium aluminate content of cement on corrosion of reinforcing stell in concrete." Cement and Concrete Research, Vol. 20, pp. 723-738.
- RILEM (1988). "Meseasurement of hardened concrete carbonation depth." TC56-CPC 18.
- ROSTAM, S. (1991). "Tecnologia Moderna de La Durabilidad." Palestra dedicada ao Prof. J. Calavera, Barcelona, Outubro, 35p.
- ROY, D.M. (1989). "Hydration, microstructure and chloride diffusion of slag-cement pastes and mortar." Malhotra, V.M. ed. - Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in concrete, 3, Trondheim. Proceedings. detroit, ACI, Vol.2, pp.1236-1281. (SP-114).
- SATO, N.M., JOHN, V.M. & AGOPYAN, V.(1995). "Mecanismos de transporte de água em concreto e argamassas." 37º Reunião do Instituto Brasileiro do Concreto. Goiânia, pp.47-61.
- SCHIESSEL, P. (1992). "Repair strategies for concrete structures damaged by steel corrosion." Rehabilitation of Concrete Structures, Proc. of Int. RILEM/CSIRO/ACRA Conference, Melbourne, Australia, pp.1-21.
- SELINGER, F. (1992). "Morteros de Reparación." Curso de Recuperação de Obras de Concreto, Bilbao, 30-31 de janeiro, 19p.
- STERN, M.; GEARY, A.L. (1957). "Electrochemical polarization. 1.A theoretical analysis of the shape of polarization curves." Journal of the Eletrochemical Society, Vol.104, Nº 1, p.56-63.
- STRATTFUL, R.F. (1973). "Highway Research Record 433." p. 12
- SURYAVANSHI, A.K., SCANTLEBURY, J.D. & NEDWELL, P.J. (1994). "Pore solution analysis of normal portland cement and sulphate resistant portland cement mortars and their influence on corrosion behaviour of embedded steel." SWAMY, R.N. ed. Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete. Proc. Sheffield, Sheffield Academic Press, pp. 482-490.
- TANG L. & NILSON L. (1991). "Chloride biding capacity, penetration and pore structures of blended cement pastes with slag and lyash." Int. Conf. on Blended Cements in Construction, Ed. R. N. Swamy, pp 377-388.
- TAYLOR, H.F.W. (1992). "Cement Chemistry." London, Academic Press.

TUUTTI, K. (1982). "*Corrosion Steel in Concrete*" Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockolm, 469p.

UCHIKAWA, H. (1986). "*Effect of blending components on hydration and structure formation.*" Congresso Internacional de Química do Cimento, Rio de Janeiro, Anais. Vol. 1, pp.249-280.

VERBECK, G. (1958). "*Carbonation of hydrated portland cement.*" Special Techn. Publication, N° 205, ASTM, 36p.

WINSLOW, D. & LIU, D.(1990). "*The pore structure of paste in concrete.*" Cement and Concrete Research. Vol.20, pp.227-235.