

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DOS SENSORES
DE CORROSÃO PARA
ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO**

CARLOS HENRIQUE LINHARES FEIJÃO

ORIENTADOR: ELTON BAUER

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL
PUBLICAÇÃO: DM 009A/00**

BRASÍLIA/DF: AGOSTO DE 2000

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

“CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DOS SENSORES DE CORROSÃO
PARA ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO”

CARLOS HENRIQUE LINHARES FEIJÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:



ELTON BAUER, DSc. (UnB)
(ORIENTADOR)



ANTÔNIO ALBERTO NEPOMUCENO, Dr. Ing. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)



PAULO ROBERTO DO LAGO HELENE, DSc. (EPUSP)
(EXAMINADOR EXTERNO)

BRASÍLIA/DF, 10 de AGOSTO DE 2000

FICHA CATALOGRÁFICA

FEIJÃO, CARLOS HENRIQUE LINHARES

Contribuição ao Estudo dos Sensores de Corrosão Para Estruturas de Concreto Armado [Distrito Federal] 2000.

xx, 182p., 210 mm x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas, 2000).

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília.

Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1 - Concreto Armado

2 - Corrosão

3 - Sensor de Corrosão

I. ENC/FT/UnB

4 - Potencial de Eletrodo

5 - Macropar Galvânico

6 - Resistência de Polarização

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FEIJÃO, C. H. L., 2000. Contribuição ao Estudo dos Sensores de Corrosão Para Estruturas de Concreto Armado. Dissertação de Mestrado, Publicação DM 009A/00, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 184p.

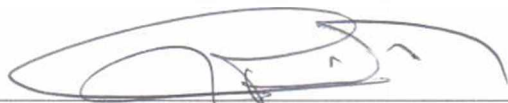
CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Carlos Henrique Linhares Feijão

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Contribuição ao Estudo dos Sensores de Corrosão Para Estruturas de Concreto Armado

GRAU/ANO: Mestre em Ciências/2000

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



Carlos Henrique Linhares Feijão

SQS 108 bloco C apto 604 - Asa Sul

CEP: 70.347-030 - Brasília/DF - Brasil

Fone: (61) 443-3063 / 9981-9990/ 443-8172 (FAX)

E-Mail: carlos_feijao@hotmail.com

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, pelo esforço em me dar o melhor ensino, pelo apoio nas minhas decisões, conselhos nos momentos de dúvida e principalmente pelo grande amor e carinho.

A minha esposa Viviana, e aos meus filhos Lucas e Luana (que está para chegar), pela compreensão nos momentos de ausência e pelo incentivo nos momentos difíceis. Sem eles, talvez eu não tivesse forças para ir até o fim.

Aos meus primeiros orientadores, na bolsa de pesquisa do CNPq, Adrião e Zenaide, que além de grandes amigos, incentivaram-me a continuar meus estudos com o Mestrado.

Ao meu tio, Antônio Feijão, pelo seu incentivo e colaboração em praticamente toda a minha vida acadêmica.

Aos meus irmãos, para que meu esforço sirva de incentivo ao estudo.

Aos meus amigos da UnB, que juntos compartilharam todos os momentos desta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Elton Bauer, pela paciência e compreensão, pelas inúmeras horas de discussão e aprendizado, pelas cobranças nas horas necessárias e pela oportunidade de estudar tema tão interessante.

Aos pesquisadores Raupach, Wietek, Broomfield e Carmem Andrade, que contribuíram para a realização deste trabalho, enviando materiais para a definição da linha de pesquisa.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, que de certa forma contribuíram para este trabalho, através de seus ensinamentos durante as disciplinas ministradas, especialmente ao Prof. Nepomuceno, que muito colaborou para a realização desta Tese, tirando dúvidas e sugerindo algumas alterações nos ensaios e à Prof^a. Eliane, que gentilmente cedeu o Laboratório de Estruturas para a fase inicial do trabalho.

À Prof^a Vanessa, pela colaboração no ensaio de caracterização do aço, colocando a estrutura do Laboratório de Metalurgia da UFMG a nossa disposição.

As técnicos Severino e Xavier, que com sua amizade e solidariedade, ajudaram no desenvolvimento deste trabalho, sem contar nos agradáveis momentos de conversa e descontração.

A CAPES, pelo auxílio financeiro no início desta jornada, que propiciou minha permanência nesta instituição de ensino superior.

À coordenação do Mestrado em Estruturas e Construção Civil e à NOVACAP, que compreenderam as dificuldades ao qual passei durante o curso, com todos os problemas inerentes à realização de um trabalho de tal porte, em conjunto com a necessidade de estar exercendo a minha atividade profissional.

À NOVACAP, especialmente aos meus chefes Dario, José Jorge e Ana Paula, que compreenderam minhas inúmeras ausências nos últimos 2 anos, que permitiram a realização deste trabalho.

RESUMO

Na engenharia moderna, a preocupação com o problema da corrosão deve ser priorizada desde a etapa de projeto. No decorrer das últimas décadas, diversos pesquisadores realizaram estudos mostrando como o gasto com manutenção e recuperação de estruturas atacadas pela corrosão é significativo, comprometendo boa parte do orçamento de um país. É neste sentido que se encaixa o desenvolvimento de técnicas que possibilitam a previsão do estado em que se encontra a armadura dentro do concreto, antes que os sintomas da corrosão sejam visíveis, pois após esta fase, os custos com manutenção e reparo já são bastante elevados. Os sensores de corrosão surgem como uma ferramenta eficaz para fornecer estas informações.

Apresenta-se aqui os resultados de dois tipos de sensores, um galvânico, baseado no modelo proposto por SCHIESSL e RAUPACH, e outro conhecido como VETEK2000, produzido pela CMS da Áustria, cujo princípio baseia-se na técnica do potencial de eletrodo.

Foram moldados 4 corpos-de-prova, com 2 sensores galvânicos, 2 sensores CMS e 2 barras de referência em cada um deles. Os sensores galvânicos foram divididos em duas categorias, uma dos sensores em escada e outra dos sensores que usaram uma relação variável de área anódica e catódica.

Adotou-se a técnica de ensaio acelerado de corrosão induzida por carbonatação, através da utilização de uma câmara com alta concentração de CO_2 , e a técnica de ensaio acelerado de corrosão induzida por cloretos, através da utilização de ciclos de imersão parcial em solução com 3% de NaCl e secagem em estufa.

Foram utilizadas as medidas de resistência de polarização, potencial de eletrodo e macropar galvânico para a avaliação das barras de referência e dos sensores de corrosão. A intensidade de corrosão, obtida através da técnica de resistência de polarização, foi o principal parâmetro para as avaliações que foram realizadas.

Verifica-se que o sensor galvânico, utilizando barras de aço inox como cátodos, apresenta-se como mais uma opção para a utilização no concreto armado, com resultados bastante satisfatórios. Já o sensor comercial da CMS apresenta sinais de instabilidade, no entanto, mostra-se como uma boa ferramenta na análise da fase de iniciação da corrosão.

ABSTRACT

In the modern engineering, the concern about the corrosion problem should be prioritized since the project stage. During the last decades, many researchers developed studies showing how significant the expenses with maintenance and recovery of concrete structures attacked by corrosion are compromising a great part of the country's budget. The development of techniques that allow the forecast of the condition of the reinforcement inside the concrete structures before the symptoms of the corrosion are visible fits into the model, because after this phase, the costs with maintenance and repair are already quite high. The corrosion sensors arrive as efficient tools that provide this information.

The present work shows the results of two types of sensors, a galvanic one, based on a model proposed by SCHIESSL and RAUPACH, and another known like VETEK2000, produced in CMS (Austria), which is based on the measurement of the electrode potential.

Four samples were molded, with two galvanic sensors, two potential sensors and two reference bars each one. The galvanic sensors were divided in two categories, one of the sensors in stairway and the other with the sensors using an area relationship between anodic and cathodic variables.

It was adopted the technique of accelerated corrosion induced by carbonation through the use of a high CO₂ concentration chamber, and the technique of accelerated corrosion induced by chlorides through the use of partial immersion cycles into a 3% NaCl solution along with drying inside a hothouse.

