

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

**AVALIAÇÃO DA SENSIBILIDADE DO ENSAIO CAIM –  
CORROSÃO ACELERADA POR IMERSÃO MODIFICADA –  
FRENTE AO PROCESSO DE CORROSÃO EM ARMADURAS  
DE CONCRETO ARMADO**

**Ariela da Silva Torres**

***Dissertação de Mestrado***

Porto Alegre

Junho, 2006

**ARIELA DA SILVA TORRES**

**AVALIAÇÃO DA SENSIBILIDADE DO ENSAIO CAIM –  
CORROSÃO ACELERADA POR IMERSÃO MODIFICADA –  
FRENTE AO PROCESSO DE CORROSÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para  
obtenção do título de Mestre em Engenharia na modalidade Acadêmico.

Porto Alegre

Julho 2006

TORRES, Ariela da Silva

Avaliação da sensibilidade do ensaio CAIM – Corrosão Acelerada Por Imersão Modificada – frente ao processo de corrosão/ TORRES, Ariela da Silva – Porto Alegre: PPGEC/UFRGS, 2006.

Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Mestre em Engenharia.

Orientação do Prof. Ph.D. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho.

Corrosão de armaduras 2. Método de ensaio  
3. Patologia das construções 4. Teste eletroquímico

CDU –ver bibliotecário

**ARIELA DA SILVA TORRES**

**AVALIAÇÃO DA SENSIBILIDADE DO CAIM – CORROSÃO  
ACELERADA POR IMERSÃO MODIFICADA – FRENTE AO  
PROCESSO DE CORROSÃO EM ARMADURAS DE  
CONCRETO ARMADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia na modalidade Acadêmico.

Prof. Luis Carlos Pinto da Silva Filho  
Ph.D. pela Universidade de Leeds  
Orientador

Prof. Fernando Schnaid  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**BANCA EXAMINADORA**

**Profa. Dra. Aguida Gomes de Abreu (UPF)**  
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Profa. Dra. Denise Carpena Coitinho Dal Molin (UFRGS)**  
Dra. pela Universidade de São Paulo

**Prof. Dr André Tavares da Cunha Guimarães (FURG)**  
Dr. pela Universidade de São Paulo

...  
Eu quero ver você mandar na razão  
Pra mim não é qualquer notícia que abala um  
coração

Se toda hora é hora de dar decisão, eu falo agora  
No fundo eu julgo o mundo um fato consumado e eu  
vou embora  
Não quero mais, de mais a mais, me aprofundar  
nessa história  
Arreio os meus anseios, perco o veio e vivo de  
memória

Eu quero é viver em paz

...

*Djavan (Fato Consumado)*

Dedico este trabalho a minha “fundação”. Três pilares perfeitos (pai, mãe e Tita).

## AGRADECIMENTOS

A vida, ao meu ver, é feita de encontros. Vivemos encontrando pessoas. Seja pela primeira vez ou reencontrando depois de muito tempo. Eu vivi os 24 meses desta dissertação assim. Encontrei pessoas, reencontrei outras, mas todas elas foram importantes!

Algumas delas...

Primeiro, ao Prof. Luis Carlos pela orientação deste trabalho mas acima de tudo por ter me dado a oportunidade de fazer parte da família LEME e ter me dado a sua amizade, companheirismo e confiança.

Ao Professor Dario por sempre terem sido exemplo de profissional e amigo.

Aos Professores que participaram da banca examinadora desta dissertação, pelos valiosos conselhos que enriqueceram ainda mais o trabalho, Prof<sup>a</sup> Denise, Prof<sup>a</sup> Águida e Prof<sup>o</sup> André.

Ao “anjos” do LEME: Fontes, Sr. Teixeira, Sr. Ribeiro, Sr. Miro, Flávio, Liliana, Virgínia e Angélica por todo o suporte técnico que me foi dado durante o tempo de convívio.

Aos meus colegas e amigos do LEME por terem se transformado em mais que colegas. Verdadeiros amigos. Mas agradeço em especial Leila, Uziel, Estela e Larissa.

Aos meus colegas da turma de estruturas 2004 e aos “agregados”, por termos superado até o fim às dificuldades e com isso termos aprendido princípios para toda a vida. Em especial Daniel Jost (por ser um verdadeiro amigo para toda a vida), Rafael Speaker (meu amigo pra todas as horas), Daniel Nunes e Juliana Chicarello, Klaus (o coração da turma, a transparência em pessoa, meu companheiro de festas e amigo “genial”).

Às minhas amigas do tempo de colégio, do tempo da faculdade e tantas outras que apareceram antes ou durante este estudo por terem sido mais que amigas e muitas vezes irmãs nos momentos mais difíceis (Jô, Jaque... e são muitas). Em especial, a Lidiane Ibeiro, por ter me incentivado no início, no meio e no fim desta etapa. Por ter

sido minha companheira de risadas, de estresse, mas principalmente de vitórias na Engenharia Civil; à Adriane Vargas, a lista foi muito importante, mas a sua amizade foi mais ainda!

Às empresas Pré-Mold, pela doação do cimento, I.C. da Silva Incorporadora de Imóveis, pela doação da armadura e a Sika, pelo superplastificante.

À querida Ana Paula Kirchheim, por ter sido de fundamental importância na elaboração deste trabalho.

Ao pessoal da Eng. Química, principalmente a Tiele, pela execução da solução de limpeza das barras.

Aos bolsistas do LEME, mas em especial ao Diego Guimarães, por ter me ajudado tanto e estar sempre ao meu lado.

À turma da praia, Metralhas que sempre me proporcionaram momentos de descontração e pelo simples fato deste grupo existir.

Aos meus tios, dindos e primos (Márcio, Marissol, Guto, Beta, Lipe, Marcos, Idangela...) por fazerem parte da minha vida. Em especial ao Duda que fez toda revisão desta dissertação. Ao meu tio Júnior, por ter sido, desde que nasci, muito mais que um tio, mas um companheiro e um incentivador.

À minha vó Ivalisia, onde está sei que torce muito por mim. Ao vô Idelon por ter me apresentado a Engenharia Civil. À minha vó, Zenaida, por sempre ter sido um exemplo de mulher e ao meu tio Fernando, por ter me demonstrado em pequenos atos o seu amor.

À minha irmã Tita, por ser quem ela é!

Ao meu pai, meu protetor, meu amigo e minha base por me amar tanto. À minha mãe, minha amiga e a mulher mais guerreira que conheço, por ser o que ela é pra mim.

A Deus, por todas as bênçãos que recebi.



## RESUMO

TORRES, A.S. **Avaliação da Sensibilidade do Ensaio CAIM – Corrosão Acelerada por Imersão Modificada – Frente ao Processo de Corrosão em Armaduras de Concreto Armado**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2006.

A construção civil vem se deparando com uma dualidade que envolve avanços dos métodos de cálculo e tecnologia dos materiais contraposto ao incremento das patologias das construções. Inúmeros levantamentos estatísticos, realizados nos últimos anos, vem demonstrando a grande incidência e repercussão dos processos patológicos atuantes sobre as estruturas de concreto. Vários estudos comprovam que a corrosão de armaduras no concreto é de grande incidência nas construções e, na maioria dos casos, aquele que gera os maiores problemas, tanto em termos de custo como de segurança. Isto explica porque técnicas de medição de resistência à corrosão vêm sendo intensamente estudadas.

Todavia, dada a complexidade do assunto e a falta de normalização específica, observa-se a existência de uma grande diversidade de métodos de ensaio, aliada à ausência de uma padronização dos tipos e condições de ensaio. A maioria dos pesquisadores adapta ensaios anteriormente realizados, sem realizar estudos específicos sobre a eficiência e reprodutibilidade dos mesmos. O presente trabalho descreve um estudo realizado com o intuito de avaliar qual os efeitos das variações das condições de ensaio, como tempo de exposição e diferença de potencial induzida, no comportamento de corpos-de-prova de diversas relações água/cimento testados pela metodologia CAIM, um tipo de ensaio acelerado comparativo de corrosão por imersão em solução salina, que já foi empregado em várias pesquisas no LEME. O objetivo é entender como o ensaio reage a variações de método, verificando sua sensibilidade a estas e definindo quais as condições padrão mais adequadas.

*Palavras-chave:* corrosão, métodos de ensaio, patologia das construções, métodos eletroquímicos.

## ABSTRACT

TORRES, A.S. **Avaliação da Sensibilidade do Ensaio CAIM – Corrosão Acelerada por Imersão Modificada – Frente ao Processo de Corrosão em Armaduras de Concreto Armado**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2006.

The construction community is facing a dualistic reality, where advances in design methods and materials technology are opposed by the increase in pathological problems registered in our structures. Several recent surveys have pointed out that several and important deterioration processes occur in concrete structures. Many studies indicate that reinforcement corrosion is one of the most prevalent and costly between these. That explains why there are so much interest in studying methods to evaluate the corrosion resistance of construction materials. However, given the complexity of the theme and the lack of standardization, a great diversity of methods have evolved, without a proper definition and parameterization of testing conditions. A great number of researches simply adapt methods used by others, not paying enough attention to the evaluation of the efficiency and reproducibility of the test method. This prevents the comparison of results and creates obstacles to sharing data and articulate research efforts. The present work describes a study aimed at evaluating the influence of variations in test conditions, such as exposure time and induce voltage, in the performance of mortar samples with different w/c relations subjected to the CAIM test. This comparative accelerated method, in which mortar samples are immersed on a saline solution and connected to a constant voltage source, has already been used in several studies at LEME. The study analyses how the method respond to variations in test conditions and will help establish the more efficient standard conditions for the test considering the whole range of concrete strengths.

Keywords: corrosion; test methods; construccion of pathology, electrochemical test methods.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	ix
ABSTRACT.....	x
LISTA DE FIGURAS.....	xiv
LISTA DE TABELAS.....	xvi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xvii
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>01</b>
1.1 HIPÓTESES DA PESQUISA .....	05
1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	05
1.2.1 Objetivo Principal.....	05
1.2.2 Objetivo Secundário.....	05
1.3 DELIMITAÇÕES E LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	06
1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA.....	07
<b>2 REVISÃO DO MECANISMO DE CORROSÃO DE ARMADURAS EM CONCRETO ARMADO.....</b>	<b>08</b>
2.1 CONCEITOS BÁSICOS.....	08
2.2 CORROSÃO DE ARMADURAS DE CONCRETO ARMADO .....	14
2.2.1 Processos Corrosivos em Barras de Armadura.....	15
2.2.2 Princípios da Corrosão Eletroquímica.....	16
2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM A CORROSÃO DAS ARMADURAS.....	20
2.3.1 Concreto.....	20
2.3.2 Meio Ambiente.....	22
2.3.3 Presença de íons cloreto.....	24
2.3.4 Carbonatação.....	32
<b>3 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE CORROSÃO.....</b>	<b>34</b>
3.1 INTRODUÇÃO.....	34
3.2 PRINCÍPIOS DOS MÉTODOS VISUAIS DE AVALIAÇÃO DA CORROSÃO.....	39
3.3 PRINCÍPIOS DOS MÉTODOS GRAVIMÉTRICOS DE AVALIAÇÃO DA CORROSÃO.....	40
3.4 PRINCÍPIOS DOS MÉTODOS ELETROQUÍMICOS DE AVALIAÇÃO DA CORROSÃO.....	41
3.4.1 Ensaios de determinação do coeficiente de difusão de oxigênio.....	41
3.4.2 Ensaios de difusão e migração de cloretos.....	42
3.4.3 Ensaios de determinação de teor de cloretos.....	43

3.4.4 Ensaio de resistividade.....	43
3.4.5 Ensaio de medição da resistência elétrica.....	46
3.4.6 Ensaio de potencial de corrosão.....	47
3.4.7 Ensaio de determinação das curvas de polarização.....	49
3.4.8 Ensaio de resistência à polarização.....	50
3.4.9 Ensaio de impedância eletroquímica.....	52
3.4.10 Ensaio de determinação da intensidade de corrente galvânica.....	53
3.4.11 Ensaio de determinação de ruídos eletroquímicos.....	53
3.5 DESENVOLVIMENTO, EVOLUÇÃO E PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DO ENSAIO CAIM.....	54
3.5.1 Evolução do Ensaio CAIM.....	55
3.5.2 Considerações Finais do Ensaio.....	57
<b>4 DESCRIÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>59</b>
4.1 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE ESTUDO.....	59
4.1.1 Tipo de conexão elétrica.....	59
4.1.2 Voltagem de Indução.....	61
4.1.3 Tempo de ensaio.....	61
4.1.4 Nível da solução.....	62
4.2 DENIFIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE RESPOSTA.....	62
4.3 ESTRATÉGIA DE PESQUISA.....	63
4.3.1 Etapa preliminar.....	63
4.3.2 Etapa principal.....	65
4.4 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS.....	67
4.4.1 Cimento.....	67
4.4.2 Agregado miúdo.....	68
4.4.3 Agregado graúdo.....	69
4.4.4 Aditivo.....	70
4.4.5 Armadura.....	71
4.4.6 Água de amassamento.....	71
4.4.7 Solução salina agressiva.....	71
4.5 CARACTERÍSTICAS DOS CORPOS-DE-PROVA.....	71
4.6 PRODUÇÃO DO CONCRETO.....	72
4.7 PROCEDIMENTO DE ENSAIO ADOTADO.....	73
<b>5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>77</b>
5.1 ESTRATÉGIA DE ANÁLISE.....	77
5.2 RESULTADOS DA ETAPA PRELIMINAR.....	78

5.2.1 Análise da Corrente - Etapa Preliminar.....	79
5.2.2 Análise da Perda de Massa - Etapa Preliminar.....	80
5.3 RESULTADOS DA ETAPA PRINCIPAL.....	84
5.3.1 Análise da Corrente - Etapa Principal.....	84
5.3.2 Análise da Perda de Massa - Etapa Principal.....	95
5.3.3 Análise ANOVA - Etapa Principal.....	107
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>113</b>
6.1 CONCLUSÕES.....	113
6.2 Sugestões para trabalhos futuros .....	115
REFERÊNCIAS.....	117
ANEXO A.....	124
ANEXO B.....	135

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Resto de estrutura encontrada no Forte São João – RJ.....	02
Figura 2: Representação do ciclo básico dos metais.....	09
Figura 3: Efeito da corrosão na superfície do concreto.....	15
Figura 4: Formação de pilha de corrosão em concreto armado.....	17
Figura 5: Esquema ilustrativo de formação de pilhas de ação local. As áreas escuras são anódicas e as claras são catódicas.....	18
Figura 6: Modelo de Vida Útil proposto por Tuuti.....	18
Figura 7: Representação esquemática da corrosão eletroquímica na presença de cloretos.....	24
Figura 8: Avanço do processo de carbonatação.....	32
Figura 9: Representação do Método dos quatro eletrodos para medida de resistividade elétrica.....	44
Figura 10: Ensaio de medida de resistividade.....	44
Figura 11: Posição do fio sobre a barra.....	60
Figura 12: Posição do fio enrolado em meia barra.....	60
Figura 13: Detalhamento da metodologia empregada para posicionamento do fio na barra.....	61
Figura 14: Curva granulométrica do agregado miúdo.....	69
Figura 15: Curva granulométrica do agregado graúdo.....	70
Figura 16: Vista das formas prismáticas, com as barras posicionadas nos espaçadores.....	72
Figura 17: Detalhes do ensaio CAIM em execução.....	74
Figura 18: Rompimento dos corpos-de-prova.....	75
Figura 19: Imersão das barras na solução de limpeza.....	76
Figura 20: Comportamento da corrente individual em função do tempo.....	79
Figura 21: Perdas de massa médias registradas na etapa preliminar.....	81
Figura 22: Comportamento médio da corrente total em função do tempo – CMB; 8h; 15V.....	85
Figura 23: Comportamento médio da corrente total em função do tempo – C; 8h; 15V.....	86
Figura 24: Comportamento médio da corrente total em função do tempo – CMB; 8h; 45V.....	86
Figura 25: Comportamento médio da corrente total em função do tempo – C; 8h; 45V.....	86
Figura 26: Comportamento médio da corrente total em função do tempo – CMB; 8h; 70V.....	87
Figura 27: Comportamento médio da corrente total em função do tempo – C; 8h; 70V.....	87

Figura 28: Comportamento médio da corrente total em função do tempo – CMB; 24h; 15V.....	89
Figura 29: Comportamento médio da corrente total em função do tempo – C; 24h; 15V.....	89
Figura 30: Comportamento médio da corrente total em função do tempo – CMB; 24h; 45V.....	89
Figura 31: Comportamento médio da corrente total em função do tempo – C; 24h; 45V.....	90
Figura 32: Comportamento médio da corrente total em função do tempo – CMB; 24h; 70V.....	90
Figura 33: Comportamento médio da corrente total em função do tempo – C; 24h; 70V.....	90
Figura 34: Comportamento médio da corrente total em função do tempo – CMB; 40h; 15V.....	92
Figura 35: Comportamento médio da corrente total em função do tempo – C; 40h; 15V.....	92
Figura 36: Comportamento médio da corrente total em função do tempo – CMB; 40h; 45V.....	93
Figura 37: Comportamento médio da corrente total em função do tempo – C; 40h; 45V.....	93
Figura 38: Comportamento médio da corrente total em função do tempo – CMB; 40h; 70V.....	93
Figura 39: Comportamento médio da corrente total em função do tempo – C; 40h; 70V.....	94
Figura 40: Perda de massa em relação aos parâmetros em estudo – tempo 8h.....	95
Figura 41: Perda de massa em relação aos parâmetros em estudo – tempo 24h.....	99
Figura 42: Perda de massa em relação aos parâmetros em estudo – tempo 40h.....	103
Figura 43: Análise estatística da relação a/cfunção da perda de massa .....	108
Figura 44: Análise estatística da voltagem do equipamento em função da perda de massa.....	108
Figura 45: Análise estatística do tempo de ensaio em função da perda de massa .....	109
Figura 46: Análise estatística da profundidade de imersão do cp em função da perda de massa.....	109
Figura 47: Análise estatística da interação entre a relação a/c e a voltagem do equipamento em função da perda de massa.....	110
Figura 48: Análise estatística da interação entre a relação a/c e a profundidade de imersão dos cps em função da perda de massa.....	110
Figura 49: Análise estatística da interação entre a voltagem do equipamento e a profundidade de imersão dos cps em função da perda de massa.....	111
Figura 50: Análise estatística da interação entre a relação a/c, o tempo de ensaio e a voltagem do equipamento em função da perda de massa.....	111
Figura 51: Análise estatística da interação entre a relação a/c, profundidade de imersão dos cps e a voltagem do equipamento em função da perda de massa.....	112

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipos de Corrosão.....	10
Tabela 2: Reações mais prováveis durante o processo corrosivo.....	17
Tabela 3: Classificação do grau de agressividade do meio ambiente com base na umidade relativa.....	23
Tabela 4: Classes de agressividade ambiental.....	23
Tabela 5: Valores de teor crítico de cloreto sugeridos por diversos autores.....	31
Tabela 6: Metodologias e métodos de ensaio para avaliação da corrosão em armaduras de concreto armado.....	37
Tabela 7: Características comparativas de diversos métodos para avaliação da durabilidade do concreto armado.....	38
Tabela 8: Interpretação dos resultados do ensaio de resistividade.....	45
Tabela 9: Probabilidade de corrosão através do Ecorr, segundo ASTM C 876.....	48
Tabela 10: Critérios para avaliar os resultados de velocidade de corrosão.....	52
Tabela 11: Descrição das Variáveis Analisadas na Etapa Preliminar.....	64
Tabela 12: Variáveis analisadas na primeira etapa do programa experimental.....	64
Tabela 13: Descrição das variáveis analisadas na etapa principal.....	65
Tabela 14: Variáveis analisadas na segunda etapa do programa experimental.....	66
Tabela 15: Caracterização físico-mecânica e química do cimento utilizado.....	68
Tabela 16: Composição granulométrica do agregado miúdo.....	69
Tabela 17: Composição granulométrica do agregado graúdo.....	70
Tabela 18: Traços dos concretos.....	73
Tabela 19: Abreviações empregadas nas figuras.....	79
Tabela 20: Corpos-de-prova utilizados na etapa preliminar.....	82
Tabela 21: Resultados etapa preliminar.....	83
Tabela 22: Resultados da ANOVA para perda de massa.....	84
Tabela 23: Corpos-de-prova submetidos a 8h de ensaio a 15V.....	96
Tabela 24: Corpos-de-prova submetidos a 8h de ensaio a 45V .....	97
Tabela 25: Corpos-de-prova submetidos a 8h de ensaio a 70V .....	97
Tabela 26: Resultados ensaio de curta duração (8h).....	98
Tabela 27: Corpos-de-prova submetidos a 24h de ensaio a 15V .....	100
Tabela 28: Corpos-de-prova submetidos a 24h de ensaio a 45V .....	101
Tabela 29: Corpos-de-prova submetidos a 24h de ensaio a 70V .....	101
Tabela 30: Resultados ensaio de média duração (24h).....	102
Tabela 31: Corpos-de-prova submetidos a 40h de ensaio a 15V .....	104
Tabela 32: Corpos-de-prova submetidos a 40h de ensaio a 45V .....	105
Tabela 33: Corpos-de-prova submetidos a 40h de ensaio a 70V .....	105
Tabela 34: Resultados ensaio de longa duração (40h).....	106
Tabela 35: Resultados da ANOVA para perda de massa.....	107



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$\mu\text{A}$ : micro Ampere ( $10^{-6}$  Ampere)

$^{\circ}\text{C}$ : graus Celsius

a/c: relação água/cimento

ABCP: Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ACI: American Concrete Institute

ANOVA: Análise de Variância

ASHTO: The American Association of State Highway and Transportation Officials

ASTM: American Society for Testing and Materials

$\text{C}_3\text{A}$ : aluminato tricálcico

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ : hidróxido de cálcio

$\text{CaCl}_2$ : cloreto de cálcio

$\text{CaCO}_3$ : carbonato de cálcio

CEB: Comité Euro-Internacional de Betón

$\text{Cl}^-$ : íon cloro

cm: centímetro

$\text{CO}_2$ : dióxido de carbono ou gás carbônico

$\text{C}_p$  (s): corpo-de-prova (s)

CPV-ARI: cimento Portland de alta resistência inicial

C-S-H: silicato de cálcio hidratado

dm: decímetro

$F_c$ : resistência à compressão axial

$\text{H}_2\text{O}$ : água

LEME: Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais

mg: miligrama

mm: milímetro

MPa: Mega Pascal

$\text{NaCl}$ : cloreto de sódio

NBR: Norma Brasileira Regulamentada

NORIE: Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação

O<sub>2</sub>: oxigênio

pH: potencial de hidrogênio

U.R.: umidade relativa

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

# 1 INTRODUÇÃO

A construção civil vem se deparando com um desafio estabelecido pela contraposição entre os sensíveis avanços tecnológicos, e as considerações sobre impacto ambiental e o incremento das patologias das construções. Enquanto alguns pesquisadores festejam o desenvolvimento de novos e melhores materiais, além de técnicas de execução das estruturas, nos deparamos com uma preocupação social sobre a poluição e para insatisfação de uma parcela dos usuários quanto ao desempenho das edificações.

Inúmeros levantamentos estatísticos foram realizados nos últimos anos. Eles evidenciam a considerável incidência e seriedade dos processos patológicos atuantes sobre as estruturas de concreto (ANDRADE, 1997; ARANHA, 1994). Estes estudos vêm constatando de forma clara que a corrosão de armaduras no concreto é o processo de maior frequência nas construções, sendo também, na maioria dos casos, o que gera os maiores problemas, tanto em termos de custo como de segurança.

Desde os primórdios da história, quando o homem começou a utilizar os minerais extraídos da natureza para a produção de metais, a corrosão é uma importante, e onerosa, causa de deterioração dos mesmos. Os metais compostos de ferro são especialmente sensíveis à corrosão, visto que a exposição ambiental estimula os mesmos a retornar ao seu estado mais estável, energeticamente, que são os vários tipos de óxidos de ferro.

Com a chegada do desenvolvimento industrial, o homem entrou na era do aço, material sobre o qual, em grande parte, está embasada a civilização moderna. Diversos tipos de aço foram desenvolvidos, para atender a inúmeras finalidades, e a melhoria da sua resistência à corrosão tem sido uma preocupação constante.

Infelizmente, os avanços em técnicas de produção e proteção ainda são insuficientes para tornar estes materiais imunes à sua ação deletéria do meio ambiente, como explica DUTRA (1999). No Brasil, a preocupação com o tema se intensificou na expansão da indústria petroquímica, pois o processo de corrosão começou a atingir tanques e tubulações e se tornou um verdadeiro desafio em ambientes agressivos como os prevalentes nas plataformas de exploração marinha.

No caso da construção civil, são necessários investimentos, em alguns casos, para obtenção de uma vida útil condizente com as expectativas dos usuários e da sociedade. A corrosão, ao transformar os materiais, altera suas características e afeta as estruturas civis de modo que sua durabilidade e desempenho deixam de satisfazer aos fins que se destinam. Um exemplo do intenso efeito deletério do fenômeno pode ser visto na Figura 1, que mostra o estado a que foi reduzida uma estrutura de concreto armado exposta a um ambiente favorável à corrosão.



Figura 1: Resto de estrutura encontrada no Forte São João - RJ, em julho de 2005.

Ou seja, a corrosão é um processo espontâneo, que está constantemente ameaçando as estruturas. Por esta razão, a corrosão é tida como um dos fenômenos patológicos mais sérios e de maior repercussão técnico-econômica na área de engenharia civil. Muitos estudos estão voltados para a avaliação de medidas para preveni-la ou mitigá-la. A importância e criticalidade da maioria das obras civis explicam valores consideráveis sejam investidos na prevenção de acidentes, que podem trazer prejuízos materiais de monta ou danos irreparáveis aos usuários.

É interessante notar que o concreto e o aço são dois materiais de construção bastante compatíveis. Apresentam coeficientes de dilatação térmica semelhantes e boa afinidade química. O concreto normalmente fornece às armaduras um alto grau de proteção contra corrosão, ao constituir um meio altamente alcalino em torno do aço. Além disso, os concretos modernos, com reduzida relação água/cimento e bem curados, apresentam permeabilidade muito baixa, o que dificulta o acesso dos agentes agressivos. Todavia, a corrosão pode ser desencadeada quando o concreto se encontra fissurado ou teve sua alcalinidade reduzida, devido à carbonatação do concreto, que reduz o pH da solução contida nos poros do mesmo (HELENE, 1993).

O desencadeamento dos processos corrosivos é, muitas vezes, facilitado pela baixa qualidade do concreto empregado nas edificações. Deficiências nas etapas de dosagem, transporte, adensamento e cura resultam em concretos com elevada porosidade, segregações e ninhos, que se constituem em uma das principais causas facilitadoras do processo de iniciação da corrosão. A adoção de espessuras de cobertura reduzidas, ou o mau posicionamento das armaduras, permite que a frente de carbonatação atinja as armaduras muito cedo, criando as condições para o desenvolvimento do processo corrosivo e aumentando o risco de aparecimento precoce de danos estruturais, o que acarreta um “envelhecimento prematuro” das estruturas, como cita Cabral, 2000.

No momento atual, a realidade do mercado da construção civil exige que se aprofundem os conhecimentos sobre os materiais e que se apliquem soluções eficientes para controle da corrosão. Para tanto, é necessário testar e qualificar estas soluções, sejam elas alterações na composição e geometria do elemento do concreto, películas protetoras aplicadas na superfície do concreto ou do aço ou medidas elétricas passivantes. É necessário coletar dados sobre a validade e eficiência dessas alternativas e seu desempenho relativo, para diferentes concretos, considerando os efeitos de interação.

Infelizmente, as técnicas de ensaio e normas para análise da resistência à corrosão ainda não estão completamente sistematizadas. Diferentes esquemas e condições de ensaio foram propostas e aplicadas nos últimos anos (JADOVSKI et al, 1993;

SELIESTRE et al, 1993 e 1994; MARCHESAN et al, 1997). No LEME, tem sido usado um tipo de ensaio de corrosão acelerado denominado CAIM (*Corrosão Acelerada por Imersão Modificada*). Este tipo de ensaio evoluiu ao longo de duas décadas, a partir de uma concepção inicial proposta por Varela & Espinosa (1988).

O ensaio, utilizado inicialmente por Lima (1990), e depois modificado e aperfeiçoado por Selistre (1993), Marchesan et al (1997) e Kirchheim et al (2005), prevê que um corpo-de-prova de concreto armado seja imerso numa solução de cloretos. A migração dos íons cloreto é estimulada pela aplicação de uma diferença de potencial (ddp) entre a barra e a solução. Os resultados são obtidos em termos de correntes de corrosão e perda de massa da armadura permitindo uma avaliação relativa de materiais ou tratamentos contra a corrosão.

Apesar do ensaio ter sido empregado com êxito em trabalhos anteriores, permanecem ainda algumas incertezas acerca de quais as condições padrão mais adequadas para seu emprego. Por exemplo, em linha com as discussões que cercam o ensaio ASTM C1202, discute-se qual a ddp mais apropriada para estimular a corrosão, permitindo resultados significativos num curto espaço de tempo sem alterar de forma marcante as características do processo. Dúvidas sobre os efeitos de variação do tempo de ensaio, e sobre a sensibilidade do equipamento à forma de conexão da fonte de tensão à barra e ao nível de submersão dos cps também permaneciam.

O presente estudo foi proposto com o objetivo de aprofundar o conhecimento sobre a dinâmica e sensibilidade às condições de ensaio. Tem o intuito de colaborar para aperfeiçoar seu uso e, eventualmente, permitir sua normalização. Ao mesmo tempo, colabora para que se conheça como o processo corrosivo, nas condições de ensaio, responde a variações de estímulo.

Acredita-se que o avanço nesta área permitirá eventualmente consolidar um método de ensaio acelerado comparativo que poderá se constituir numa ferramenta para qualificação de medidas de prevenção e tratamento.

## 1.1 HIPÓTESES DE PESQUISA

As principais hipóteses que nortearam o desenvolvimento dessa pesquisa estão listadas abaixo:

- a) as variações das condições de ensaio afetam os resultados obtidos com aplicação do método de ensaio proposto;
- b) a análise da sensibilidade do ensaio CAIM a diferentes condições de ensaio permitirá definir um conjunto de condições padrão para consolidação da técnica;
- c) a variação de cada condição, em três níveis e, em alguns casos, de forma isolada, é suficiente para que se verifiquem quais as tendências de resposta do ensaio e estas variações.

## 1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos deste trabalho estão listados a seguir:

### 1.2.1 Objetivo Principal

Determinar a resposta do ensaio CAIM a variações de parâmetros considerados importantes para consolidar a técnica de ensaio. Tais como o tempo de aplicação do ensaio, a profundidade de imersão dos corpos-de-prova (cps) na solução aquosa, o posicionamento do fio na barra e a voltagem de indução aplicada;

### 1.2.2 Objetivo Secundário

Como objetivo secundário deste trabalho estabeleceu verificar como corpos-de-prova confeccionados com diferentes relações água/cimento respondem à variação das condições de ensaio.

### 1.3 DELIMITAÇÕES E LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Este trabalho prevê como delimitações e limitações:

- a) Serão investigados concretos fabricados com apenas 1 tipo de cimento, tipo Portland (classificado como CP-V ARI pela NBR 5732). A escolha do tipo de cimento baseou-se no fato de que o mesmo não contém adições pozolanicas;
- b) Fixaram-se apenas três relações água/cimento (0,35, 0,5 e 0,7) para realização dos ensaios, sendo admitido que com estes pontos será possível, com auxílio de ferramentas estatísticas, construir curvas de tendência válidas para este intervalo;
- c) Os métodos de adensamento e as temperaturas e umidades de cura serão constantes para todos os corpos-de-prova ensaiados;
- d) A idade para controle de resistência à compressão foi fixada em 28 dias;
- e) Serão realizados ensaios CAIM, simultaneamente, com no máximo 10 cps, devido à capacidade do equipamento de ensaio disponível;
- f) Estabeleceu-se que o ensaio CAIM seria realizado quando os cps atingissem 21 dias de idade, para reduzir o prazo do experimento e permitir que o trabalho fosse concluído em prazo hábil. Admite-se que cps executados com CP-V ARI, nesta idade, já tenham atingido um grau de hidratação elevado, o que os tornaria razoavelmente representativos do comportamento do concreto em estruturas reais;
- g) O equipamento disponível suporta uma corrente total máxima de 20A. Portanto, foi estabelecido que, quando a soma da corrente de corrosão dos cps ensaiados atingia este limite, a aquisição de dados seria interrompida e os cps desconectados. Mesmo que o tempo de ensaio proposto não fosse atingido. Os cps desconsiderados serão estudados conforme a proposta do experimento em que o mesmo se encontrava.



- h) As variações de tensão aplicadas estarão de acordo com a disponibilidade de ajustes do equipamento;
- i) O revestimento utilizado durante todo o estudo foi de 30 mm, com o auxílio de espaçadores de plástico.

## **1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA**

A presente dissertação foi estruturada em seis capítulos, descritos a seguir:

O primeiro capítulo destinou-se à introdução do assunto e apresentação da justificativa do estudo, além dos objetivos da pesquisa e das limitações e delimitações da mesma.

O segundo capítulo contém uma breve revisão bibliográfica sobre o processo de corrosão, suas principais causas e seus efeitos nas estruturas.

No terceiro capítulo é apresentada uma revisão teórica sobre os principais métodos de ensaio utilizados para avaliação do processo de corrosão, assim como uma descrição completa do ensaio CAIM.

No quarto capítulo é apresentado o programa experimental adotado na pesquisa, com informações sobre a caracterização e seleção dos materiais utilizados, método de dosagem empregado e procedimentos de ensaio adotados.

No quinto capítulo são apresentados os resultados obtidos durante o estudo, juntamente com a análise e discussão dos mesmos.

No sexto e último capítulo são apresentadas as conclusões e sugestões para futuros estudos.

## 2 REVISÃO DO MECANISMO DE CORROSÃO DE ARMADURAS EM CONCRETO ARMADO

### 2.1 CONCEITOS BÁSICOS

O termo corrosão tem um significado amplo, englobando processos físico-químicos, ou até biológicos, de degradação de materiais. É aplicado em diferentes áreas, sofrendo relativização de acordo com a forma como o processo se estabelece, qual o produto final gerado pela reação ou, ainda, qual o material atingido.

Diversos pesquisadores fizeram tentativas de estabelecer ou adaptar uma conceituação para o termo “corrosão”. Helene (1993) a define como *“uma interação destrutiva de um material com o meio ambiente, seja por ação física, química, eletroquímica ou a combinação destas”*. Dutra (1999) prefere definir o termo simplesmente como *“deterioração dos materiais pela ação do meio”*.

Gentil (2003) adota um viés mais específico, admitindo corrosão como *“a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente aliada ou não a esforços mecânicos”*. Esta visão coincide com a de Huerta (1997), que estabelece corrosão como *“a reação química e eletroquímica de um metal e a interação dele com o meio que o envolve e a deterioração de suas propriedades”*. Pourbaix (1987) explica corrosão como *“a destruição de materiais sob a ação química ou eletroquímica do meio circunvizinho”*.

De forma geral, para os fins deste trabalho, pode-se admitir que a corrosão é um *fenômeno de deterioração ambiental, de natureza química, física ou biológica, que atinge materiais metálicos e não-metálicos, alterando suas propriedades ou afetando seu desempenho*. Especificamente, em relação à armadura do concreto armado, pode-se definir corrosão das armaduras como *um processo eletroquímico que tem como resultado a deterioração do aço, causando perda de funcionalidade*.

Com exceção dos metais nobres (assim chamados por serem muito resistentes à oxidação e que, portanto, são encontrados na natureza sob a forma metálica), a condição mais estável de um material metálico é a de um composto oxidado (minério), forma na qual apresenta o mais baixo nível de energia interna. Para se obter um metal, é necessário purificar e adicionar energia ao composto, por intermédio de processos metalúrgicos. Disto resulta um incremento no nível de energia, que coloca o metal em estado de equilíbrio metaestável. Isto explica a grande avides dos metais processados em, sob condições propícias às reações de corrosão, liberar a energia adicional e retornar à sua forma original, mais estável, como indicado na Figura 2. Pode-se, portanto, na maioria dos casos, admitir a corrosão como sendo um processo inverso ao processo metalúrgico de obtenção dos metais (GENTIL, 2003).

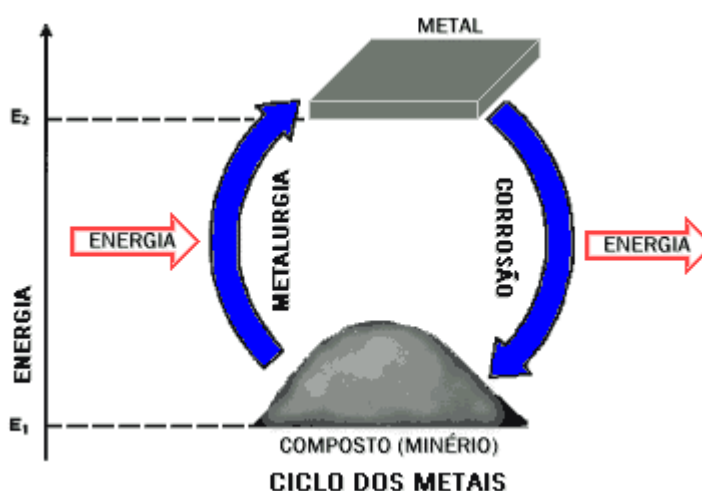


Figura 2 – Representação do ciclo básico dos metais (DUTRA, 1999).

O aço de construção é obtido pela redução térmica do minério de ferro, exigindo um consumo de carbono. O produto final encontra-se, portanto, em um nível energético maior do que a sua matéria-prima, devido ao processo de fabricação. O processo corrosivo nada mais é do que a perda desta energia, com o conseqüente retorno do produto metalúrgico a seu estado inicial de matéria-prima. Isto justifica, termodinamicamente, o caráter espontâneo das reações de corrosão da armadura, como explica Gentil (2003).

Geralmente, o produto da corrosão de um metal é semelhante ao minério do qual ele é extraído. Por exemplo, o óxido de ferro mais comum é a hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). A ferrugem nada mais é do que uma forma de hematita hidratada ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ).




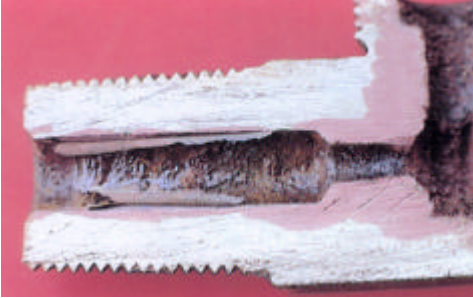
Para que um metal propenso à corrosão seja preservado em um estado de alta energia é necessário impedir que se estabeleçam condições propícias para o desenvolvimento de um processo corrosivo ou, alternativamente, é necessário colocar o metal em equilíbrio estável, pela incorporação contínua de energia, como no caso do método de proteção por impressão de corrente catódica.

Para melhor entender o fenômeno da corrosão a Tabela 1 irá diferenciar alguns dos distintos tipos de corrosão, tendo como base os resultados de uma revisão bibliográfica dos trabalhos de diversos pesquisadores, (DUTRA, 1999; GENTIL, 2003; CASCUDO, 1997; HELENE, 1993; HUERTA, 1997).


Tabela 1 – Tipos de corrosão

TIPO DE CORROSÃO	COMENTÁRIO	FIGURA
<i>Corrosão Galvânica</i>	Resultante de um contato elétrico entre materiais dissimilares na presença de um eletrólito.	 <p>Aspecto da corrosão galvânica em espelho permutador de calor (ABRACO, 2006)</p>
<i>Corrosão em frestas</i>	Locais onde se estabelecem condições de aeração ou concentração diferencial.	 <p>Exemplo de corrosão em frestas de peça de aço inox. (ABRACO, 2006)</p>

<p><i>Corrosão atmosférica</i></p>	<p>Em estruturas aéreas, é influenciado pela disponibilidade de oxigênio, pela umidade relativa do ar e pela presença de gases poluentes, especialmente enxofre.</p>	 <p>Exemplo de corrosão atmosférica (ABRACO, 2006)</p>
<p><i>Corrosão pelo solo</i></p>	<p>Ocorre em estruturas como tubulações, estacas metálicas, cabos de transmissão de energia e de telecomunicações, tanques enterrados, entre outros. Sua intensidade depende do teor de umidade, da composição química e do pH do solo.</p>	 <p>Corrosão pelo solo, tubulação enterrada. (Fonte: ABRACO, 2006)</p>
<p><i>Corrosão pela água</i></p>	<p>Manifesta-se em estruturas diretamente em contato com meios aquosos, tais como estacas de piers, tubulações submersas, embarcações, instalações de água de refrigeração, instalações de geração de vapor e de tratamento e distribuição de água.</p>	 <p>Corrosão em tubulação de água, com presença de tubérculos de óxido de ferro. (GENTIL, 2003)</p>
<p><i>Corrosão por bactérias ou corrosão microbiológica</i></p>	<p>A ocorrência desse tipo de corrosão é encontrada em tubulações enterradas, em feixes de permutadores de calor e tubulações de esgoto. A atuação das bactérias se dá pela modificação do meio, que se torna agressivo por acidificação ou contaminação com espécies químicas.</p>	 <p>Aspecto da corrosão causada pela ação de microorganismos. (GENTIL, 2003)</p>

<i>Corrosão eletrolítica</i>	Caracteriza-se por ser um processo de natureza eletroquímica, que se estabelece como resultado de um fluxo indesejável de corrente contínua ou dispersa no eletrólito. As instalações mais sujeitas a esse tipo de corrosão são os oleodutos, as tubulações de adutoras e os cabos elétricos e de comunicação enterrados.	 <p>Exemplo de corrosão eletrolítica em duto de petróleo (ABRACO, 2006)</p>
<i>Corrosão por compostos de enxofre</i>	Este tipo de corrosão é observado, principalmente, em unidades de processamento químico, petroquímico ou de petróleo, onde o enxofre aparece como impureza ou resíduo. Aparece também nas partes frias de equipamentos onde ocorre condensação dos gases provenientes de combustíveis com alto teor de enxofre	 <p>Exemplo de corrosão causada por compostos de enxofre (GENTIL, 2003)</p>
<i>Corrosão grafítica</i>	Este processo corrosivo ocorre nos ferros fundidos cinzentos, em presença de um eletrólito. Em estruturas antigas, nas quais havia grafite no ferro, o grafite agia como o cátodo da relação,	 <p>Corrosão grafítica em componente de bomba centrífuga (GENTIL, 2003)</p>
<i>Dezincificação</i>	É o processo corrosivo que se observa nas ligas de zinco, especialmente latões, utilizadas em permutadores de calor e outros equipamentos. Neste caso, o zinco é corroído deixando sobre a superfície uma camada porosa de cobre, sem qualquer resistência mecânica.	 <p>Exemplo de corrosão por perda do zinco em tubo de latão (GENTIL, 2003)</p>
<i>Corrosão sob fadiga</i>	A fadiga é um processo de deterioração mecânica dos materiais sujeitos a esforços cíclicos. A presença de um eletrólito intensifica a sua ação. O fenômeno manifesta-se por meio de trincas que se propagam na direção perpendicular aos esforços.	

<p><i>Corrosão sob tensão</i></p>	<p>É um processo de deterioração de materiais metálicos submetidos a tensões estáticas de tração. O efeito da corrosão progride da superfície para o interior do material, perpendicularmente à direção das tensões, podendo provocar a fratura da peça. A falha do material ocorre por meio de trincas, sem qualquer evidência de corrosão superficial</p>	 <p>Exemplo de corrosão sob tensão (GENTIL, 2003)</p>
<p><i>Corrosão estimulada por correntes de fuga</i></p>	<p>Este tipo de corrosão é gerado pela fuga de corrente elétrica contínua, devido a um aterramento elétrico mal executado.</p>	 <p>Exemplo de corrosão por corrente de fuga (GENTIL, 2003)</p>
<p><i>Corrosão por alta temperatura</i></p>	<p>Decorrente da exposição de metais a agentes oxidantes, em altas temperaturas, causando efeitos de oxidação, sulfetação, carbonização, ou outros menos comuns. Ocorre em metais ou ligas aquecidos a partir de um combustível contaminado por enxofre ou em casos de descontrole de chama, com alternância de caráter oxidante e redutor</p>	 <p>Exemplo de corrosão por alta temperatura (ABRACO, 2006)</p>
<p><i>Corrosão por ação de sais fundidos</i></p>	<p>É um tipo de corrosão pela ação de vapores de sais fundidos. Ocorre em instalações de tratamento térmico de metais, onde o aquecimento é feito por sais fundidos.</p>	
<p><i>Corrosão filiforme</i></p>	<p>Ocorre em superfícies pintadas com um delgado filme de tinta-base orgânica. Caracteriza-se pelo aparecimento de finos filamentos em direções semi-aleatórias.</p>	 <p>Corrosão filiforme em chapa de aço-carbono pintada (GENTIL, 2003)</p>

<p><i>Corrosão em concreto</i></p>	<p>A corrosão em concreto é um fenômeno patológico muito comum em construções e decorre da perda da passivação e deterioração da armadura de reforço, que se degrada e pode causar a delaminação do concreto de cobrimento.</p>	 <p>Corrosão em concreto, devido à urina humana (GENTIL, 2003)</p>
------------------------------------	---	---

## 2.2 CORROSÃO DE ARMADURAS DE CONCRETO ARMADO

Como já mencionado, é de extrema importância o processo de corrosão em armaduras de concreto armado. ANDRADE (1997) cita que 64% das manifestações patológicas, no estado de Pernambuco, eram devido à corrosão em armaduras. No estudo realizado na região Amazônica por ARANHA (1994), a corrosão em armaduras é responsável por 42,68% do total das manifestações patológicas encontradas nas diferentes obras inspecionadas.

Segundo DAL MOLIN (1988), a corrosão de armaduras é responsável por 11,89% das fissuras presentes nas edificações do estado do Rio Grande do Sul. O levantamento foi realizado no período de 1977 a 1986 nos mais diversos tipos de edificações. A mesma autora ainda comenta que, em termos de gravidade e implicações na segurança da estrutura, a corrosão em armaduras é responsável por 40%.

A corrosão de armaduras em estruturas de concreto armado tem três conseqüências importantes (ROSENBERG et al, 1989; GONZÁLEZ et al, 1996, CABRAL, 2000):

- a) afeta a própria armadura, provocando uma perda de seção transversal e um decréscimo de sua resistência mecânica além da capacidade de suporte de solicitações;
- b) provoca a formação de óxidos e hidróxidos que incorporam muitas moléculas de água em sua composição, o que gera uma tendência à expansão. Isto provoca o aparecimento de tensões de tração elevadas



na estrutura de poros da matriz cimentícia, o que pode resultar em fissuração (caracteristicamente paralela às barras das armaduras) e, em casos severos, lascamento da camada de cobrimento;

- c) causa perturbações na interface aço/concreto, decorrentes da degradação das camadas externas do aço e acúmulo de óxidos, prejudicando a transferência de tensões entre eles. Tudo isso prejudica a perfeita funcionalidade da estrutura, comprometendo assim sua durabilidade.

O lascamento, ou delaminação, do concreto provoca a perda de estanqueidade e facilita o ingresso de agentes agressivos em direção ao aço, agravando o problema. A percolação dos produtos de corrosão pelas fissuras leva ao aparecimento de manchas de corrosão na superfície, junto às fissuras. Nos casos em que o concreto é muito poroso, os produtos de corrosão podem lixiviar através do mesmo, aparecendo na superfície como manchas, geralmente de cor marrom-avermelhada, conforme pode ser visualizado na Figura 3.



Figura 3 - Efeito da corrosão na superfície do concreto.

### 2.2.1 Processos corrosivos em barras de armadura

Basicamente, dois tipos de processos corrosivos podem ser desencadeados em armaduras de aço. São denominados corrosão eletroquímica e corrosão por oxidação direta.

A corrosão por *oxidação direta* é um tipo de corrosão química, caracterizado pelo estabelecimento de uma reação química direta entre o metal e o agente agressivo,

sem que haja deslocamento de elétrons. Neste caso ocorre uma reação gás-metal, com formação de uma película de óxido de ferro. Esse tipo de corrosão é muito lento à temperatura ambiente e não provoca deterioração substancial das superfícies metálicas, salvo se existirem gases extremamente agressivos na atmosfera. Normalmente os produtos gerados por esse tipo de processo são uniformes, aderentes e podem atuar como uma barreira contra a ação degradante do meio, impedindo o prosseguimento do mesmo e aumentando a resistência da armadura contra a corrosão em meio aquoso (HELENE, 1993).

O outro processo de corrosão nas armaduras é conhecido como *corrosão eletroquímica*. É resultado da formação de pilhas ou células de corrosão, devido à presença de um eletrólito na superfície das barras ou no concreto que as envolve. Esse processo também pode ser responsável pelo ataque que sofrem as armaduras antes de seu emprego, quando ainda estão armazenadas no canteiro de obra. O produto deste tipo de corrosão é heterogêneo, poroso e de baixa aderência. O mesmo é formado por óxidos e hidróxidos de ferro, de coloração avermelhada e pulverulenta, que recebem a denominação de produtos de corrosão. *Este processo é o mais importante e de maior impacto na corrosão em armaduras de concreto armado.*

### **2.2.2 Princípios da corrosão eletroquímica**

O processo de corrosão eletroquímica já foi exaustivamente descrito por vários pesquisadores (YOO et al, 2003; CASCUDO, 2000; HELENE, 1993; ANDRADE, 1992; LIMA, 1990, entre outros) e não se considera necessário abordá-lo em detalhe no presente trabalho. A seguir, será feita apenas uma breve revisão sobre o tema, com o intuito de prover uma base teórica mínima para a discussão dos efeitos registrados neste programa experimental.

No caso de uma armadura no concreto, formam-se zonas anódicas e catódicas alternadas, pela movimentação dos elétrons entre diferentes regiões da armadura, conforme mostrado na Figura 4. Entre as zonas, se estabelece um fluxo de elétrons, que forma a denominada corrente de corrosão. A perda de elétrons na zona

anódica faz com que o material comece a se degradar, com formação dos produtos de corrosão.

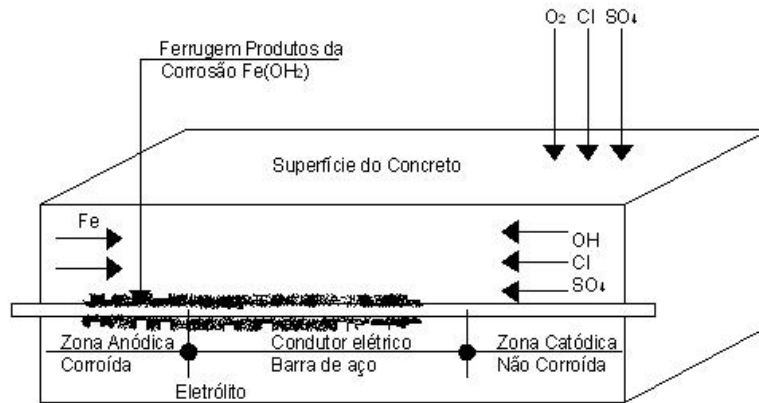


Figura 4 - Formação de pilha de corrosão em concreto armado  
(Fonte: Helene, 1993)

Quimicamente, as reações de corrosão são do tipo REDOX. Ao imergir um metal em uma solução ocorre uma diferença de potencial de natureza eletroquímica entre as fases (sólida e líquida). Esta diferença de potencial provoca a ocorrência de uma reação REDOX, para que o sistema procure o seu equilíbrio. Ou seja, que atinja uma situação de diferença de potencial mínimo, surgindo produtos de corrosão. As reações mais comuns durante o processo corrosivo são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Reações mais prováveis durante o processo corrosivo  
(HELENE, 1993)

REGIÃO	REAÇÃO PROVÁVEL	CARACTERÍSTICA DO PRODUTO FORMADO
Zona anódica	$2\text{Fe} \rightarrow 2\text{Fe}^{2+} + 4\text{e}^-$	-----
Zona catódica	$2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$	-----
Superfície da barra ou eletrólito	$2\text{Fe}^{2+} + 4\text{OH}^- \rightarrow 2\text{Fe}(\text{OH})_2$	Hidróxido ferroso, fracamente solúvel, de cor marrom.
	$2\text{Fe}^{2+} + 4\text{OH}^- \rightarrow 2\text{FeO} \cdot \text{H}_2\text{O}$	Óxido ferroso hidratado, expansivo, de cor marrom.
	$4\text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{Fe}(\text{OH})_3$	Hidróxido férrico, expansivo, avermelhado.
	$3\text{Fe} + 8\text{OH}^- \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 8\text{e}^- + 4\text{H}_2\text{O}$	Óxido de característica mista – férrico e ferroso
	$4\text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{FeO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Óxido férrico hidratado, expansivo.

Segundo Dutra (1999), a formação de pilhas localizadas explica porque uma estrutura de aço, imersa na água do mar, vai sofrer corrosão, mesmo que não esteja ligada a outro material mais nobre. Como mostrado na Figura 5, nesta condição as zonas catódicas e anódicas se alternam no material. As zonas anódicas serão inicialmente consumidas, expondo novas superfícies. Ao longo do processo, as zonas catódicas podem mudar de polaridade, tornando-se suscetíveis à degradação.

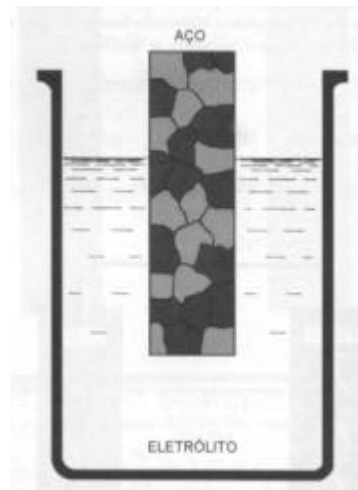


Figura 5: Esquema ilustrativo de formação de pilhas de aço local. As áreas escuras são anódicas e as claras são catódicas (Fonte: Dutra, 1999)

Neste trabalho, a melhor maneira encontrada, de expor o mecanismo da corrosão das armaduras no concreto, foi através do modelo de TUUTTI (1982) que subdivide o processo em iniciação e propagação, conforme Figura 6.

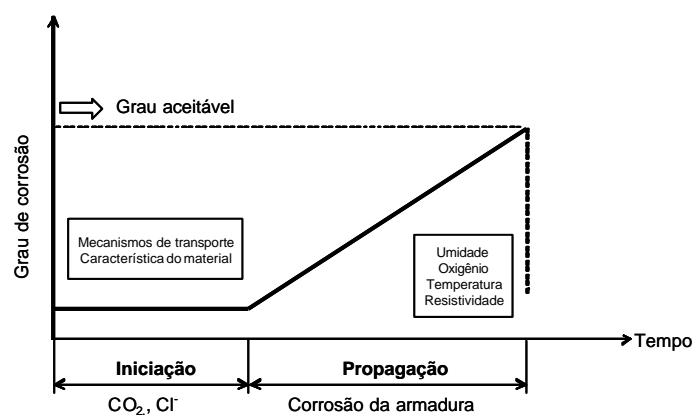


Figura 6: Modelo de vida útil proposto por TUUTTI (1982)

A iniciação abrange o período de tempo que vai desde a etapa de execução da estrutura de concreto armado até a ação do agente agressivo em penetrar no concreto de cobrimento, atingir a armadura e despassivá-la. A despassivação pode ocorrer por duas condições, a primeira pela presença de uma quantidade suficiente de cloretos, com origem no meio externo e atinge a armadura por difusão ou já estavam incorporados no concreto devido à água de amassamento ou agregados contaminados ou uso de aditivos aceleradores de pega e endurecimento a base de cloretos. A segunda forma de despassivação é pela redução da alcalinidade do concreto, geralmente em consequência de reações de carbonatação ou pela penetração de substâncias ácidas no concreto. Ou seja, esta etapa de iniciação está totalmente relacionada ao concreto que "protege" a armadura, estas questões serão discutidas no próximo item.

A etapa de propagação consiste no desenvolvimento do processo corrosivo até o nível de um grau aceitável do mesmo. Como é de amplo conhecimento, a corrosão eletroquímica só ocorre quando existir um eletrólito houver disponibilidade de oxigênio e for estabelecida uma diferença de potencial entre dois metais ou entre dois pontos de um mesmo metal, podendo haver presença ou não de agentes agressivos.

O *eletrólito*, formado pela solução dos poros do concreto podendo conter íons agressivos originários do meio externo, é fundamental para que se estabeleça o processo de corrosão eletroquímica, uma vez que, em todo o processo eletroquímico há o movimento de elétrons de regiões anódicas para catódicas da armadura, como já discutido anteriormente.

O potencial do eletrodo é definido como a *diferença de potencial* (ddp) entre o metal e uma solução (eletrólito) através de uma dupla camada elétrica (PAGE, 1988), esta definida como o arranjo de partículas carregadas e /ou dipolos orientados existentes em qualquer interface material/meio aquoso (WOLYNEC, 1987). A ddp pode ter origem nos mais diversos eventos, como solicitações mecânicas, diferenças de composição química, aeração diferencial, qualidade do concreto, concentração salina, entre outras.

O *oxigênio* é essencial fundamental para que as reações REDOX aconteçam. O interessante é que ele pode tanto acelerar o processo, na presença de hidrogênio, quanto atuar como um retardador, quando aplicado diretamente sobre a superfície do metal. Segundo Comitê 222 do ACI (1991) a taxa de corrosão do aço será baixa se o concreto for continuamente saturado em água; isto pela maior dificuldade de difusão de oxigênio nestas condições. Neste caso diz-se que todo o processo eletroquímico de corrosão do aço é controlado pelo acesso de oxigênio dissolvido no eletrólito às regiões catódicas (FELIU, 1988)

A presença de *agentes agressivos* do tipo sulfetos, cloretos, dióxido de carbono, nitritos, gás sulfídrico, cátion amônio, óxidos de enxofre e fuligem, entre outros, pode favorecer o desenvolvimento de processos corrosivos, ao aumentar a eficiência do eletrólito, reduzir o pH ou atacar a camada passivadora de óxidos que normalmente existe em torno da armadura.

## 2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM A CORROSÃO DAS ARMADURAS

Existem muitos fatores que influenciam no processo de corrosão das armaduras, dentre eles podemos citar o concreto utilizado (espessura de cobrimento, resistência à compressão do concreto, relação água/cimento, cura do concreto), o tipo do aço e as características do meio ambiente no qual se insere o elemento de concreto armado.

### 2.3.1 Concreto

Como já foi discutido, o concreto tem um papel muito relevante na passivação das armaduras. Além disto, o mesmo exerce uma importante função de proteção mecânica.

Pode-se admitir que a qualidade do concreto estará diretamente relacionada com as diretrizes de projeto, com os materiais utilizados e com as características de fabricação, tais como o tipo de cimento, relação água/cimento, espessura de cobrimento, tipo de adensamento e cura, dentre outros.

Algumas propriedades do concreto interferem diretamente na ocorrência ou não do processo de corrosão, dentre elas:

- a) *permeabilidade* - propriedade que está relacionada a granulometria dos agregados, tipo de cimento e à relação água/cimento. Quanto maior a permeabilidade de um concreto, maior a possibilidade de ingresso de fluidos e de agentes agressivos (gases e íons), o que pode estimular o desenvolvimento de processos de corrosão das armaduras;
- b) *pH do concreto* – alcalinidade dos poros do concreto está entre  $12 < \text{pH} < 13$  (YOO et al, 2003) formando uma camada protetora ou filme passivo nas armaduras;
- c) *cobrimento* – a camada superficial de concreto, que envolve a barra, é a principal responsável pela proteção à armadura. O controle da espessura de cobrimento e a adoção de procedimentos construtivos que garantam uma boa qualidade e compacidade a este concreto de cobrimento é, portanto, uma medida fundamental para assegurar maior durabilidade e reduzir risco de desenvolver o processo de corrosão das armaduras;
- d) *resistividade* - propriedade relacionada à atividade iônica do eletrólito. Quanto maior a atividade iônica, menor a resistividade elétrica do eletrólito e maior a probabilidade de ocorrer a corrosão. A resistividade é influenciada pela proporção e tipo dos materiais da mistura, pela umidade relativa do ambiente no qual o concreto está inserido, pelo grau de hidratação da pasta de cimento e pela presença de sais dissolvidos na fase aquosa do concreto.
- e) *O efeito passivante do concreto* - Segundo Neville (1997), a camada protetora de passivação seria formada logo após o início da hidratação do cimento, e seria constituída principalmente de um tipo de óxido de ferro ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ), que ficaria firmemente aderido ao aço. Enquanto essa película de óxido estiver presente, o aço permanece intacto. Agentes agressores ou alterações no equilíbrio do meio, todavia, podem destruir

a película, desencadeando o processo corrosivo. A principal alteração que ameaça a camada passivadora consiste na perda de alcalinidade do concreto que envolve a armadura.

### 2.3.2 Meio Ambiente

Este item é de fundamental importância em todos os aspectos relacionados à durabilidade, e a nova norma de Projeto e Execução de Estruturas de Concreto - NBR 6118 (ABNT, 2003) foi modificada recentemente para possibilitar a sua inserção. O tipo de meio ambiente no qual as estruturas estão inseridas é fator determinante da tendência à corrosão.

É comum que se procure classificar os ambientes em razão de sua agressividade. Em seu trabalho, Wexler (1976) propunha a seguinte classificação:

- a) Rural, caracterizada por uma região ao ar livre, com baixos teores de poluentes e, conseqüentemente, baixa agressividade às estruturas;
- b) Urbana, localizada em centros populacionais, contém impurezas como óxidos de enxofre, fuligem ácida e agentes agressivos;
- c) Marinha, região localizada próxima ao mar e sua agressividade se deve à umidade relativa do ar e aos sais dissolvidos;
- d) Industrial, região localizada ao ar livre e próxima a zonas industriais, contaminadas com partículas em suspensão e gases;
- e) Viciada, região fechada, com baixa taxa de renovação de ar, ocorrendo intensificação da concentração dos agentes agressivos.

Já Helene (1993) propôs a classificação mostrada na Tabela 3. A combinação de diversas classificações nacionais e internacionais serviu de base para a definição da Tabela 4, cujo conteúdo foi incorporado na nova NBR 6118 (2003).



Tabela 3: Classificação do grau de agressividade do meio ambiente com base na umidade relativa

<b>UMIDADE RELATIVA</b>	<b>Carbonatação</b>	<b>Ataque químico</b>	<b>Penetração de cloretos</b>	<b>Corrosão das armaduras</b>	
				<b>Concreto carbonatado</b>	<b>Concreto com cloretos</b>
<i>Muito Baixa</i> £ 45%	Risco leve	Risco insignificante	Risco insignificante	Risco insignificante	Risco insignificante
<i>Baixa</i> 45 a 65%	Alto risco	Risco insignificante	Risco leve	Risco leve	Risco leve
<i>Média</i> 65 a 85%	Risco médio	Risco insignificante	Risco leve	Alto risco	Alto risco
<i>Alta</i> 85 a 98%	Risco leve	Risco leve	Risco médio	Risco médio	Alto risco
<i>Saturada</i> <sup>3</sup> 98%	Risco insignificante	Alto risco	Alto risco	Risco leve	Risco leve

(fonte: CEB, 1992, modificado por HELENE, 1993)

Tabela 4: Classes de agressividade ambiental

<b>CLASSE DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL</b>	<b>Agressividade</b>	<b>Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto</b>	<b>Risco de deterioração da estrutura</b>
<i>I</i>	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
<i>II</i>	Moderada	Urbana	Pequeno
<i>III</i>	Forte	Marinha	Grande
		Industrial	
<i>IV</i>	Muito forte	Industrial	Elevado
		Respingos de maré	

(fonte: NBR 6118, 2003)

### 2.3.3 Presença de íons cloreto

Os cloretos são grandes responsáveis pelo estabelecimento de processos corrosivos, pois atuam como despassivadores e ativadores da corrosão em armaduras de concreto armado. A Figura 7 ilustra o processo de penetração de íons cloreto.

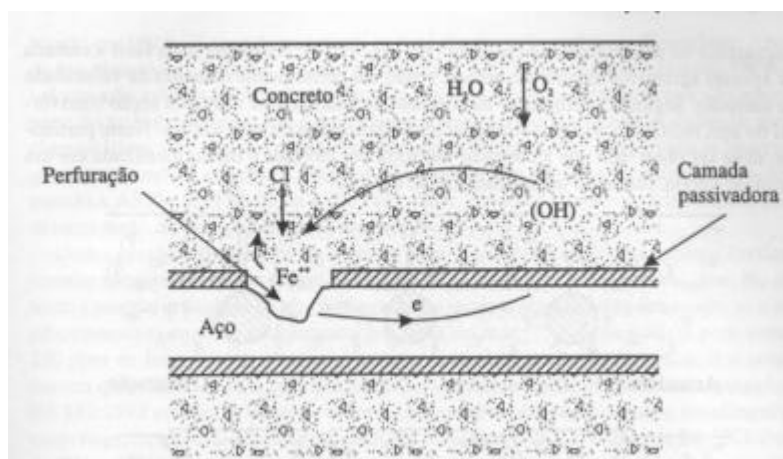


Figura 7: Representação esquemática da corrosão eletroquímica na presença de cloretos, segundo Neville (1997).

Existem três teorias que tentam explicar o efeito dos cloretos sobre a corrosão do aço imerso no concreto (ACI Committee 222).

- a) *Teoria do filme óxido* – segundo esta teoria, os íons cloretos conseguem penetrar através dos poros e defeitos do filme óxido passivante muito mais facilmente que os outros agentes agressivos em função do seu pequeno raio atômico, e conseguem dispersar coloidalmente este filme, facilitando a penetração de outros íons.
- b) *Teoria da adsorção* - esta teoria diz que os íons cloreto são adsorvidos na superfície do metal em competição com oxigênio dissolvido e com íons hidroxila. Os íons cloreto promovem a hidratação do metal, facilitando assim, a sua dissolução em íons.
- c) *Teoria do complexo transitório* – de acordo com esta teoria, os íons cloretos competem com as hidroxilas pelos íons de ferro produzidos no processo de corrosão, para a formação de compostos de corrosão solúveis, denominados compostos transitórios. No concreto adjacente à

área anódica, a concentração de cátions de ferro aumenta. Isto é, o pH cai enquanto a produção de íons hidroxila ocorre na vizinhança das áreas catódicas do aço. Devido à queda local do pH no ânodo, um complexo solúvel de cloretos e ferro é formado. Estes complexos difundem-se a partir do ânodo para outras regiões, permitindo que a corrosão continue.

Os íons cloreto no concreto podem ser incorporados a ele durante a produção ou podem ingressar quando o mesmo já está endurecido. Durante a produção, os íons cloreto podem ser incorporados pelo uso indevido de agregados contaminados, aditivos aceleradores de pega com cloretos, alguns aditivos redutores de água ou plastificantes ou pelo emprego de água de amassamento contaminada. A incorporação após o endurecimento ocorre em estruturas expostas a águas ou ventos contaminados com cloretos, tais como água do mar, atmosferas marinhas, extratos de lavagem de pisos e fachadas com ácido muriático, sais de degelo e efluentes de processos industriais (etapa de branqueamento de indústrias de celulose e papel, por exemplo).

Os cloretos do ambiente podem penetrar no concreto através de mecanismos clássicos de penetração de água e transportes de íons. Os cloretos com maior potencial de agressão estão na forma dissolvida em água. Como sólido, na forma de cristal, não é potencialmente agressivo, porque não difunde para o interior do concreto, a menos que, por ser higroscópico, absorva umidade ambiente, em solução, possa difundir para o interior do concreto. Quando depositado na superfície do concreto, pela chuva ou por absorção capilar, difusão, permeabilidade ou migração de íons, por ação de um campo elétrico, penetra no concreto, criando a chamada “frente de cloreto” em analogia à “frente de carbonatação”, cuja concentração varia da superfície para o interior do concreto.

Os cloretos podem ser encontrados nos concretos de duas formas: como cloretos livres (solúvel ou dissociável), ou como cloretos combinados, formando parte das fases hidratadas do cimento. O primeiro trata-se do cloreto realmente agressivo à armadura desde que continue a penetração de cloretos pelo concreto de cobrimento, segundo Martín-Pérez et al (2000).

A soma dos cloretos livres e o combinado é denominado cloreto total. Embora o cloreto solúvel em água seja o que pode provocar a corrosão, é conveniente determinar os cloretos totais, pois parte dos combinados podem vir a ficar disponíveis para reações deletérias devido a fenômenos tais como carbonatação do concreto ou elevação de temperatura (PEREIRA e CINCOTTO, 2001).

Ao contrário do que se imagina, somente a presença de cloretos não é suficiente para iniciar processo de corrosão do aço no estado passivo. Para que a corrosão se inicie, é necessário também a presença de oxigênio, que penetra através de fissuras ou através da porosidade do concreto. O processo inicia-se, geralmente, como resultado de uma gradual acidificação localizada devido à ação dos íons cloretos, que progride até que a camada passivante é destruída (GONZÁLEZ et al, 1996a).

Figueiredo et al (1993) argumenta que o mecanismo de penetração dos íons cloreto através do concreto depende de uma série de fatores relacionados com o tipo de cátion associado aos cloretos, o tipo de acesso do cloreto ao concreto (se antes ou depois de endurecido), presença de outro ânion como sulfato, o tipo de cimento empregado na produção do concreto, a relação água/cimento, o estado de carbonatação do concreto, as condições de produção e cura, a umidade ambiental (que influencia a condição de saturação dos poros) e quantidade de cloretos ambientais.

Os principais fatores determinantes da velocidade e profundidade de penetração de íons cloreto são:

- a) *Cimento utilizado na fabricação do concreto:* a reação de  $C_3A$  (aluminato tricálcio) e  $C_4AF$  (aluminoferro tetracálcio) do cimento, quando possuir os dois componentes, determina a capacidade de combinação com os íons cloreto. Cimentos com baixas quantidades de aluminato tricálcio possuem pouca capacidade de imobilizar os íons cloreto, através da formação de um sal complexo insolúvel, cloroaluminato de cálcio hidratado (Sal de Friedel), que reduz a concentração de íons cloreto livres na solução aquosa dos poros do concreto (PAGE et al, 1986). Estudos vêm demonstrando cimentos

com adições (microssílica, escória e cinza volante) retardam o incremento da corrosão, porém ainda estão totalmente relacionados às características físicas do concreto (porosidade, resistividade) do que as características químicas do mesmo (DOTTO et al, 2004 e AHMAD, 2003)

- b) *Relação água/cimento, adensamento e cura*: a relação água/cimento tem interferência direta na porosidade do concreto e assim a facilidade de entrada de íons cloreto, revelando que quanto maior a relação a/c, menor porosidade e conseqüentemente menor a possibilidade de entrada de agentes agressivos. Tanto o adensamento quanto a cura possuem um efeito sobre as propriedades de transporte de pastas de cimento endurecidas e, por conseguinte, sobre a difusibilidade efetiva dos íons cloreto. Já é de conhecimento do meio científico que as condições de cura podem modificar a estrutura dos poros da pasta e assim alterarem a porosidade final do concreto.
- c) *Grau de saturação dos poros e concentração de íons cloreto*: o transporte dos íons cloreto ocorre em presença de água. Nas situações onde a água que contém os cloretos se encontra estagnada, a penetração ao interior do concreto ocorre através de mecanismos de difusão, ou também por sucção capilar da água que os contém, quando ocorrem ciclos de umedecimento e secagem. Com o aumento da quantidade de cloretos nos poros do concreto, a possibilidade de secagem do mesmo é diminuída pelo efeito higroscópico característico dos sais. Lopez e González (1993) associaram a saturação dos poros de corpos-de-prova de argamassa com a resistividade e velocidade de corrosão e concluindo que um valor crítico de saturação corresponde a uma resistividade baixa, na qual a velocidade de corrosão começa a se tornar inaceitável e oferece problemas relevantes de durabilidade.
- d) *Fissuras*: a primeira região atingida pelos íons cloretos é a que contém fissuras, o que cria pequenas regiões anódicas no interior das fissuras e regiões catódicas maiores fora delas. A velocidade em que a corrosão se desenvolve depende da abertura da fissura, da qualidade

do concreto e da relação área catódica/anódica. Portanto quanto maior a quantidade de fissuras de estruturas, maior será a possibilidade de entrada de agentes agressivos e assim a formação do processo de corrosão das armaduras.

- e) *Carbonatação*: de acordo com Figueiredo et al (1993) as estruturas de concreto armado que possuem simultaneamente efeitos de carbonatação e íons cloretos possuem um acelerado processo de corrosão quando comparadas com a ocorrência dos dois ataques de forma independente.

Diversas partes da estrutura podem sofrer ciclos diferentes de umedecimento e secagem, isto por que as durações destes ciclos podem variar de um local para outro, dependendo do movimento do mar e do vento, da exposição ao sol e do uso da estrutura. Em climas quentes de regiões litorâneas o ingresso do cloreto é progressivo em concretos ora expostos à névoa ou água do mar, ora seco. O concreto seco vai sendo embebido por água do mar ou água de chuva salinizada, por absorção, podendo culminar na sua saturação. Quando as condições externas são mais secas, o movimento da água inverte-se e a umidade evapora pelos poros capilares superficiais do concreto, porém, permanecem os sais cristalizados nos poros do concreto. A partir deste momento, os sais se deslocam para as partes menos salinizadas, ou seja, para o interior da estrutura. As regiões mais externas continuam com ciclos de secagem e molhagem, permitindo o aumento da concentração de sais no interior, tornando essa parte da estrutura nunca seca totalmente (NEVILLE, 1997).

A absorção capilar depende do diâmetro dos capilares do concreto que, por sua vez, são variáveis no tempo, em função do grau de hidratação do cimento, da composição química desse cimento, de eventuais adições e da relação água/cimento.

A penetração de cloreto por difusão expressa pelo coeficiente de difusão, depende da dimensão e da distribuição dos poros, e da capacidade de retenção do cloreto, que está relacionada diretamente com a composição e adições do cimento. Por

exemplo, adições de sílica ativa podem reduzir a difusividade dos íons cloreto nos poros de concreto (HELENE, 1993).

Diferentes normas e recomendações, de vários países, fornecem valores orientativos para a concentração limite, acima da qual o cloreto passa a originar a corrosão:

- a) O British Research Establishment considera que um baixo risco de corrosão pode ser associado a um valor limite de cloreto total (em função da massa de cimento) igual a 0,4%, sendo um risco intermediário associado a teores entre 0,4% e 1% e um alto risco quando o teor supera 1% (BRE, 1982);
- b) O Comitê Técnico 222, *Corrosion of metals in concrete*, do American Concrete Institute - ACI admite uma concentração total (em relação à massa de cimento) de 0,15%;
- c) A norma britânica - BS 8110, *Structural use on concrete*,; Part 1 (BSI, 1985) - estabelece um teor de 0,4% de cloreto (em relação à massa de cimento) para estruturas de concreto armado e 0,1% para concreto protendido;
- d) A norma brasileira - NBR 6118, *Projeto e Execução de obras de concreto Armado - Procedimento*, (ABNT, 2003) - não faz classificação de faixas limite e apenas menciona, no item 6.3.3, "Mecanismos preponderantes de deterioração relativos à armadura" no item b "despassivação por elevado teor de íon cloro (cloreto)".
- e) O Comitê Euro-Internacional do Concreto (CEB), no seu boletim 152, *Durability of Concrete Structures*, (CEB, 1992), não define um valor fixo para o teor crítico de cloretos, admitindo que o mesmo é dependente da qualidade do concreto e da umidade relativa do meio ambiente onde a estrutura está inserida. Se o concreto não estiver carbonatado, um teor de 0,05% de cloretos em relação à massa do concreto, ou de 0,4% de cloretos em relação à massa de cimento (para um conteúdo de cimento de referência de 300 kg/m<sup>3</sup>), são considerados como limites adequados para determinar se vão ocorrer danos devido à corrosão.