The measures of polarization resistance, electrode potential and galvanic macropar were used for the evaluation of the reference bars and corrosion sensors. The corrosion current, obtained through the polarization resistance technique, it was the main parameter for the evaluations that were accomplished.

It is verified that the galvanic sensor, using stainless steel bars as cathodes, it is presented as more an option for the use in the reinforced concrete, with quite satisfactory results. The commercial sensor CMS presents signs of instability, however, it is shown as a good tool in the analysis of the initiation period of the corrosion.

SUMÁRIO

Capítulo	Página
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 JUSTIFICATIVA PARA O TEMA	1
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	3
1.2.1 <i>Objetivos Gerais</i>	3
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	3
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	3
2. CONSIDERAÇÕES SOBRE A CORROSÃO NO CONCRETO ARMADO	5
2.1 ASPECTOS DA DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS RELACIONADOS À CORROSÃO.....	10
2.2 ASPECTOS DA ESTRUTURA FÍSICA DO CONCRETO	13
2.3 CORROSÃO INDUZIDA PELA CARBONATAÇÃO.....	16
2.4 CORROSÃO INDUZIDA POR CLORETOS.....	20
2.5 CORROSÃO EM REGIÕES COM FISSURAS.....	23
3. TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS E SENSORES DE CORROSÃO.....	26
3.1 TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS USUAIS PARA O CONCRETO ARMADO	27
3.1.1 <i>Técnica da Resistência Elétrica</i>	27
3.1.2 <i>Técnica do Potencial de Eletrodo</i>	29
3.1.3 <i>Técnica do Ruído Eletroquímico</i>	31
3.1.4 <i>Técnica da Impedância Eletroquímica</i>	33
3.1.5 <i>Técnica da Resistência de Polarização</i>	35
3.1.6 <i>Técnica da Corrente Galvânica (Estudo de Macropares)</i>	39
3.2 AVALIAÇÃO DAS TÉCNICAS DE MONITORAMENTO DA CORROSÃO.....	41
3.3 SENSORES DE CORROSÃO PARA ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO.....	42
3.3.1 <i>Sensores de Resistência Elétrica</i>	43
3.3.2 <i>Sensor Galvânico</i>	43
3.3.3 <i>Sensor de Potencial de Corrosão</i>	49
3.3.4 <i>Sensor de Resistência de Polarização</i>	51
4. PROJETO EXPERIMENTAL.....	56
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	58
4.1.1 <i>Cimento</i>	58
4.1.2 <i>Areia</i>	59
4.1.3 <i>Aço</i>	60
4.1.4 <i>Sensores galvânicos de corrosão</i>	62
4.1.5 <i>Corpos-de-prova</i>	63
4.2 SÉRIES DE ENSAIO	66
4.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL - METODOLOGIA	68
4.3.1 <i>Medidas Eletroquímicas</i>	68
4.3.2 <i>Ensaio Complementares</i>	72
4.3.3 <i>Ensaio de Corrosão Induzida por Carbonatação</i>	72
4.3.4 <i>Ensaio de Corrosão Induzida por Cloretos</i>	75
5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	78
5.1 ENSAIO ACELERADO DE CORROSÃO INDUZIDA POR CARBONATAÇÃO	79
5.1.1 <i>Barras longitudinais de referência - Série CA-BL</i>	79
5.1.2 <i>Sensor Comercial CMS - Série CA-SC</i>	82
5.1.3 <i>Sensores galvânicos em escada - Série CA-SGE</i>	85
5.1.4 <i>Sensores Galvânicos com Variação de Área Anódica Catódica - Série CA-SGA</i>	92
5.2 ENSAIO ACELERADO DE CORROSÃO INDUZIDA POR CLORETOS.....	100
5.2.1 <i>Barras longitudinais de referência - Série CL-BL</i>	100
5.2.2 <i>Sensor Comercial CMS - Série CL-SC</i>	105
5.2.3 <i>Sensores galvânicos em escada - Série CL-SGE</i>	109

5.2.4	<i>Sensores Galvânicos com Variação de Área Anódica Catódica - Série CL-SGA</i>	115
5.3	AVALIAÇÕES COMPLEMENTARES	121
5.3.1	<i>Perdas Gravimétrica e Eletroquímica</i>	121
5.3.2	<i>Avaliação conjunta das Séries de Carbonatação e Cloretos</i>	122
6.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS	126
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	130
	ANEXO I	144
	ANEXO II	148
	ANEXO III	155
	ANEXO IV	169
	ANEXO V	176
	ANEXO VI	180

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
FIGURA 2.1 - TIPOS DE CORROSÃO MAIS FREQUENTES NO CONCRETO E SUAS CAUSAS (MATOS, 1997).....	6
FIGURA 2.2 - CÉLULA DE CORROSÃO EM CONCRETO ARMADO (HELENE E FIGUEIREDO, 1994).....	6
FIGURA 2.3 - FORMAÇÃO DE PILHA DE CORROSÃO SEGUNDO ANDRADE (1992).....	8
FIGURA 2.4 - FORMAÇÃO DE MACROPAR GALVÂNICO EM ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO (HELENE E FIGUEIREDO, 1994).....	10
FIGURA 2.5 - MODELO DE PROPAGAÇÃO DA CORROSÃO PROPOSTO POR TUUTTI (1982).....	12
FIGURA 2.6 - PRINCIPAIS MECANISMOS DE TRANSPORTE NO CONCRETO (HELENE, 1993).....	14
FIGURA 2.7 - CARBONATAÇÃO ATRAVÉS DA SUPERFÍCIE E FISSURAS NO CONCRETO (PRUDÊNCIO, 1986).....	18
FIGURA 2.8 - CARBONATAÇÃO DIFICULTADA COM OS POROS TOTALMENTE VAZIOS (BAKKER, 1988).....	18
FIGURA 2.9 - CARBONATAÇÃO DIFICULTADA COM OS POROS TOTALMENTE PREENCHIDOS (BAKKER, 1988).....	18
FIGURA 2.10 - CARBONATAÇÃO ACELERADA EM POROS PARCIALMENTE PREENCHIDOS (BAKKER, 1988).....	19
FIGURA 2.11 - CORROSÃO POR PITES (TREADAWAY, 1988).....	20
FIGURA 2.12 - PENETRAÇÃO DE CLORETOS NO CONCRETO ENDURECIDO (SCHIESSL, 1988).....	21
FIGURA 2.13 - EFEITO DAS FISSURAS NA CORROSÃO DO AÇO NO CONCRETO (WWW.A-BAU.CO.AT).....	24
FIGURA 3.1 - TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS USUAIS PARA MEDIDAS NO CONCRETO ARMADO (ALMEIDA, 1996).....	27
FIGURA 3.2 - ARRANJO TÍPICO DE Sonda DE RESISTÊNCIA EM CONCRETO (MATOS, 1997).....	28
FIGURA 3.3 - ESQUEMA MOSTRANDO A INSTRUMENTAÇÃO PARA A MEDIDA DE RUÍDO ELETROQUÍMICO.....	32
FIGURA 3.4 - EXEMPLO DE CURVA DE REGISTRO TEMPORAL DO RUÍDO DE CORRENTE (VILELLA, 1996).....	33
FIGURA 3.5 - EXEMPLO DE CIRCUITO EQUIVALENTE PARA CONCRETO ARMADO E DIAGRAMA DE NYQUIST (MATOS, 1997).....	34
FIGURA 3.6 - DISTRIBUIÇÃO NÃO UNIFORME DO SINAL ELÉTRICO PELO CE SOBRE A ARMADURA - INDEFINIÇÃO DA ÁREA POLARIZADA (FELIU ET AL., 1990).....	38
FIGURA 3.7 - ILUSTRAÇÃO DO SISTEMA <i>Guard Ring</i> PARA CONFINAMENTO DE SINAL ELÉTRICO EM MEDIDAS DE R_p (FELIU ET AL., 1990).....	38
FIGURA 3.8 - SISTEMA SEMELHANTE AO <i>Guard Ring</i> , UTILIZANDO POLARIZAÇÃO GALVANOSTÁTICA (FELIU ET AL., 1990).....	39
FIGURA 3.9 - FORMAÇÃO DE MACROPILHAS EM MEIOS AERADO E NÃO-AERADOS (GALVEZ, 1980).....	40
FIGURA 3.10 - COMPORTAMENTO DA CORRENTE GALVÂNICA NO TEMPO (SCHIESSL E RAUPACH, 1992).....	45
FIGURA 3.11 - ESQUEMA DO SENSOR EM ESCADA (SCHIESSL E RAUPACH, 1992).....	45
FIGURA 3.12 - ESQUEMA DO SENSOR EM ESCADA (SCHIESSL E RAUPACH, 1992).....	46
FIGURA 3.13 - SENSOR EXPANSÍVEL DE MULTI-ANÉIS (SCHIESSL E RAUPACH, S.D.).....	47
FIGURA 3.14 - DETALHE DE CONSTRUÇÃO DO SENSOR GALVÂNICO (SHORT ET AL., 1991).....	49
FIGURA 3.15 - ARRANJO PARA MEDIDAS DE R_p E I_{gal} EM SISTEMA PROPOSTO POR SHORT ET AL. (1991).....	49
FIGURA 3.16 - ESQUEMA DO SENSOR DA CMS (WWW.A-BAU.CO.AT).....	50
FIGURA 3.17 - EXEMPLO DE UTILIZAÇÃO DO SENSOR VETEK2000 EM ESTRUTURA REAL.....	51
FIGURA 3.18 - MODELO DE Sonda C2 PARA CONCRETO DA CAPCIS (WWW.CAPCIS.CO.UK).....	52
FIGURA 3.19 - MODELO DE Sonda M3 PARA CONCRETO DA CAPCIS (WWW.CAPCIS.CO.UK).....	52
FIGURA 3.20 - MODELO DE Sonda PARA ESTRUTURAS JÁ CONSTRUÍDAS DA <i>ELECTROCHEMICAL DEVICES</i> (<i>POTENTIAL WELLS PROBE</i>).....	53
FIGURA 3.21 - ARRANJO PARA COLOCAÇÃO DE ELETRODO DE REFERÊNCIA E Sonda DE GRAFITE EM ESTRUTURA DE CONCRETO EM CONSTRUÇÃO (<i>ELECTROCHEMICAL DEVICES</i>).....	54
FIGURA 4.1 - DIAGRAMA DAS MEDIDAS ELETROQUÍMICAS ENVOLVIDAS NA SÉRIE DE CARBONATAÇÃO.....	57
FIGURA 4.2 - DIAGRAMA DAS MEDIDAS ELETROQUÍMICAS ENVOLVIDAS NA SÉRIE DE CLORETOS.....	58
FIGURA 4.3 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA AREIA.....	60
FIGURA 4.4 - ESQUEMA DE MONTAGEM DOS SENSORES GALVÂNICOS EM ESCADA E COM VARIAÇÃO DE A_a/A_c	62
FIGURA 4.5 - ESQUEMA DA FORMA DOS CORPOS-DE-PROVA.....	64
FIGURA 4.6 - ESQUEMA DE MONTAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA.....	65
FIGURA 4.7 - CURVA TÍPICA DE ESTABILIZAÇÃO DA CORRENTE GALVÂNICA UTILIZANDO AMPERÍMETRO DE RESISTÊNCIA NULA (ZRA), QUE PODE VARIAR EM FUNÇÃO DO MEIO E DO MATERIAL UTILIZADO.....	70
FIGURA 4.8 - ESQUEMA DA CÂMARA DE CARBONATAÇÃO.....	73
FIGURA 5.1 - EVOLUÇÃO DA INTENSIDADE DE CORROSÃO - SÉRIE CA-BL.....	79
FIGURA 5.2 - EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA ÔHMICA - SÉRIE CA-BL.....	80
FIGURA 5.3 - EVOLUÇÃO DO POTENCIAL ECS - SÉRIE CA-BL.....	81
FIGURA 5.4 - CORRELAÇÃO ENTRE INTENSIDADE DE CORROSÃO E POTENCIAL (ECS) - SÉRIE CA-BL.....	81
FIGURA 5.5 - CORRELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA ÔHMICA E INTENSIDADE DE CORROSÃO - SÉRIE CA-BL.....	82