Valores de teores de cloretos críticos adotados por diversos autores são sumarizados nos trabalhos Glass & Buenfeld (1997), e se encontram compilados na Tabela 5. Nestes trabalhos o início da corrosão foi identificado por uma alta significativa da corrente galvânica ou polarização e que possibilitasse a leitura da mesma. Também foi identificado com métodos de resistência a polarização, impedância eletroquímica e potencial de corrosão. Nos casos que o aumento da corrosão foi insignificante a análise foi realizada pelo método visual associado a dados obtidos de estruturas de concreto armado que apresentaram teores de cloretos. As várias técnicas utilizadas para realização deste trabalho, justificam a variação de valores obtidos, porém não inviabilizam a sua aceitação por serem técnicas muito utilizadas e difundidas no meio acadêmico.

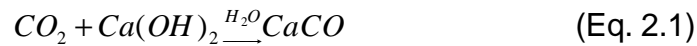


Tabela 5: Valores de teor crítico de cloreto sugeridos por diversos autores (GLASS and BUENFELD, 1997)

REFERÊNCIA	Condição de exposição	Amostra	Valores ou intervalos		
			Cloretos totais (% massa cim.)	Cloretos livres (% massa cim.)	Cl/OH
<i>Stratful et all, 1975</i>	Ao ar livre	Estrutura	0,17-1,4		
<i>Vassi, 1984</i>	Ao ar livre	Estrutura	0,2-1,5		
<i>M. Thomas, 1996</i>	Ao ar livre	Concreto	0,5-0,7		
<i>Elsener e Böhni, 1986</i>	laboratório	Argamassa	0,25-0,5		
<i>Henriksen, 1993</i>	Ao ar livre	Estrutura	0,3-0,7		
<i>Treadway et alli,23</i>	Ao ar livre	Concreto	0,32-1,9		
	laboratório	Pasta	0,4		0,22
<i>Page et alli, 1986</i>	Ao ar livre	Concreto			3,0
<i>Hanson e Sorensen, 1990</i>	laboratório	Argamassa	0,4-1,6		
<i>Schiessl e Raupach, 1990</i>	laboratório	Concreto	0,5-2		
<i>Thomas et alli, 1990</i>	Ao ar livre	Concreto	0,5		
<i>Tutti, 1993</i>	laboratório	Concreto	0,5-1,4		
<i>Locke e Siman, 1980</i>	laboratório	Concreto	0,6		
<i>Labert et alli, 1991</i>	laboratório	Concreto	1,6-2,5		3-20
<i>Lukas, 1985</i>	Ao ar livre	Estrutura	1,8-2,2		
<i>Pettersson, 1993</i>	Laboratório	Pasta/arg.			2,5-6
<i>Goni e Andrade, 1990</i>	Laboratório	Solução			0,26-0,8
<i>Diamond, 1986</i>	Laboratório	Pasta/solução			0,3
<i>Hausmann, 1967</i>	Laboratório	Solução			0,6
<i>Yonezawa et alli, 1988</i>	Laboratório	Arg./solução			1-40

### 2.3.4 Carbonatação

A carbonatação é um processo químico de neutralização do concreto (redução do pH), decorrente da reação entre o hidróxido de cálcio, liberado na hidratação do cimento, e o dióxido de carbono do ar, como mostrado a seguir:



Deste processo resulta a formação de carbonato de cálcio, que se deposita nos poros do concreto, como indicado na Figura 7.

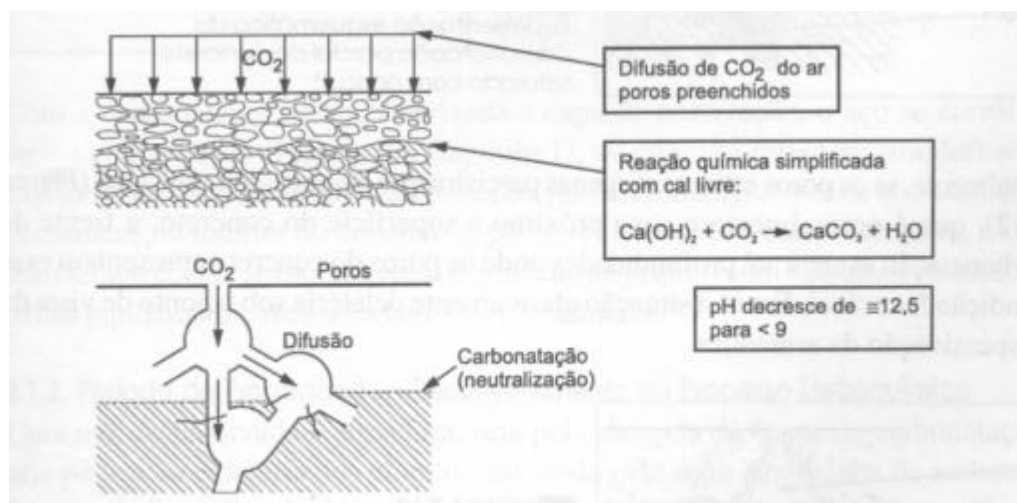
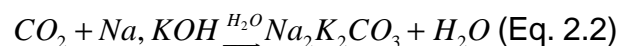


Figura 8: Avanço do processo de carbonatação (Fonte: CEB 152, 1984).

Uma reação similar pode ocorrer entre o dióxido de carbono e hidróxidos de sódio e potássio, como mostrado na equação 2.2.



As equações 2.1 e 2.2 são simplificações de um processo que ocorre em várias etapas envolvendo diversas reações secundárias (CASCUDO, 1997). O balanço químico das reações de carbonatação, mostradas nas equações 2.1 e 2.2, acarreta a neutralização dos hidróxidos, com impacto sobre a possibilidade de liberação de hidroxilas. Por esta razão, este tipo de reação reduz o pH da pasta de concreto, que pode chegar a níveis que deixam de garantir a passivação das armaduras.

Ou seja, a carbonatação acarreta uma redução generalizada do pH para valores menores que 10,5, ocasionando a suscetibilidade das armaduras no que tange à corrosão das armaduras (CUNHA, 2001).

Normalmente a concentração entre álcalis contidos na pasta hidratada e o CO<sub>2</sub> presente na atmosfera, em concentração que varia entre 0,03 e 0,05% em atmosferas rurais e de 0,1 a 1,2% em locais de tráfego pesado. Já em ambientes que possuem atmosferas viciadas, como silos de certos materiais a granel, a concentração de CO<sub>2</sub> pode atingir até 1,8%.

A carbonatação avança progressivamente a partir da superfície para o interior do concreto. Forma-se, portanto, uma “frente de carbonatação”, geralmente expressa em mm ou em cm, que separa duas zonas de pH. É importante ressaltar que o valor de profundidade de carbonatação deve ser tratado como um valor médio, pois a profundidade carbonatada nem sempre é uniforme em concretos contendo agregados graúdos, com dimensão máxima característica acima de 19mm (HELENE, 1993).

Os principais fatores que influenciam a taxa de carbonatação são: *umidade relativa do ambiente, tipo e quantidade de cimento* em estudos de autores como Neville (1982) e Kulakowski (2002), *relação a/c* com Ahmad (2003), *concentração de CO<sub>2</sub>, pH, O<sub>2</sub>, matéria-prima do aço, fluência e temperatura* de acordo com López et al (2003).

Neste trabalho, não se achou necessário ter um estado mais aprofundado sobre o efeito da carbonatação pelo fato do programa experimental, desta dissertação, ser baseado em corrosão de armadura por ataque de íons cloretos. Porém sabe-se que as estruturas de concreto armado, quando sujeitas à corrosão de armaduras por ação da carbonatação têm sua vida útil reduzida, com conseqüências graves na estabilidade global, na segurança, na estética e no crescimento significativo dos custos de manutenção.

## 3 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE CORROSÃO

### 3.1 INTRODUÇÃO

No capítulo anterior se discutiu a importância do estudo e controle dos processos corrosivos, especialmente em estruturas de concreto armado. Para planejar como prevenir ou mitigar a corrosão é fundamental que se possa avaliar a resistência ao desencadeamento deste fenômeno patológico, de diferentes tipos de concreto e barras de aço, assim como medir a eficiência de diferentes tratamentos de proteção físicos e químicos.

Distintas formas de medir a resistência à corrosão de materiais diversos vem sendo estudadas, há muito tempo, por diversos pesquisadores. Várias técnicas foram propostas e aplicadas, sendo algumas até mesmo normalizadas em alguns países, citadas ao longo do trabalho (ASTM T 277-83, ASTM C 876 e ASTM C 1202)<sup>1</sup>. Nenhuma técnica, todavia, se estabeleceu, até agora, como um paradigma de referência para a realização deste tipo de ensaio.

Pode-se dizer que, no momento atual, ainda é válida a observação de Helene (1993), de que os métodos e metodologias disponíveis estão dispersos na literatura, parecendo não haver ainda um consenso sobre quais são os mais adequados, úteis e confiáveis ao estudo da corrosão das armaduras no concreto armado. Na ausência de normas específicas para a realização de ensaios de resistência à corrosão, foram desenvolvidos métodos de avaliações, qualitativas e quantitativas, com diferentes

---

<sup>1</sup> Na pesquisa Bibliográfica realizada para este trabalho, não foram encontradas Normas Brasileiras sobre Técnicas de ensaio, somente sobre tópicos de corrosão, tais como: Classificação de meios corrosivos (NBR 6181, 1986); Determinação de cloretos na atmosfera pelo método da vela úmida (NBR 6111, 2001), Corrosão atmosférica - Classificação da corrosividade de atmosferas (NBR 14643, 2001), Corrosão atmosférica - Taxa de sulfatação - Determinação pelo método da vela de dióxido de chumbo (NBR 6921, 2002), Corrosão atmosférica - Determinação do tempo de superfície úmida em superfícies metálicas expostas à atmosfera (NBR 15085, 2004).

condições de aceleração e tempos de ensaio variáveis. Uma análise sumária da miríade de métodos aplicados permite identificar técnicas de diferentes níveis de complexidade, que se baseiam em premissas distintas e adotam uma série de variáveis de controle.

Pode-se admitir que esta variedade de abordagens seja, em parte, resultado do fato de que o fenômeno de corrosão envolve reações físico-químicas de elevada complexidade, caracterizando um processo bastante dinâmico, que é afetado por um grande número de variáveis de difícil controle, até mesmo a nível laboratorial, como a temperatura, a umidade relativa, o teor de poluentes, a umidade de equilíbrio do concreto, o histórico de exposição, a presença de heterogeneidades, a composição dos agentes agressivos, entre tantas outras, já discutidas.

O problema é que a adoção de múltiplas técnicas impede a comparação dos resultados obtidos, e dificulta a análise de sua reprodutibilidade e confiabilidade. A maioria das técnicas tem aplicação restrita e não foi adequadamente escrutinada, para verificar qual a sua resposta a diferentes condições de ensaio e sensibilidade à variação das características dos corpos de prova ensaiados.

É interessante notar que a imensa maioria dos ensaios tem caráter acelerado. Este fato deve-se ao longo tempo necessário para que o fenômeno de corrosão, na estrutura real, ocorra.

O fato de poder utilizar ensaios acelerados, apesar de ganhar no fator tempo, entra em controvérsia com a realidade que sofre as estruturas de concreto armado, pois ao mesmo tempo em que buscamos um ensaio que permita avaliar, com eficiência, este fenômeno, o mesmo deve permitir comparar os resultados com o tempo real da estrutura.

A necessidade de acelerar o processo de corrosão estimulou pesquisadores a desenvolverem técnicas como o uso de câmaras de carbonatação, ciclos de molhagem e secagem, câmaras de névoa salina, ciclos de imersão em solução de cloreto de sódio (NaCl) ou cloreto de cálcio (CaCl<sub>2</sub>), com ou sem secagem.

De acordo com Helene (1993), o processo de corrosão das armaduras no concreto armado está dividido em duas etapas. A primeira, denominada de iniciação, ligada à situação termodinâmica do processo, ou seja, ocorrência ou não de condições necessárias para que o processo de corrosão ocorra, em geral ligado à qualidade do concreto de cobertura e à agressividade do ambiente. A segunda, chamada de propagação, está associada à cinética do processo, ou seja, a existência de condições que acelerem ou inibam as reações que alteram a velocidade ou taxa de corrosão. A Tabela 6 mostra essas diferentes verificações que podem ser efetuadas, com o intuito de observar a possibilidade de desencadeamento e rapidez de desenvolvimento da corrosão.

Verifica-se que, durante o período de iniciação, as naturezas dos ensaios está relacionada à medição de variáveis ligadas às características dos metais e, principalmente, do meio circundante. A questão é determinar quando a situação termodinâmica favorecerá a despassivação (expressa pela destruição do filme passivante) da armadura.

Já no período de propagação, os ensaios se voltam para a determinação da disponibilidade de elementos que são indispensáveis para (oxigênio) ou estimulam (cloretos, teor de sais solúveis no eletrodo) a continuação do processo. Além disto, nesta fase, são aplicados ensaios para avaliar a dinâmica do processo, tais como a medição da corrente, da impedância e dos ruídos eletroquímicos.

Tabela 6: Metodologias e métodos de ensaio para avaliação da corrosão em armaduras de concreto armado (Helene, 1993)

<b>ESTÁGIO DA CORROSÃO</b>	<b>INICIAÇÃO</b>	<b>PROPAGAÇÃO</b>
<b>FENÔMENO</b>	<b>TERMODINÂMICA DA CORROSÃO</b>	<b>CINÉTICA DE CORROSÃO</b>
<b>SIGNIFICADO</b>	<b>VIABILIDADE DA CORROSÃO</b>	<b>TAXA DA CORROSÃO</b>
<i>Avaliação do concreto</i>	Profundidade de carbonatação Teor de umidade de equilíbrio pH da solução presente nos poros do concreto Concentração de cloretos e hidroxilas Teor de cloretos Difusão de cloretos Retenção de cloretos	Resistividade elétrica Penetração de cloretos Migração de cloretos Difusão de oxigênio Teor de sais solúveis
<i>Avaliação da Armadura</i>	Tipo Resistência Proteção	Composição química Perda de massa Observação visual e microscópica
<i>Avaliação do sistema concreto/armadura/meio ambiente</i>	Heterogeneidades Meio ambiente Potencial do eletrodo	Heterogeneidades Meio ambiente Macrocélula Corrente/tensão impressa Resistência de polarização Curvas de polarização Resistência elétrica Impedância eletroquímica Ruídos eletroquímicos

A Tabela 7 contém uma correlação, montada em bases comparativas, entre o custo da aplicação de algumas técnicas, o local onde a mesma deve ser aplicada, o tempo necessário para a obtenção de resultados, a possibilidade de dano à estrutura devido à aplicação da técnica e os resultados esperados.

Tabela 7: Características comparativas de diversos métodos para avaliação da durabilidade do concreto armado. (fonte: BUNGEY e MILLARD, 1996)

MÉTODO	CUSTO	VELOCIDADE DE OBTENÇÃO DE RESULTADO	DANO À ESTRUTURA	LOCAL DE REALIZAÇÃO DO ENSAIO	APLICAÇÃO
<i>Medida do cobrimento e de posicionamento da armadura</i>	Baixo	Rápida	Nenhum	In loco	Causa e risco de corrosão
<i>Profundidade de carbonatação</i>	Baixo	Rápida	Pequeno	In loco	
<i>Conteúdo e profundidade de alcance de cloretos</i>	Baixo	Moderado	Pequeno	Laboratório	
<i>Potencial de corrosão</i>	Moderado	Rápida	Pequeno	In loco	Risco de corrosão
<i>Resistividade</i>	Moderado	Rápida	Pequeno /nenhum	In loco	
<i>Resistência de polarização</i>	Moderado	Rápida	Pequeno	In loco	Velocidade de corrosão
<i>Impedância</i>	Alto	Lenta	Pequeno	Laboratório	
<i>Intensidade Galvânica</i>	Moderado / Alto	Rápida	Pequeno	Laboratório	
<i>Absorção</i>	Moderado	Lenta	Moderado/ Pequeno	Laboratório	Causa e risco de deterioração do concreto e de corrosão
<i>Permeabilidade à água e gases</i>	Moderado	Lenta	Moderado/ Pequeno	Laboratório/ In loco	
<i>Teor de umidade</i>	Baixo	Moderado/Lenta	Pequeno	In loco	
<i>Análise Petrográfica</i>	Alto	Lenta	Moderado	In loco	
<i>Conteúdo de sulfatos</i>	Baixo / Moderado	Moderada/Lenta	Moderado/ Pequeno	Laboratório	
<i>Radiográficos</i>	Alto	Lenta	Nenhum	Laboratório	
<i>Álcali-silicato</i>	Alto	Lenta	Moderado	Laboratório	



No que diz respeito à identificação (em natureza ou extensão) e quantificação do fenômeno de corrosão, destacam-se, entre outras, as técnicas visuais, gravimétricas e, especialmente, as eletroquímicas (RODRÍGUEZ et al, 1994 e CASCUDO, 1997). Os princípios, vantagens e limitações de cada uma são descritas nos itens seguintes.

### **3.2 PRINCÍPIOS DOS MÉTODOS VISUAIS DE AVALIAÇÃO DA CORROSÃO**

Dada sua simplicidade e custo reduzido, muitas vezes a inspeção visual é a principal ferramenta utilizada para a identificação dos sintomas de um processo corrosivo. Um especialista adequadamente treinado é capaz de estimar, de maneira rudimentar, o grau de deterioração de uma estrutura corroída a partir de uma análise visual (CASCUDO, 1997). O problema é que estas estimativas apresentam um componente subjetivo bastante forte, e dependem diretamente do grau de conhecimento do avaliador e da possibilidade de acesso visual à estrutura (CABRAL, 2000). Além de não ser confiável em concretos porosos pelo fato de não ser possível definir o tempo de ação do fenômeno de corrosão.

Além disto, os sintomas da corrosão normalmente só se tornam visíveis quando o fenômeno está avançado, num estágio no qual já pode haver um comprometimento da estabilidade e segurança da estrutura.

Este tipo de exame poderia ser categorizado como um método não-destrutivo, que permite uma identificação instantânea, se a corrosão já estiver avançada, mas demanda um acompanhamento temporal para avaliar a intensidade de desenvolvimento do fenômeno.

Dentre as informações que podem ser obtidas no exame visual destacam-se:

- Presença de fissuras no concreto, paralelas às armaduras;
- Identificação de fragmentação e destacamento do revestimento;

- Localização de locais em que as armaduras estão expostas e corroídas;
- Comprometimento da aderência aço-concreto;
- Flambagem de armaduras longitudinais de pilares pelo decréscimo na seção de concreto ou pela perda do monolitismo da estrutura;
- Manchamento da superfície do concreto com produto ferruginoso.

Pela análise visual é possível, ainda, coletar informações sobre a causa do ataque. Se o ataque for motivado pela presença de íons cloreto, a corrosão se manifesta de forma mais localizada ao longo da barra, sendo característico a formação de localizada<sup>2</sup>. Já se o ataque for motivado pela queda de pH, em função da carbonatação, o processo de corrosão se apresenta mais uniforme ao longo da superfície do metal.

### **3.3 PRINCÍPIOS DOS MÉTODOS GRAVIMÉTRICOS DE AVALIAÇÃO DA CORROSÃO**

O método gravimétrico é utilizado apenas em laboratórios e visa quantificar o grau de deterioração através da determinação da perda de massa dos metais, após a decorrência de um certo tempo de propagação do fenômeno (CASCUDO, 1997).

A perda de massa é dependente da área superficial sujeita à corrosão e do tempo de exposição do metal. Sendo assim, é possível definir uma taxa de corrosão, que pode ser expressa em mg/dm<sup>2</sup>/dia (mdd), admitindo massa expressa em miligramas, área em decímetros quadrados e tempo em dias. Com auxílio da Lei de Faraday, e usando fatores de conversão, as referidas taxas de corrosão em mdd são convertidas e expressas em  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ .

A principal deficiência deste método está relacionada com o fato de que o mesmo só pode ser realizado em segmentos de barra retirados da estrutura. Desta forma,

---

<sup>2</sup> Corrosão localizada ocorre quando o desgaste se dá de forma muito localizada e de alta intensidade, geralmente com profundidade maior que o diâmetro e bordos angulosos. Comum ocorrer em aços inoxidáveis em meios que contêm cloretos (DUTRA, 1999).

assume uma característica destrutiva. Além disto, dependendo das condições de ensaio empregadas, podem ser necessários longos períodos de tempo até que se obtenham perdas de massa significativas. A boa confiabilidade do método eleva a sua importância, quando usado para fins de comparação com métodos eletroquímicos de estimação da perda de massa (CABRAL, 2000).

### **3.4 PRINCÍPIOS DOS MÉTODOS ELETROQUÍMICOS DE AVALIAÇÃO DA CORROSÃO**

As técnicas eletroquímicas tem sido uma das ferramentas mais importantes para o estudo do processo corrosivo em estruturas de concreto armado, visando avaliar o desempenho de estruturas afetadas, desenvolver técnicas de proteção e reparo e produzir estruturas mais duráveis.

De acordo com Figueiredo (1994), o potencial das técnicas eletroquímicas para avaliar aspectos relacionados com a durabilidade das estruturas de concreto é notável, dada sua sensibilidade e rapidez. Porém estas técnicas devem ser melhor estudadas ou desenvolvidas, buscando facilitar seu emprego em laboratório e no próprio canteiro de obra.

A seguir se faz uma breve revisão das principais técnicas eletroquímicas desenvolvidas e utilizadas por diversos pesquisadores da área, tais como HELENE (1993); CASCUDO (1997); HUERTA (1997); ABREU (1998); MELCHERS (1999); DUTRA (1999); CABRAL (2000); MARTÍN-PÉREZ (2000); LIMA & HELENE (2001); PEREIRA & CINCOTTO (2001); VIDEM (2001); GENTIL (2003); VIEIRA (2003); AHMAD (2003); LÓPEZ et al (2003) e LIANG & YANG (2005).

#### **3.4.1 Ensaios de determinação do coeficiente de difusão de oxigênio**

O conhecimento do coeficiente de difusão de oxigênio através do concreto ou da argamassa fornece subsídios para caracterizar a porosidade do material, servindo para estimar o efeito de proteção por barreira exercido sobre a armadura.

Para determinar o fluxo de oxigênio até a superfície da armadura do concreto, mede-se a intensidade de corrente catódica ( $I_{cat}$ ), a um potencial constante de -750 mV, em relação a um eletrodo de calomelano saturado (ECS). A  $I_{cat}$  é registrada quando a curva corrente versus tempo alcança o chamado estado estacionário (GJORV et al, 1996). Com o valor de  $I_{cat}$  no estado estacionário aplica-se a lei de Faraday para obter o fluxo de oxigênio ( $J(O_2)$ ) até a armadura:

$$J(O_2) = \frac{I_{CAT}}{n \times F}$$

Eq. 3.1

Onde:

 $J(O_2)$ : fluxo de oxigênio em mol/s; $I_{cat}$ : intensidade de corrente catódica no estado estacionário em Amper (A);

N: número de elétrons de Valencia (4);

F: constante de Faraday (96500 C/mol).

A partir do valor de fluxo de oxigênio e utilizando a primeira lei de Fick, calcula-se o coeficiente de difusão aparente de oxigênio  $D_{ap}(O_2)$  (PAGE & LAMBERT, 1987).

$$D_{ap}(O_2) = \frac{J(O_2) \times e}{S \times C_o}$$

Eq. 3.2

Onde:

 $D_{ap}(O_2)$ : coeficiente de difusão aparente de oxigênio em  $cm^2/s$ ; $J(O_2)$ : fluxo de oxigênio em mol/s;

e: a espessura do revestimento em cm;

S: a área da armadura onde o oxigênio pode ser reduzido em  $cm^2$ ; $C_o$ : a concentração de oxigênio em uma solução de  $Ca(OH)_2$  em  $mol/cm^3$ .

### 3.4.2 Ensaios de difusão e migração de cloretos

Dada a importância dos íons cloretos como iniciadores de corrosão, alguns ensaios se concentram em avaliar o coeficiente de difusão dos mesmos através do revestimento.

Sabe-se que, quando o concreto está em estado saturado, os íons cloretos têm acesso ao seu interior por meio de difusão, devido à diferença de concentração iônica entre a face que está exposta e a matriz do concreto. Este processo, freqüentemente, é descrito pela primeira Lei de Fick.

É utilizada a equação de Nernst-Planck, em estado estacionário, para modelar a movimentação iônica no eletrólito, neste caso o concreto (ANDRADE & SANJUAN, 1994).

$$D_{efe} = \frac{J_{Cl} \times R \times T \times I}{Z_{Cl} \times F \times C_{Cl} \times \gamma \times \Delta E}$$

Eq. 3.3

Onde:

$D_{efe}$ : coeficiente efetivo de difusão de cloretos em  $\text{cm}^2/\text{s}$ ;

$J_{Cl}$ : fluxo de cloretos em  $\text{mol}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ;

R: constante dos gases ( $1,9872 \text{ cal}/\text{mol} \cdot \text{K}$ );

I: espessura da amostra;

$Z_{Cl}$ : carga elétrica do íon cloreto;

F: número de Faraday ( $23063 \text{ cal}/\text{volt} \cdot \text{eq}$ );

$C_{Cl}$ : concentração inicial de cloretos na câmara em  $\text{mol}/\text{l}$ ;

$\gamma$ : coeficiente de atividade do cloreto (0,68);

$\Delta E$ : variação de potencial imposta no sistema.

### 3.4.3 Ensaios de determinação de teor de cloretos

De acordo com Cabral (2000), este método consiste em perfurar pequenos orifícios no concreto e coletar amostras em forma de pó ou em pequenos pedaços, para serem analisados em laboratório. Determina-se o teor de cloretos totais (solúveis em ácido) ou livres (solúveis em água). Existem diversos métodos para determinar este teor, dentre eles o Volhard, Quantab Test, o RCT (Rapid Chloride Test) e o método de Mohr, dentre outros.

### 3.4.4 Ensaios de resistividade

Medidas de resistividade elétrica do concreto podem ser utilizadas tanto para investigações de propriedades do concreto em laboratório ou para monitoramento in loco de estruturas de concreto. Especialmente, neste último caso, quando associado com medidas de potencial de eletrodo, é um bom indicador do risco de corrosão (ABREU, 1998).

A medida da resistividade elétrica do concreto é fundamental para definição do período de iniciação da corrosão. Uma grande resistividade normalmente está

associada a uma maior resistência à corrosão, pois indica que a estrutura é pouco porosa ou que não há eletrólito disponível.

Dentre os métodos propostos para medir a resistividade destaca-se o método de Werner ou dos quatro eletrodos, Figura 9 e 10. Este método é normalizado pela ASTM G57 (DOTTO et al, 2004), para uso em solos, sendo mais tarde adaptado para uso em concreto.

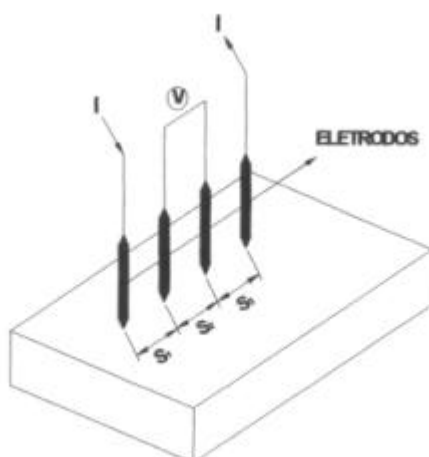


Figura 9 – Representação do método dos quatro eletrodos para medição de resistividade elétrica (PINCELLI, 2004)



Figura 10 – Ensaio de medição de resistividade (ABREU, 1998)

O princípio do ensaio de resistividade consiste em induzir a passagem de corrente entre os eletrodos, com auxílio de uma fonte de alimentação de corrente alternada. Mede-se, então, a diferença de potencial entre os eletrodos, como explicado por

Abreu (1998). O valor da resistividade, de acordo com a fórmula de Frank Wenner, é calculado através da seguinte equação:

$$r = R \times K$$

$$K = \frac{4\rho a}{\frac{i+2a}{\sqrt{a^2+b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2+4b^2}}}$$

Eq. 3.4

Onde:

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

R: resistência medida pelo instrumento, em ohm;

a: distância entre eletrodos em cm;

b: profundidade de penetração dos eletrodos no cp, em cm;

Entretanto, para casos onde a profundidade  $b \leq a / 20$ , a resistividade é dada por:

$r = \frac{2\rho aV}{l}$ <p>Eq. 3.5</p>	<p>Onde:</p> <p><math>\rho</math>: resistividade elétrica, em ohm.cm;</p> <p>a: distância entre eletrodos em cm;</p> <p>V: diferença de potencial entre os eletrodos centrais em (mV);</p> <p>l: corrente (mA)</p>
---	--

A interpretação dos resultados obtidos é feita de acordo com os intervalos propostos por CEB 192 (1988), indicados na Tabela 8.

Tabela 8: Interpretação dos resultados do ensaio de resistividade

RESISTIVIDADE (ohm.cm)	RISCO DE CORROSÃO DA ARMADURA
< 5000	Muito alto
5000 a 10000	alto
10000 a 20000	Baixo/moderado
>20000	baixo

Existem vários fatores importantes que intervêm na utilização deste método, tais como: os efeitos provocados pela polarização, a resistência de contato entre o eletrodo e a superfície do concreto, o efeito da intensidade de corrente, da

freqüência, do tipo de onda, armadura, as dimensões dos cps e limitações da estrutura (ABREU, 1998).

### 3.4.5 Ensaio de medição da resistência elétrica

De acordo com Cascudo (1997) a utilização desta técnica iniciou nos anos 70, porém não foi de muito sucesso devido ao limitado número de informações que ela fornece sobre o processo de corrosão, e ao fato de serem utilizadas sondas metálicas embutidas no concreto devidamente projetadas estruturalmente.

A técnica baseia-se no fato que a resistência reflete o grau de dificuldades de que um fluxo de elétrons que percorre um certo material. Assim ao ocorrer o processo de corrosão a sonda metálica diminui sua seção transversal, aumentando a resistência elétrica. Ou seja, com a temperatura mantida constante, a corrosão do elemento metálico pode ser monitorada periodicamente pela medida de sua resistência elétrica. Essa técnica estima a taxa de corrosão das armaduras situadas próximas à sonda.

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

Eq. 3.6

Onde:

R: resistência elétrica da peça metálica (ohm);

$\rho$ : resistividade elétrica da peça metálica (ohm.m);

L: comprimento da peça metálica (m);

A: área da seção transversal da peça metálica (m<sup>2</sup>).

Esta técnica tem como vantagens:

- A obtenção de dados instantâneos, o que permite a acumulação de dados por um período de tempo;
- Estudos de métodos de proteção e controle da corrosão, na avaliação do desempenho de diferentes tipos de argamassas e concretos como protetores físicos da armadura;
- É um método não destrutivo;
- Pode ser realizado sem a utilização de mão-de-obra especializada pela facilidade de interpretação dos resultados.



Porém tem como desvantagens:

- A sonda só informa dados de corrosão do local de sua instalação;
- Diferença de resultados de acordo com a situação em que se encontra a estrutura;
- A sonda metálica deve ser instalada no mesmo momento da concretagem da peça estrutural, pois se instalada depois terá condições diferentes da armadura;
- Essa técnica não é válida para corrosão localizada como o pite.

### **3.4.6 Ensaios de potencial de corrosão**

Esta técnica surgiu nos anos 50 nos EUA e a partir de seu surgimento passou a ser muito usada tanto no seu país de origem quanto na Europa (CASCUDO, 1997).

Potencial de equilíbrio é o que se estabelece a partir de uma situação de equilíbrio entre duas tendências: a dos átomos metálicos, em deixar o metal e passar para a dissolução, ionizando-se e hidratando-se, e a dos cátions, em depositar-se sobre o metal. A esse equilíbrio dinâmico é correspondida uma densidade de corrente de intercâmbio, equivalente a velocidade de dissolução anódica ou de depósito de cátions, segundo a Lei de Faraday.

A técnica de potenciais de eletrodo ou de corrosão consiste em medir a diferença de potencial de um eletrodo de trabalho (armaduras) e um eletrodo de referência (por exemplo: calomelano saturado, cobre-sulfato de cobre ou prata-cloreto de prata) através de um voltímetro de alta impedância de entrada. Este método apresenta resultados na forma de linhas equipotenciais sobre a estrutura de concreto armado, conhecido como mapeamento de potenciais.

De acordo com Castro et al (1998) este método é totalmente qualitativo e sempre deve ser completado com outro tipo de ensaios, como por exemplo, resistência elétrica.

De acordo com a ASTM C876 (1991) a interpretação dos resultados utilizando o eletrodo de cobre-sulfato de cobre (ESC) é dado pela Tabela 9.

Tabela 9: Probabilidade de corrosão através do  $E_{corr}$ , segundo ASTM C876 (1991).

POTENCIAIS DE CORROSÃO - ESC	PROBABILIDADE DE CORROSÃO (%)
$E_{corr} > -200 \text{ mV}$	< 10
$-200 \text{ mV} < E_{corr} < -350 \text{ mV}$	Incerta
$E_{corr} < -350 \text{ mV}$	> 90%

Alguns fatores interferem nas medidas de potencial como:

- Camadas superficiais de concreto de alta resistividade, pois a corrente de corrosão tende a evitar o concreto resistivo pela sua baixa umidade;
- A qualidade do concreto e profundidade de cobrimento: sabe-se que quanto menor a relação água/cimento, menor a porosidade do concreto e assim maior a resistividade do material, o que dificulta o caminho iônico de retorno até o eletrodo de referência. Quanto maior o valor do cobrimento também, maior a dificuldade da identificação do processo de corrosão;
- Existência de carbonatação e de íons cloretos: esses dois fenômenos provocam situações contrárias na leitura dessa técnica, pois a carbonatação reduz os valores de leitura de potencial e a ação de íons cloretos aumenta os dados obtidos;

Esta técnica tem como vantagens:

- Delimitação de áreas comprometidas;
- Monitoramento da estrutura;
- Sensibilidade para detectar mudanças no estado superficial da armadura;

- Levantamento de potenciais eletroquímicos;
- É um método não destrutivo;
- Apresenta rapidez e facilidade na execução do método.

Porém apresenta, como desvantagens:

- Não fornece dados quantitativos do processo de corrosão;
- Aponta, apenas, zonas prováveis de corrosão;
- Limitações ao se deparar com concretos de alta resistividade;
- Interferência da espessura do revestimento nas leituras dos potenciais;
- Umidade também interfere no processo;
- Cloretos e carbonatação também interferem no uso do método;
- Grande quantidade de variáveis que interferem na técnica.

### **3.4.7 Ensaio de determinação das curvas de polarização**

São representações gráficas das relações entre corrente e potencial de um sistema de corrosão (CASCUDO, 1997). Foi um dos primeiros métodos eletroquímicos a ser efetivamente usado no estudo da corrosão de armaduras, em laboratório, utilizando barras de aço imersas em corpos-de-prova de concreto.

O princípio do método é aplicar uma sobre-tensão, seja no sentido anódico, com valores de potencial mais positivos que o potencial de corrosão, ou no sentido catódico, com valores de potenciais mais negativos, registrando as alterações da corrente.

Os resultados são apresentados na forma de curvas potencioestáticas, potenciodinâmicas ou galvanostáticas. Nas duas primeiras têm-se respostas de corrente em função do potencial aplicado, já a última têm-se correntes elétricas fixas aplicadas ao sistema e registram-se as variações de potencial.

Esta técnica tem como vantagens:

- Indica a cinética do processo, através da velocidade de corrosão;
- Informa sobre a morfologia do ataque;
- Possibilita a caracterização do comportamento da corrosão;
- Informa taxas de corrosão;
- Indica a tendência à passivação e ao pite.

Porém tem como desvantagens:

- A necessidade de correção da queda ôhmica existente entre eletrodos;
- Utilização de soluções sintéticas ou extratos aquosos para simulação do líquido intersticial contido nos poros do concreto;
- A técnica tem uma natureza destrutiva, devida à alta polarização;
- É um método acelerado e artificial de induzir corrosão, não reproduzindo as mesmas condições da estrutura;
- Requer profissionais especializados.

### **3.4.8 Ensaios de resistência à polarização**

A resistência à polarização representa a inércia que um sistema possui em desenvolver um processo eletroquímico de corrosão, isto é, um processo de transferência de carga elétrica do metal. Sendo assim, quanto maior for a resistência à polarização, menos intensas serão as velocidades de corrosão encontradas (CASCUDO, 1997).

Esta técnica vem sendo desenvolvida e se popularizando no meio acadêmico de estudos sobre corrosão. Entretanto quando o método é usado in-situ deve-se considerar as variáveis que o meio ambiente provoca na realização do ensaio (MILLARD, 2001).

Para utilização da técnica aplica-se uma pequena polarização em torno do potencial de corrosão livre do metal em análise ( $E_{corr}$ ) e a partir daí registram-se os incrementos de corrente originados da polarização imposta e traça-se um gráfico de potencial versus corrente.

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I} \text{ Eq. 3.7}$$

Utiliza-se a equação de Stern-Geary para determinação da corrente de corrosão instantânea ( $I_{corr}$ ):

$$I_{corr} = \left( \frac{b_a \times b_c}{2,3(b_a + b_c)} \right) \times \frac{\Delta E}{\Delta I} = \frac{B}{R_p}$$

Eq. 3.8

Onde:

$R_p$ : resistência de polarização (K.W)

B: constante de Stern-Geary (mV)

$\beta_a$  e  $\beta_c$ : constante de Tafel anódica e catódica

$I_{corr}$ : corrente de corrosão

Polarização galvanostática

$\Delta E$ : variação no potencial (V)

$\Delta I$ : corrente aplicada (A)

Polarização potencioestática ou Potenciosdinâmica

$\Delta E$ : potencial aplicado (V)

$\Delta I$ : variação na corrente (A)

Ao dividir a intensidade de corrosão ou corrente de corrosão,  $I_{corr}$ , pela área efetiva de estudo "S", obtém-se a densidade de corrosão,  $i_{corr}$ .

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p \times S}$$

Eq. 3.9

Onde:

$i_{corr}$ : densidade de corrosão ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ );

S: área efetiva ( $\text{cm}^2$ ).

A compensação da resistência ôhmica do concreto deve ser feita sob pena de se obter um valor de resistência de polarização superestimado e, em consequência, valores de  $i_{corr}$  inferiores aos reais. Pode-se determinar a velocidade instantânea de corrosão, de forma qualitativa, a cada momento de um determinado ensaio, Tabela 10.

Tabela 10: Critérios para avaliar os resultados de velocidade de corrosão (MILLARD, 2001)

<b><math>i_{corr}</math> (mA/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>VELOCIDADE DO PROCESSO</b>
10-100	Muito elevada
1-10	elevada
0,1-1	Moderada
<0,1	desprezível

### 3.4.9 Ensaio de impedância eletroquímica

A impedância de um circuito elétrico representa a dificuldade pelo qual um sinal elétrico (potencial ou corrente) enviado a este circuito encontra ao percorrê-lo. A técnica baseia-se na aplicação de um sinal alternado de pequena amplitude a um eletrodo embebido. Após isso, compara-se a perturbação inicial com a resposta do eletrodo, pela medida da mudança de fase dos componentes de corrente e voltagem e pela medida de suas amplitudes (CASCUDO, 1997)..

Esta técnica tem como vantagens:

- Fornece informações sobre a cinética do processo;
- É uma técnica precisa e reprodutível;
- Fornece informações sobre o mecanismo do controle eletroquímico;
- Sensível para detectar e caracterizar o estado da armadura;

- Informa sobre a morfologia do ataque;
- É um método não destrutivo;
- Permite acompanhar a evolução do estado passivo ou ativo das armaduras ao longo do tempo;

Porém, tem como desvantagens:

- Não tem aplicabilidade “in situ” nas estruturas de concreto armado;
- Não calcula as constantes de Tafel;
- Requer mão-de-obra altamente especializada.

#### **3.4.10 Ensaio de determinação da intensidade de corrente galvânica**

Esta técnica consiste em aplicar uma diferença de potencial nula entre o eletrodo de trabalho e o de referência, que, por sua vez, encontra-se curto-circuitado ao contra eletrodo. A corrente indicada diretamente no potenciostato é a Intensidade Galvânica, que circula através dos dois tramos conectados ao potenciostato.

É uma técnica de uso restrito em laboratório e muito usado no estudo das macro-pilhas de corrosão.

#### **3.4.11 Ensaio de determinação de ruídos eletroquímicos**

Este método analisa variações na corrente e/ou no potencial que ocorrem naturalmente, denominados de ruídos, em torno de um estado estacionário, durante o processo de corrosão (CASCUDO, 1997)..

O princípio da técnica é em registrar pequenas flutuações do potencial e da corrente, obtendo desvio padrão do ruído do potencial ( $\sigma E$ ) e o desvio padrão do ruído da corrente ( $\sigma i$ ), calculando-se a resistência do ruído ( $R_n$ ).

$$R_n = \frac{SE}{Si} \text{ Eq. 3.10}$$

A obtenção dos resultados é feita através do registro dos ruídos no tempo ou pelo registro da amplitude do ruído em função da freqüência. Analisando os resultados pode-se diferenciar os sistemas passivos dos ativos, além de obter informações sobre a morfologia do ataque das armaduras.

Esta técnica tem como vantagens:

- Obtém informações sobre a morfologia do ataque e sobre o estado superficial da armadura;
- Obtém a velocidade de corrosão da armadura no concreto;
- A técnica não modifica as características do eletrodo de corrosão;
- É um método não destrutivo;
- Útil para estudo em longo prazo;
- Útil no estudo e avaliação de diferentes tipos de ambientes agressivas.

Porém tem como desvantagens:

- Tempo necessário para obtenção de resultados;
- A possibilidade de interferência de ruídos externos;
- Dificuldade para aplicação em estruturas reais.

### **3.5 DESENVOLVIMENTO, EVOLUÇÃO E PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DO ENSAIO CAIM**

O ensaio CAIM - Corrosão Acelerada por Imersão Modificada - é um ensaio acelerado de corrosão que se enquadra entre os ensaios eletroquímicos, como os citados acima. Ao contrário dos ensaios anteriores, todavia, se concentra na avaliação direta do efeito da corrosão sobre a barra, através de uma medição da



perda de massa da mesma após o ensaio. Além disto, permite que se acompanhe a evolução da corrente de corrosão, fundamental para avaliar a dinâmica do processo corrosivo.

Por estas razões, considera-se que esta é uma técnica interessante e com grande potencial de utilização para avaliação da degradação provocada pela corrosão em estruturas de concreto armado. Dada suas características, aparentemente se constitui num ensaio sensível, que pode ser usado de forma eficiente para obter dados comparativos de desempenho.

O objetivo do trabalho é justamente avaliar se as variações nas condições de ensaio afetam os resultados e estabelecer quais os parâmetros de ensaio mais adequadas para que este se constitua numa alternativa de ensaio com qualificações adequadas para uso em laboratório ou na seleção de materiais para utilização em estruturas reais.

### **3.5.1 Evolução do Ensaio CAIM**

O ensaio CAIM teve seu primeiro uso no LEME por Lima (1990), a partir de uma concepção original empregada por Varela & Espinosa (1988).

Originalmente, o ensaio era realizado com auxílio de um aquário de vidro sem fundo, com dimensões de 8 x 8 x 20 cm, que ficava apoiado sobre o corpo-de-prova, sendo fixado com algum tipo de massa vedante. Dentro deste aquário era colocada uma solução 0,6 Molar de cloreto de sódio (equivalente a uma concentração de sal de 35,5%, típica da água do mar do Oceano Atlântico) e uma placa metálica, conectada a uma fonte de alimentação. O outro pólo era fixado na barra de aço (armadura do corpo-de-prova). Aplicava-se, então, uma diferença de potencial de 60 V, de forma a tornar a barra um pólo positivo e a placa um pólo negativo, induzindo a passagem de corrente elétrica entre elas, que favorecia a movimentação dos íons cloretos na direção da barra. O período de ensaio proposto era de 7 horas, durante as quais se acompanhava, visualmente, a evolução da degradação dos cps. Ao final do ensaio,

os corpos-de-prova eram rompidos e as barras retiradas, limpas e pesadas, para avaliação da perda de massa.

Dada a complexidade da operação de fixação dos aquários, a equipe do LEME/NORIE propôs, em 1991, a modificação do conceito do ensaio, passando a utilizar os corpos-de-prova imersos em uma solução de cloretos. Além disto, fabricou-se uma fonte de voltagem contínua regulável, que permitia a indução de diferenças de potencial entre 15 e 70 V. O equipamento foi projetado de forma que se pudesse acompanhar a evolução da corrente de corrosão ao longo do ensaio. Decidiu-se, ainda, que as barras deveriam ficar totalmente inseridas no concreto, sendo deixada para fora uma das ponta do fio de conexão com a fonte. A outra ponta era enrolada em torno de um trecho pequeno da barra. Após as modificações o ensaio foi batizado de CAIM.

Em 1992, Jadovski et al, utilizaram o procedimento CAIM para o estudo da influência da espessura do revestimento no fenômeno de corrosão. O ensaio consistia em submeter os corpos-de-prova de concreto armado, com barras de 125 mm de diâmetro, a uma fonte de corrente contínua de 80V, enquanto estes estavam parcialmente imersos numa solução salina de cloreto de sódio com concentração de 35 g/l, durante um período de 8 horas. Após as barras eram limpas e pesadas, permitindo que se fizesse a verificação de perda de massa. Uma inovação deste programa de estudo consistiu na utilização de um procedimento químico, baseado no emprego da solução de limpeza proposta na ASTM A380 (1990), para limpeza da barra, além da limpeza mecânica.

Selistre et al, em 1993 e 1994, utilizou o CAIM para estudos sobre a influência da relação água/cimento, do revestimento e do tempo de cura na corrosão de armaduras. Estudou também o efeito de técnicas para reversão do processo corrosivo. Utilizaram-se corpos-de-prova com dimensões de 10x10x20 cm, nos quais foram inseridas barras de aço CA-50 com 12.5 mm de diâmetro (1/2") e aproximadamente 15 cm de comprimento. Nesta ensaio, pela primeira vez, foram usados espaçadores plásticos para garantir um revestimento de 15 mm.

Os corpos-de-prova eram ensaiados aos 28 dias de idade, sendo conectados a uma fonte de corrente contínua de 80V, por um tempo de 8 h (1 ciclo) de parcial imersão dos cps em uma solução de NaCl. Após as barras eram retiradas, limpas conforme a ASTM A380 (1990) e pesadas para cálculo da perda de massa.

Marchesan et al, em 1997, utilizaram o CAIM em um estudo sobre aplicação de revestimentos para controle de corrosão. Neste ensaio, os copos-de-prova eram expostos a uma fonte de corrente contínua de 75V durante 8 horas. Os cps eram parcialmente submersos (até a altura do cobrimento mais a metade do diâmetro da barra) em uma solução de 35 g de NaCl/l. Após as barras eram limpas, conforme ASTM A380 (1990/1996) e pesadas.

No programa de ensaios desenvolvido por Kirchheim et al (2005), novas modificações foram introduzidas. Dúvidas sobre a possibilidade de o contato direto entre o fio e a barra estarem provocando distorções no processo de corrosão da mesma levaram os pesquisadores a propor uma nova forma de conexão elétrica, na qual o fio era mantido acima da barra, sem contato direto.

### **3.5.2 Considerações Finais do Ensaio**

O CAIM, como técnica de medida de corrosão em armaduras de concreto armado, pode ser considerado um ensaio que possibilita uma análise rápida, pois permite avaliar visualmente o comportamento do mesmo no decorrer do tempo. Seu emprego permite avaliar a intensidade de corrosão, que caracteriza a dinâmica da corrosão, e determinar a perda de massa do aço, importante variável para avaliar os efeitos deletérios do processo corrosivo.

Ao mesmo tempo, porém, é um ensaio que necessita de atenção e dedicação do pesquisador, pois o mesmo tem que acompanhar a evolução da corrente e registrar mudanças visuais nos cps desde a pesagem inicial até o final das armaduras. É necessário ainda adotar cuidados para garantir um correto posicionamento das barras nos cps e uma adequada cura do concreto. Além de tudo isso, o pesquisador

deve ter sensibilidade suficiente para encerrar o ensaio se os cps estiverem em estado de deterioração muito avançado.

O processo, entretanto, ainda necessita ser comparado com outras técnicas eletroquímicas, que sejam aferidas sua sensibilidade e confiabilidade, em relação a outros métodos, o que pode viabilizar sua consolidação como método de ensaio e eventual normalização.

Com esta técnica é possível avaliar alternativas de proteção contra corrosão em diversos tipos de concreto (com adições, diferentes cimentos, etc).

Diversas vezes este ensaio, CAIM, já foi executado (como mencionado anteriormente) como teste de diferentes tipos de concreto com vários conceitos de execução. Porém, jamais houve um estudo detalhado destes diversos conceitos, com a finalidade de estudar a corrosão de armaduras de diferentes resistências de concretos, ou cobrimentos ou tipos de materiais utilizados no concreto em estudo.

Cabe lembrar, ainda, que os estudos na área da corrosão apresentam aplicabilidade restrita, devido à ausência de correlações confiáveis entre os resultados obtidos e a observações sobre a dinâmica do processo corrosivo derivadas da análise de estruturas reais.

## 4. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 4.1 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE ESTUDO

A primeira medida tomada para orientar os trabalhos experimentais consistiu na definição de uma estratégia de pesquisa.

O objetivo principal proposto para o trabalho, como enfatizado no capítulo 1, consistia em analisar como a variação de certas condições de ensaio afeta os resultados obtidos com a aplicação do ensaio acelerado de corrosão CAIM.

Com este intuito, foram selecionadas algumas variáveis de estudo consideradas prioritárias:

- a) Tipo de Conexão Elétrica;
- b) Voltagem de Indução;
- c) Tempo de Ensaio;
- d) Nível da Solução (Profundidade de Imersão do Corpo-de-Prova);

A seguir se discutem as razões que levaram à seleção de cada uma das variáveis enumeradas acima.

#### 4.1.1 Tipo de conexão elétrica

A escolha de estudar esta variável foi baseada na observação de formação ou não de pontos específicos de corrosão ao redor da conexão elétrica. Para isto, foram adotadas duas formas de conexão elétrica. Em uma delas, o fio era posicionado sobre a barra (Figura 11), apoiado em pedaços plásticos para que não tivesse

contato direto com a barra. Na outra forma, o fio era enrolado na metade da barra (Figura 12) e também apoiado em pedaços plásticos. Nesta última maneira, foi possível analisar o comportamento do campo corrosivo nos extremos da barra, com e sem conexão elétrica.



Figura 11: Posição do fio sobre a barra



Figura 12: Posição do fio enrolado em meia barra

Para estudo da variável posição do fio na barra, foi desenvolvida uma metodologia que foi utilizada durante toda esta pesquisa, Figura 13.

- a) Cortava-se um pedaço de fio de aproximadamente 1m;
- b) Desencapava-se um trecho do fio, equivalente ao comprimento da barra;
- c) Cortavam-se pequenos pedaços da capa isolante retirada, que eram usados como apoios, para evitar o contato entre o fio e a barra (no caso de fio sobre a barra) ou para ajudar na amarração do fio (no caso de fio enrolado na barra);



a) corte do fio



b) fio desencapado



c) corte e posicionamento dos apoios



d) amarração do fio

Figura 13: Detalhamento da metodologia empregada para posicionamento do fio na barra

#### 4.1.2 Voltagem de indução

A fonte utilizada neste estudo foi uma fonte de tensão constante, porém com a flexibilidade de variá-la. A tensão utilizada nos testes, de medida de corrosão em armaduras de concreto armado, é de muita importância nos ensaios eletroquímicos devido à proporcionalidade entre o seu aumento e o aumento da taxa de corrosão.

Foram utilizadas três voltagens de indução neste trabalho: 15, 45 e 70 Volts, estas determinadas em função da fonte utilizada.

#### 4.1.3 Tempo de ensaio

O tempo de ensaio necessário para que haja efeito de corrosão é um parâmetro muito discutido na maioria dos métodos eletroquímicos, visto que esta variável está diretamente relacionada ao concreto que está sendo estudado. Relações

água/cimento maiores apresentam sinais de corrosão em tempos menores que as relações a/c menores. Isto se deve à porosidade do concreto que leva à facilidade de migração dos cloretos. Neste estudo utilizou-se os tempos de 8 (1 ciclo), 24 (3 ciclos) e 40h (5 ciclos) de ensaio, com fonte ligada para ter total sensibilidade do ensaio em diferentes tempos em que a fonte permanecia ligada.

#### **4.1.4 Nível da solução**

A migração dos cloretos nos corpos-de-prova está relacionado à capacidade de aeração que o concreto estudado possui, ou seja, com a possibilidade de penetração dos sais no seu interior. Esta variável, nível de solução, demonstra este poder de migração dos sais e o quanto que o nível de solução influencia nisto.

Os níveis de solução estudados foram até a altura do cobrimento e até a altura do cobrimento mais meia barra. Estes níveis foram controlados durante a execução do ensaio, efetuando reposição da solução sempre que a altura da mesma estava abaixo do nível que estava sendo estudado.

## **4.2 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE RESPOSTA**

Para Ribeiro & Caten (2000), as variáveis de respostas analisadas são também chamadas de variáveis dependentes, porque elas dependem de um conjunto de fatores experimentais que podem afetar os resultados.

As variáveis de resposta deste trabalho foram a intensidade de corrente e a perda de massa das armaduras do concreto, analisadas a partir do ensaio CAIM, e a resistência à compressão<sup>1</sup>, utilizada como um parâmetro de controle dos concretos ensaiados.

A perda de massa é uma medida de degradação largamente empregada em estudos de corrosão. A mesma é definida como uma porcentagem, relativa à massa inicial

---

<sup>1</sup> Os ensaios de resistência à compressão axial seguiram os procedimentos previstos na NBR 5739 (ABNT, 1994).



da barra antes da concretagem. Segundo Helene (1993), apesar de ser uma determinação destrutiva, é um dos parâmetros quantitativos mais confiáveis, a partir do qual todas as outras determinações de taxa de corrosão são, em geral, aferidas.

### 4.3 ESTRATÉGIA DE PESQUISA

Além das variáveis de estudo, descritas no item 4.1, considerou-se que seria interessante avaliar como se daria à interação da mudança de nível destas variáveis com a variação da **relação água/cimento** do concreto. Ou seja, verificar se eventuais alterações na dinâmica do processo acelerado de corrosão desencadeado durante o ensaio, causadas pela variação das condições de ensaio, seriam diferentes em concretos com estruturas de poros distintas.

O problema é que, com este número de variáveis, a construção de uma matriz experimental completa levaria a um número de ensaios muito elevado.

Para contornar este problema, a pesquisa foi sub-dividida em duas etapas, uma preliminar e uma principal. Na etapa preliminar a investigação se centrou no efeito do tipo de conexão elétrica e no nível da solução de imersão. Na etapa principal, o tipo de conexão foi mantido constante, sendo ampliados os níveis de outras variáveis.

Em ambas as fases, para preservar o equipamento, adotaram-se, como sendo condições limitantes de ensaio, o desenvolvimento de uma corrente máxima de 4A em um determinado cp, ou de uma corrente total de 18A.

#### 4.3.1 Etapa Preliminar

No estudo preliminar foi variado o tipo de conexão elétrica da barra e o nível da solução de imersão, como mostrado na Tabela 11. Nesta fase, foram fixados o cobrimento (através do uso de espaçadores plásticos com 30 mm de altura), a voltagem de indução (sendo adotado o valor máximo permitido pelo equipamento, de 70V, que era o padrão empregado em ensaios anteriores) e o tempo de ensaio (adotou-se um tempo de ensaio de 40h, equivalente a 5 ciclos contínuos de 8 horas.

O padrão antigo era de 1 ciclo de 8 h, porém estudos recentes de Kirchheim et al. (2005) indicaram que, para concretos de alta densidade, este intervalo de tempo era insuficiente para provocar uma corrosão considerável das barras). Foram empregados cps com duas relações água-cimento: uma baixa (0,35) e uma alta (0,70), buscando analisar como se comportariam concretos com compacidades bem distintas.

Tabela 11: Descrição das Variáveis Analisadas na Etapa Preliminar.

VARIÁVEIS DE ESTUDO	NÍVEIS DE VARIAÇÃO
<i>Tipo de Conexão Elétrica</i>	Fio sobre a barra Fio enrolado na barra
<i>Profundidade de Imersão dos cps</i>	Face inferior da barra (=cobrimento) Face superior da barra (=cobrimento + ½ diâmetro da barra)
<i>Relação água/cimento</i>	0,35 0,70

Para cada combinação de variáveis, nesta fase, foram testados 4 cps, originários de dois lotes de fabricação, como indicado na tabela 12.

Tabela 12: Variáveis analisadas na primeira etapa do programa experimental

A/C	POSIÇÃO DO FIO NA BARRA	PROFUNDIDADE DE IMERSÃO	Nº DE CPS	Nº DE REPETIÇÕES DO ENSAIO
0,35	Sobre a barra	Cob + meia barra	4	2x
	Enrolado na barra	cobrimento	4	2x
0,7	Sobre a barra	Cob + meia barra	4	2x
	Enrolado na barra	cobrimento	4	2x
TOTAL DE CPS			16	

### 4.3.2 Etapa Principal

Na etapa principal da pesquisa foi feito um estudo das demais variáveis de interesse: voltagem de indução e tempo de ensaio, como mostrado na Tabela 13. Para verificar os efeitos de interação, variou-se, novamente, nesta fase, a relação água/cimento e o nível da solução de imersão. Em função dos resultados da fase preliminar, o tipo de conexão foi estabelecido como fio sem contato (sobre a barra, conectado por meio de isoladores plásticos). Foram utilizadas três relações água-cimento, para que se pudesse acompanhar melhor as tendências de comportamento ao longo da faixa de variação.

Tabela 13: Descrição das Variáveis Analisadas na Etapa Principal.

<b>VARIÁVEL</b>	
<i>Relação água/cimento</i>	0,35 – 0,5 – 0,7
<i>Voltagem do equipamento</i>	15 – 45 – 70V
<i>Tempo de ensaio</i>	8 – 24 – 40h
<i>Profundidade de imersão</i>	Até cobrimento – até cobrimento mais a altura da barra

Para realização da segunda etapa foi construída uma matriz que permitiu que todas as variáveis cruzassem entre si, de maneira que foi possível montar a Tabela 14. Nesta etapa foram ensaiados 3 corpos-de-prova, em cada CAIM, de cada relação água/cimento, pelo número de canais que a fonte disponibiliza (total de 10).

Tabela 14: Variáveis analisadas na segunda etapa do programa experimental

A/C	VOLTAGEM (V)	TEMPO (H)	PROFUNDIDADE DE IMERSÃO	Nº DE CPS
0,35	15	8	Cob + ½ barra	3
		24		3
		40		3
		8	cobrimento	3
		24		3
		40		3
	45	8	Cob + ½ barra	3
		24		3
		40		3
		8	cobrimento	3
		24		3
		40		3
	70	8	Cob + ½ barra	3
		24		3
		40		3
8		cobrimento	3	
24			3	
40			3	
0,5	15	8	Cob + ½ barra	3
		24		3
		40		3
		8	cobrimento	3
		24		3
		40		3
	45	8	Cob + ½ barra	3
		24		3
		40		3
		8	cobrimento	3
		24		3
		40		3
	70	8	Cob + ½ barra	3
		24		3
		40		3
8		cobrimento	3	
24			3	
40			3	
0,7	15	8	Cob + ½ barra	3
		24		3
		40		3
		8	cobrimento	3
		24		3
		40		3
	45	8	Cob + ½ barra	3
		24		3
		40		3
		8	cobrimento	3
		24		3
		40		3
	70	8	Cob + ½ barra	3
		24		3
		40		3
8		cobrimento	3	
24			3	
40			3	
TOTAL DE CPS				162

## **4.4 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS**

Os materiais utilizados para confecção dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios de corrosão em armaduras de concreto de armado e de resistência à compressão estão descritos a seguir.

### **4.4.1 Cimento**

O cimento utilizado no experimento foi o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI). Este cimento foi escolhido por apresentar o menor teor de adições em sua composição, por obter as características físicas desejáveis (hidratação e resistência à compressão) e de ser fácil obtenção. As principais características químicas, físicas e mecânicas do cimento empregado, fornecidas pelo fabricante, encontram-se descritas na Tabela 15.

Tabela 15: Caracterização físico-mecânica e química do cimento utilizado (fonte: Cimento Itambé)

<b>COMPOSIÇÃO QUÍMICA</b>	<b>TEOR (% EM MASSA)</b>
Perda de fogo (PF)	3,41
Resíduo insolúvel	0,83
Trióxido de enxofre - SO	3,15
Óxido de cálcio livre - CaO	1,62
Óxido de magnésio - MgO	5,14
Óxido de alumínio - Al O	4,37
Óxido de silício - SiO	18,24
Óxido de ferro - Fe O	2,57
Óxido de cálcio - CaO	59,78
Equivalente alcalino	0,58
<b>CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA</b>	
Tempo de início de pega (min)	134
Tempo de fim de pega (min)	195
Finura na peneira # 200 (%)	0,13
Finura na peneira # 325 (%)	1,07
Expansibilidade a quente (mm)	0,53
Consistência normal (%)	29,51
Resistência à compressão 1 dia (MPa)	23,53
Resistência à compressão 3 dias (MPa)	35,07
Resistência à compressão 7 dias (MPa)	41,19
Resistência à compressão 28 dias (MPa)	49,64

#### 4.4.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado tem origem quartzosa, e se encontra disponível no mercado local. As características físicas e distribuição granulométrica estão relacionadas na Tabela 16. A curva granulométrica encontra-se na Figura 14.

Tabela 16: Composição granulométrica do agregado miúdo

PENEIRA (MM)	% RETIDA	% ACUMULADA	MÉTODO DE ENSAIO - NBR
4,8	1	1	7217 (1987)
2,4	6	7	
1,2	13	20	
0,6	22	42	
0,3	55	97	
0,15	3	100	
<0,15	0	100	
Total	100		
<b>Dimensão máxima característica (mm)</b>		4,8	7217 (1987)
<b>Módulo de Finura</b>		2,64	
<b>Gradação</b>		Zona 3 (Areia média)	7211 (2005)

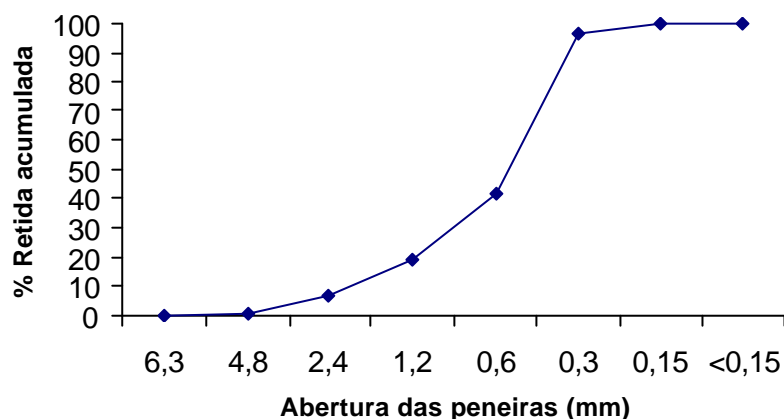


Figura 14: Curva Granulométrica do agregado miúdo

#### 4.4.3 Agregado graúdo

Para moldagem dos corpos-de-prova utilizou-se agregado graúdo de origem basáltica. As características físicas e sua distribuição granulométrica estão relacionadas na Tabela 17. A curva granulométrica encontra-se na figura 15.

Tabela 17: Composição granulométrica do agregado graúdo

PENEIRA (MM)	% RETIDA	% ACUMULADA	MÉTODO DE ENSAIO
25	0	0	7217 (1987)
19	1	1	
12,5	35	36	
9,5	34	70	
6,3	23	93	
4,8	7	100	
<4,8	0	100	
Total	100	-	
<b>Dimensão máxima característica (mm)</b>		19	7217 (1987)
<b>Módulo de Finura</b>		6,87	
<b>Gradação</b>		Brita 1	7211 (2005)

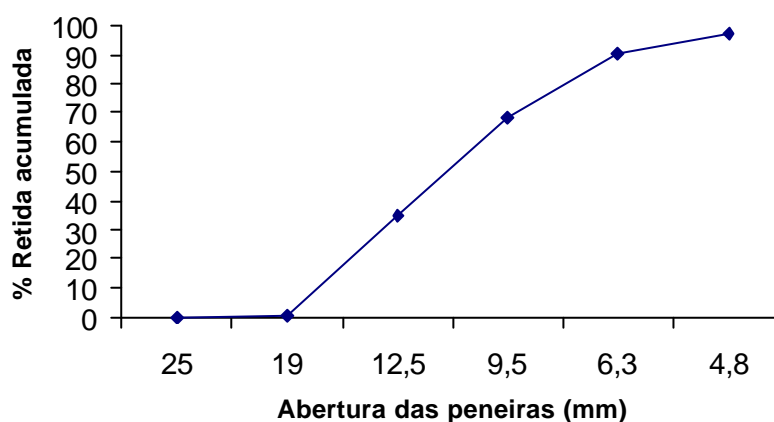


Figura 15: Curva Granulométrica do agregado graúdo

#### 4.4.4 Aditivo

O aditivo utilizado foi do tipo superplastificante à base de sais sulfonados. Seu uso foi necessário nos traços com relação água/cimento 0,35 e 0,5, pelo baixo consumo de água. A quantidade de superplastificante foi determinada tendo em vista a necessidade de garantir que o abatimento de tronco de cone do concreto ficasse dentro do intervalo, especificado a priori, de  $12 \pm 2$  cm.



#### **4.4.5 Armadura**

Os segmentos de barras de aço utilizados para confecção dos cps para o ensaio CAIM são da classe CA 50A, com 12,5 mm de diâmetro e 14,5 cm de comprimento. Antes do ensaio as barras foram limpas com auxílio de escovas de aço, para retirar qualquer tipo de impurezas, que afetasse a determinação da massa inicial ou o desencadeamento do processo corrosivo na superfície da mesma.

#### **4.4.6 Água de amassamento**

Em toda a pesquisa foi utilizada água potável, proveniente da rede pública de distribuição.

#### **4.4.7 Solução Salina Agressiva**

O ensaio CAIM foi realizado com auxílio de uma solução salina composta de água e sal de cozinha (NaCl). Foram empregados 35 g de sal por litro de água, para simular a salinidade das águas do oceano Atlântico

### **4.5 CARACTERÍSTICAS DOS CORPOS-DE-PROVA**

Diversos métodos eletroquímicos desenvolvidos em laboratórios utilizam corpos-de-prova confeccionados com argamassa ou concreto com barras de aço imersas neles. Os corpos-de-prova são submetidos a situações similares à real, estimando-se a taxa de corrosão (GONZALES et al, 1996).

Os corpos-de-prova utilizados, nesta dissertação, para o ensaio de corrosão, eram prismáticos, apresentando dimensões de 10 x 20 x 10 cm. Um segmento de barra de aço era posicionado em cada um deles, com auxílio de espaçadores plásticos, como se observa na Figura 16.



Figura 16: Vista das formas prismáticas, com as barras posicionadas nos espaçadores

Nos ensaios de resistência à compressão foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos, com dimensões de 10 x 20 cm.

#### 4.6 PRODUÇÃO DO CONCRETO

Como discutido no capítulo 1, o objetivo principal deste estudo consistia em avaliar o *ensaio de corrosão CAIM*. Pelas razões apresentadas no item 4.3, decidiu-se empregar corpos-de-prova elaborados com três relações água/cimento (0,35, 0,5 e 0,7).

Para garantir que os concretos tivessem alguma similaridade, estabeleceu-se, como parâmetro de controle, que o abatimento de tronco de cone das misturas frescas deveria ficar em 120 mm  $\pm$  20 mm (NBR 7223, 1982), e que o teor de argamassa seria de 54%.

Nas misturas que não atingiram o abatimento desejado foi adicionado aditivo superplastificante, sendo admitida uma proporção máxima de 1%, em relação à massa do cimento. Na Tabela 18 estão apresentados os traços finais, ajustados, utilizados neste estudo para as relações água/cimento de 0,35; 0,5 e 0,7.

Tabela 18: Traços dos concretos

RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO	M	TRAÇO	ADITIVO (% CIMENTO)	CONSUMO DE CIMENTO (kg/m <sup>3</sup> )
0,35	3,5	1:1,34:2,16:0,35	1	523
0,5	5	1:2,12:2,88:0,5	0,2	392
0,7	7	1:3,16:3,84:0,7	--	336

A mistura dos materiais foi realizada em uma betoneira de eixo vertical, previamente imprimada com argamassa de cimento e areia. A ordem de colocação dos materiais na betoneira foi mantida constante para todas as misturas: brita, 50% da água, cimento, aditivo superplastificante com o restante da água e areia.

Após a mistura dos materiais foram moldados os corpos-de-prova, de acordo a NBR 5738 (1994). Na primeira etapa foram moldados 4 corpos-de-prova prismáticos para cada tipo de concreto. Já na segunda etapa foram moldados 3 corpos-de-prova prismáticos, para cada relação água/cimento em estudo. Foram ainda moldados 3 corpos-de-prova cilíndricos, em cada concretagem realizada, para controle da resistência à compressão.

O processo de adensamento utilizado foi mecânico, com auxílio de vibrador de agulha. Após a moldagem, os cps foram armazenados em local seco e cobertos com sacos plásticos, por um período de 24 horas. Em seguida a desmoldagem, os mesmos foram colocados em câmara úmida, como preconizado pela NBR 9479 (1994). Os cps cilíndricos permaneceram na câmara até a idade de 21 dias, quando foram então retirados para realização do ensaio de corrosão. Aos 28 dias foram efetuados os ensaios de resistência à compressão nos cps cilíndricos.

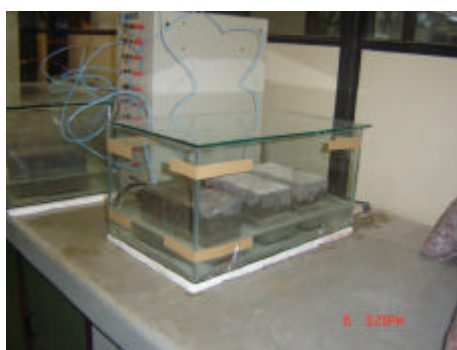
#### 4.7 PROCEDIMENTO DE ENSAIO ADOTADO

No presente estudo foi empregado o procedimento de ensaio CAIM, cujo desenvolvimento foi descrito no capítulo 3.

Em geral, foram empregadas as condições de ensaio consolidadas nos programas de teste já efetuados. Algumas pequenas modificações no procedimento de ensaio, todavia, foram adotadas, para permitir que o programa experimental proposto, o mais amplo já levado a efeito com este ensaio, fosse executado adequadamente.

Como nos ensaios anteriores, as barras de aço de cada cp foram conectados à fonte de voltagem constante, gerando dois pólos e estimulando a migração dos ânions e elétrons do pólo negativo (solução salina ou eletrodo) ao pólo positivo (armadura).

Para evitar a liberação de um vapor contendo cloretos para o ambiente, foram criados recipientes de vidro fechados (vide Figura 17). Outra modificação foi necessária em função do fato de que o planejamento experimental previa o ensaio simultâneo de cps elaborados com concreto de resistência distinta. Como a estrutura de poros destes concretos é bem diferente, a taxa de umedecimento e a resistividade dos mesmos também diferia muito. Por isso, o aquecimento dos mesmos durante os ensaios era diferenciado. Para isolar os efeitos do ensaio nos cps de cada relação a/c, decidiu-se então usar três recipientes, ao invés de um recipiente único, como empregado nos testes anteriores.



a) Ensaio CAIM nos cps com a/c de 0,35.



b) Ensaio CAIM nos cps com a/c 0,5 e 0,7.



c) Posicionamento dos cps no reservatório.



d) Vista da fonte de tensão constante.

Figura 17: Detalhes do ensaio CAIM em execução.

O ensaio foi monitorado durante o tempo total de duração, sendo realizadas leituras de trinta em trinta minutos para verificar a corrente individual de cada corpo-de-prova e a voltagem total do sistema. A altura da solução, também foi verificada ao final de cada ciclo (8h), para repor, quando necessário, solução que atingisse o nível que estava em estudo.

Após o término do ensaio, os corpos-de-prova foram rompidos em uma prensa hidráulica e as barras retiradas (Figura 18).



Figura 18: Rompimento dos corpos de prova

Antes de realizar a pesagem das barras, era efetuada uma limpeza com a solução recomendada pela ASTM A380 (1996). Este procedimento de limpeza já foi utilizado por diversos autores como Lima (1990 e 1997), Cascudo & Helene (2001), Selistre et al (1994), Kirchheim et al (2005), como discutido no capítulo 3. A solução de limpeza é gerada pela dissolução de 580g de ácido clorídrico e de 3,5 g de hexametilenotetramina em água, até que se complete um litro de solução. As barras ficam imersas na solução por 45 minutos (Figura 19), sendo depois lavadas em água corrente. As barras limpas eram então colocadas em uma estufa, a 20°C, por 45 minutos, para estimular a evaporação de qualquer água remanescente.

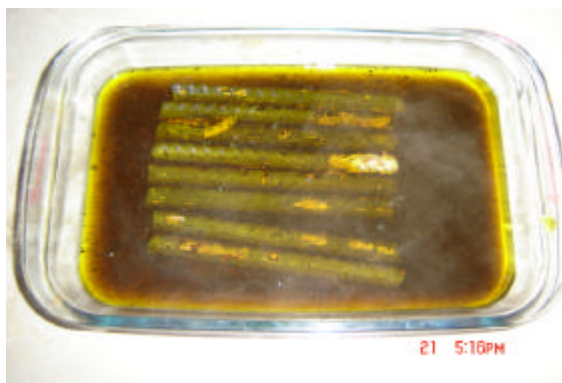


Figura 19: Imersão das barras na solução de limpeza

## 5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos no programa experimental desenvolvido neste estudo. Para facilidade de interpretação, os dados serão organizados de acordo com a fase da pesquisa, como descrito no capítulo 4: Preliminar (que visava definir o tipo de conexão elétrica a adotar e verificar o desempenho nas situações mais extrema, servindo de balizamento para a fase seguinte) e Principal (na qual foi efetuado o estudo das demais variáveis de interesse, descritas no capítulo 4).

### 5.1 ESTRATÉGIA DE ANÁLISE

A análise inicial dos dados foi feita através do exame das curvas de evolução de corrente e pela verificação do valor médio e do coeficiente de variação obtido nas determinações de perda de massa das barras dos cps de mesma natureza.

Como explicado no capítulo 4, foram confeccionados quatro cps de cada tipo, na primeira fase e três cps de cada tipo, na segunda fase.