FIGURA 5.6 - CORRELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA ÔHMICA E POTENCIAL (ECS) - SÉRIE CA-BL	82
FIGURA 5.7 - EVOLUÇÃO DO POTENCIAL EM RELAÇÃO AO CMS - SÉRIE CA-BL	83
FIGURA 5.8 - CORRELAÇÃO ENTRE INTENSIDADE DE CORROSÃO E POTENCIAL (CMS) - SÉRIE CA-SC	84
FIGURA 5.9 - CORRELAÇÃO ENTRE POTENCIAL (CMS) E POTENCIAL (ECS) - SÉRIE CA-SC	84
FIGURA 5.10 - OSCILAÇÃO DO POTENCIAL DO SENSOR CMS EM RELAÇÃO AO CALOMELANO - SÉRIE CA-SC	85
FIGURA 5.11 - EVOLUÇÃO DA INTENSIDADE DE CORROSÃO (A), CORRENTE GALVÂNICA (B) E RESISTÊNCIA ÔHMICA (C) - SÉRIE CA-SGE1	86
FIGURA 5.12 - EVOLUÇÃO DA INTENSIDADE DE CORROSÃO (A), CORRENTE GALVÂNICA (B) E RESISTÊNCIA ÔHMICA (C) - SÉRIE CA-SGE2	88
FIGURA 5.13 - EVOLUÇÃO DO POTENCIAL INOX (A) E DO POTENCIAL ECS (B) - SÉRIE CA-SGE2	89
FIGURA 5.14 - CORRELAÇÃO ENTRE CORRENTE GALVÂNICA E INTENSIDADE DE CORROSÃO - SÉRIE CA-SGE	90
FIGURA 5.15 - CORRELAÇÃO ENTRE CORRENTE GALVÂNICA E RESISTÊNCIA ÔHMICA - SÉRIE CA-SGE	91
FIGURA 5.16 - CORRELAÇÃO ENTRE INTENSIDADE DE CORROSÃO E RESISTÊNCIA ÔHMICA - SÉRIE CA-SGE	91
FIGURA 5.17 - CORRELAÇÃO ENTRE POTENCIAL INOX E INTENSIDADE DE CORROSÃO - SÉRIE CA-SGE	92
FIGURA 5.18 - CORRELAÇÃO ENTRE POTENCIAL (INOX) E POTENCIAL (ECS) - SÉRIE CA-SGE	92
FIGURA 5.19 - EVOLUÇÃO DA INTENSIDADE DE CORROSÃO (A), CORRENTE GALVÂNICA (B) E RESISTÊNCIA ÔHMICA (C) - SÉRIE CA-SGA1	93
FIGURA 5.20 - EVOLUÇÃO DO POTENCIAL INOX (A) E DO POTENCIAL ECS (B) - SÉRIE CA-SGA1	95
FIGURA 5.21 - EVOLUÇÃO DA INTENSIDADE DE CORROSÃO (A), CORRENTE GALVÂNICA (B) E RESISTÊNCIA ÔHMICA (C) - SÉRIE CA-SGA2	96
FIGURA 5.22 - EVOLUÇÃO DO POTENCIAL INOX (A) E DO POTENCIAL ECS (B) - SÉRIE CA-SGA2	97
FIGURA 5.23 - CORRELAÇÃO ENTRE CORRENTE GALVÂNICA E INTENSIDADE DE CORROSÃO - SÉRIE CA-SGA	98
FIGURA 5.24 - CORRELAÇÃO ENTRE POTENCIAL (INOX) E INTENSIDADE DE CORROSÃO - SÉRIE CA-SGA	98
FIGURA 5.25 - CORRELAÇÃO ENTRE POTENCIAL (INOX) E POTENCIAL (ECS) - SÉRIE CA-SGA	99
FIGURA 5.26 - CORRELAÇÃO ENTRE CORRENTE GALVÂNICA E RESISTÊNCIA ÔHMICA - SÉRIE CA-SGA	99
FIGURA 5.27 - CORRELAÇÃO ENTRE INTENSIDADE DE CORROSÃO E RESISTÊNCIA ÔHMICA - SÉRIE CA-SGA	100
FIGURA 5.28 - EVOLUÇÃO DA INTENSIDADE DE CORROSÃO - SÉRIE CL-BL	101
FIGURA 5.29 - EVOLUÇÃO DA VARIAÇÃO DE MASSA DA SÉRIE DE CLORETOS	102
FIGURA 5.30 - EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA ÔHMICA - SÉRIE CL-BL	103
FIGURA 5.31 - CORRELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA ÔHMICA E INTENSIDADE DE CORROSÃO - SÉRIE CL-BL	103
FIGURA 5.32 - EVOLUÇÃO DO POTENCIAL ECS - SÉRIE CL-BL	104
FIGURA 5.33 - CORRELAÇÃO ENTRE INTENSIDADE DE CORROSÃO E POTENCIAL (ECS) - SÉRIE CL-BL	105
FIGURA 5.34 - EVOLUÇÃO DO POTENCIAL EM RELAÇÃO AO CMS - SÉRIE CL-BL	106
FIGURA 5.35 - OSCILAÇÃO DO POTENCIAL DO SENSOR CMS EM RELAÇÃO AO CALOMELANO - SÉRIE CL-SC	106
FIGURA 5.36 - CORRELAÇÃO ENTRE INTENSIDADE DE CORROSÃO E POTENCIAL (CMS) - SÉRIE CL-SC	107
FIGURA 5.37 - CORRELAÇÃO ENTRE INTENSIDADE DE CORROSÃO E POTENCIAL (CMS) - PERÍODO DE INICIAÇÃO - SÉRIE CL-SC	107
FIGURA 5.38 - CORRELAÇÃO ENTRE POTENCIAL (CMS) E POTENCIAL (ECS) - SÉRIE CL-SC	108
FIGURA 5.39 - CORRELAÇÃO ENTRE POTENCIAL (CMS) E POTENCIAL (ECS) - FAIXA - SÉRIE CL-SC	108
FIGURA 5.40 - EVOLUÇÃO DA INTENSIDADE DE CORROSÃO (A) E CORRENTE GALVÂNICA (B) - SÉRIE CL-SGE1	109
FIGURA 5.41 - EVOLUÇÃO DO POTENCIAL INOX (A) E DO POTENCIAL ECS (B) - SÉRIE CL-SGE1	111
FIGURA 5.42 - EVOLUÇÃO DA INTENSIDADE DE CORROSÃO (A) E CORRENTE GALVÂNICA (B) - SÉRIE CL-SGE2	112
FIGURA 5.43 - EVOLUÇÃO DO POTENCIAL INOX (A) E DO POTENCIAL ECS (B) - SÉRIE CL-SGE2	113
FIGURA 5.44 - CORRELAÇÃO ENTRE CORRENTE GALVÂNICA E INTENSIDADE DE CORROSÃO - SÉRIE CL-SGE	114
FIGURA 5.45 - CORRELAÇÃO ENTRE POTENCIAL (INOX) E INTENSIDADE DE CORROSÃO - SÉRIE CL-SGE	114
FIGURA 5.46 - CORRELAÇÃO ENTRE POTENCIAL (INOX) E POTENCIAL (ECS) - SÉRIE CL-SGE	115
FIGURA 5.47 - EVOLUÇÃO DA INTENSIDADE DE CORROSÃO (A) E CORRENTE GALVÂNICA (B) - SÉRIE CL-SGA1	116
FIGURA 5.48 - EVOLUÇÃO DO POTENCIAL INOX (A) E DO POTENCIAL ECS (B) - SÉRIE CL-SGA1	117
FIGURA 5.49 - EVOLUÇÃO DA INTENSIDADE DE CORROSÃO (A) E CORRENTE GALVÂNICA (B) - SÉRIE CL-SGA2	118
FIGURA 5.50 - EVOLUÇÃO DO POTENCIAL INOX (A) E DO POTENCIAL ECS (B) - SÉRIE CL-SGA2	119
FIGURA 5.51 - CORRELAÇÃO ENTRE CORRENTE GALVÂNICA E INTENSIDADE DE CORROSÃO - SÉRIE CL-SGA	120
FIGURA 5.52 - CORRELAÇÃO ENTRE POTENCIAL (INOX) E INTENSIDADE DE CORROSÃO - SÉRIE CL-SGA	120
FIGURA 5.53 - CORRELAÇÃO ENTRE POTENCIAL (INOX) E POTENCIAL (ECS) - SÉRIE CL-SGA	121
FIGURA 5.54 - PERDA ELETROQUÍMICA X GRAVIMÉTRICA	121
FIGURA 5.55 - AÇÃO DAS MICROCELULAS E MACROCELULAS NOS ENSAIOS DE CARBONATAÇÃO E CLORETOS (ANDRADE E ALONSO, 1996)	123
FIGURA I.1 - ENSAIO DE ABSORÇÃO CAPILAR	145
FIGURA I.2 - EVOLUÇÃO DO POTENCIAL INOX - SÉRIE CA-SGE1	145
FIGURA I.3 - EVOLUÇÃO DO POTENCIAL ECS - SÉRIE CA-SGE1	145
FIGURA I.4 - EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA ÔHMICA - SÉRIE CL-SGE1	146

FIGURA I.5 - EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA ÔHMICA - SÉRIE CL-SGE2	146
FIGURA I.6 - EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA ÔHMICA - SÉRIE CL-SGA1	146
FIGURA I.7 - EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA ÔHMICA - SÉRIE CL-SGA2	147
FIGURA III.1 - INTENSIDADE DE CORROSÃO - SÉRIE CA-BL - AMPLIADO	156
FIGURA III.2 - POTENCIAL DE CORROSÃO - SÉRIE CA-BL - AMPLIADO	156
FIGURA III.3 - EVOLUÇÃO DA MASSA DOS CPS - SÉRIE CA-BL	156
FIGURA III.4 - POTENCIAL (ECS) - SÉRIE CA-SC - AMPLIADO	157
FIGURA III.5 - CORRENTE GALVÂNICA - SÉRIE CA-SGE1 - AMPLIADO	157
FIGURA III.6 - INTENSIDADE DE CORROSÃO - SÉRIE CA-SGE1 - AMPLIADO	157
FIGURA III.7 - POTENCIAL (INOX) - SÉRIE CA-SGE1 - AMPLIADO	158
FIGURA III.8 - POTENCIAL (ECS) - SÉRIE CA-SGE1 - AMPLIADO	158
FIGURA III.9 - CORRENTE GALVÂNICA - SÉRIE CA-SGE2 - AMPLIADO	158
FIGURA III.10 - INTENSIDADE DE CORROSÃO - SÉRIE CA-SGE2 - AMPLIADO	159
FIGURA III.11 - POTENCIAL (INOX) - SÉRIE CA-SGE2 - AMPLIADO	159
FIGURA III.12 - POTENCIAL (ECS) - SÉRIE CA-SGE2 - AMPLIADO	159
FIGURA III.13 - CORRENTE GALVÂNICA - SÉRIE CA-SGA1 - AMPLIADO	160
FIGURA III.14 - INTENSIDADE DE CORROSÃO - SÉRIE CA-SGA1 - AMPLIADO	160
FIGURA III.15 - POTENCIAL (INOX) - SÉRIE CA-SGA1 - AMPLIADO	160
FIGURA III.16 - POTENCIAL (ECS) - SÉRIE CA-SGA1 - AMPLIADO	161
FIGURA III.17 - CORRENTE GALVÂNICA - SÉRIE CA-SGA2 - AMPLIADO	161
FIGURA III.18 - INTENSIDADE DE CORROSÃO - SÉRIE CA-SGA2 - AMPLIADO	161
FIGURA III.19 - POTENCIAL (INOX) - SÉRIE CA-SGA2 - AMPLIADO	162
FIGURA III.20 - POTENCIAL (ECS) - SÉRIE CA-SGA2 - AMPLIADO	162
FIGURA III.21 - INTENSIDADE DE CORROSÃO - SÉRIE CL-BL - AMPLIADO	162
FIGURA III.22 - POTENCIAL DE CORROSÃO - SÉRIE CL-BL - AMPLIADO	163
FIGURA III.23 - POTENCIAL (ECS) - SÉRIE CL-SC - AMPLIADO	163
FIGURA III.24 - CORRENTE GALVÂNICA - SÉRIE CL-SGE1 - AMPLIADO	163
FIGURA III.25 - INTENSIDADE DE CORROSÃO - SÉRIE CL-SGE1 - AMPLIADO	164
FIGURA III.26 - POTENCIAL (INOX) - SÉRIE CL-SGE1 - AMPLIADO	164
FIGURA III.27 - POTENCIAL (ECS) - SÉRIE CL-SGE1 - AMPLIADO	164
FIGURA III.28 - CORRENTE GALVÂNICA - SÉRIE CL-SGE2 - AMPLIADO	165
FIGURA III.29 - INTENSIDADE DE CORROSÃO - SÉRIE CL-SGE2 - AMPLIADO	165
FIGURA III.30 - POTENCIAL (INOX) - SÉRIE CL-SGE2 - AMPLIADO	165
FIGURA III.31 - POTENCIAL (ECS) - SÉRIE CL-SGE2 - AMPLIADO	166
FIGURA III.32 - CORRENTE GALVÂNICA - SÉRIE CL-SGA1 - AMPLIADO	166
FIGURA III.33 - INTENSIDADE DE CORROSÃO - SÉRIE CL-SGA1 - AMPLIADO	166
FIGURA III.34 - POTENCIAL (INOX) - SÉRIE CL-SGA1 - AMPLIADO	167
FIGURA III.35 - POTENCIAL (ECS) - SÉRIE CL-SGA1 - AMPLIADO	167
FIGURA III.36 - CORRENTE GALVÂNICA - SÉRIE CL-SGA2 - AMPLIADO	167
FIGURA III.37 - INTENSIDADE DE CORROSÃO - SÉRIE CL-SGA2 - AMPLIADO	168
FIGURA III.38 - POTENCIAL (INOX) - SÉRIE CL-SGA2 - AMPLIADO	168
FIGURA III.39 - POTENCIAL (ECS) - SÉRIE CL-SGA2 - AMPLIADO	168