Para análise dos resultados foi realizada uma avaliação dos dados brutos de acordo com critério utilizado pelos pesquisadores do grupo LEME. O critério é feito da seguinte maneira: calcula-se a média e o desvio padrão dos dados obtidos pela perda de massa dos cps, soma-se e subtrai-se 1x a média do desvio padrão e os resultados que estiverem entre este intervalo são considerados. Novamente calcula-se média e desvio padrão, agora dos dados que já passaram pela primeira etapa, e soma-se e subtrai-se 2x a média do desvio para verificar se dados do intervalo anterior foram corretamente discriminados. Os dados que são descartados, por não

terem valores no intervalo especificado, são substituídos pela média dos novos valores.

Para aprofundar a análise dos resultados, foi realizado um estudo estatístico para avaliar a significância estatística dos vários fatores analisados, através da aplicação do método de análise de variância (ANOVA) aos dados de perda de massa. As análises foram efetuadas com auxílio do *software* Statistica, versão 6.1, que permite realizar comparações entre grupos de variáveis, comparando a variabilidade das médias dentro e entre os grupos.

A decisão sobre significância é tomada baseada numa análise do valor do parâmetro F, representativo da distribuição de Fisher. Foi adotado, como referência, um valor de F correspondente a um nível de significância de 95%.

Desta forma, dentro da lógica do teste empregado, a variável é considerada significativa quando o valor da função de Fischer calculado pelo *software* ( $F_{\text{calc}}$ ) é menor que o valor de Fischer tabelado, para um grau de insignificância de 5% ( $F_{0,05}$ ) (RIBEIRO & CATEN, 2003).

## 5.2 RESULTADOS DA ETAPA PRELIMINAR

Nesta primeira etapa do estudo foram analisadas três variáveis independentes, conforme descrito no capítulo anterior. Os ensaios foram repetidos duas vezes, com dois cps de cada tipo em cada ensaio, totalizando quatro corpos-de-prova para cada combinação de variáveis:

1. *Tipo de conexão*: fio sobre a barra e enrolado na barra;
2. *Profundidade de Imersão dos cps*: até o cobrimento e até o cobrimento mais metade do diâmetro da barra;
3. *Relação água/cimento*: 0,35 e 0,7.



### 5.2.1 Análise da Corrente - Etapa Preliminar

O comportamento dos corpos-de-prova, em função da corrente média, pode ser observado na Figura 20 (Dados no ANEXO A). O significado das abreviações utilizadas na figura pode ser encontrado na Tabela 19.

Tabela 19: Abreviações empregadas nas figuras.

SÍMBOLO	SIGNIFICADO
<i>FE</i>	Tipo de conexão elétrica: Fio Enrolado
<i>FS</i>	Tipo de conexão elétrica: Fio Sobre a Barra
<i>C</i>	Profundidade de imersão: cobrimento
<i>CMB</i>	Profundidade de imersão: cobrimento mais meia barra

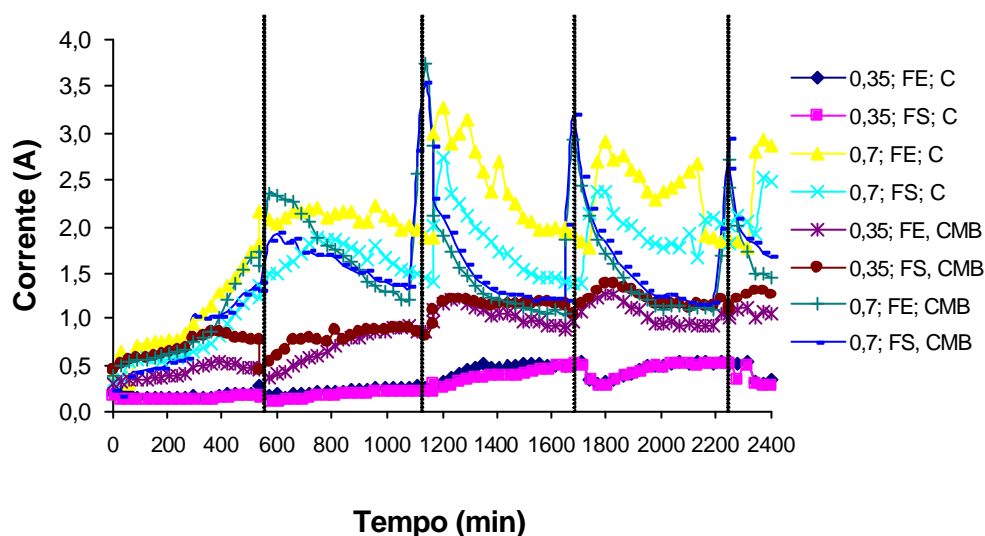


Figura 20: Comportamento da corrente individual em função do tempo

Observa-se, no gráfico, que as curvas de evolução de corrente dos cps, com conexão elétrica sobre e enrolada na barra, são próximas quando comparadas na mesma relação água/cimento. Ou seja, pode-se concluir que a dinâmica do fenômeno praticamente não é afetada pelo tipo de conexão adotada.

O acompanhamento da evolução de corrente demonstra, ainda, que o comportamento dos cps, para as duas profundidades de imersão, foram muito semelhantes. Ou seja, a variação da profundidade de imersão não afeta de forma decisiva a dinâmica do processo corrosivo, porém afeta de forma marcante a intensidade de corrente.

Quanto à relação a/c, como se pode claramente verificar na figura, os cps com relação água/cimento 0,7 apresentaram valores de corrente individuais sempre superiores aos da relação água/cimento 0,35, como se poderia esperar, em razão das diferenças de porosidade e resistividade destes tipos de concreto. Ou seja, pode-se admitir que existe uma diferença considerável na dinâmica do processo corrosivo quando se varia a resistência dos concretos ensaiados.

Um aspecto interessante que não havia sido notado, nos programas de ensaio anteriores realizado com o CAIM, dado o fato de que os ensaios eram conduzidos em apenas um dia, foi o efeito de pico de corrente na retomada do ensaio, que se mostrou marcante nas séries com o concreto mais poroso, de relação a/c 0,7. Acredita-se que este fenômeno ocorre devido ao depósito de oxigênio nos poros do concreto durante o tempo que a fonte permanece desligado (turno noturno).

### **5.2.2 Análise da Perda de Massa - Etapa Preliminar**

Em relação à perda de massa, os corpos-de-prova se comportaram segundo a Figura 22 (Dados no ANEXO B). Observa-se que o comportamento dos cps com conexão elétrica tipo fio enrolado na barra foi levemente superior, na maioria das vezes, com exceção dos cps com relação a/c 0,7 e profundidade de imersão na altura do cobrimento. Ou seja, os indícios não são suficientes para apontar influência considerável desta variável na perda de massa.

Em relação à profundidade de imersão, houve uma diferença de comportamento bastante marcante entre os cps de relação a/c 0,35 e 0,7. Nos primeiros a perda de massa foi menor quando a profundidade de imersão era menor (cobrimento). Ou seja, o estímulo de elevação do nível eletrólito pareceu mais importante que a possibilidade de maior aeração. Já nos cps com relação a/c 0,7, a perda de massa

foi consideravelmente maior quando a profundidade de imersão era menor, permitindo maior aeração. Acredita-se que isto está associado a diferenças na possibilidade de umidade e cloretos a partir da solução, em cps com estruturas de poros bem distintas. No caso da estrutura de poros mais aberta, a oxigenação parece ser mais importante para estimular a corrosão e conseqüente perda e massa.

Quanto à influência da relação a/c, como esperado os cps com relação a/c 0,7 sofreram corrosão mais intensa, resultando em maiores perdas de massa das barras.

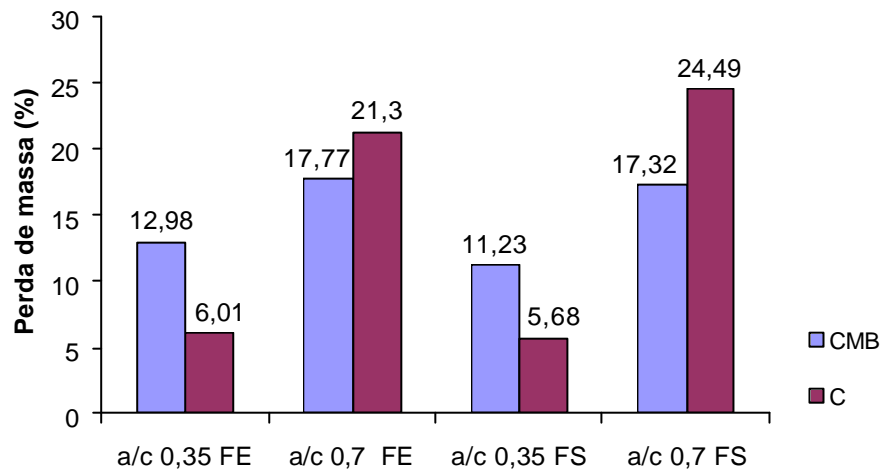




Figura 22: Perdas de massa médias registradas na etapa preliminar.

Na Tabela 20 estão registros fotográficos dos corpos-de-prova ao final do ensaio.

Tabela 20: Corpos-de-prova utilizados na Etapa Preliminar

RELAÇÃO A/C	TIPO DE CONEXÃO		PROFUNDIDADE DE IMERSÃO
	FIO ENROLADO	FIO SOBRE	
0,35			Até cobertura mais meia barra
			Até cobertura
0,7			Até cobertura mais meia barra
			Até cobertura

Fazendo um paralelo (Tabela 21) entre a análise de corrente, perda de massa e análise visual, das amostras em estudos, é possível observar que as menores perdas de massa estão associadas aos menores valores de corrente, como também ao contrario, maiores picos de corrente, associados as maiores perdas de massa. O que se confirma visualmente pelo acumulo de produtos de corrosão nos cps.

Tabela 21: Resultados etapa preliminar

<b>AMOSTRA</b>	<b>PICO MÁXIMO DE CORRENTE (A)</b>	<b>PERDA DE MASSA (%)</b>	<b>ASPECTO VISUAL (quanto ao produto de corrosão)</b>
<i>0,35; FE; C</i>	0,5	6,01	Alguns pontos
<i>0,35; FS; C</i>	0,5	5,68	Alguns pontos
<i>0,35; FE; CMB</i>	1,2	12,98	Vários pontos
<i>0,35; FS; CMB</i>	1,4	11,23	Alguns pontos
<i>0,7; FE; CMB</i>	2,9	21,3	Muitos pontos
<i>0,7; FS; C</i>	2,5	24,49	Muitos pontos
<i>0,7; FE; CMB</i>	3,7	17,77	Muitos pontos
<i>0,7; FS; CMB</i>	2,9	17,32	Muitos pontos

Para analisar a significância destas variações efetuou-se uma ANOVA, como já discutido, cujos resultados estão sumarizados na Tabela 22. Observa-se que a análise aponta que das três variáveis analisadas apenas uma teve comportamento significativo, relação a/c. As outras duas variáveis, tipo de conexão e profundidade de imersão dos corpos-de-prova, não foram significativas neste teste. As análises efetuadas com as interações das variáveis tiveram significância de acordo com a Tabela abaixo.

Baseado nestes resultados foi determinado para a próxima etapa o uso de apenas um tipo de conexão (fio sobre a barra) que além, da variável, não ter tido resultados significativos à escolha é de fácil execução. A variável profundidade de imersão, apesar de ter demonstrado resultados negativos no teste ANOVA, será mantida na próxima etapa com os dois tipos (até cobrimento e até cobrimento mais meia barra) pelo fato de terem tido comportamentos diferentes comparados às relações água/cimento. Esta diferença de comportamento acredita-se, que foi pela maior ou menor capacidade de aeração dos concretos utilizados.

Tabela 22: Resultados da ANOVA para perda de massa.

VARIÁVEL	GRAUS DE LIBERDADE	MÉDIA QUADRADA	F <sub>CALC</sub>	F <sub>0,05</sub>	SIGNIFICÂNCIA
<i>Relação a/c</i>	1	700,1	188,5	5,3	<i>Significativo</i>
<i>Tipo de conexão</i>	1	0,6	0,2	5,3	Não Significativo
<i>Profundidade de Imersão</i>	1	0,2	0,1	5,3	Não Significativo
<i>Relação a/c*tipo de conexão</i>	1	23,4	6,3	5,3	<i>Significativo</i>
<i>Relação a/c*profundidade de imersão</i>	1	4,3	1,15	5,3	<i>Significativo</i>
<i>Tipo de conexão*profundidade de imersão</i>	1	4,3	1,2	5,3	Não Significativo
<i>Relação a/c*tipo de conexão*profundidade de imersão</i>	1	1,7	0,5	5,3	Não Significativo
<i>Erro</i>	8	3,7			

### 5.3 RESULTADOS DA ETAPA PRINCIPAL

As variáveis estudadas nesta fase da pesquisa, conforme discutido no capítulo 4, foram a voltagem do equipamento (15, 45 e 70V), o tempo total de ensaio (8, 24 e 40h), a profundidade de imersão (CMB e C) e a relação a/c (0,35; 0,5 e 0,7). Para cada combinação foram confeccionados três corpos-de-prova e manteve-se o tipo de conexão, fio sobre barra, como descrito no item anterior.

#### 5.3.1 Análise da Corrente - Etapa Principal

O comportamento médio dos corpos-de-prova, em termos de evolução da corrente, está mostrado nas Figuras 22 a 39 (Dados no ANEXO A), para os vários tempos de ensaio.

A primeira série de resultados, referente ao tempo de **ensaio de 8 h**, com diferentes voltagens e profundidades de imersão, corresponde às figuras de 22 a 27. Observe, nestes gráficos, que, em relação à variação de voltagem, os valores de corrente foram semelhantes entre as relações a/c, para as voltagens de 15 e 45 V em diferentes profundidades de imersão. Já os valores de corrente nos ensaios com 70 Volts são bem superiores aos demais, principalmente quando os cps apresentavam uma relação a/c de 0,7, resultado compatível com as tendências já registradas na etapa anterior da pesquisa.

Outra característica marcante foi que a variação da profundidade de imersão não gerou diferenças consideráveis nas correntes, para ensaios realizados nas mesmas voltagens, embora se note, nos cps com relações a/c maiores, submetidos a maiores voltagens, uma certa tendência de que a imersão menor (até o cobrimento), acarrete correntes maiores.

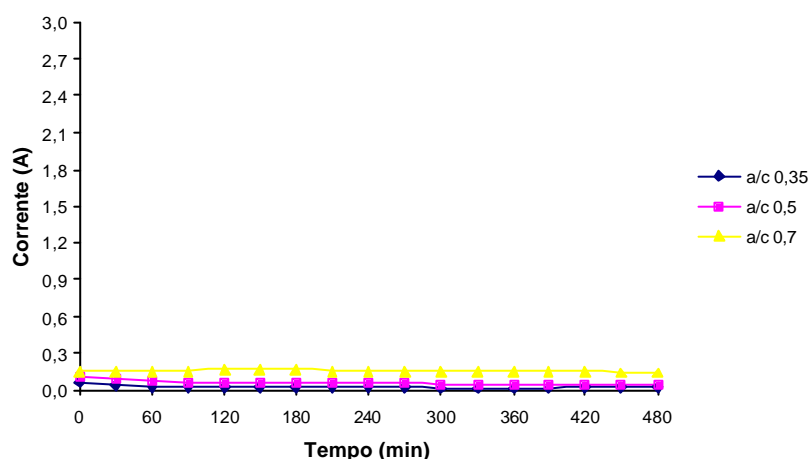


Figura 22: Comportamento médio da corrente total em função do tempo – CMB; 8h; 15V.

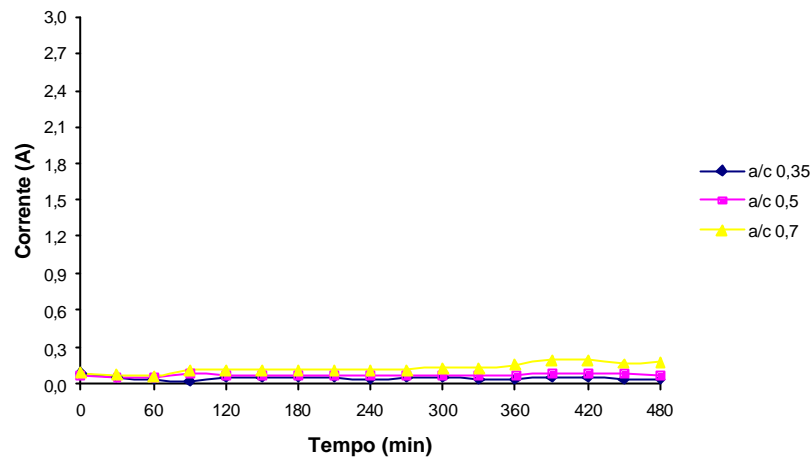


Figura 23: Comportamento médio da corrente total em função do tempo – C; 8h; 15V.

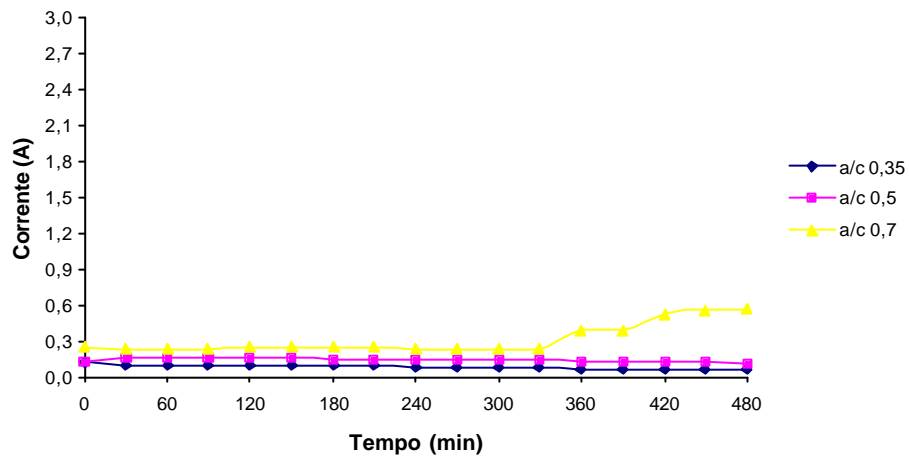


Figura 24: Comportamento médio da corrente total em função do tempo – CMB; 8h; 45V.

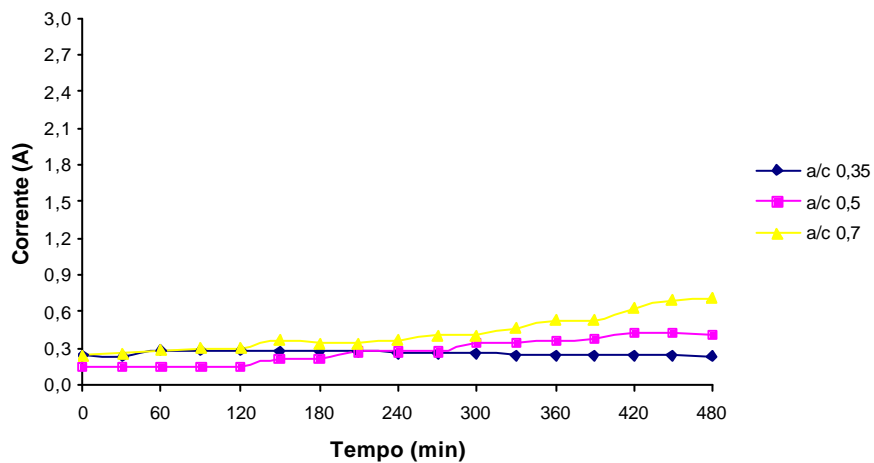


Figura 25: Comportamento médio da corrente total em função do tempo – C; 8h; 45V.



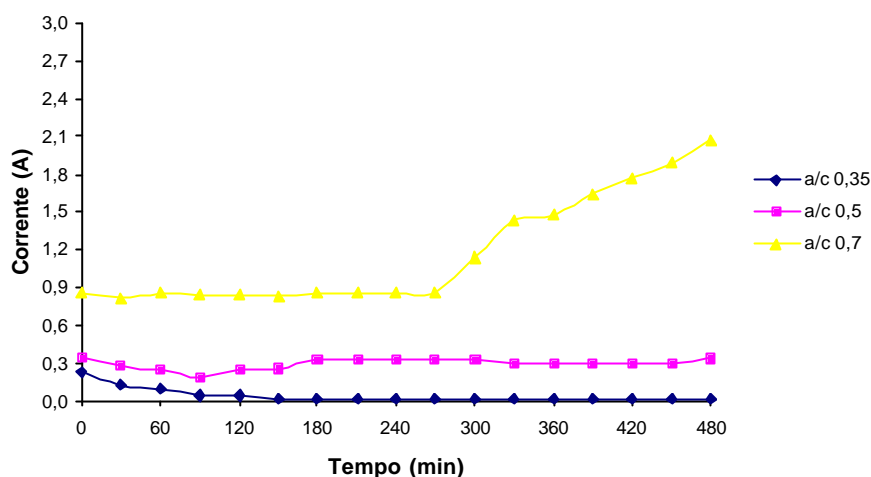


Figura 26: Comportamento médio da corrente total em função do tempo – CMB; 8h; 70V.

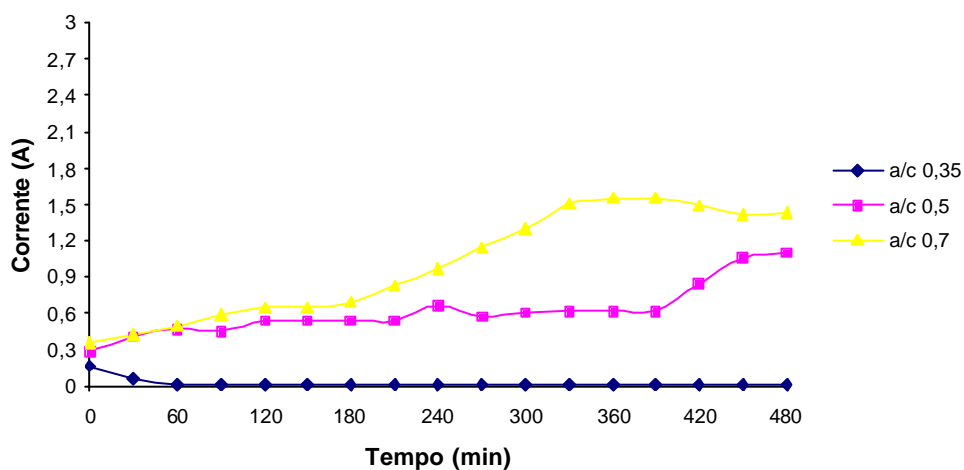


Figura 27: Comportamento médio da corrente total em função do tempo – C; 8h; 70V.

Quanto ao efeito da variação da relação a/c, observa-se que as diferenças entre os cps de resistências distintas começam a se tornar mais sensíveis quando as voltagens de ensaio são de 45 V (como se observa nas figuras, os cps de a/c 0,7 começam a se diferenciar dos demais a partir do 4ª. hora de ensaio, no caso de profundidade de imersão maior. No caso de profundidade de imersão menor, os cps de 0,7 e 0,5 começam a se diferenciar mais cedo, a partir da 3ª. hora) ou de 70 V (em altas voltagens, algumas diferenças são notadas desde o início dos ensaios, se intensificando após 4 horas de ensaio, para os cps de relação a/c 0,70). Acredita-se que estas diferenças ocorreram pela diferença na resistividade dos concretos.

Também chama atenção da relação a/c 0,35 ter permanecido com valores nulos em alguns ensaios, mesmo tendo partido de um valor acima deste. Este fato deve-se a “expulsão” do oxigênio dos poros do concreto pelo início do ensaio.

***Ou seja, pode-se concluir que ensaios de curta duração (8h) só parecem ser eficientes se forem usadas voltagens elevadas (acima de 45V). Mesmo assim, pode ser difícil estimular a corrosão em cps de relação a/c muito baixa (em torno de 0,35).***

Nas Figuras 28 a 33 (Dados no ANEXO A) estão os resultados da segunda série de resultados, referentes ao tempo de **ensaio de 24 h (três períodos de 8 h)**, com diferentes voltagens e profundidades de imersão.

Em relação à variação de voltagem, pode-se verificar que os valores de corrente nos ensaios com 15 V foram ainda baixas, para todas as relações a/c. Quando as voltagens são mais elevadas, as respostas, em termos de aumento de corrente, são mais marcantes.

Todavia, no caso de cps com profundidade de imersão de cobrimento mais meia barra, submetidos a 45 V, as correntes foram muito elevadas. Além disto, as correntes dos cps com relação a/c 0,5 só foram consideráveis neste valor de voltagem. Ou seja, os dados parecem indicar que o processo corrosivo, no período de 24 h, se desenvolveu de forma mais efetiva nos ensaios com tensão de 45 V.

Nos ensaios de 70 V, algum fator parece ter perturbado o ensaio, fazendo com que alguns cps não apresentassem correntes significativas, ao contrário do esperado. Não se encontrou uma explicação técnica clara para esta ocorrência, recomendando-se que sejam repetidos ensaios deste tipo para verificar se a tendência se repete.

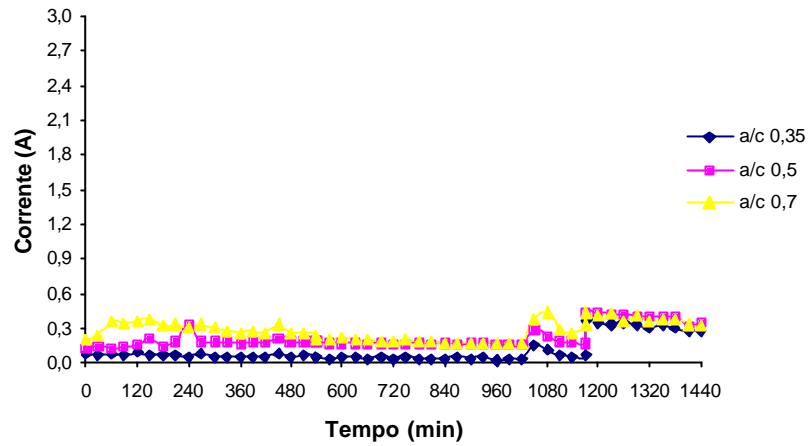


Figura 28: Comportamento médio da corrente total em função do tempo – CMB; 24h; 15V.

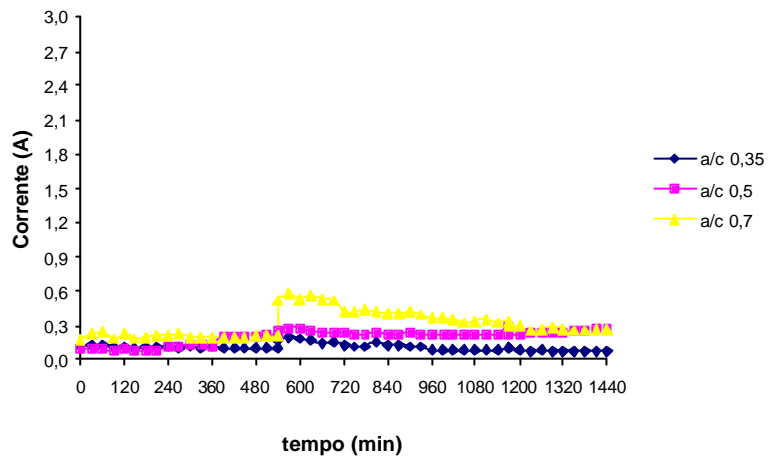


Figura 29: Comportamento médio da corrente total em função do tempo – C; 24h; 15V.

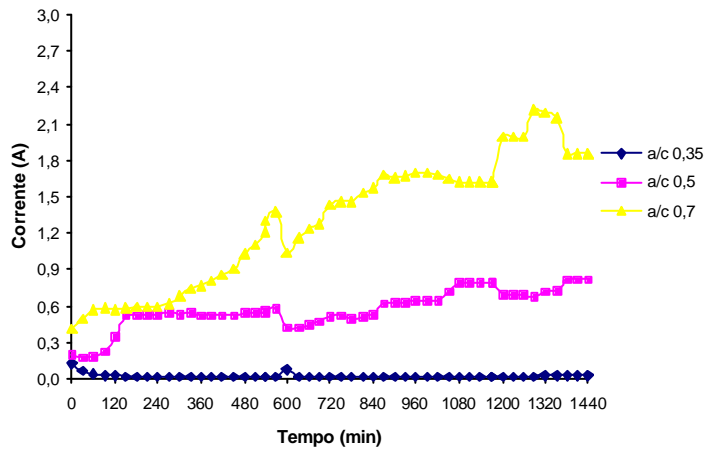


Figura 30: Comportamento médio da corrente total em função do tempo – CMB; 24h; 45V.

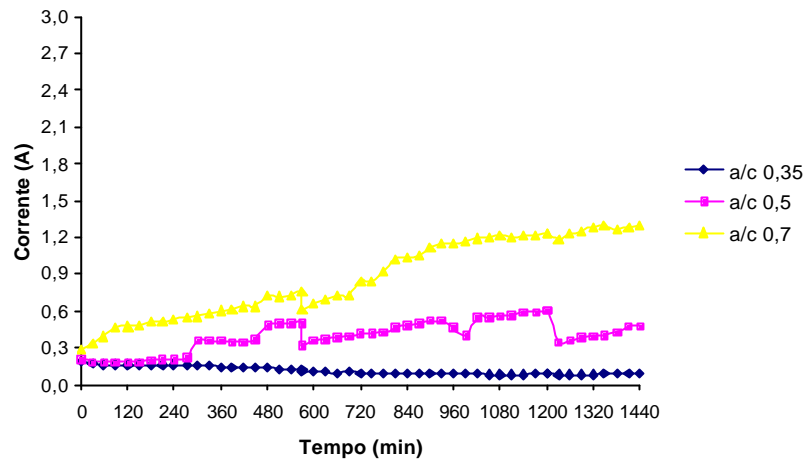


Figura 31: Comportamento médio da corrente total em função do tempo – C; 24h; 45V.

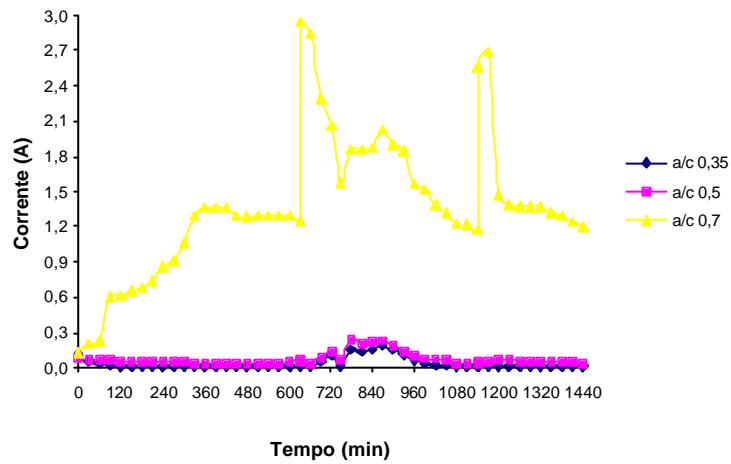


Figura 32: Comportamento médio da corrente total em função do tempo – CMB; 24h; 70V.

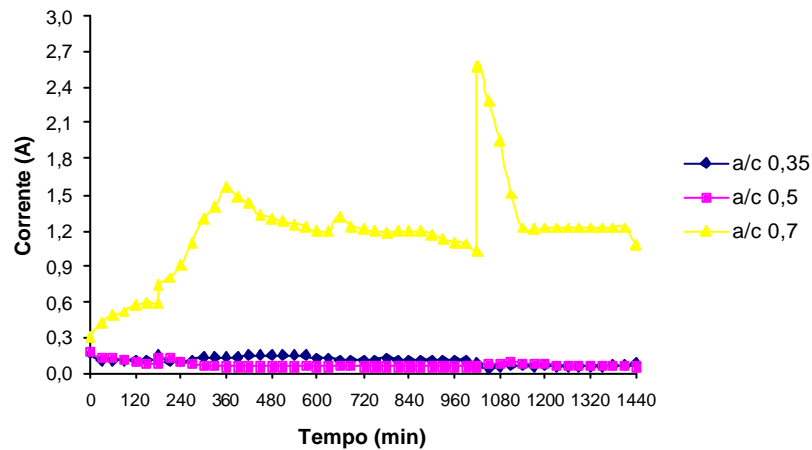


Figura 33: Comportamento médio da corrente total em função do tempo – C; 24h; 70V.

Em relação à profundidade de imersão, observou-se uma razoável semelhança entre os resultados obtidos nas duas profundidades de imersão, em todas as voltagens.

Somente no caso da voltagem de 45V, os cps submetidos a uma profundidade de imersão maior (cobrimento mais meia barra) desenvolveram correntes superiores aos de profundidade de imersão menor (só cobrimento) com exceção da relação a/c 0,35.

Quanto aos efeitos da variação da relação água/cimento, verifica-se que, nas voltagens de 45 V e 70 V, os cps com relação a/c 0,70 apresentaram intensidades de corrente bem maiores que os demais, desde o início dos ensaios. Nos ensaios com estímulo de 45 V, os cps com relação a/c 0,50 desenvolveram correntes consideravelmente maiores que os de relação a/c 0,35, porém inferiores ao de relação a/c 0,70.

Novamente observa-se a tendência a zero da relação a/c 0,35 na maioria dos ensaios e da relação a/c 0,5 nos ensaios de 70V. E também neste caso, acredita-se que este fenômeno ocorre pela ausência de oxigênio nos poros do concreto.

***Ou seja, pode-se concluir que os ensaios de média duração (24h), com voltagem de 45 V, conseguem provocar o desenvolvimento de processos de corrosão intensos em cps com relação a/c acima de 0,50. O uso de voltagens baixas (15V) parece não ser recomendável, pois a mesma não estimula o desenvolvimento de um processo de corrosão intensa, reduzindo as diferenças entre os cps, o que pode mascarar o esperado. Já o efeito de voltagens altas (70V) necessitam ser melhor investigadas, pois os dados coletados neste trabalho mostraram tendências não esperadas. O tempo de 24 h parece suficiente para estimular corrosões intensas se a voltagem for média, mas a segmentação do ensaio causa picos de corrente. Em todos os casos, é difícil estimular a corrosão em cps de relação a/c baixa (0,35), neste período.***

Nas Figuras 34 a 39 (Dados no ANEXO A) podem ser observados os resultados da terceira série de cps ensaiados, referentes ao tempo de ensaio de 40 h (cinco períodos de 8 h), com diferentes voltagens e profundidades de imersão. Observa-se que o comportamento, em geral, é muito similar ao registrado nos ensaios de 24 h. Em relação à *variação de voltagens*, é interessante notar que, nos ensaios com voltagens médias (45V), as intensidades de corrente tendem a se estabilizar após as

24 h (ou 1440 minutos), em cerca de 1,3 a 1,4 A, no caso de profundidade de imersão até cobrimento mais meia barra, e de 1,2 A, no caso de profundidade de imersão até cobrimento e relação a/c 0,5.

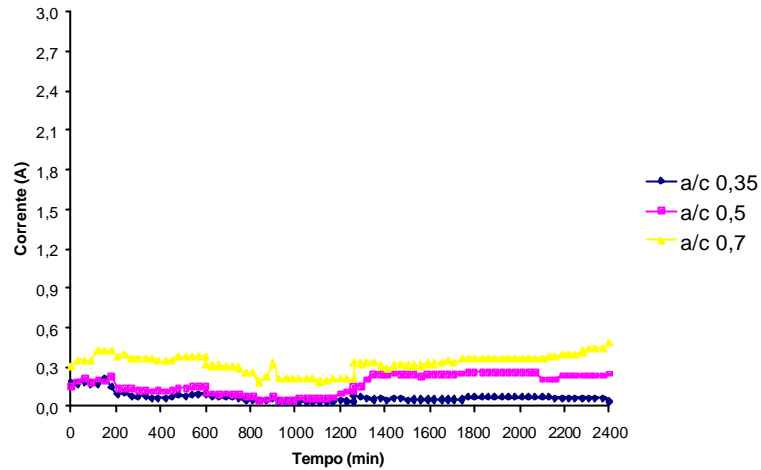


Figura 34: Comportamento médio da corrente total em função do tempo – CMB; 40h; 15V.

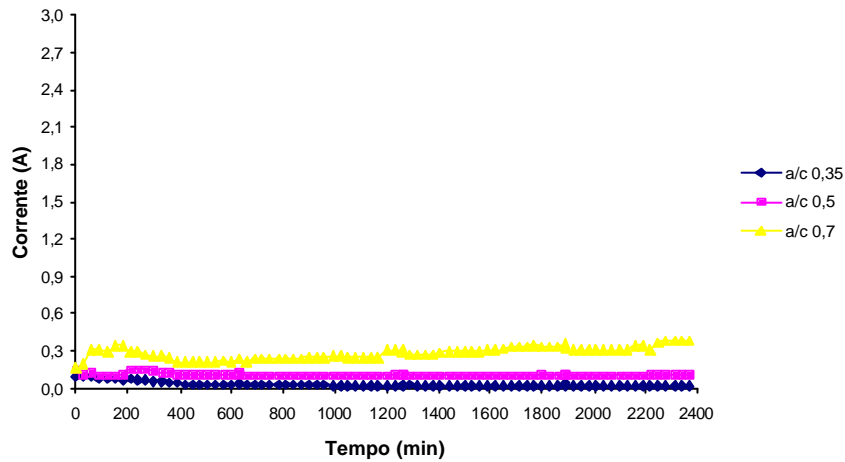


Figura 35: Comportamento médio da corrente total em função do tempo – C; 40h; 15V.

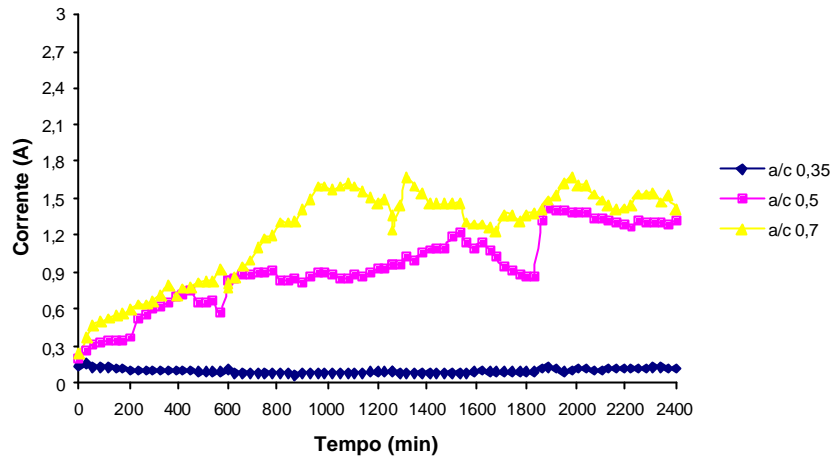


Figura 36: Comportamento médio da corrente total em função do tempo – CMB; 40h; 45V.

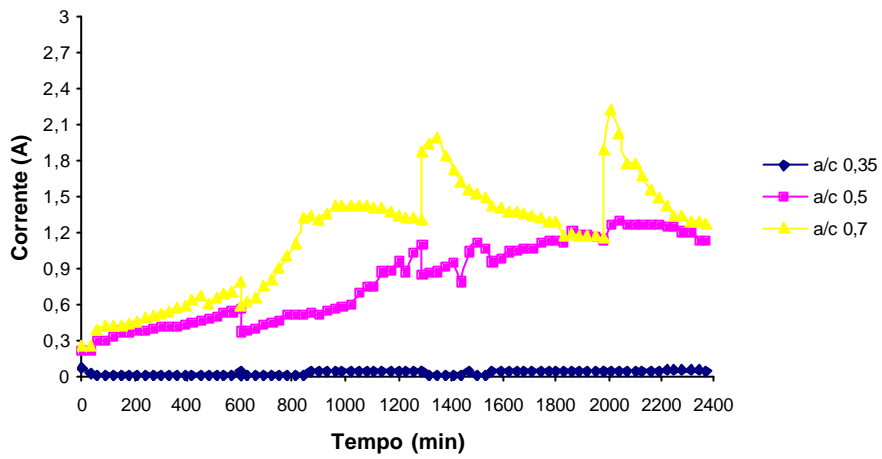


Figura 37: Comportamento médio da corrente total em função do tempo – C; 40h; 45V.

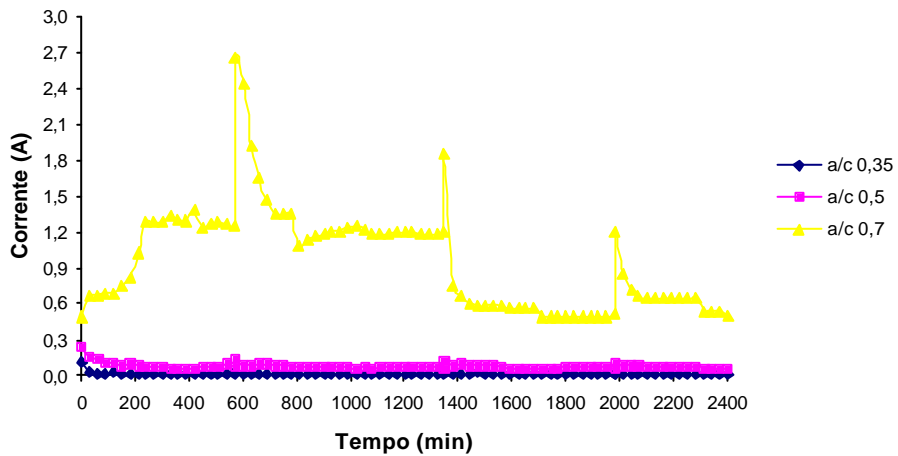


Figura 38: Comportamento médio da corrente total em função do tempo – CMB; 40h; 70V.

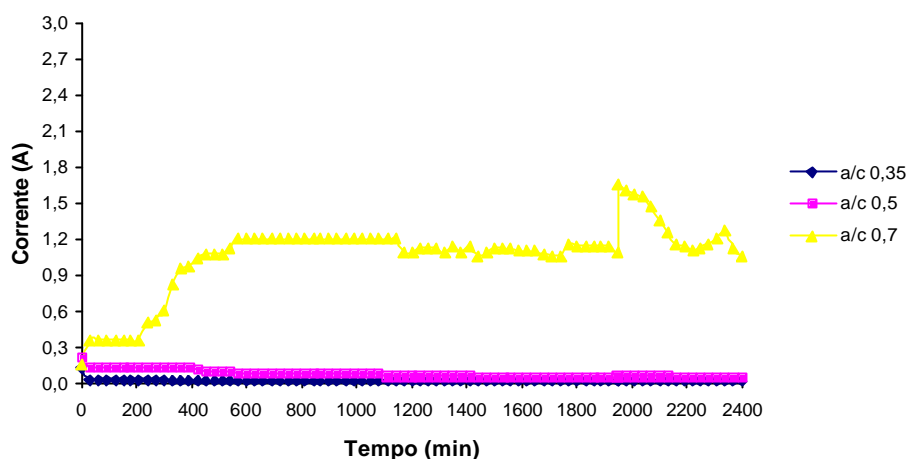


Figura 39: Comportamento médio da corrente total em função do tempo – C; 40h; 70V.

Analisando a variação da voltagem, nos ensaios com 70V notam-se o mesmo problema observado anteriormente, referente à intensidade de corrente praticamente nula nos cps de 0,50 e 0,35, que conclui-se ser resultado do mesmo fator mencionado anteriormente (falta de  $O_2$ ). A voltagem de 45V teve comportamento muito semelhante aos ensaios de média duração, onde os concretos com menores resistência (a/c 0,5 e 0,7) apresentaram crescimento de corrente, contrario do concreto de melhor resistência que se estabilizou próximo ao zero.

Em geral, quanto à profundidade de imersão, as diferenças foram pequenas. Somente nos ensaios com 70V, os cps com relação 0,70 e profundidade de imersão maior registraram picos de correntes um pouco superiores.

Quanto à variação da relação a/c, mais uma vez se observa claramente que os cps com relação a/c 0.35 são muito pouco sensíveis à corrosão, sob qualquer condição de ensaio. Já os cps com relação a/c de 0,70 sempre desenvolvem correntes de corrosão maiores, sendo possível verificar diferenças de comportamento até na voltagem de 15V.

***Ou seja, pode-se concluir que os ensaios de longa duração (40h) não apresentam grandes vantagens em relação aos ensaios de média duração (24h), a não ser que se queira determinar, com maior clareza, qual o patamar de intensidade de corrente de um certo tipo de corpo-de-prova. Além disto, no caso de voltagens menores (15V), tempos totais de ensaio maiores são***



**necessários para permitir que, pelo menos, os cps de maior relação a/c comecem a se diferenciar dos demais.**

### 5.3.2 Análise da Perda de Massa - Etapa Principal

Os resultados de perda de massa estão mostrados nas Figuras 55 a 57 (Dados no ANEXO B), organizados em função dos tempos de ensaio utilizados nesta pesquisa.

#### Resultados dos Ensaio de Curta Duração

Na Figura 40 são mostrados os resultados dos ensaios de curta duração (8 h). Verifica-se que a perda de massa foi crescendo com o aumento da relação a/c, havendo um grande salto nos cps confeccionados com relação a/c 0,7, submetidos a 70 V e imersão maior, e nos cps de relação a/c 0,70 e 0,50, submetidos a 70 V e imersão menor. Nos ensaios de cps com relação a/c 0,35 as perdas de massa foram pequenas, sendo quase nulas no caso de imersão maior. Da mesma forma, nos ensaios com voltagem de 15 V, as perdas de massa foram reduzidas, todas inferiores a 0,5%. De forma geral, a imersão maior, ou seja, com menor acesso de oxigênio, conduziu a perdas de massa menores.

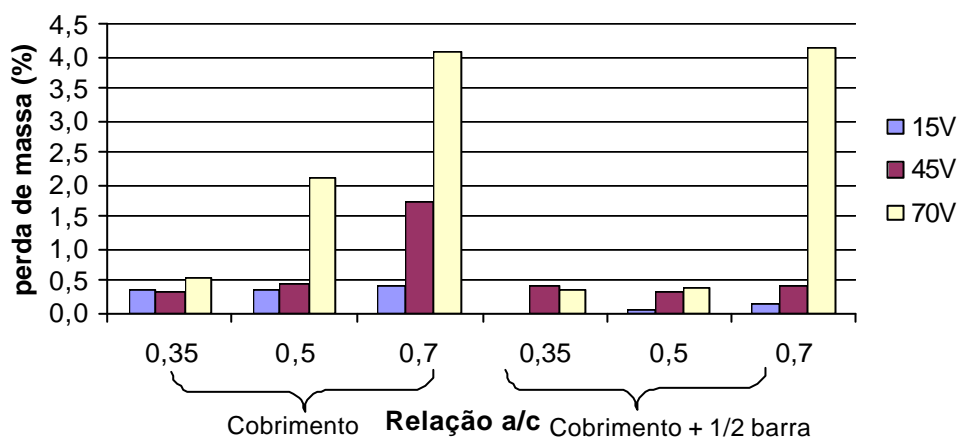


Figura 40: Perda de massa em relação aos parâmetros em estudo – tempo 8h

Nas Tabelas 23 a 25 são mostrados alguns registros fotográficos dos corpos-de-prova ao final dos ensaios de 8h em 15, 45 e 70V, respectivamente.

Como se pode verificar na Tabela 23, a aparência dos cps após o ensaio com estímulo de 15V é bastante boa. Pode-se observar que nenhum deles apresentava fissuras marcantes ou sinais de produtos de corrosão. Aliás, nem na solução salina foram notados sinais de produtos de corrosão. Não se notam diferenças significativas entre cps com diferentes relações a/c ou expostos em profundidades de imersão distintas.

Examinando as imagens mostrados na Tabela 24, relativas aos cps após 8h de ensaio sob voltagem de 45 V, verifica-se que já se notam sinais de corrosão, especialmente nos cps com relação 0,7 e menor profundidade de imersão.

Já os corpos-de-prova submetidos, durante 8h, a uma diferença de tensão de 70V (Tabela 25), apresentaram sinais de corrosão, especialmente na relação a/c 0,7. Os cps de relação a/c 0,5 apresentaram principalmente fissuras e o lote de cps de relação a/c 0,35 não apresenta sinais de produto de corrosão.

Tabela 23: Corpos-de-prova submetidos a 8h de ensaio a 15V





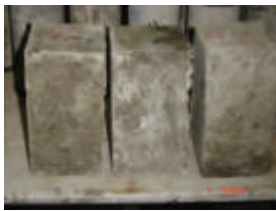

VOLTAGEM: 15V	RELAÇÃO A/C		
	0,35	0,5	0,7
Até cobrimento mais meia barra			
Até cobrimento			

Tabela 24: Corpos-de-prova submetidos a 8h de ensaio a 45V






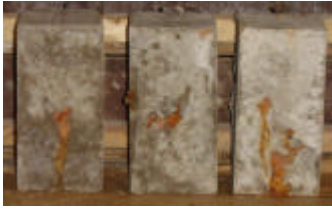





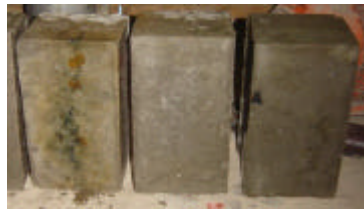
VOLTAGEM: 45V	RELAÇÃO A/C		
	0,35	0,5	0,7
Até cobrimento mais meia barra			
Até cobrimento			

Tabela 25: Corpos-de-prova submetidos a 8h de ensaio a 70V

VOLTAGEM: 70V	RELAÇÃO A/C		
	0,35	0,5	0,7
Até cobrimento mais meia barra			
Até cobrimento			

Ao realizar uma comparação entre as análises de corrente, de perda de massa e visual dos cps (Tabela 26) notamos uma boa similaridade dos resultados. Ou seja, os cps apresentaram baixos valores de corrente, tiveram pouca perda de massa e uma análise visual sem sinais de corrosão. O contrário também foi verificado, valores mais altos de corrente, com maiores perdas de massa e sinais do produto de corrosão no concreto. O comportamento da profundidade de imersão não permaceu

fixo entre as diferenças entre as amostras, comportando-se em alguns casos com maior perda de massa e maiores valores de corrente na maior profundidade e em maiores relações a/c e em outros casos ao contrario.

Tabela 26: Resultados ensaio de curta duração (8h)

AMOSTRA	PICO MÁXIMO DE CORRENTE (A)	PERDA DE MASSA (%)	ASPECTO VISUAL (quanto ao produto de corrosão)
<i>0,35; 15V; CMB</i>	0,07	0	Sem pontos
<i>0,35; 15V; C</i>	0,09	0,36	Sem pontos
<i>0,5; 15V; CMB</i>	0,1	0,07	Sem pontos
<i>0,5; 15V; C</i>	0,09	0,36	Sem pontos
<i>0,7; 15V; CMB</i>	0,17	0,15	Sem pontos
<i>0,7; 15V; C</i>	0,2	0,41	Sem pontos
<i>0,35; 45V; CMB</i>	0,12	0,43	Sem pontos
<i>0,35; 45V; C</i>	0,28	0,32	Sem pontos
<i>0,5; 45V; CMB</i>	0,17	0,33	Sem pontos
<i>0,5; 45V; C</i>	0,43	0,46	Sem pontos, com fissuras
<i>0,7; 45V; CMB</i>	0,58	0,43	Poucos pontos, com fissuras
<i>0,7; 45V; C</i>	0,71	1,73	Poucos pontos
<i>0,35; 70V; CMB</i>	0,23	0,36	Sem pontos
<i>0,35; 70V; C</i>	0,17	0,55	Sem pontos
<i>0,5; 70V; CMB</i>	0,34	0,4	Sem pontos
<i>0,5; 70V; C</i>	1,06	2,01	Sem pontos, com fissuras
<i>0,7; 70V; CMB</i>	2,07	4,16	Poucos pontos, com fissuras
<i>0,7; 70V; C</i>	1,55	4,08	Poucos pontos, com fissuras

### Resultados dos Ensaios de Média Duração

Na Figura 41 estão os resultados médios de perda de massa dos ensaios de média duração (24 h). Verifica-se que a perda de massa foi bem acentuada na relação a/c

0,7, nas voltagens 45 e 70V, para ambos níveis de solução de imersão. Além destas, foram registradas perdas de massa consideráveis nos cps com relação a/c 0,5, estimulados com diferença de voltagem de 45 V.

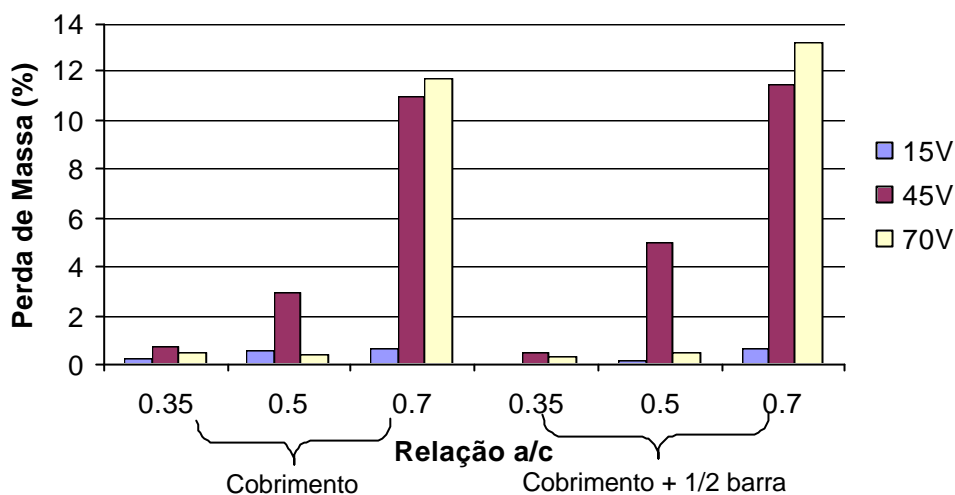


Figura 41: Perda de massa em relação aos parâmetros em estudo – tempo 24h

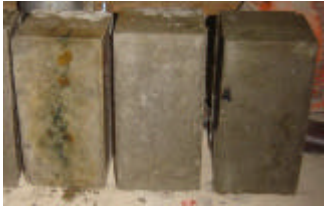
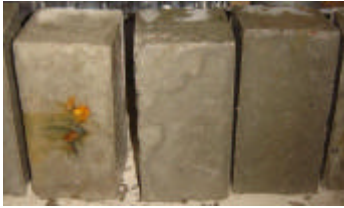




Além disto, é possível notar que todos os cps com relação a/c 0,35 apresentaram resultados de perda de massa muito pequenos, sempre inferiores a 0,5%. Isto também vale para todos os testes realizados com tensão de estímulo de 15 V, como foi observado no ensaio de curta duração. Pode-se, ainda, identificar uma leve tendência de que as perdas de massa sejam maiores nos cps com imersão maior, ao contrário do que se verificava no ensaio de curta duração. Ou seja, o alongamento do período do ensaio parece compensar a dificuldade de acesso do oxigênio.

Nas Tabelas 27 a 29 são apresentados os registros fotográficos dos cps, efetuados ao final dos ensaios de média duração.

Na Tabela 27, correspondente aos cps submetidos a uma diferença de potencial de 15 V, observa-se que podem ser identificado sinais de corrosão em cps de todas as relações a/c. A única exceção parece ser a série de cps de relação a/c 0,35, com profundidade de imersão menor, na qual não são vistos sinais externos de produtos de corrosão. Cabe salientar que, apesar da perda de peso ser abaixo de 1% neste

nível de tensão, já se notam sinais claros de fissuração e presença de produtos de corrosão nos cps confeccionados com relação a/c de 0,70.

Tabela 27: Corpos-de-prova submetidos a 24h de ensaio a 15V

VOLTAGEM: 15V	RELAÇÃO A/C		
	0,35	0,5	0,7
Até cobrimento mais meia barra			
Até cobrimento			

Na Tabela 28, que contém os dados de cps ensaiados por 24 h a 45V, verifica-se que a aparência dos cps já mostra sinais claros de deterioração, especialmente quando o concreto foi confeccionado com relações a/c de 0,5 e 0,7. Nota-se um grande acúmulo de produtos de corrosão em torno da fissura, alguns de cor bem escura. Apenas nos cps com relação a/c 0,35 os vestígios de corrosão são escassos. Quanto à profundidade de imersão, observa-se uma leve tendência dos cps mais imersos apresentarem maiores sinais de deterioração.

Nos ensaios de 24h, com estímulo de 70 V, a aparência dos cps no final do ensaio, mostrada na Tabela 29, indo de encontro ao comportamento observado na evolução da corrente de corrosão. Pode-se notar nas imagens da Tabela que somente nos cps de relação a/c 0,70 é que a presença de produtos de corrosão é marcante. As observações visuais da solução de ataque ao final do ensaio indicam, todavia, que mesmo no reservatório dos cps de relação a/c 0,35, a água já mostrava alguns indícios de produtos de corrosão. Novamente, os cps com imersão maior mostram sinais levemente mais intensos de degradação.

Tabela 28: Corpos-de-prova submetidos a 24h de ensaio a 45V





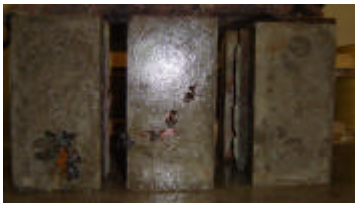







VOLTAGEM: 45V	RELAÇÃO A/C		
	0,35	0,5	0,7
Até cobrimento mais meia barra			
Até cobrimento			

Tabela 29: Corpos-de-prova submetidos a 24h de ensaio a 70V

VOLTAGEM: 70V	RELAÇÃO A/C		
	0,35	0,5	0,7
Até cobrimento mais meia barra			
Até cobrimento			

Como feito no ensaio de curta duração, ao comparar as respostas de análise de corrente, perda de massa e análise visual (Tabela 30) os resultados permanecem de acordo com os ensaios de 8h, onde quanto maiores os valores de corrente, maiores perdas de massa e mais produtos de corrosão são visualizados. Porém neste tempo de ensaio observa-se que o comportamento dos cps submetidos a 45V

apresentaram valores de corrente e perdas de massa superiores aos cps submetidos a 70V, nas relações a/c 0,35 e 0,5.

Tabela 30: Resultados ensaio de média duração (24h)

AMOSTRA	PICO MÁXIMO DE CORRENTE (A)	PERDA DE MASSA (%)	ASPECTO VISUAL (quanto ao produto de corrosão)
0,35; 15V; CMB	0,35	0,04	Poucos pontos
0,35; 15V; C	0,16	0,28	Sem pontos
0,5; 15V; CMB	0,44	0,19	Poucos pontos
0,5; 15V; C	0,28	0,58	Poucos pontos
0,7; 15V; CMB	0,44	0,68	Poucos pontos, com fissuras
0,7; 15V; C	0,57	0,69	Poucos pontos, com fissuras
0,35; 45V; CMB	0,13	0,47	Sem pontos
0,35; 45V; C	0,18	0,77	Sem pontos
0,5; 45V; CMB	0,82	4,97	Muitos pontos, com fissuras
0,5; 45V; C	0,61	2,97	Poucos pontos, com fissuras
0,7; 45V; CMB	2,21	11,45	Muitos pontos, com fissuras
0,7; 45V; C	1,29	10,96	Muitos pontos, com fissuras
0,35; 70V; CMB	0,19	0,33	Sem pontos
0,35; 70V; C	0,16	0,52	Sem pontos
0,5; 70V; CMB	0,24	0,5	Sem pontos
0,5; 70V; C	0,17	0,43	Poucos pontos
0,7; 70V; CMB	2,95	13,29	Muitos pontos, com fissuras
0,7; 70V; C	2,28	11,73	Muitos pontos, com fissuras

### Resultados dos Ensaios de Longa Duração

Os resultados, em termos de perda de massa, dos ensaios de longa duração (40h) estão apresentados na Figura 42. Observa-se que os resultados da relação a/c 0,7 apresentaram comportamentos similares na voltagem de 15V para ambas as



situações de imersão. Nas outras voltagens estudadas, todavia, o comportamento se alterou. Para voltagens de 45V os resultados de perda de massa foram bem superiores quando a imersão foi maior enquanto que, para voltagens de estímulo de 70 V, as perdas de massa foram maiores quando a imersão ocorria até o cobrimento.

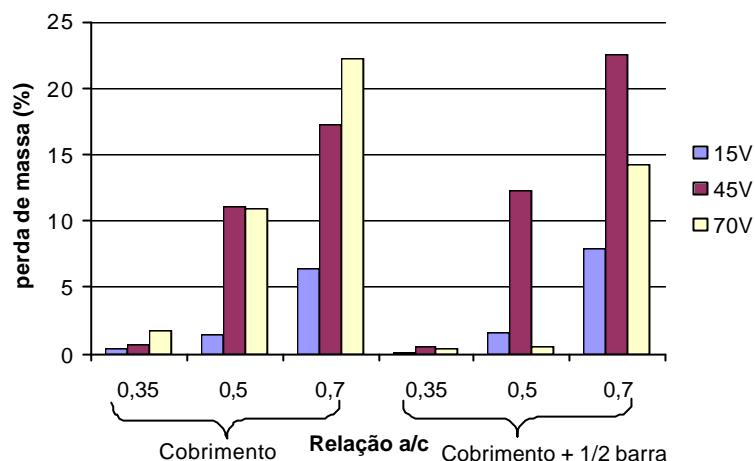


Figura 42: Perda de massa em relação aos parâmetros em estudo – tempo 40h

O desempenho dos cps com relação a/c 0,5 foi bastante parecido quando submetidos a tensões de estímulo de 15 e 45V, para ambas profundidades de imersão. Quando a tensão se elevava para 70V, os cps com imersão até o meio da barra apresentaram um comportamento anômalo, com perda de massa praticamente nula. Diante da ausência de explicações plausíveis, especula-se que tenha havido algum problema de conexão elétrica para justificar esta brusca mudança de comportamento. É interessante notar que, em geral, os maiores valores de perda de massa foram registrados nos cps estimulados com 45 V.


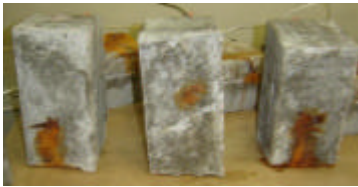




Adicionalmente, como nos ensaios de menor duração, verifica-se que os cps com relação a/c 0,35 apresentaram perdas de massa muito baixas, sendo o maior valor de perda de massa (1,71%) registrado no cp submetido a uma voltagem de 70V, com imersão somente até o cobrimento.

Em geral, os cps submetidos a uma profundidade de imersão menor apresentaram maiores perdas de massa, porém houveram algumas exceções nos cps com relação a/c 0,5.

As Tabelas 31, 32 e 33 apresentam fotografias dos estados finais dos cps dos ensaios de longa duração.







Na Tabela 31 observa-se os cps submetidos a 40h de ensaio a 15V. Pode-se notar a existência clara de sinais de corrosão nos cps com relação a/c de 0,5 e 0,7, o que não acontece nos cps de relação a/c 0,35.

Tabela 31: Corpos-de-prova submetidos a 40h de ensaio a 15V

VOLTAGEM: 15V	RELAÇÃO A/C		
	0,35	0,5	0,7
Até cobrimento mais meia barra			
Até cobrimento			

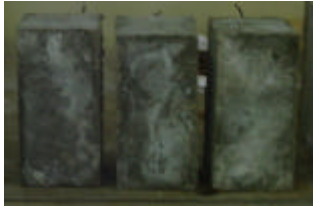

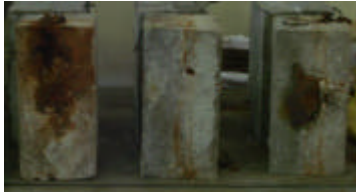



Na Tabela 32 pode-se observar a aparência dos cps ao final do ensaio de 40h a 45V. Praticamente todos eles apresentam sinais claros de corrosão, que parecem mais intensos nos cps mais imersos. Cabe salientar, todavia, que as diferenças são suaves. O acúmulo de produtos de corrosão nos cps com relação 0,5 e 0,7 é muito intenso. Nota-se também que apesar de muito próximas as perdas de massa da relação a/c 0,35 nas diferentes profundidades de imersão, a análise visual não demonstrou similaridade nas figuras, pois na menor imersão não identifica-se produtos de corrosão.

Tabela 32: Corpos-de-prova submetidos a 40h de ensaio a 45V

VOLTAGEM: 45V	RELAÇÃO A/C		
	0,35	0,5	0,7
Até cobrimento mais meia barra			
Até cobrimento			

As imagens dos cps ensaiados por 40h a 70V podem ser vistas na Tabela 33. Ao contrário do esperado, as degradações são menores que as registradas a 45V. Isto vai de encontro aos resultados de intensidade de corrente e perda de massa. Quanto à profundidade de imersão, verifica-se que, em geral, os cps com menor imersão apresentaram aparência mais degradada.

Tabela 33: Corpos-de-prova submetidos a 40h de ensaio a 70V

VOLTAGEM: 70V	RELAÇÃO A/C		
	0,35	0,5	0,7
Até cobrimento mais meia barra			
Até cobrimento			

Na Tabela 34 estão apresentados os resultados para este tempo de ensaio, para efeito de comparação geral, como foi realizado para os outros tempos. Como no ensaio de média duração, a voltagem de 45 V apresentou altos valores de corrente e perda de massa para as relações 0,5 e 0,7, estes valores são equivalentes somente em comparação a relação a/c 0,7 a 70V.

Tabela 34: Resultados ensaio de longa duração (40h)

<b>AMOSTRA</b>	<b>PICO MÁXIMO DE CORRENTE (A)</b>	<b>PERDA DE MASSA (%)</b>	<b>ASPECTO VISUAL (quanto ao produto de corrosão)</b>
<i>0,35; 15V; CMB</i>	0,21	0,11	Sem pontos
<i>0,35; 15V; C</i>	0,1	0,36	Sem pontos
<i>0,5; 15V; CMB</i>	0,26	1,59	Poucos pontos, com fissuras
<i>0,5; 15V; C</i>	0,15	1,55	Muitos pontos, com fissuras
<i>0,7; 15V; CMB</i>	0,48	7,94	Muitos pontos, com fissuras
<i>0,7; 15V; C</i>	0,39	6,35	Muitos pontos, com fissuras
<i>0,35; 45V; CMB</i>	0,16	0,5	Poucos pontos
<i>0,35; 45V; C</i>	0,07	0,67	Sem pontos
<i>0,5; 45V; CMB</i>	1,42	12,29	Muitos pontos, com fissuras
<i>0,5; 45V; C</i>	1,27	11,2	Muitos pontos, com fissuras
<i>0,7; 45V; CMB</i>	1,67	22,59	Muitos pontos, com fissuras
<i>0,7; 45V; C</i>	2,23	17,19	Muitos pontos, com fissuras
<i>0,35; 70V; CMB</i>	0,11	0,4	Sem pontos
<i>0,35; 70V; C</i>	0,12	1,71	Poucos pontos
<i>0,5; 70V; CMB</i>	0,24	0,55	Sem pontos
<i>0,5; 70V; C</i>	0,21	10,99	Muitos pontos
<i>0,7; 70V; CMB</i>	2,66	14,31	Muitos pontos, com fissuras
<i>0,7; 70V; C</i>	1,67	22,28	Muitos pontos, com fissuras

### 5.3.3 Análise ANOVA - Etapa Principal

Novamente, foi utilizado o *software* estatístico Statistica, versão 6.1 para fazer comparações entre os grupos de variáveis, baseado na distribuição de Fisher (F), com nível de significância adotado de 95%.

A Tabela 35 mostra um sumário dos resultados da ANOVA. Verifica-se que todas as variáveis de estudo mostraram efeito significativo sobre a perda de massa, sendo que a mais influente foi à relação a/c, seguida pelo tempo. A variável menos influente foi à profundidade de imersão, já esperado como na etapa anterior não foi significativa quando realizados testes entre outras variáveis.

Todas as interações também foram significativas, indicando que o comportamento do fenômeno se altera quando os parâmetros se combinam, como foi evidenciado por alguns dos resultados experimentais já discutidos. Esta amplitude de efeitos justifica a decisão que subsidia este trabalho, de desenvolver uma análise ampla do comportamento deste tipo de ensaio.

Tabela 35: Resultados da ANOVA para perda de massa

VARIÁVEL	GRAUS DE LIBERDADE	MÉDIA QUADRADA	F <sub>CALC</sub>	F <sub>0,05</sub>	SIGNIFICÂNCIA
<i>Relação a/c</i>	2	863,421	8184,09	4,46	<i>Significativo</i>
<i>Voltagem</i>	2	288,344	2733,12	4,46	<i>Significativo</i>
<i>Tempo</i>	2	565,620	5361,32	4,46	<i>Significativo</i>
<i>Prof. de Imersão</i>	1	11,729	111,17	5,32	<i>Significativo</i>
<i>a/c*voltagem</i>	4	114,811	1088,26	3,84	<i>Significativo</i>
<i>a/c*tempo</i>	4	195,533	1853,39	3,84	<i>Significativo</i>
<i>Voltagem*tempo</i>	4	60,646	574,85	3,84	<i>Significativo</i>
<i>a/c*Prof. de Imersão</i>	2	2,823	26,75	4,46	<i>Significativo</i>
<i>Volt.*Prof.imersão</i>	2	35,705	338,44	4,46	<i>Significativo</i>
<i>Tempo*Prof.imersão</i>	2	8,321	78,88	4,46	<i>Significativo</i>
<i>a/c*Volt.*tempo</i>	8	22,425	212,56	3,44	<i>Significativo</i>
<i>a/c*Volt.*Prof.imersão</i>	4	6,799	64,45	3,84	<i>Significativo</i>
<i>a/c*Tempo*Prof.imersão</i>	4	4,221	40,01	3,84	<i>Significativo</i>
<i>Volt.*tempo*Prof.imersão</i>	4	29,586	280,43	3,84	<i>Significativo</i>
<i>a/c*volt.*tempo*Prof.imersão</i>	8	5,959	56,49		<i>Significativo</i>
<i>Erro</i>					

As Figuras 43 a 46 mostram os efeitos de cada uma das variáveis de estudo de forma isolada.

Observa-se, de forma geral, que o aumento da relação a/c e do tempo de ensaio tendem a favorecer o incremento das perdas de massa. A redução da profundidade de imersão também leva a uma pequena redução da perda de massa comparada com a imersão maior. A variável voltagem teve seu ponto mais alto, em perda de massa, a 45V, devido aos resultados vistos anteriormente.

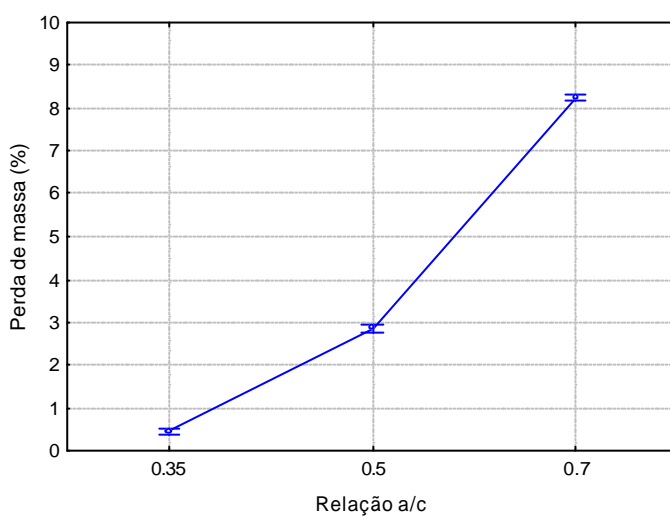


Figura 43: Análise estatística da relação a/c em função da perda de massa.

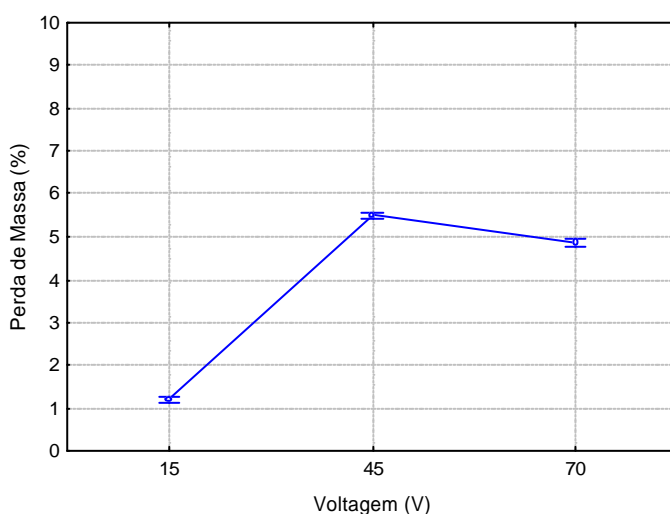


Figura 44: Análise estatística da voltagem do equipamento em função da perda de massa.

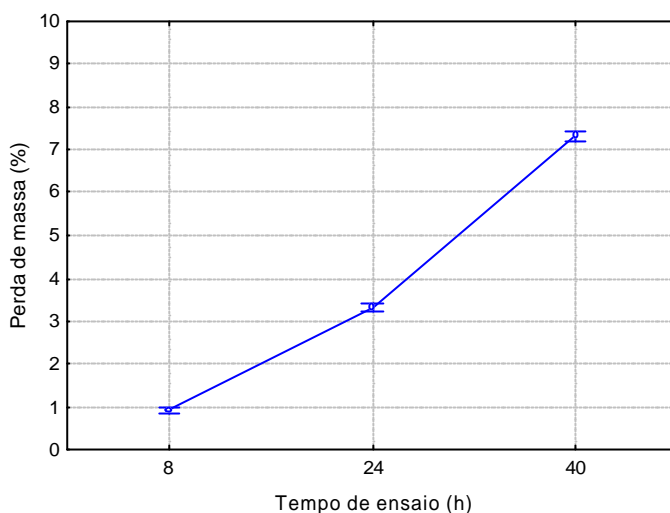


Figura 45: Análise estatística do tempo de ensaio em função da perda de massa.

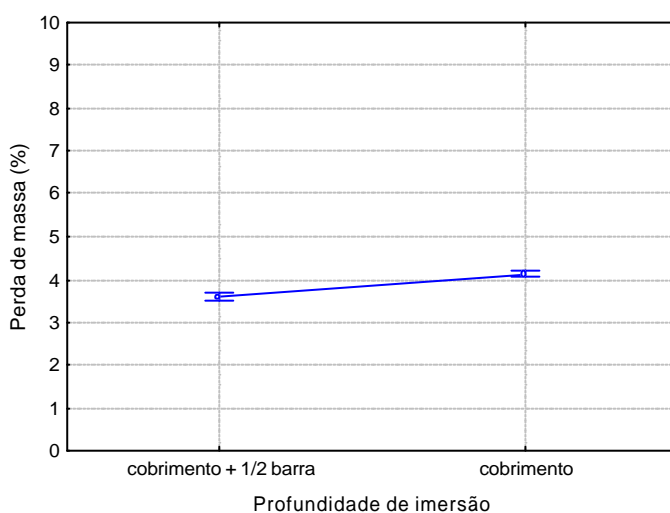


Figura 46: Análise estatística da profundidade de imersão do cp em função da perda de massa.

As Figuras 47 a 49 mostram algumas das interações binárias significativas que mostraram as tendências mais interessantes.