ÍNDICE DE FOTOS

Foto	Página
FOTO 3.1 - TIPOS DE SONDAS DE RESISTÊNCIA PARA USOS DIVERSOS	43
FOTO 3.2 - FOTO DO SENSOR ESCADA (WWW.SENSORTEC.DE)	44
FOTO 3.3 - EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO SENSOR EM ESCADA (WWW.SENSORTEC.DE)	46
FOTO 3.4 - FOTO DO SENSOR EM ANÉIS EXPANSÍVEIS (SCHIESSL E RAUPACH, S.D.)	47
FOTO 3.5 - SENSOR VETEK2000 DA CMS	51
FOTO 3.6 - SONDA DE CORROSÃO DA <i>KH DESIGN</i> (WWW.KHDESIGN.DEMON.CO.UK)	54
FOTO 3.7 - EXEMPLO DE APLICAÇÃO DE SONDA DA <i>KH DESIGN</i> (WWW.KHDESIGN.DEMON.CO.UK)	55
FOTO 4.1 - DETALHE DOS SENSORES E BARRAS MONTADOS NA FORMA DO CP	65
FOTO 4.2 - EQUIPAMENTO PARA MEDIDA DE CORRENTE GALVÂNICA	69
FOTO 4.3 - EQUIPAMENTOS PARA ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE POLARIZAÇÃO	71
FOTO 4.4 - CÂMARA DE CARBONATAÇÃO	74
FOTO 4.5 - PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO ATRAVÉS DO INDICADOR FENOLFTALEÍNA	75
FOTO 4.6 - ENSAIO DE CLORETOS - CORPOS-DE-PROVA PARCIALMENTE SUBMERSOS EM SOLUÇÃO DE NaCl	76
FOTO IV.1 - ASPECTO DA BARRA CA-BL1-1 APÓS O FINAL DO ENSAIO	170
FOTO IV.2 - ASPECTO DA BARRA CA-BL1-2 APÓS O FINAL DO ENSAIO	170
FOTO IV.3 - ASPECTO DA BARRA CA-BL2-1 APÓS O FINAL DO ENSAIO	170
FOTO IV.4 - ASPECTO DA BARRA CA-BL2-2 APÓS O FINAL DO ENSAIO	170
FOTO IV.5 - ASPECTO DO SENSOR CA-SGE1 APÓS O FINAL DO ENSAIO	171
FOTO IV.6 - ASPECTO DO SENSOR CA-SGA1 APÓS O FINAL DO ENSAIO	171
FOTO IV.7 - ASPECTO DO SENSOR CA-SGE2 APÓS O FINAL DO ENSAIO	172
FOTO IV.8 - ASPECTO DO SENSOR CA-SGA2 APÓS O FINAL DO ENSAIO	172
FOTO IV.9 - ASPECTO DA BARRA CL-BL1-1 APÓS O FINAL DO ENSAIO	173
FOTO IV.10 - ASPECTO DA BARRA CL-BL1-2 APÓS O FINAL DO ENSAIO	173
FOTO IV.11 - ASPECTO DA BARRA CL-BL2-1 APÓS O FINAL DO ENSAIO	173
FOTO IV.12 - ASPECTO DA BARRA CL-BL2-2 APÓS O FINAL DO ENSAIO	173
FOTO IV.13 - ASPECTO DO SENSOR CL-SGE1 APÓS O FINAL DO ENSAIO	174
FOTO IV.14 - ASPECTO DO SENSOR CL-SGA1 APÓS O FINAL DO ENSAIO	174
FOTO IV.15 - ASPECTO DO SENSOR CL-SGE2 APÓS O FINAL DO ENSAIO	175
FOTO IV.16 - ASPECTO DO SENSOR CL-SGA2 APÓS O FINAL DO ENSAIO	175

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela	Página
TABELA 2.1 - REAÇÕES PROVÁVEIS NUM PROCESSO DE CORROSÃO DO AÇO EM CONCRETO (LIMA, 1996).....	7
TABELA 2.2 - TEOR LIMITE DE CLORETOS (ANDRADE, 1992 - MODIFICADA).....	23
TABELA 3.1 - CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DA RESISTIVIDADE - CEB 192 (CEB, 1989).....	29
TABELA 3.2 - CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO DE POTENCIAIS DE CORROSÃO SEGUNDO A ASTM C-876.....	30
TABELA 3.3 - VALORES INDICATIVOS DE I_{CORR} (ANDRADE E ALONSO, 1996).....	37
TABELA 3.4 - CARACTERÍSTICA DOS MÉTODOS DE CORROSÃO MAIS UTILIZADOS EM CONCRETO ARMADO : A (ÓTIMO) , B (SATISFATÓRIO), C (INSATISFATÓRIO) - RODRÍGUEZ ET AL., 1994.....	41
TABELA 3.5 - CARACTERÍSTICAS DOS MÉTODOS ELETROQUÍMICOS E SENSORES (RILEM, 1994 - MODIFICADO) ..	42
TABELA 3.6 - REFERÊNCIA DE POTENCIAIS PARA O SENSOR VETEK2000 DA CMS (WIETEK, 1996).....	50
TABELA 4.1 - ANÁLISE QUÍMICA DO CIMENTO.....	59
TABELA 4.2 - PROPRIEDADES FÍSICAS DOS CIMENTOS.....	59
TABELA 4.3 - PROPRIEDADES DA AREIA UTILIZADA NO ENSAIO.....	60
TABELA 4.4 - ANÁLISE QUÍMICA DAS ARMADURAS (ABSORÇÃO ATÔMICA).....	61
TABELA 4.5 - CONEXÕES ELÉTRICAS NOS SENSORES GALVÂNICOS.....	63
TABELA 4.6 - SÉRIE DE ENSAIO - CARBONATAÇÃO.....	67
TABELA 4.7 - SÉRIE DE ENSAIO - CLORETOS.....	68
TABELA 4.8 - CRONOLOGIA DO ENSAIO DE CARBONATAÇÃO.....	75
TABELA 4.9 - CRONOLOGIA DO ENSAIO DE CLORETOS.....	77
TABELA 5.1 - LIMITES DE DESPASSIVAÇÃO PADRÕES E ENCONTRADOS NAS SÉRIES DE ENSAIO.....	124