Ao examinar a Figura 47 verifica-se que a curva de evolução da perda de massa em função da relação  $a/c$  se altera levemente nas diferentes voltagens. O comportamento das curvas para as voltagens de 45 e 70 V é razoavelmente parecido, sendo que existe uma certa aceleração de perda de massa quando cps de 0,70 são expostos à voltagem mais elevada, ao contrário do que acontece na voltagem mais baixa.

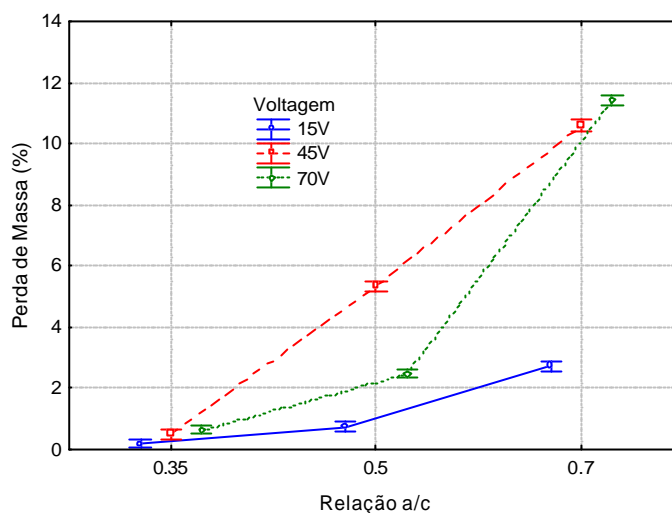


Figura 47: Análise estatística da interação entre a relação a/c e a tensão do equipamento em função da perda de massa

Na Figura 48 observa-se que, embora a interação relação a/c x profundidade de imersão seja significativa, não existem grandes diferenças de comportamento, sendo a perda de massa menor quando a profundidade é menor. Já a Figura 49 mostra que quando a tensão se eleva, as diferenças entre as profundidades de imersão ficam mais intensas.

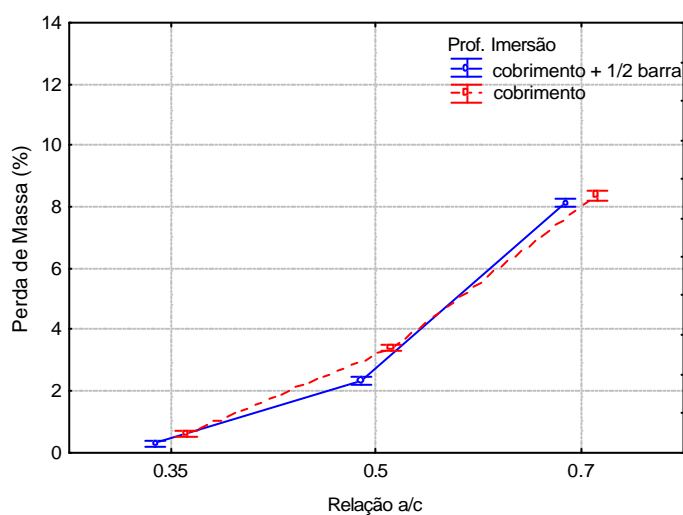


Figura 48: Análise estatística da interação entre a relação a/c e a profundidade de imersão dos cps em função da perda de massa



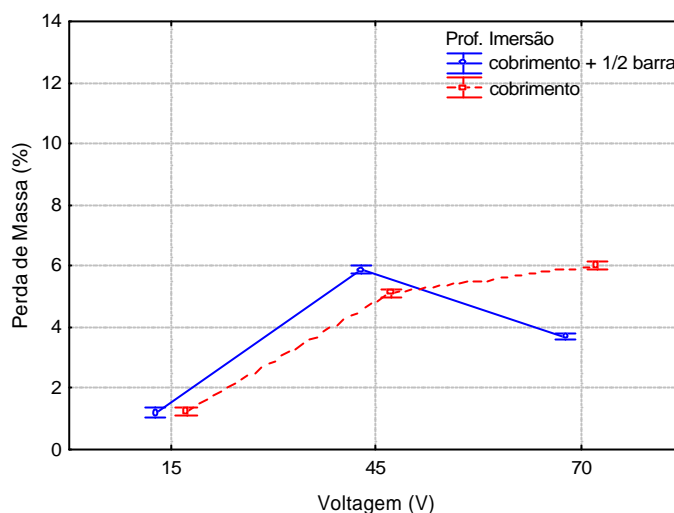


Figura 49: Análise estatística da interação entre a voltagem do equipamento e a profundidade de imersão dos cps em função da perda de massa.

As Figuras 50 e 51 mostram algumas das principais interações entre três variáveis. Na Figura 50 se observa que no ensaio de menor duração existe menor diferença entre os cps de relação a/c submetidos a 15 V que nas demais séries. Pode-se notar, ainda, que as diferenças entre as voltagens de 45 e 70V tendem a ser maiores em ensaios mais longos.

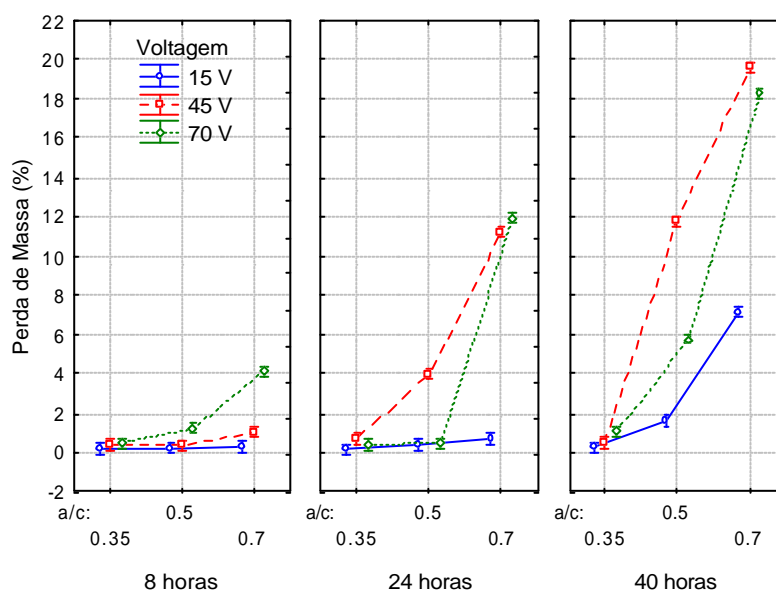


Figura 50: Análise estatística da interação entre a relação a/c, o tempo de ensaio e a voltagem do equipamento em função da perda de massa.

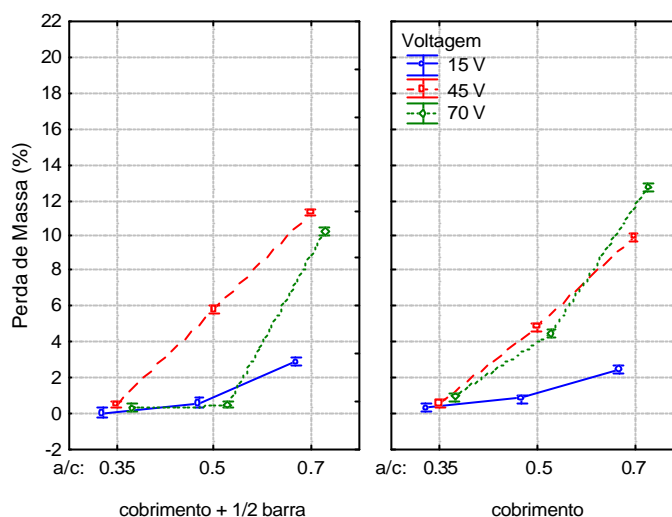


Figura 51: Análise estatística da interação entre a relação a/c, profundidade de imersão dos cps e a voltagem do equipamento em função da perda de massa.

Na Figura 51 observa-se que as diferenças entre os ensaios nas diferentes voltagens têm comportamento melhor quando a profundidade de imersão é menor, ou seja, há mais possibilidade de ingresso de oxigênio. O aumento da profundidade de imersão causa perturbações claras na dinâmica do processo.

Ao avaliarmos os resultados da análise de corrente, perda de massa, análise visual e o teste estatístico podemos concluir que as variáveis analisadas demonstram claramente o efeito que o ensaio CAIM provoca em barras imersas em corpos-de-prova de concreto.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos resultados obtidos na série de ensaios realizados permite que se tracem algumas conclusões importantes sobre o comportamento do ensaio CAIM e sob sua sensibilidade como instrumento de avaliação da corrosão em barras de concreto armado.

### 6.1 CONCLUSÕES

Uma revisão dos dados coletados e analisados no capítulo 5 permite que se levantem as seguintes conclusões para o presente trabalho:

- a) As variáveis de estudo escolhidas de fato influenciam na dinâmica do ensaio, com exceção do tipo de conexão elétrica e a profundidade de imersão na etapa preliminar;
- b) A variável de estudo mais influente foi a relação a/c, seguida do tempo e da voltagem de estímulo;
- c) A utilização de uma voltagem de estímulo de 15 V não é suficiente para gerar degradações intensas, que permitem diferenciar o desempenho de cps com relações a/c bastante distintas;
- d) Os cps confeccionados com relação a/c de 0,70 apresentam grande degradação, para todos os tempos de ensaio;
- e) O incremento da relação a/c leva, em alguns casos, a tendências quase exponenciais de incremento na perda de massa. Exceções à esta tendência parecem se constituir quando a profundidade de imersão (cobrimento mais meia barra) e a estrutura de poros do material (a/c=0,35) dificultam a penetração de oxigênio;

- f) Na maioria dos cps confeccionados com relação a/c 0,35, a degradação foi muito pequena ou nula, mesmo quando se empregaram tensões de estímulo elevadas;
- g) Os ensaios indicaram que pode haver um patamar de intensidade de corrosão, que é atingido após um certo tempo, no qual o processo se torna razoavelmente estacionário;
- h) É interessante notar que houve uma boa compatibilidade entre os resultados de evolução de corrente, perda de massa e avaliação visual, evidenciando que o método de ensaio avaliado é robusto e pode gerar dados bastante ricos;
- i) É necessário prosseguir com os estudos para compreender como se processam os efeitos de retomada de estímulo (efeito de pico), e tentar esclarecer porque a degradação de cps com relações a/c médias e altas, submetidos a altas voltagens, não foi tão intensa;
- j) Cabe ainda destacar que os resultados da presente pesquisa claramente enfatizam a importância de avaliar os métodos de ensaio propostos e verificar como os mesmos respondem a variações nas condições de ensaio e dos corpos de prova ensaiados;

Tendo em vista estas afirmações, pode-se tecer um conjunto de recomendações para o uso futuro do CAIM:

- a) Adoção do sistema de conexão elétrica sem contato, que se mostrou rápido, prático e eficiente;
- b) Adoção da tensão de estímulo de 45 V como padrão, tendo em vista que a mesma conduziu a resultados bastante significativos, num tempo razoável;
- c) Adoção de um tempo de ensaio padrão de 24 h, podendo o mesmo ser ajustado para mais ou menos caso se deseje avaliar concretos de relações a/c muito baixas (< 0,35) ou muito altas (> 0,70), respectivamente;

- d) A variável profundidade de imersão deve continuar sendo estudada, pois os resultados não foram muito específicos para que se determine qual a melhor altura para diferentes relações água/cimento;
- e) Enquanto não se tiverem mais dados sobre o comportamento do ensaio, sugere-se que o mesmo só deve ser aplicado de forma comparativa.
- f) Deve-se agregar, como resposta do ensaio, o valor do patamar de estabilidade da intensidade de corrosão. Obviamente, devem ser realizados ensaios complementares para verificar se estes valores apresentam boa reprodutibilidade e são característicos de um certo tipo de concreto;
- g) Deve-se começar a interpretar o ensaio considerando a área sob o gráfico intensidade de corrosão x tempo, retomando os princípios de análise estabelecidos por Marchesan et al(1997);
- h) A proposta de normalização do ensaio deve ser retardada até que se tenham mais resultados sobre a dinâmica da corrosão neste ensaio, sob as novas condições padrão;
- i) Deve-se montar um manual de procedimento de ensaio e procurar divulgar o mesmo para que se possa coletar, mais rapidamente, dados sobre seu desempenho em condições variadas.

## 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O tema de interesse deste trabalho, ou seja, a análise de metodologias para avaliação da corrosão em estruturas de concreto armado, é muito amplo, e certamente ainda há uma multitude de tópicos a serem estudados.

Este trabalho contribuiu para dar início a uma proposta de metodologia que pode ser incrementada com outros estudos na mesma área de atuação. Neste sentido, são apresentadas a seguir algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Estudar o comportamento do ensaio com diferentes tipos de

cimento e aditivos e efeitos destes;

- Avaliar o comportamento do ensaio com diferentes tipos de cura do concreto;
- Realizar um estudo com outros tipos de espaçadores, de diferentes materiais e formas, além de outras posições dentro das fôrmas;
- Avaliar o concreto sob o ponto de vista da porosidade e capacidade de retenção de íons cloreto;
- Estudar o efeito visual das barras quando o ensaio atinge altas correntes ou mudanças bruscas da mesma;
- Avaliar os efeitos da corrosão em estruturais reais, através de métodos de comparação;
- Realizar um estudo comparativo do ensaio CAIM com outros ensaios eletroquímicos nas mesmas condições do concreto e do ambiente;
- Desenvolver trabalhos semelhantes de qualificação de ensaios com outros métodos e técnicas.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, A. G. **Efeito das Adições Minerais na Resistividade Elétrica de Concretos Convencionais**. Porto Alegre-RS, 1998. 129 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

AHMAD, S. Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction – a review. **Cement & Concrete Composites**, Vol. 25, 2003, p. 459-471.

ALONSO, C.; ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M.; CASTRO, P. Valores críticos de cloruros para despassivar aceros de refuerzo embebidos en un mortero estandarizado de cemento portland. Im: IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções (CONPAT 97). **Anais**, Vol. 2, p. 555-562, 1997.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS STANDARD. Method of Test for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. **ASHTO T 277**, 1983.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 222. **ACI manual of concrete practice**. Detroit, 1991. V.1: corrosion of metals in concrete.

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

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Annual book of ASTM Standards**. Standard test for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. ASTM C876, Philadelphia, 1991.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Annual book of ASTM Standards**. Standard practice for cleaning, descaling and passivation of stainless steel parts, equipment and systems. (Revision) ASTM A 380, Philadelphia, 1996.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Annual book of ASTM Standards**. Test Method for Electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. ASTM C1202, Philadelphia, 1997.

ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de Estruturas com Armaduras Corroídas**. Tradução: Antonio Carmona e Paulo Helene. São Paulo, PINI, 1992.

ANDRADE, C.; SANJUAN, M. A. Chloride Diffusion Coefficient Obtained from Migration Tests of High Performance concrete. In: **RILEM – 3C – WORKSHOP on Durability of High Performance Concrete**. Viena, 1994. 10p.

ANDRADE, J. J. **Durabilidade das estruturas de concreto armado: análise das manifestações patológicas nas estruturas no estado de Pernambuco**. Porto Alegre-RS, 1997. 148 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ARANHA, P. M. S. **Contribuição ao estudo das manifestações patológicas em estruturas de concreto armado na região amazônica**. Porto Alegre-RS, 1994. 120 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Confecção de corpos de prova e cura de corpos de prova de concreto cilíndrico ou prismáticos – Método de ensaio**. NBR 5738. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **Corrosão atmosférica - Determinação do tempo de superfície úmida em superfícies metálicas expostas à atmosfera**. NBR 15085. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **Projeto e Execução de obras de concreto Armado - Procedimento**. NBR 6118. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **Corrosão atmosférica - Taxa de sulfatação - determinação pelo método da vela de dióxido de chumbo**. NBR 6921. Rio de Janeiro, 2002.

\_\_\_\_\_. **Corrosão atmosférica - Determinação de cloretos na atmosfera pelo método da vela úmida**. NBR 6111. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **Corrosão atmosférica - Classificação da corrosividade de atmosferas**. NBR 14643. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **Concreto: ensaio de Compressão de corpos de prova de concreto – Método de ensaio**. NBR 5739. Rio de Janeiro, 1994. 4 p.

\_\_\_\_\_. **Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova de argamassa e concreto**. NBR 9479. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **Cimento Portland comum**. NBR 5732. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **Agregados: determinação da composição granulométrica**. NBR 7217. Rio de Janeiro, 1987. 3 p.

\_\_\_\_\_. **Classificação de meios corrosivos**. NBR 6181. Rio de Janeiro, 1986.

\_\_\_\_\_. **Agregados para Concreto - Especificação**. NBR 7211. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **Determinação da Consistência pelo abatimento do tronco de cone – Método de ensaio**. NBR 7223. Rio de Janeiro, 2005.



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CORROSÃO. **Fotografias sobre corrosão**. Disponível em: <http://www.abraco.org.br/corrfot.htm> Acesso em 05 mar de 2006.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION, BS 8110: Part 1, BSI, **Structural use on concrete**. London, 1985.

CABRAL, A. E. B.; **Avaliação da Eficiência de Sistemas de Reparo no Combate à Iniciação e à Propagação da Corrosão do Aço Induzida por Cloretos**. Porto Alegre – RS, 2000. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

CASCUDO, O.; **O controle da corrosão de armaduras de concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. São Paulo/Goiânia: PINI, 1997.

CASCUDO, O. **Influência das características do aço Carbono destinado ao uso como Armadura para Concreto Armado no comportamento frente à Corrosão**. São Paulo – SP, 2000. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

CASCUDO, O.; HELENE, P. R. L. **Resistência à corrosão no concreto dos tipos de armaduras brasileiras para concreto armado**. São Paulo: BT/PCC/272, 2001.

CASTRO, P. B.; CASTILLO, R. M.; CARPIO, J. J.; GENESCÁ, J.; HELENE, P.; LÓPEZ, W.; PAZINI, E. J.; SANJUÁN, M. A.; VÉLEVA, L. **Corrosión en estructuras de concreto armado**. México: IMCYC, 1998.

CEB. **Durability of Concrete Structures**. Report of CEB-RILEM International Workshop. Copenhagen, Mai, 1983; também CEB Bulletin d'information, N2 152, 1984; também Lausanne, Thomas Telford, 1992.

CEB 196 (1988)

CUNHA, A. C. Q.; HELENE, P. R. L. **Despassivação das armaduras de concreto por ação da carbontação**. São Paulo: BT/PCC/283, 2001.

DAL MOLIN, D. C. C. **Fissuras em estruturas de concreto armado: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre-RS, 1988. 196 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

DOTTO, J. M. R.; ABREU, A. G.; DAL MOLIN, D. C. C.; MÜLLER, I. L. Influence of silica fume addition on concretes physical properties and on corrosion behavior of reinforcement bars. **Cement & Concrete Composites**, Vol. 26, 2004, p. 31-39.

DURAR. **Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado**. CYTED – Red Temática XVB Durabilidad de la Armadura. Editores RINCÓN, CARRUYO, ANDRADE, HELENE Y DIAZ. 1997, 205P.

DUTRA, A. C. **Proteção catódica: técnicas de combate à corrosão**. Rio de Janeiro/RJ: Interciência LTDA, 1999.

FELIU, S. On-site determination of the polarization resistance in a reinforced concrete beam. **Corrosion**, v. 44, n. 10, p. 761-765, 1988.

FIGUEIREDO, E. J. P. **Avaliação do desempenho de revestimentos para proteção de armadura contra corrosão através de técnicas eletroquímicas – contribuição ao estudo de reparo de estruturas de concreto armado**. São Paulo, 1994. 391 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

FIGUEIREDO, E. J. P.; HELENE, P. R. L.; ANDRADE, C. **Fatores determinantes da iniciação e propagação da corrosão da armadura do concreto**. São Paulo: BT/PCC/121, 1993.

GENTIL, V. **Corrosão**. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 341 p.

GLASS, K.; BUENFELD, N. R. The presentation of the chloride threshold level for corrosion of steel in concrete. **Corrosion Science**, Vol. 39, N° 5, p. 1001-1013, 1997.

GLASS, K.; BUENFELD, N. R. Chloride Penetration into Concrete. **RILEM**, Publications, Paris, 1997. p. 429.

GONZALES, J. A.; FELIÚ, S.; RODRIGUEZ, P.; RAMIREZ, E.; ALONSO, C.; ANDRADE, C. Some questions on the corrosion of steel in concrete – Part I: when, how and how much steel corrodes. **Materials and Structures**. Vol 29 January-February, 1996a, p.40-46.

GJORV, O.; VENNESLAND, O.; EL-BASAIIDY, AS.H.S. Diffusion of Dissolved Oxygen through Concrete. **Materials Performance**, v. 25, 1986, p. 39-44.

HELENE, P. R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo: IPT, PINI, 1986. 46 p.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. São Paulo, 1993. 231 p. Tese (Livre docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo,

HUERTA, E. O. **Corrosión y degradación de materiales**. Spain/Madrid: SÍNTESIS, 1997. 366 p.

JADOVSKI, I.; LANTELME, E.M.V.; KULAKOWSKI, M.P.; CAMPAGNOLO, J.L.; DAL MOLIN, D.C.C. A influencia da espessura do cobrimento no fenômeno da corrosão de armaduras. In: VIII CONGRESSO REGIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA EM ENGENHARIA, 1992, JOINVILLE. **Anais...** Joinville: FEJ/ UDESC.

YOO, J.; PARK, Z.; KIM, J.; CHUNG, L. Development of a galvanic sensor system for detecting the corrosion damage of the steel embedded in concrete structures: Part 1. Laboratory tests to correlate galvanic current with damage. **Cement and Concrete Research**. Vol 33, 2003, p. 2057-2062.

KIRCHHEIM, A. P.; PASA, V.; DAL MOLIN, D. C. C.; SILVA FILHO, L. C. P. Avaliação de revestimentos de proteção do aço no controle da corrosão das armaduras em concretos brancos. VII CONGRESSO LATINOAMERICANO DE PATOLOGIA DE LA CONSTRUCCION, X CONGRESSO DE CONTROL DE CALIDAD EN LA CONSTRUCCION, 2005, Asunción, Paraguai. **Anais... CONPAT 2005.**

KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa.** 2002. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, UFRGS, Porto Alegre.

LIMA, M. G. **Influencia dos componentes do concreto na corrosão de armaduras.** Porto Alegre, 1990. 133 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LIMA, M. G.; HELENE, P. Influência da adição de inibidores de corrosão em propriedades de concretos. In: IV CONGRESSO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES E VI CONGRESSO DE CONTROLE DE QUALIDADE, 1997, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: LEME/CPGEC/UFRGS.

LIMA, R. C.; HELENE, P. R. L.; LIMA, M. G. **Avaliação da eficiência de inibidores de corrosão em reparo de estruturas de concreto.** São Paulo: BT/PCC/282, 2001.

LIANG, M. T.; YANG, R. J. Theoretical elucidation on the on-site measurements of corrosion rate of reinforcements. **Construction and Building Materials**, Vol 19, 2005, p. 175-180.

LÓPEZ, D. A.; PÉREZ, T.; SIMISON, S. N. The influence of microstructure and chemical composition of carbon and low alloy steels in CO<sub>2</sub> corrosion. A state-of-the-art appraisal. **Materials & Design**, Vol. 24, 2003, p. 561-575.

LOPEZ, W.; GONZALEZ, J. A. Influence of the Degree of Pore Saturation on the Resistivity of concrete and the corrosion rate of steel reinforcement. **Cement, and Concrete and Research**, Vol. 23, 1993, p. 368-376.

MARCHESAN, P. R. C.; SANTAROSA, D.; CAMPAGNOLO, J. L.; FILHO, L. C. P. S.; PACHECO, A. R. Estudo da influência da aplicação de revestimentos no controle da corrosão. In: IV CONGRESSO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES E VI CONGRESSO DE CONTROLE DE QUALIDADE, 1997, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: LEME/CPGEC/UFRGS.

MARTÍN-PÉREZ, B; ZIBARA, H.; HOOTON, R. D.; THOMAS, M. D. A. **A study of the effect of chloride binding on service life predictions.** Cement and Concrete Research, Vol. 30, 2000, p. 1215-1223.

MELCHERS, R. E. Corrosion uncertainty modelling for steel structures. **Journal of constructional Steel Research**, Vol. 52, 1999, p. 3-19.

MILLARD, S.G.; LAW, D.; BUNGEY, J. H.; CAIRNS, J. Environmental influences of linear polarisation corrosion rate measurement in reinforced concrete. **NDT&E Internacional**, Vol. 34, 2001, p. 409-417.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. São Paulo, PINI, 1997. 828 p.

PAGE, C. L.; SHORT, N. R.; HOLDEN, W. R. The influence of different cements on chloride-induced corrosion of reinforcing steel. **Cemente and Concrete Research**, Vol. 16, 1986, p. 79-86.

PAGE, C.; LAMBERT, P. Kinetics of Oxygen Diffusion in Hardened Cement Pastes. **Journal of Material Science**, v. 22, 1987, p. 942-946.

PAGE, C. L. Basic principles of corrosion. In: SCHIESSL, P., ed. **Corrosion of steel in concrete**. London, Chapman and Hall, 1988. cap. 2, p. 3-21.

PEREIRA, L. F. L. C.; CINCOTTO, M. A. **Determinação de cloretos de cimentos Portland: influência do tipo de cimento**. São Paulo: BT/PCC/294, 2001.

PINCELLI, A. L. S. **Desenvolvimento e ensaios de um sistema de mensuração de condutividade elétrica do solo**. Piracicaba/SP, 2004. 96 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luis de Queiroz.

POURBAIX, M. **Lições de corrosão electroquímica**. Brasília, CEBELCOR, 1987. 421 p.

RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. **Projeto de Experimentos**. Série monográfica Qualidade. Porto Alegre, 2003. 130 p. Escola de Engenharia – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio grande do sul. Apostila de disciplina.

RODRÍGUEZ, P.; RAMÍREZ, E.; GONZÁLEZ, J. A, Methods for studying corrosion in reinforced concrete. **Magazine of Concrete Research**, Vol. 46, N° 167, 1994. p. 81-90.

ROPER, H.; BAWEJA, D. **Carbonation-chloride Interactions and their influence on corrosion rates of steel in concrete**. EUA, American Concrete Association, ACI SP 126-16, 1989, p. 295-315.

ROSENBERG, A.; GRACE, W. R.; HANSON, C. M.; ANDRADE, C. Mechanisms of corrosion of steel in concrete. **Materials Science of Concrete**, 1989. P. 285-313.

SELISTRE, F.P.; GASTAL, S.L.; CAMPAGNOLO, J.L. Estudo de técnicas para reversão do processo corrosivo em estruturas de concreto contaminadas com cloretos. In: VI SALÃO DE INICIAÇÃO CINÉTICA E III FEIRA DE INICIAÇÃO CINÉTICA, 1994, Porto Alegre. . **Anais...** Porto Alegre: LEME/ UFRGS.

SELISTRE, F.P.; BOTH, A.A. A influencia do fator A/C, do cobrimento e do tempo de cura na corrosão de armaduras. In: V SALÃO DE INICIAÇÃO CINÉTICA E II FEIRA DE INICIAÇÃO CINÉTICA, 1993, Porto Alegre. . **Anais...** Porto Alegre: LEME/UFRGS.

TUUTTI, K. Service life of structures with regard to corrosion of embedded steel. In: ACI Publication (SP-65). International Conference on Performance of Concrete in Marine Environment. **Proceedings**. August, 1980.

VARELA, H.; ESPINOZA, L. V. Penetrabilidad de Iones cloruros en Morteros con y sin Revestimiento. In: VII JORNADAS CHILENAS DEL HORMIGÓN E I JORNADA LATINOAMERICANA DEL CIMENTO Y HORMIGÓN, CURSO: Avances Tecnológicos en el Uso de Cementos y Hormigones, 1988, Santiago de Chile. **Anais...** Santiago de Chile: Instituto Profesional de Santiago, 1988. p. 82-91.

VIDEM, K. Phenomena disturbing electrochemical corrosion rate measurements for steel in alkaline environments. **Electrochimica Acta**, Vol. 46, 2001. p. 3598-3903.

VIEIRA, G. L. **Estudo do processo de corrosão sob a ação de íons cloreto em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Porto Alegre – RS, 2003. 150 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio grande do Sul.

WEXLER, S. B. **Manual de proteção contra corrosão durante armazenamento e transporte**. São Paulo: IPT, 1976. 105 p.

WOLYNEC, S. Cinética e processos de eletrodo. In: AGOSTINHO, S.N.L., ed. **Introdução à engenharia eletroquímica: processos eletrometalúrgicos**. 2.ed. São Paulo, ABM, 1987. p. 77-129.

\_\_\_\_\_. **Caracterização do cimento Itambé**. Disponível em: <http://www.cimentoitambe.com.br/> Acesso em: 02 maio 2005.

## **ANEXO A – Dados de Análise de Corrente**

**Dados da Etapa Preliminar – Análise de corrente (Figura 35)**

Tempo: 40 horas

Voltagem: 70 Volts

Tipo de conexão elétrica: Fio Enrolado e Fio Sobre a barra

Relação a/c: 0,35 e 0,7

Profundidade de imersão: até cobrimento e até cobrimento mais meia barra

Tempo (min)	Até o cobrimento				Até o cobrimento mais meia barra			
	a/c 0,35 FE (A)	a/c ,7 FE (A)	a/c 0,35 FS (A)	a/c 0,7 FS (A)	a/c 0,35 FE (A)	a/c ,7 FE (A)	a/c 0,35 FS (A)	a/c 0,7 FS (A)
0	0,2	0,4	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,2
30	0,2	0,6	0,2	0,4	0,3	0,5	0,5	0,2
60	0,2	0,3	0,1	0,5	0,3	0,5	0,6	0,4
90	0,2	0,7	0,1	0,6	0,3	0,6	0,6	0,4
120	0,2	0,7	0,1	0,6	0,3	0,6	0,6	0,5
150	0,2	0,7	0,1	0,6	0,4	0,6	0,6	0,5
180	0,1	0,8	0,1	0,6	0,4	0,6	0,6	0,5
210	0,2	0,8	0,2	0,6	0,4	0,6	0,7	0,5
240	0,2	0,8	0,2	0,6	0,4	0,6	0,7	0,6
270	0,2	0,8	0,2	0,6	0,4	0,7	0,7	0,6
300	0,2	1,0	0,2	0,6	0,5	0,8	0,8	1,0
330	0,2	1,0	0,2	0,7	0,5	0,8	0,8	1,0
360	0,2	1,1	0,2	0,7	0,5	0,9	0,9	1,0
390	0,2	1,3	0,2	0,8	0,5	1,0	0,9	1,0
420	0,2	1,4	0,2	0,9	0,5	1,2	0,8	1,1
450	0,2	1,5	0,2	1,1	0,5	1,4	0,8	1,2
480	0,2	1,6	0,2	1,1	0,5	1,5	0,8	1,3
510	0,2	1,7	0,2	1,3	0,5	1,7	0,8	1,3
540	0,2	1,8	0,2	1,4	0,5	1,7	0,8	1,4
540	0,3	2,2	0,2	1,2	0,5	1,6	0,5	1,3
570	0,2	2,1	0,1	1,5	0,4	2,4	0,5	1,8
600	0,2	2,0	0,1	1,5	0,4	2,3	0,6	1,9
630	0,2	2,1	0,1	1,6	0,4	2,3	0,7	1,8
660	0,2	2,2	0,2	1,6	0,5	2,3	0,8	1,9
690	0,2	2,2	0,2	1,7	0,5	2,1	0,8	1,7
720	0,2	2,2	0,2	1,8	0,6	2,0	0,8	1,7
750	0,2	2,2	0,2	1,9	0,6	1,9	0,8	1,7
780	0,2	2,1	0,2	1,9	0,6	1,8	0,8	1,7
810	0,2	2,1	0,2	1,9	0,7	1,7	0,9	1,7
840	0,2	2,2	0,2	1,8	0,8	1,7	0,8	1,6
870	0,2	2,2	0,2	1,8	0,8	1,6	0,8	1,5
900	0,2	2,1	0,2	1,7	0,8	1,5	0,8	1,5
930	0,2	2,1	0,2	1,7	0,8	1,4	0,9	1,5
960	0,3	2,2	0,2	1,8	0,8	1,4	0,9	1,4
990	0,3	2,1	0,2	1,7	0,9	1,3	0,9	1,4
1020	0,3	2,1	0,2	1,6	0,9	1,3	0,9	1,4
1050	0,3	2,0	0,2	1,5	0,9	1,2	0,9	1,4

1080	0,3	2,0	0,2	1,5	0,9	1,2	0,9	1,4
1110	0,3	2,0	0,2	1,5	0,9	2,6	0,8	2,8
1140	0,3	1,9	0,2	1,4	0,9	3,7	0,8	3,5
1170	0,3	1,9	0,2	1,4	1,0	2,9	1,0	2,8
1170	0,3	3,0	0,3	2,0	1,1	2,1	1,1	2,3
1200	0,3	3,3	0,3	2,7	1,2	1,9	1,2	2,1
1230	0,4	2,9	0,3	2,3	1,2	1,7	1,2	1,9
1260	0,4	3,0	0,3	2,2	1,2	1,6	1,2	1,7
1290	0,4	3,1	0,4	2,1	1,2	1,5	1,2	1,6
1320	0,5	2,8	0,4	2,0	1,1	1,4	1,2	1,5
1350	0,5	2,6	0,4	1,9	1,1	1,3	1,2	1,4
1380	0,5	2,4	0,4	1,8	1,0	1,2	1,1	1,3
1410	0,5	2,7	0,4	1,7	1,1	1,2	1,2	1,3
1440	0,5	2,3	0,4	1,7	1,1	1,2	1,2	1,3
1470	0,5	2,3	0,4	1,6	1,0	1,2	1,2	1,3
1500	0,5	2,1	0,4	1,5	1,0	1,1	1,2	1,2
1530	0,5	2,1	0,5	1,5	1,0	1,1	1,2	1,2
1560	0,5	2,0	0,5	1,5	1,0	1,1	1,2	1,2
1590	0,5	2,0	0,5	1,4	0,9	1,1	1,2	1,2
1620	0,5	2,0	0,5	1,5	0,9	1,1	1,2	1,2
1650	0,5	1,9	0,5	1,4	0,9	1,1	1,2	1,2
1650	0,5	2,0	0,5	1,4	0,9	1,9	1,1	2,0
1680	0,5	1,9	0,5	1,4	1,0	2,9	1,1	3,2
1710	0,5	1,8	0,5	1,4	1,1	2,4	1,2	2,5
1740	0,4	1,8	0,4	2,1	1,2	2,1	1,2	2,2
1770	0,3	2,7	0,3	2,4	1,2	1,9	1,3	2,0
1800	0,3	2,9	0,3	2,4	1,3	1,7	1,4	1,8
1830	0,3	2,7	0,4	2,1	1,3	1,6	1,4	1,7
1860	0,4	2,8	0,4	2,0	1,2	1,5	1,3	1,6
1890	0,4	2,6	0,4	2,0	1,1	1,3	1,3	1,5
1920	0,4	2,6	0,4	1,9	1,1	1,3	1,3	1,4
1950	0,5	2,4	0,5	1,8	1,0	1,2	1,2	1,3
1980	0,5	2,3	0,5	1,8	1,0	1,1	1,2	1,2
2010	0,5	2,4	0,5	1,8	0,9	1,1	1,2	1,2
2040	0,5	2,4	0,5	1,8	1,0	1,1	1,2	1,3
2070	0,5	2,5	0,5	1,8	0,9	1,1	1,2	1,2
2100	0,5	2,6	0,5	1,9	0,9	1,1	1,1	1,2
2130	0,5	2,7	0,5	1,7	0,9	1,1	1,1	1,2
2160	0,5	1,9	0,5	2,1	0,9	1,1	1,1	1,2
2190	0,5	1,9	0,5	2,1	0,9	1,1	1,1	1,2
2220	0,5	1,8	0,5	2,0	1,1	1,7	1,2	2,0
2250	0,5	1,8	0,5	1,8	1,0	2,7	1,1	2,9
2250	0,5	1,9	0,5	2,0	1,0	2,4	1,1	2,6
2280	0,5	1,8	0,4	2,1	1,1	2,0	1,2	2,1
2310	0,5	1,8	0,5	2,1	1,1	1,7	1,3	1,9



2340	0,3	2,8	0,3	1,9	1,0	1,5	1,3	1,8
2370	0,3	2,9	0,3	2,5	1,1	1,5	1,3	1,7
2400	0,3	2,9	0,3	2,5	1,1	1,5	1,3	1,7