SIMBOLOGIA

Ω	Ohm
β_a	constante anódica de Tafel
μA	micro ampere
β_c	constante catódica de Tafel
A	ampere
A%	relação água/materiais secos
a/c	relação água/cimento
A_a	área anódica
A_c	área catódica
$Ca(OH)_2$	hidróxido de cálcio
$CaCO_3$	carbonato de cálcio
Cl^-	íon cloreto
CO_2	gás carbônico
CP	corpo-de-prova
D	coeficiente efetivo de difusão
E(ECS)	potencial de eletrodo em relação ao eletrodo de calomelano saturado
E(INOX)	potencial de eletrodo em relação à barra de INOX.
E_{corr}	potencial de corrosão
H_2O	água
H_2SO_4	ácido sulfúrico
i_{corr}	intensidade de corrosão
I_{gal}	corrente galvânica
i_{gal}	intensidade galvânica
i_t	intensidade de corrosão total
NaCl	cloreto de sódio
O_2	oxigênio
OH^-	íon hidroxila
P_{elet}	perda de massa eletroquímica
R_{ohm}	resistência ôhmica
R_p	resistência de polarização

1. INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA PARA O TEMA

A corrosão de armaduras é uma das principais causas de deterioração precoce das estruturas de concreto armado. DAL MOLIN (1988), em estudo realizado no Rio Grande do Sul, verificou que a incidência relativa em função do dano provocado nas estruturas apresenta um índice de 40% para os casos de corrosão da armadura, principalmente quando relacionada a segurança estrutural. NINCE (1996), em estudo na região Centro-Oeste do Brasil, com mais de 500 casos analisados, concluiu que a incidência da corrosão de armadura em estruturas com problemas patológicos na cidade de Brasília é da ordem de 30,1%, na cidade de Goiânia 14,2%, em Campo Grande 4,5% e em Cuiabá 23,1%. CARMONA & MOREGA, citados por NINCE (1996), descrevem que no estado de São Paulo, as manifestações de corrosão de armadura em estruturas com algum tipo de defeito são da ordem de 31%. RAMANATHAN (1987) diz que, perdas devido à corrosão em países industrializados chegam a ordem de 3,5% a 4,2% do PIB. HOBBS (1996) descreve que a estimativa de custo anual com reparos em estruturas atacadas pela corrosão no Reino Unido é da ordem de £500 milhões. Nos Estados Unidos, a estimativa de custo anual é da ordem de \$50 bilhões. Evidencia-se portanto o enfoque atual sobre a durabilidade das estruturas de concreto, particularmente no caso da corrosão de armaduras.

SCHIESSL & RAUPACH (s.d.), citam que o custo anual com inspeção, manutenção e reparo, para o caso de pontes, é da ordem de 1-2% do custo de substituição das mesmas, e os maiores dispêndios para as medidas de reparo são:

- As inspeções, que possuem um alto custo, consomem tempo e requerem pessoal especializado e materiais específicos;
- Falhas na durabilidade, principalmente devido à corrosão, são detectadas somente em estágios avançados, onde é possível uma avaliação visual. O reparo, neste caso, tem um custo muito mais elevado;
- No caso de estruturas como pontes, viadutos, túneis, os procedimentos de inspeção, manutenção e reparo causam um custo adicional da ordem de 15-40%, devido aos atrasos com o sistema de transporte;

Os estudos relativos à corrosão são bastante antigos. Os primeiros trabalhos relacionados à

corrosão de armadura e à utilização de técnicas eletroquímicas para o monitoramento da corrosão no concreto armado datam da década de 60, como referência os trabalhos de PAPADAKIS et al. (1969), ANDRADE (1973), IVANOV et al. (1980) e SCHIESSL (1988).

No Brasil, os trabalhos relacionados à utilização de técnicas eletroquímicas no estudo da corrosão das armaduras datam de meados da década de 80, realizados pelo Prof. Luiz Miranda e equipe (potencial de eletrodo e curvas de polarização). A Universidade de Brasília (UnB), através do Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM), realizou os primeiros estudos com a técnica de resistência de polarização no final da década de 80 (BAUER, 1991; BAUER et al., 1990; MONTALVÃO, 1992). Mais recentemente, através do programa de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, o LEM desenvolveu diversos estudos relacionados com a corrosão de armaduras, através dos trabalhos de MONTEIRO (1996), CASTANHEIRA (1997), GUIMARÃES (1997), VASCONCELOS (1997), FIGUEIREDO (1998) e TEIXEIRA (1998). Em 1996, o CNPq patrocinou o LEM (UnB) para a realização de um projeto para o estudo das adições e da microestrutura do concreto no estudo da corrosão, e também encontra-se em andamento um estudo para avaliar a ação conjunta de íons cloreto e carbonatação na corrosão de armaduras.

Destacam-se também os estudos desenvolvidos na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) e na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), como os trabalhos de MATOS (1991), HELENE (1993), FIGUEIREDO (1994), BAUER (1995), LIMA (1996) e BRITO (1997), entre outros.

Apesar dos estudos relativos à corrosão de armadura e à técnicas eletroquímicas estarem bem desenvolvidos, com muitos trabalhos publicados na literatura nacional e internacional, verifica-se uma grande carência de referências bibliográficas quando o assunto é relacionado ao monitoramento da corrosão através da utilização de sensores. Foram encontradas poucas pesquisas, apenas a nível internacional, destacando-se os trabalhos de RAUPACH & SCHIESSL (1992), JOHN (1996), WIETEK (1996), BROOMFIELD (1994), SHORT et al. (1991), TAMURA et al. (1996) e ANSUINI & DIMOND (1994).

No Brasil, mais recentemente foram publicados três trabalhos relacionados ao tema sensores de corrosão por FEIJÃO e BAUER (1998), FEIJÃO e BAUER (1999) e FEIJÃO e BAUER (2000).

A proposição do emprego de sensores de corrosão embutidos na massa do concreto consiste em obter informações sobre a armadura numa fase onde as frentes de agentes agressivos ainda não atacaram o aço, possibilitando o uso de medidas preventivas, que são menos dispendiosas. O estudo, compreensão e desenvolvimento de dispositivos que façam este papel se torna de grande importância para a segurança das obras de engenharia e para a economia do país.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.2.1 Objetivos Gerais

Através de metodologias de ensaios acelerados de corrosão induzida por carbonatação e por cloretos, procura-se avaliar a sensibilidade e estabilidade dos sensores de corrosão frente às diversas condições as quais podem ser submetidos em estruturas reais. São utilizadas técnicas de potencial de eletrodo, resistência de polarização e corrente galvânica para a realização das medidas eletroquímicas necessárias.

1.2.2 Objetivos Específicos

Avaliar dois tipos de sensores de corrosão para estruturas de concreto armado. O primeiro sensor é comercializado como VETEK 2000, distribuído pela CMS da Áustria. O outro sensor foi desenvolvido neste trabalho, baseado no modelo proposto por SCHIESSL & RAUPACH (1992), que propuseram a utilização de um sensor galvânico em forma de escada, a fim de acompanhar o avanço da frente de agentes agressivos através da camada de cobertura da armadura. O sensor galvânico foi dividido em duas categorias: a primeira seguiu o modelo original da escada, no entanto, com um novo arranjo dos eletrodos, e a segunda variou a relação área anódica e catódica.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

A distribuição dos assuntos tratados nesta Dissertação é a seguinte:

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, com um apanhado geral do conhecimento relativo à eletroquímica aplicada à corrosão no concreto armado, aspectos da corrosão induzida por carbonatação e por cloretos, conceitos de durabilidade, uma avaliação dos mecanismos de transporte no concreto e sua microestrutura.

O capítulo 3 trata das técnicas eletroquímicas aplicadas ao estudo da corrosão e apresenta um apanhado dos tipos de sensores que podem ser utilizados para o acompanhamento da corrosão no concreto armado.

O capítulo 4 mostra o procedimento experimental adotado neste trabalho, com a caracterização dos materiais empregados, as definições das séries de ensaio e as metodologias adotadas para os ensaios de corrosão.

Os resultados e discussões são tratados no capítulo 5, que mostra de forma seqüencial os resultados das barras de referência, do sensor CMS, do sensor galvânico em escada e do sensor galvânico horizontal, para os ensaios de carbonatação e cloretos, respectivamente.

O capítulo 6 expõe as conclusões que foram obtidas através das análises dos sensores, e trata das recomendações e sugestões para pesquisas futuras.

Os anexos trazem informações complementares, como procedimentos experimentais, fotos e tabelas e figuras.

2. CONSIDERAÇÕES SOBRE A CORROSÃO NO CONCRETO ARMADO

Os princípios eletroquímicos da corrosão de armaduras no concreto armado já são bem estudados e divulgados (SCHIESSL, 1988; GENTIL, 1996 ; FURTADO, 1981; HELENE, 1993; HELENE, 1986; PANOSSIAN, 1993; PAPADAKIS et al., 1969; IVANOV et al., 1980; MATOS, 1997 entre outros).

As características físicas do concreto, como porosidade, permeabilidade, absorção e características químicas que definem a interação com o meio ambiente, definem o quanto este material será resistente à ação de agentes agressivos, como cloretos e CO_2 . Um concreto bem dosado e executado deveria proporcionar excelente proteção à armadura, mantendo-as em estado passivo, através de uma barreira física eficaz contra o ingresso de agentes agressivos e de uma proteção química, pelo pH elevado, variando de 12,5 a 13,5 (BAKKER, 1988), principalmente devido aos hidróxidos formados nas reações de hidratação dos silicatos do cimento e dos álcalis incorporados ao clínquer (SATO, 1998).

Segundo GENTIL (1996), a corrosão e a deterioração que podem ser observadas no concreto podem ser atribuídas principalmente à fatores mecânicos, físicos, biológicos e químicos. No caso da corrosão em concreto armado, os principais causadores da corrosão das armaduras são os íons cloretos e a redução da reserva alcalina através do fenômeno da carbonatação. Fatores físicos e mecânicos, como variações térmicas e choques na estrutura, podem acelerar o ingresso dos agentes agressivos, através de formação de fissuras, por exemplo.

Segundo FURTADO (1981), corrosão é a deterioração de um corpo sólido por meio de uma ação química ou eletroquímica, provocada pelo meio ambiente. Já HELENE (1986) diz que corrosão é a interação destrutiva de um material com o ambiente, seja por reação química ou eletroquímica. PANOSSIAN (1993) define corrosão metálica como sendo a transformação de um metal em íon metálico pela sua interação química ou eletroquímica com o meio em que se encontra.

No concreto armado, a corrosão pode se manifestar principalmente de 3 maneiras (Figura 2.1):

- corrosão generalizada: normalmente devido ao fenômeno da carbonatação;
- corrosão por pites: em geral devido aos íons cloretos;

- corrosão sob tensão: comum em concreto protendido.

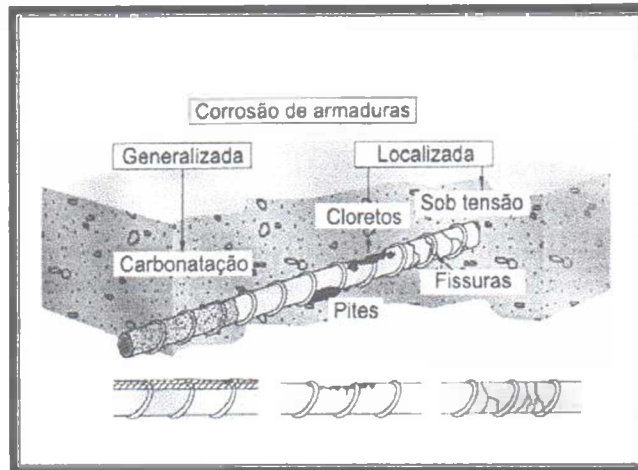


Figura 2.1 - Tipos de Corrosão Mais Frequentes no Concreto e Suas Causas (MATOS, 1997)

A corrosão metálica tem uma natureza eletroquímica (PAGE, 1988; ANDRADE, 1992; WOLYNEC, 1987, METHA e MONTEIRO, 1994), onde a superfície do metal que corroe funciona como uma mistura de eletrodos, onde reações anódicas e catódicas se processam. A formação de uma célula ou pilha de corrosão no concreto armado pode acontecer de acordo com a Figura 2.2.

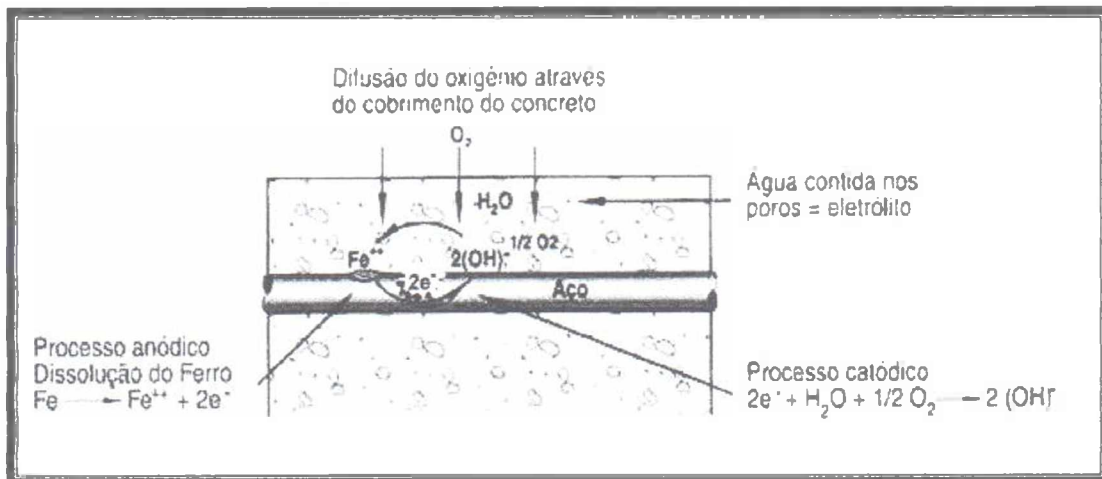


Figura 2.2 - Célula de corrosão em concreto armado (HELENE e FIGUEIREDO, 1994)

As reações mais prováveis no caso da corrosão de armadura são mostradas na Tabela 2.1:

Tabela 2.1 - Reações prováveis num processo de corrosão do aço em concreto (LIMA, 1996)

Região	Reação Provável	Características do produto formado e Observações
Região Anódica	$2\text{Fe} \rightarrow 2\text{Fe}^{2+} + 4\text{e}^-$	-
Região catódica	$\text{H}_2\text{O} + \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^-$ $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$	Meio aerado Meio não-aerado
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
	$4\text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Óxido férrico hidratado, expansivo

Em uma pilha de corrosão, o sentido da corrente, por convenção, é oposto ao sentido real do fluxo de elétrons, ou seja, admite-se que o sentido convencional seja do cátodo para o ânodo. Considerando a reação química que ocorre em uma pilha ($a\text{A} + b\text{B} \rightarrow c\text{C} + d\text{D}$), sua força eletromotriz é dada pela equação de Nernst (GENTIL, 1996; PAGE, 1988; MATOS, 1997; FURTADO, 1981; PANOSSIAN, 1993; POSADAS, 1980).