Dados (A – Ampère) da **Etapa Principal** – Análise de corrente

**Tempo: 8 horas**

Voltagem: 15, 45 e 70 Volts

Relação a/c: 0,35; 0,5 e 0,7

Profundidade de imersão: até cobrimento e até cobrimento mais meia barra

	<i>Figura 37</i>			<i>Figura 38</i>			<i>Figura 39</i>			<i>Figura 40</i>			<i>Figura 41</i>			<i>Figura 42</i>		
volt/P.I.	15V-CMB			15V-C			45V-CMB			45V-C			70V-CMB			70V-C		
a/c	0,35	0,50	0,70	0,35	0,50	0,70	0,35	0,50	0,70	0,35	0,50	0,70	0,35	0,50	0,70	0,35	0,50	0,70
0	0,07	0,10	0,16	0,09	0,06	0,09	0,12	0,13	0,25	0,24	0,15	0,25	0,23	0,34	0,86	0,17	0,29	0,36
30	0,04	0,09	0,16	0,05	0,05	0,08	0,1	0,17	0,23	0,24	0,15	0,26	0,13	0,28	0,82	0,07	0,4	0,42
60	0,03	0,08	0,16	0,04	0,05	0,07	0,1	0,17	0,24	0,28	0,15	0,29	0,09	0,24	0,86	0,02	0,46	0,5
90	0,02	0,07	0,16	0,03	0,09	0,11	0,1	0,17	0,24	0,28	0,15	0,3	0,04	0,19	0,85	0,02	0,45	0,59
120	0,02	0,07	0,17	0,05	0,08	0,11	0,1	0,17	0,25	0,28	0,15	0,3	0,04	0,24	0,85	0,02	0,54	0,64
150	0,02	0,07	0,17	0,05	0,08	0,11	0,1	0,17	0,25	0,27	0,22	0,37	0,02	0,26	0,83	0,02	0,54	0,64
180	0,02	0,07	0,17	0,05	0,08	0,12	0,1	0,16	0,25	0,27	0,23	0,34	0,01	0,32	0,85	0,02	0,54	0,7
210	0,02	0,07	0,16	0,05	0,08	0,12	0,1	0,16	0,25	0,27	0,27	0,34	0,01	0,32	0,85	0,02	0,55	0,83
240	0,02	0,07	0,16	0,04	0,08	0,12	0,09	0,15	0,24	0,26	0,28	0,36	0,01	0,32	0,85	0,01	0,67	0,96
270	0,02	0,07	0,16	0,05	0,08	0,11	0,09	0,15	0,24	0,26	0,28	0,4	0,01	0,32	0,85	0,01	0,58	1,15
300	0,01	0,06	0,16	0,05	0,08	0,12	0,09	0,15	0,24	0,26	0,35	0,4	0,01	0,32	1,13	0,01	0,61	1,3
330	0,01	0,06	0,16	0,04	0,08	0,13	0,09	0,15	0,24	0,25	0,35	0,46	0,01	0,3	1,43	0,01	0,62	1,51
360	0,01	0,06	0,16	0,04	0,07	0,16	0,08	0,13	0,39	0,25	0,37	0,53	0,01	0,3	1,47	0,01	0,62	1,55
390	0,01	0,06	0,16	0,05	0,09	0,2	0,07	0,13	0,39	0,25	0,38	0,53	0,01	0,3	1,65	0,01	0,62	1,55
420	0,02	0,06	0,15	0,05	0,09	0,2	0,07	0,13	0,53	0,25	0,43	0,63	0,01	0,3	1,77	0,01	0,85	1,5
450	0,03	0,06	0,15	0,04	0,09	0,17	0,07	0,13	0,55	0,24	0,43	0,69	0,01	0,3	1,89	0,01	1,06	1,42
480	0,02	0,06	0,15	0,04	0,08	0,17	0,06	0,12	0,58	0,23	0,4	0,71	0,01	0,33	2,07	0,01	1,1	1,43

**Tempo: 24 horas**

Voltagem: 15, 45 e 70 Volts

Relação a/c: 0,35; 0,5 e 0,7

Profundidade de imersão: até cobrimento e até cobrimento mais meia barra

	Figura 43			Figura 44			Figura 45			Figura 46			Figura 47			Figura 48		
Volt/P.I.	15V-CMB			15V-C			45V-CMB			45V-C			70V-CMB			70V-C		
a/c	0,35	0,50	0,70	0,35	0,50	0,70	0,35	0,50	0,70	0,35	0,50	0,70	0,35	0,50	0,70	0,35	0,50	0,70
0	0,08	0,13	0,19	0,12	0,1	0,17	0,13	0,2	0,41	0,18	0,21	0,29	0,12	0,09	0,13	0,16	0,17	0,32
30	0,06	0,13	0,24	0,12	0,09	0,23	0,07	0,18	0,49	0,17	0,18	0,33	0,05	0,07	0,21	0,11	0,13	0,42
60	0,07	0,13	0,36	0,12	0,1	0,24	0,04	0,19	0,57	0,16	0,19	0,4	0,03	0,06	0,24	0,11	0,12	0,48
90	0,06	0,13	0,35	0,11	0,08	0,18	0,02	0,23	0,59	0,17	0,19	0,46	0,02	0,06	0,6	0,11	0,11	0,52
120	0,09	0,16	0,36	0,11	0,1	0,23	0,02	0,35	0,57	0,16	0,19	0,48	0,02	0,05	0,61	0,11	0,09	0,57
150	0,07	0,21	0,38	0,1	0,08	0,19	0,02	0,52	0,58	0,16	0,19	0,49	0,02	0,05	0,65	0,11	0,08	0,6
180	0,06	0,13	0,32	0,11	0,08	0,2	0,02	0,53	0,59	0,16	0,2	0,51	0,02	0,05	0,68	0,11	0,08	0,6
210	0,06	0,18	0,33	0,11	0,08	0,21	0,02	0,53	0,59	0,16	0,21	0,51	0,01	0,05	0,74	0,15	0,13	0,74
240	0,05	0,32	0,30	0,11	0,11	0,22	0,02	0,53	0,59	0,16	0,21	0,53	0,01	0,05	0,85	0,1	0,12	0,8
270	0,08	0,18	0,34	0,1	0,11	0,22	0,01	0,54	0,62	0,16	0,23	0,54	0,01	0,05	0,91	0,1	0,09	0,91
300	0,05	0,18	0,31	0,11	0,12	0,2	0,01	0,54	0,68	0,15	0,36	0,56	0,01	0,05	1,06	0,11	0,08	1,1
330	0,05	0,17	0,27	0,1	0,12	0,19	0,01	0,54	0,75	0,15	0,36	0,58	0,01	0,04	1,3	0,14	0,07	1,29
360	0,05	0,17	0,26	0,11	0,12	0,2	0,01	0,53	0,77	0,14	0,36	0,6	0,01	0,04	1,36	0,14	0,06	1,39
390	0,05	0,17	0,27	0,1	0,2	0,19	0,01	0,52	0,8	0,14	0,35	0,62	0,01	0,04	1,36	0,14	0,05	1,57
420	0,05	0,17	0,26	0,1	0,2	0,2	0,01	0,52	0,85	0,14	0,35	0,64	0,01	0,04	1,36	0,14	0,06	1,48
420	0,08	0,21	0,33	0,1	0,21	0,2	0,01	0,52	0,9	0,14	0,37	0,64	0,01	0,04	1,3	0,14	0,06	1,43
450	0,05	0,18	0,26	0,1	0,21	0,21	0,01	0,54	1,03	0,13	0,49	0,73	0,01	0,04	1,29	0,15	0,06	1,33
480	0,06	0,18	0,25	0,1	0,22	0,21	0,01	0,54	1,1	0,13	0,5	0,72	0,01	0,04	1,29	0,14	0,05	1,3
510	0,05	0,17	0,24	0,09	0,22	0,21	0,01	0,54	1,22	0,13	0,5	0,73	0,01	0,04	1,29	0,14	0,06	1,28
540	0,05	0,18	0,2	0,17	0,25	0,52	0,01	0,58	1,31	0,12	0,5	0,76	0,01	0,04	1,29	0,14	0,06	1,25
570	0,04	0,16	0,2	0,2	0,28	0,57	0,01	0,58	1,38	0,1	0,33	0,61	0,01	0,05	1,29	0,14	0,06	1,24
600	0,05	0,17	0,22	0,18	0,26	0,53	0,07	0,43	1,04	0,11	0,36	0,66	0,01	0,07	1,25	0,12	0,06	1,2
630	0,04	0,16	0,19	0,16	0,25	0,57	0,01	0,42	1,16	0,1	0,37	0,7	0,02	0,05	2,95	0,13	0,06	1,19

660	0,03	0,15	0,2	0,14	0,24	0,54	0,01	0,45	1,24	0,1	0,39	0,73	0,01	0,04	2,84	0,11	0,06	1,31
690	0,04	0,17	0,19	0,16	0,24	0,52	0,01	0,47	1,28	0,1	0,39	0,73	0,05	0,09	2,3	0,11	0,06	1,23
720	0,03	0,14	0,19	0,13	0,24	0,43	0,01	0,51	1,44	0,09	0,42	0,85	0,11	0,15	2,06	0,1	0,06	1,2
750	0,05	0,16	0,19	0,11	0,22	0,43	0,01	0,52	1,46	0,09	0,42	0,84	0,01	0,07	1,58	0,11	0,06	1,19
780	0,04	0,17	0,18	0,12	0,23	0,43	0,01	0,5	1,46	0,09	0,43	0,93	0,16	0,24	1,86	0,12	0,06	1,19
810	0,04	0,15	0,18	0,15	0,24	0,42	0,01	0,51	1,54	0,09	0,46	1,02	0,14	0,21	1,85	0,11	0,05	1,2
840	0,03	0,17	0,17	0,12	0,22	0,41	0,01	0,53	1,57	0,09	0,49	1,03	0,15	0,22	1,87	0,11	0,05	1,2
870	0,05	0,15	0,16	0,12	0,23	0,41	0,02	0,62	1,69	0,09	0,5	1,05	0,19	0,23	2,03	0,11	0,05	1,2
900	0,03	0,16	0,17	0,11	0,23	0,43	0,01	0,63	1,67	0,09	0,52	1,11	0,16	0,19	1,9	0,11	0,05	1,16
930	0,05	0,16	0,17	0,11	0,23	0,4	0,01	0,64	1,67	0,09	0,53	1,14	0,11	0,14	1,85	0,11	0,05	1,13
960	0,02	0,15	0,17	0,09	0,22	0,36	0,01	0,64	1,7	0,09	0,46	1,15	0,06	0,1	1,57	0,1	0,05	1,1
990	0,03	0,15	0,17	0,09	0,22	0,36	0,01	0,65	1,7	0,09	0,4	1,17	0,04	0,08	1,51	0,1	0,05	1,09
1020	0,03	0,15	0,17	0,09	0,22	0,36	0,01	0,65	1,68	0,09	0,55	1,19	0,03	0,08	1,39	0,08	0,05	1,03
1020	0,15	0,28	0,37	0,09	0,22	0,32	0,02	0,72	1,65	0,09	0,55	1,21	0,02	0,07	1,33	0,05	0,07	2,57
1050	0,11	0,22	0,44	0,09	0,23	0,33	0,01	0,79	1,63	0,09	0,56	1,22	0,01	0,04	1,23	0,04	0,08	2,28
1080	0,06	0,18	0,29	0,09	0,23	0,36	0,01	0,79	1,63	0,09	0,57	1,2	0,01	0,04	1,22	0,05	0,09	1,95
1110	0,04	0,18	0,25	0,08	0,23	0,33	0,01	0,79	1,63	0,09	0,59	1,21	0,01	0,04	1,18	0,07	0,09	1,51
1140	0,06	0,17	0,34	0,1	0,29	0,34	0,01	0,79	1,63	0,09	0,6	1,22	0,01	0,05	2,56	0,07	0,08	1,23
1170	0,36	0,44	0,44	0,09	0,23	0,3	0,01	0,79	1,63	0,09	0,61	1,23	0,01	0,05	2,7	0,06	0,08	1,21
1200	0,35	0,44	0,4	0,08	0,23	0,29	0,02	0,7	2	0,09	0,61	1,23	0,01	0,06	1,48	0,07	0,08	1,22
1230	0,33	0,43	0,42	0,08	0,24	0,25	0,02	0,7	2	0,09	0,35	1,18	0,01	0,06	1,39	0,06	0,07	1,22
1260	0,35	0,42	0,36	0,08	0,24	0,26	0,02	0,7	2	0,08	0,36	1,22	0,02	0,06	1,38	0,06	0,07	1,22
1290	0,34	0,41	0,41	0,07	0,24	0,28	0,02	0,68	2,21	0,08	0,38	1,25	0,02	0,06	1,38	0,06	0,07	1,22
1320	0,31	0,41	0,36	0,08	0,24	0,27	0,02	0,73	2,19	0,09	0,39	1,29	0,02	0,06	1,38	0,06	0,07	1,22
1350	0,33	0,41	0,38	0,07	0,25	0,26	0,02	0,74	2,15	0,09	0,41	1,29	0,02	0,06	1,32	0,06	0,07	1,22
1380	0,31	0,41	0,38	0,07	0,25	0,26	0,03	0,82	1,86	0,09	0,43	1,27	0,02	0,05	1,29	0,07	0,07	1,22
1410	0,27	0,32	0,33	0,07	0,26	0,27	0,03	0,82	1,86	0,09	0,47	1,28	0,02	0,05	1,24	0,07	0,07	1,22
1440	0,27	0,34	0,31	0,07	0,26	0,27	0,03	0,82	1,86	0,09	0,48	1,29	0,01	0,04	1,2	0,08	0,06	1,07

**Tempo: 40 horas**

Voltagem: 15, 45 e 70 Volts

Relação a/c: 0,35; 0,5 e 0,7

Profundidade de imersão: até cobrimento e até cobrimento mais meia barra

	<i>Figura 49</i>			<i>Figura 20</i>			<i>Figura 51</i>			<i>Figura 52</i>			<i>Figura 53</i>			<i>Figura 54</i>		
<b>Volt/P.I.</b>	<b>15V-CMB</b>			<b>15V-C</b>			<b>45V-CMB</b>			<b>45V-C</b>			<b>70V-CMB</b>			<b>70V-C</b>		
<b>a/c</b>	<b>0,35</b>	<b>0,50</b>	<b>0,70</b>	<b>0,35</b>	<b>0,50</b>	<b>0,70</b>	<b>0,35</b>	<b>0,50</b>	<b>0,70</b>	<b>0,35</b>	<b>0,50</b>	<b>0,70</b>	<b>0,35</b>	<b>0,50</b>	<b>0,70</b>	<b>0,35</b>	<b>0,50</b>	<b>0,70</b>
0	0,18	0,16	0,30	0,09	0,15	0,17	0,14	0,2	0,24	0,07	0,22	0,27	0,11	0,24	0,49	0,12	0,21	0,15
30	0,17	0,19	0,35	0,1	0,13	0,21	0,16	0,27	0,37	0,03	0,23	0,27	0,02	0,15	0,66	0,03	0,13	0,36
60	0,18	0,21	0,35	0,09	0,14	0,31	0,13	0,32	0,47	0,02	0,3	0,39	0,02	0,14	0,67	0,03	0,13	0,36
90	0,17	0,18	0,35	0,09	0,11	0,31	0,13	0,33	0,49	0,02	0,31	0,41	0,02	0,11	0,68	0,03	0,13	0,36
120	0,17	0,20	0,42	0,08	0,11	0,3	0,12	0,34	0,52	0,02	0,33	0,42	0,03	0,11	0,69	0,03	0,13	0,36
150	0,21	0,19	0,42	0,08	0,11	0,36	0,12	0,34	0,54	0,01	0,37	0,43	0,01	0,09	0,75	0,03	0,13	0,36
180	0,15	0,23	0,42	0,08	0,12	0,35	0,11	0,35	0,57	0,02	0,38	0,44	0,02	0,1	0,81	0,03	0,13	0,36
210	0,09	0,14	0,37	0,09	0,16	0,31	0,11	0,37	0,6	0,01	0,39	0,46	0,01	0,08	1,03	0,03	0,13	0,36
240	0,10	0,13	0,40	0,07	0,15	0,3	0,11	0,52	0,63	0,01	0,4	0,49	0,01	0,07	1,28	0,02	0,13	0,5
270	0,07	0,13	0,37	0,07	0,15	0,28	0,11	0,56	0,64	0,01	0,41	0,51	0,01	0,07	1,28	0,02	0,13	0,54
300	0,07	0,13	0,37	0,06	0,14	0,26	0,1	0,61	0,66	0,01	0,42	0,53	0,01	0,07	1,28	0,02	0,13	0,61
330	0,07	0,13	0,36	0,06	0,13	0,26	0,11	0,63	0,72	0,01	0,42	0,55	0,01	0,06	1,34	0,02	0,13	0,83
360	0,06	0,12	0,36	0,05	0,13	0,25	0,11	0,65	0,79	0,01	0,42	0,57	0,01	0,06	1,31	0,01	0,13	0,95
390	0,06	0,12	0,35	0,04	0,12	0,21	0,1	0,7	0,7	0,01	0,43	0,59	0,01	0,06	1,3	0,01	0,13	0,97
420	0,06	0,11	0,34	0,04	0,13	0,22	0,1	0,72	0,76	0,01	0,45	0,64	0,01	0,06	1,39	0,01	0,12	1,03
450	0,07	0,13	0,35	0,04	0,13	0,22	0,1	0,75	0,78	0,01	0,48	0,67	0,01	0,07	1,24	0,01	0,09	1,08
480	0,08	0,14	0,37	0,04	0,13	0,22	0,09	0,65	0,82	0,01	0,48	0,61	0,01	0,07	1,27	0,01	0,09	1,08

510	0,07	0,14	0,37	0,04	0,12	0,21	0,09	0,66	0,83	0,01	0,5	0,66	0,01	0,07	1,28	0,01	0,09	1,08
540	0,08	0,15	0,38	0,04	0,12	0,22	0,09	0,68	0,83	0,01	0,53	0,69	0,01	0,1	1,26	0,01	0,09	1,11
570	0,09	0,15	0,38	0,04	0,12	0,23	0,08	0,58	0,92	0,01	0,55	0,71	0,01	0,07	1,25	0,01	0,09	1,21
600	0,09	0,15	0,38	0,04	0,12	0,22	0,12	0,83	0,76	0,01	0,57	0,79	0,03	0,14	2,66	0,01	0,09	1,21
600	0,09	0,10	0,32	0,04	0,13	0,24	0,1	0,84	0,8	0,04	0,37	0,6	0,02	0,08	2,44	0,01	0,09	1,21
630	0,07	0,10	0,31	0,05	0,13	0,24	0,08	0,86	0,85	0,01	0,39	0,62	0,01	0,09	1,92	0,01	0,09	1,21
660	0,07	0,09	0,3	0,04	0,11	0,22	0,08	0,88	0,95	0,01	0,41	0,66	0,01	0,09	1,66	0,01	0,09	1,21
690	0,07	0,10	0,3	0,03	0,11	0,24	0,08	0,88	1	0,01	0,43	0,75	0,01	0,09	1,47	0,01	0,09	1,21
720	0,06	0,09	0,3	0,03	0,11	0,24	0,08	0,89	1,1	0,01	0,45	0,8	0,01	0,08	1,35	0,01	0,09	1,21
750	0,06	0,09	0,29	0,03	0,11	0,24	0,08	0,9	1,18	0,01	0,48	0,9	0,01	0,08	1,35	0,01	0,09	1,21
780	0,05	0,08	0,25	0,03	0,11	0,24	0,08	0,92	1,2	0,01	0,51	1	0,01	0,08	1,36	0,01	0,09	1,21
810	0,05	0,07	0,25	0,03	0,11	0,24	0,07	0,83	1,3	0,01	0,51	1,11	0,02	0,07	1,08	0,01	0,09	1,21
840	0,04	0,04	0,19	0,03	0,11	0,24	0,07	0,83	1,3	0,01	0,52	1,32	0,02	0,07	1,14	0,01	0,09	1,21
870	0,04	0,05	0,23	0,03	0,11	0,25	0,07	0,84	1,32	0,04	0,53	1,34	0,02	0,07	1,16	0,01	0,09	1,21
900	0,06	0,07	0,32	0,03	0,11	0,25	0,07	0,82	1,4	0,04	0,52	1,31	0,02	0,07	1,18	0,01	0,09	1,21
930	0,03	0,04	0,21	0,03	0,11	0,25	0,07	0,87	1,5	0,04	0,55	1,37	0,02	0,07	1,21	0,01	0,09	1,21
960	0,03	0,04	0,21	0,03	0,11	0,25	0,07	0,89	1,6	0,04	0,58	1,42	0,02	0,07	1,22	0,01	0,09	1,21
990	0,03	0,04	0,2	0,03	0,11	0,26	0,08	0,9	1,6	0,04	0,58	1,42	0,02	0,07	1,24	0,01	0,09	1,21
1020	0,03	0,06	0,2	0,03	0,11	0,26	0,08	0,88	1,57	0,04	0,6	1,42	0,01	0,06	1,25	0,01	0,09	1,21
1050	0,03	0,06	0,2	0,03	0,11	0,26	0,08	0,86	1,6	0,04	0,7	1,43	0,01	0,07	1,22	0,01	0,09	1,21
1080	0,03	0,06	0,21	0,03	0,11	0,26	0,08	0,86	1,62	0,04	0,74	1,43	0,01	0,06	1,19	0,01	0,06	1,21
1110	0,03	0,06	0,19	0,03	0,11	0,26	0,08	0,88	1,6	0,04	0,76	1,41	0,01	0,07	1,18	0,01	0,06	1,21
1140	0,03	0,06	0,2	0,03	0,11	0,26	0,08	0,87	1,56	0,04	0,88	1,4	0,01	0,07	1,19	0,01	0,06	1,09
1170	0,03	0,06	0,2	0,03	0,11	0,26	0,09	0,9	1,51	0,04	0,89	1,37	0,01	0,07	1,19	0,01	0,06	1,09
1200	0,04	0,09	0,2	0,03	0,11	0,32	0,08	0,93	1,46	0,04	0,97	1,34	0,01	0,07	1,19	0,01	0,06	1,13
1230	0,03	0,12	0,2	0,03	0,12	0,32	0,09	0,93	1,49	0,04	0,88	1,32	0,01	0,07	1,19	0,01	0,06	1,14
1260	0,03	0,11	0,2	0,03	0,12	0,32	0,1	0,97	1,36	0,04	1,03	1,31	0,01	0,07	1,18	0,01	0,06	1,13
1260	0,08	0,15	0,33	0,04	0,12	0,29	0,08	0,97	1,24	0,04	1,1	1,31	0,01	0,07	1,18	0,01	0,06	1,09
1290	0,07	0,16	0,33	0,03	0,11	0,28	0,08	0,97	1,44	0,04	0,85	1,87	0,01	0,07	1,18	0,01	0,06	1,14

1320	0,06	0,20	0,33	0,03	0,11	0,28	0,08	1,02	1,67	0,01	0,86	1,94	0,01	0,06	1,21	0,01	0,06	1,09
1350	0,05	0,25	0,33	0,03	0,11	0,28	0,08	1	1,6	0,01	0,88	1,99	0,03	0,12	1,86	0,01	0,06	1,15
1380	0,05	0,25	0,3	0,03	0,11	0,28	0,08	1,06	1,54	0,01	0,91	1,85	0,02	0,09	0,75	0,01	0,04	1,06
1410	0,04	0,24	0,29	0,03	0,11	0,29	0,08	1,08	1,45	0,01	0,95	1,72	0,02	0,09	0,67	0,01	0,04	1,08
1440	0,06	0,25	0,31	0,03	0,11	0,3	0,08	1,1	1,45	0,01	0,8	1,62	0,02	0,09	0,6	0,01	0,04	1,13
1470	0,06	0,25	0,32	0,03	0,11	0,31	0,08	1,1	1,45	0,04	1,05	1,56	0,03	0,09	0,6	0,01	0,04	1,12
1500	0,04	0,24	0,31	0,03	0,11	0,31	0,08	1,19	1,45	0,01	1,12	1,52	0,01	0,08	0,58	0,01	0,04	1,11
1530	0,05	0,25	0,31	0,03	0,11	0,31	0,08	1,22	1,45	0,01	1,07	1,48	0,01	0,08	0,59	0,01	0,04	1,11
1560	0,05	0,23	0,31	0,03	0,11	0,31	0,08	1,14	1,3	0,04	0,96	1,42	0,01	0,08	0,58	0,01	0,04	1,1
1590	0,05	0,25	0,32	0,03	0,11	0,32	0,09	1,09	1,29	0,04	0,99	1,4	0,01	0,06	0,57	0,01	0,04	1,1
1620	0,05	0,25	0,32	0,03	0,11	0,32	0,1	1,14	1,29	0,04	1,05	1,38	0,01	0,06	0,57	0,01	0,04	1,07
1650	0,05	0,25	0,33	0,03	0,11	0,33	0,09	1,07	1,27	0,04	1,06	1,38	0,01	0,06	0,57	0,01	0,04	1,06
1680	0,05	0,25	0,34	0,03	0,11	0,34	0,09	1,03	1,22	0,04	1,07	1,36	0,01	0,06	0,57	0,01	0,04	1,06
1710	0,05	0,25	0,33	0,03	0,11	0,34	0,09	0,95	1,36	0,04	1,08	1,34	0,01	0,06	0,5	0,01	0,04	1,16
1740	0,05	0,25	0,35	0,03	0,11	0,34	0,09	0,92	1,36	0,04	1,12	1,32	0,01	0,06	0,5	0,01	0,04	1,15
1770	0,07	0,26	0,36	0,03	0,11	0,35	0,09	0,88	1,31	0,04	1,14	1,29	0,01	0,06	0,5	0,01	0,04	1,15
1800	0,07	0,26	0,36	0,03	0,12	0,34	0,09	0,87	1,36	0,04	1,14	1,29	0,02	0,07	0,49	0,01	0,04	1,14
1830	0,07	0,26	0,36	0,03	0,11	0,34	0,09	0,87	1,38	0,04	1,12	1,19	0,02	0,07	0,49	0,01	0,04	1,14
1860	0,07	0,26	0,36	0,03	0,11	0,34	0,12	1,33	1,4	0,05	1,22	1,2	0,02	0,07	0,49	0,01	0,04	1,14
1890	0,07	0,26	0,36	0,03	0,12	0,36	0,12	1,42	1,48	0,04	1,18	1,19	0,02	0,07	0,49	0,01	0,04	1,09
1920	0,07	0,26	0,36	0,04	0,13	0,32	0,11	1,4	1,51	0,04	1,18	1,16	0,02	0,07	0,49	0,01	0,05	1,67
1950	0,07	0,26	0,36	0,02	0,11	0,31	0,09	1,4	1,62	0,05	1,17	1,17	0,02	0,07	0,49	0,01	0,05	1,6
1980	0,07	0,26	0,36	0,02	0,11	0,31	0,1	1,4	1,67	0,05	1,15	1,16	0,02	0,06	0,53	0,01	0,05	1,58
2010	0,07	0,26	0,36	0,02	0,11	0,31	0,11	1,38	1,61	0,04	1,14	1,89	0,01	0,11	1,22	0,01	0,05	1,54
2040	0,07	0,26	0,36	0,02	0,11	0,31	0,11	1,38	1,6	0,04	1,27	2,23	0,02	0,08	0,86	0,01	0,05	1,47
2070	0,07	0,26	0,36	0,02	0,11	0,31	0,11	1,35	1,53	0,04	1,3	2,03	0,02	0,08	0,72	0,01	0,05	1,36
2100	0,07	0,2	0,36	0,02	0,11	0,31	0,11	1,35	1,48	0,04	1,27	1,77	0,01	0,08	0,66	0,01	0,05	1,25
2130	0,07	0,2	0,38	0,02	0,11	0,31	0,11	1,32	1,44	0,04	1,27	1,77	0,01	0,08	0,65	0,01	0,05	1,16
2160	0,06	0,2	0,38	0,02	0,11	0,31	0,11	1,3	1,4	0,04	1,27	1,67	0,01	0,08	0,65	0,01	0,05	1,15

2190	0,06	0,24	0,39	0,03	0,11	0,35	0,11	1,29	1,42	0,04	1,27	1,55	0,01	0,08	0,65	0,01	0,05	1,1
2220	0,06	0,24	0,39	0,03	0,11	0,35	0,12	1,27	1,44	0,04	1,27	1,49	0,01	0,08	0,65	0,01	0,05	1,13
2250	0,06	0,24	0,39	0,03	0,12	0,32	0,11	1,31	1,53	0,05	1,26	1,41	0,01	0,08	0,65	0,01	0,05	1,16
2280	0,06	0,24	0,41	0,03	0,12	0,37	0,12	1,31	1,54	0,05	1,25	1,35	0,01	0,08	0,65	0,01	0,05	1,21
2310	0,06	0,24	0,44	0,03	0,12	0,39	0,12	1,3	1,55	0,05	1,22	1,34	0,01	0,07	0,65	0,01	0,05	1,27
2340	0,06	0,24	0,44	0,03	0,12	0,39	0,12	1,3	1,47	0,05	1,22	1,3	0,01	0,06	0,53	0,01	0,05	1,11
2370	0,06	0,24	0,44	0,03	0,12	0,39	0,12	1,29	1,51	0,05	1,15	1,29	0,01	0,06	0,53	0,01	0,05	1,06
2400	0,04	0,25	0,48	0,03	0,12	0,39	0,12	1,32	1,4	0,05	1,15	1,28	0,01	0,06	0,53	0,01	0,05	1,06



## **ANEXO B – Dados de Perda de Massa**

**Dados da *Etapa Preliminar* – Perda de Massa (Figura 36)**

Amostra		Peso antes CAIM (g)	Peso após CAIM (g)	% perda de peso	média
CMB	a/c 0,35 FE	142,5	122,5	14,04	12,98
		141,7	124,8	11,93	
	a/c 0,7 FE	138,9	114,2	17,78	17,77
		138	113,5	17,75	
	a/c 0,35 FS	138	119,1	13,70	11,23
		139,3	127,1	8,76	
a/c 0,7 FS	140,7	117,8	16,28	17,32	
	139,4	113,8	18,36		
C	a/c 0,35 FE	138,5	132,6	4,26	6,01
		136,5	125,9	7,77	
	a/c 0,7 FE	136,9	126,4	7,67	5,68
		135,7	130,7	3,68	
	a/c 0,35 FS	138,7	108,7	21,63	21,30
		139,7	110,4	20,97	
	a/c 0,7 FS	139	102,8	26,04	24,49
		141,3	108,9	22,93	

**Dados da *Etapa Principal* – Perda de Massa**

Os dados que não estão descritos são os resultados que foram retirados pelo critério utilizado no grupo LEME, como descrito no capítulo 5.

**Tempo: 8 horas (Figura 55)**

Voltagem: 15, 45 e 70 Volts

Relação a/c: 0,35; 0,5 e 0,7

Profundidade de imersão: até cobrimento e até cobrimento mais meia barra

Amostra		Peso antes CAIM (g)	Peso após CAIM (g)	% perda de peso	média
CMB	a/c 0,35; 15V	139,7	139,7	0	0
		138,0	138,0	0	
		-	-	0	
	a/c 0,5; 15V	138,9	138,8	0,07	0,07
		137,5	137,4	0,07	
		135,7	135,6	0,07	
	a/c 0,7; 15V	-	-	0,15	0,15
		137,5	137,3	0,15	
		138,3	138,1	0,14	

C	a/c 0,35; 15V	138,6	138,1	0,36	0,36
		140,6	139,9	0,36	
		138,9	138,4	0,36	
	a/c 0,5; 15V	-	-	0,36	0,36
		138,2	137,7	0,36	
		137,4	136,9	0,36	
	a/c 0,7; 15V	134,2	133,7	0,37	0,41
		140,0	139,4	0,43	
		136,4	135,8	0,44	
CMB	a/c 0,35; 45V	138,7	138,1	0,43	0,43
		-	-	0,43	
		140,3	139,7	0,43	
	a/c 0,5; 45V	136	135,6	0,29	0,33
		140,3	139,8	0,36	
		-	-	0,33	
	a/c 0,7; 45V	-	-	0,43	0,43
		138,7	138,1	0,43	
		139,4	138,8	0,43	
C	a/c 0,35; 45V	140,6	140,2	0,28	0,32
		-	-	0,32	
		138,6	138,1	0,36	
	a/c 0,5; 45V	140,7	140,2	0,36	0,46
		141,7	140,9	0,56	
		137,7	137,1	0,44	
	a/c 0,7; 45V	137,5	135,3	1,60	1,73
		139,8	137,2	1,86	
		139,5	137,6	1,36	
140,6		140,2	0,28		
CMB	a/c 0,35; 70V	139	138,5	0,36	0,36
		138,9	138,5	0,29	
		138,2	137,6	0,43	
	a/c 0,5; 70V	-	-	0,4	0,4
		141,1	140,5	0,43	
		137,5	137	0,36	
	a/c 0,7; 70V	139,6	133,8	4,15	4,16
		139,5	133,9	4,01	
		137,3	131,4	4,30	
C	a/c 0,35; 70V	138,4	137,8	0,43	0,55
		135,7	134,8	0,66	
		-	-	0,55	
	a/c 0,5; 70V	139,2	136	2,30	2,11

		137,6	134,8	2,03	4,08
		141,1	138,3	1,98	
	<i>a/c 0,7; 70V</i>	137,3	131,7	4,08	
	-	-	4,08		
	139,8	134,1	4,08		

**Tempo: 24 horas (Figura 56)**

Voltagem: 15, 45 e 70 Volts

Relação a/c: 0,35; 0,5 e 0,7

Profundidade de imersão: até cobrimento e até cobrimento mais meia barra

Amostra		Peso antes CAIM (g)	Peso após CAIM (g)	% perda de peso	média
CMB	<i>a/c 0,35; 15V</i>	138,6	138,6	0	0,04
		-	-	0,04	
		139,9	139,8	0,07	
	<i>a/c 0,5; 15V</i>	138,5	138,2	0,22	0,19
		136,9	136,7	0,15	
		-	-	0,19	
	<i>a/c 0,7; 15V</i>	140,6	139,5	0,78	0,68
		139	138,2	0,58	
		-	-	0,68	
C	<i>a/c 0,35; 15V</i>	140,1	139,8	0,21	0,28
		140,7	140,3	0,28	
		137,8	137,3	0,36	
	<i>a/c 0,5; 15V</i>	138,6	137,9	0,51	0,58
		138,3	137,5	0,58	
		-	-	0,58	
	<i>a/c 0,7; 15V</i>	-	-	0,65	0,69
		139,3	138,3	0,72	
		137,6	136,7	0,65	
CMB	<i>a/c 0,35; 45V</i>	-	-	0,47	0,47
		138,8	138,2	0,43	
		138,4	137,7	0,51	
	<i>a/c 0,5; 45V</i>	138,8	132,5	4,54	4,97
		-	-	4,97	
		136,8	129,4	5,41	
	<i>a/c 0,7; 45V</i>	-	-	11,45	11,45
		138,2	122,2	11,58	
		139,6	123,8	11,32	
C	<i>a/c 0,35; 45V</i>	-	-	0,77	0,77

	<i>a/c 0,5; 45V</i>	138,3	136,9	1,01	2,97	
		138,7	137,6	0,79		
		-	-	2,97		
		136,7	132	3,44		
		139,9	136,4	2,50		
		137,4	122,1	11,14		
	<i>a/c 0,7; 45V</i>	138,2	123,3	10,78	10,96	
		-	-	10,96		
	CMB	<i>a/c 0,35; 70V</i>	138,3	138	0,22	0,33
			138,9	138,5	0,29	
			-	-	0,33	
<i>a/c 0,5; 70V</i>		-	-	0,5	0,5	
		139,8	139,1	0,50		
		144	143,3	0,49		
<i>a/c 0,7; 70V</i>		142	119,8	15,63	13,29	
		139	123,1	11,44		
		139	121,2	12,81		
C		<i>a/c 0,35; 70V</i>	-	-	0,52	0,52
			136,8	136,2	0,44	
			136,7	135,9	0,59	
	<i>a/c 0,5; 70V</i>	141,6	141	0,42	0,43	
		140,5	139,7	0,57		
		137,1	136,7	0,29		
	<i>a/c 0,7; 70V</i>	139,4	122,8	11,91	11,73	
		140,3	124,1	11,55		
		-	-	11,73		

**Tempo: 40 horas (Figura 57)**

Voltagem: 15, 45 e 70 Volts

Relação a/c: 0,35; 0,5 e 0,7

Profundidade de imersão: até cobrimento e até cobrimento mais meia barra

Amostra		Peso antes CAIM (g)	Peso após CAIM (g)	% perda de peso	média
CMB	<i>a/c 0,35; 15V</i>	137	136,8	0,15	0,11
		139,2	139,1	0,07	
		-	-	0,11	
	<i>a/c 0,5; 15V</i>	139,1	137,1	1,44	1,59
		138,1	135,7	1,74	
		-	-	1,59	
	<i>a/c 0,7; 15V</i>	140,4	127,8	8,97	7,94
		139,8	128,8	7,87	

		-	-	6,97	
C	a/c 0,35; 15V	137	136,3	0,51	0,36
		139,2	138,9	0,22	
		137,7	137,2	0,36	
	a/c 0,5; 15V	139,1	137,3	1,29	1,55
		-	-	1,55	
		138,7	136,2	1,80	
	a/c 0,7; 15V	140,4	130,5	7,05	6,35
		-	-	6,35	
		138,3	130,5	5,64	
CMB	a/c 0,35; 45V	-	-	0,5	0,5
		140,5	139,8	0,50	
		138,9	138,2	0,50	
	a/c 0,5; 45V	140,2	122,6	12,55	12,29
		140,6	123,7	12,02	
		-	-	12,29	
	a/c 0,7; 45V	138,1	106,4	22,95	22,59
		135,9	105,7	22,22	
		-	-	22,59	
C	a/c 0,35; 45V	139,6	139	0,43	0,43
		-	-	0,43	
		136,9	136,3	0,44	
	a/c 0,5; 45V	-	-	11,2	11,2
		135,4	120,4	11,08	
		141,3	125,3	11,32	
	a/c 0,7; 45V	-	-	17,19	17,19
		138,7	116,4	16,08	
		138,8	113,4	18,30	
CMB	a/c 0,35; 70V	137,5	137,0	0,36	0,4
		-	-	0,4	
		138,9	138,3	0,43	
	a/c 0,5; 70V	-	-	0,55	0,55
		138,5	137,7	0,58	
		137,8	137,1	0,51	
	a/c 0,7; 70V	-	-	14,31	14,31
		138,7	119,5	13,84	
		138,7	118,2	14,78	
C	a/c 0,35; 70V	137,5	134,7	2,04	1,71
		139,8	137,4	1,72	
		138,2	136,3	1,37	

	<i>a/c 0,5; 70V</i>	137,9	122,6	11,09	10,99
		138,8	123,7	10,88	
		-	-	10,99	
	<i>a/c 0,7; 70V</i>	137,5	106,4	22,62	22,28
		135,4	105,7	21,94	
		-	-	22,28	