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{a\text{Me}^{n+}}{a\text{Me}} \quad (2.1)$$

- E → potencial de eletrodo do metal
- E_0 → potencial padrão
- R → constante universal dos gases [8,314 J/(mol.K)]
- T → temperatura absoluta [K]
- N → número de elétrons envolvidos (valência)
- F → constante de Faraday [96.493 Coulombs]
- $a\text{Me}^{n+}$ → atividade dos íons metálicos em solução
- $a\text{Me}$ → atividade unitária do íon metálico

Pela equação, verifica-se que, para existir uma diferença de potencial entre os eletrodos, é necessário uma das seguintes condições:

- os eletrodos serem de materiais diferentes;

- as soluções dos eletrodos terem diferentes atividades;
- os eletrodos estarem submetidos a diferentes pressões parciais de substâncias gasosas;
- os eletrodos estarem submetidos a diferentes temperaturas.

Segundo ANDRADE (1992), o processo de corrosão pressupõe a constituição de uma pilha eletroquímica, e a corrosão através do metal e do eletrólito entre ânodo e cátodo pressupõe o funcionamento de um circuito fechado. Se o circuito se interrompe em algum os seus pontos, a pilha não pode funcionar e a corrosão se detém. As condições para a formação de uma pilha são mostradas na Figura 2.3.

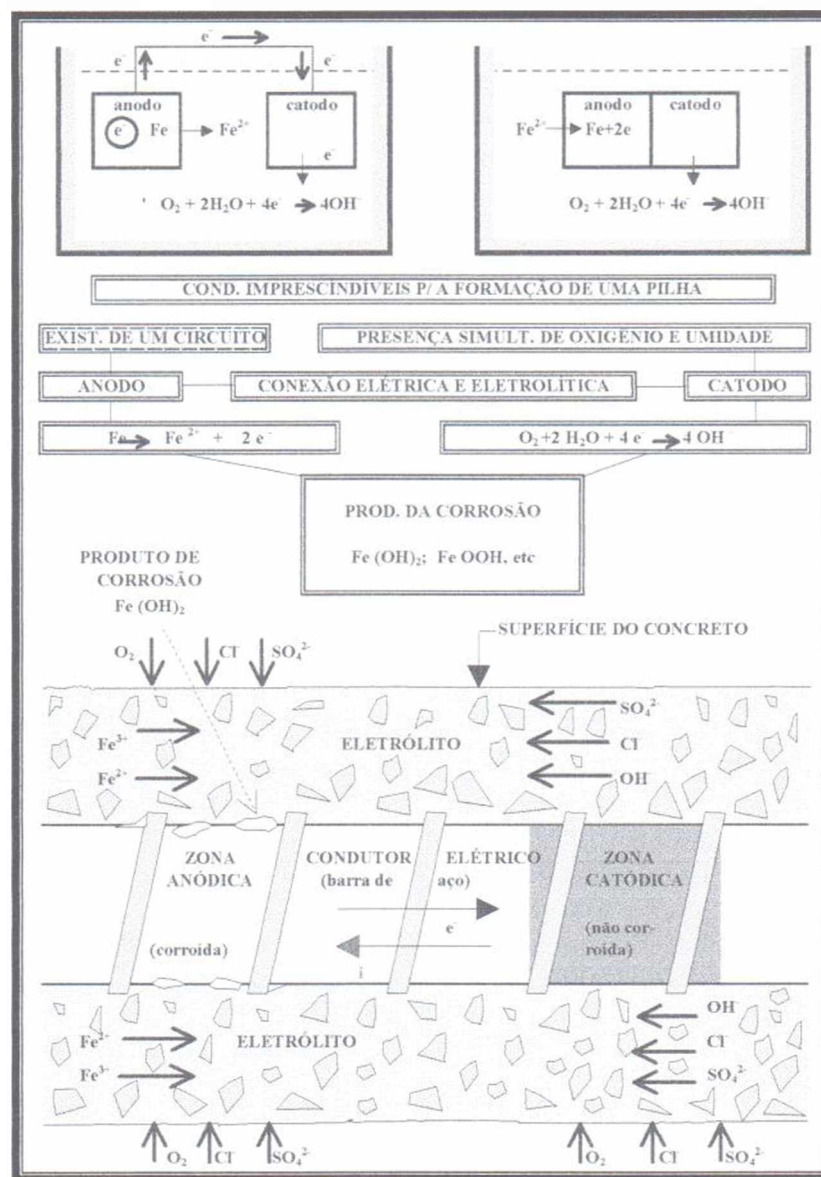


Figura 2.3 - Formação de pilha de corrosão segundo ANDRADE (1992)

O metais que tendem a formar película passivadora, como é o caso do aço, podem sofrer ataque localizado de agentes agressivos, como os de íons cloreto. Forma-se no local do ataque, onde ocorre a quebra da película, a formação de uma pequena zona anódica rodeada de uma grande zona catódica. Isto é o que chama-se de pilha ativa-passiva.

A película passivadora formada na superfície do aço surge em função da elevada alcalinidade proporcionada pela presença de hidróxidos de sódio, potássio e cálcio derivados das reações de hidratação do cimento (PAGE, 1988; METHA e MONTEIRO, 1994, HELENE, 1993). Esta película é transparente, aderente, contínua, impermeável e submicroscópica, e pode manter o aço em estado passivo indefinidamente, mesmo em presença de umidade elevada (CASTANHEIRA, 1997; ANDRADE, 1992). HELENE (1993), cita que a teoria de formação do filme de passivação mais aceita é a composta por duas camadas de óxidos, uma interna onde predomina o Fe_3O_4 e outra externa de $\gamma-Fe_2O_3$. A película passivante também pode ser de ferrato de cálcio, resultante da ferrugem superficial ($Fe(OH)_3$) com o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), segundo a reação (BASILIO *apud* HELENE, 1993):



SAGOE-CRENTSIL e GLASSER, citados por MATOS (1997), destacam um estado de semipassivação, que representaria melhor a maioria das estruturas de concreto armado. A proteção química do aço, neste caso, apresentaria uma estrutura interfacial dupla, constituída por uma camada mais interna de óxido de ferro e uma camada mais externa composta por uma mistura de goetita ($\alpha-FeOOH$) e óxido de ferro.

No concreto armado, pode surgir também a corrosão galvânica, que ocorre quando dois metais são conectados, sendo um mais nobre que o outro, como é mostrado na Figura 2.4. Isto é o que se chama de macropar galvânico. Os macropares, de uma forma mais genérica, são pilhas de corrosão que podem ser geradas entre duas áreas distantes de no máximo alguns decímetros (ANDRADE, 1992). A corrente que flui da zona anódica para a zona catódica é chamada de corrente galvânica (I_{gal}), e esta é dada pela soma da contribuição das micropilhas e das macropilhas (GALVEZ, 1980; CASTANHEIRA, 1997; NEPOMUCENO, 1992).

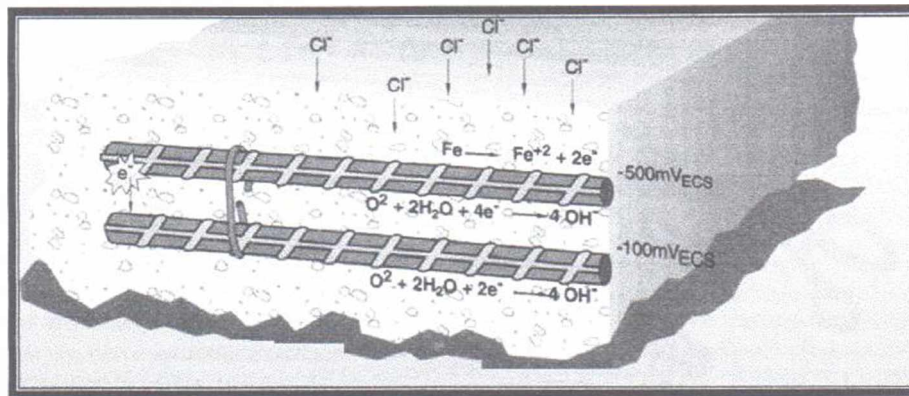


Figura 2.4 - Formação de macropar galvânico em estrutura de concreto armado (HELENE e FIGUEIREDO, 1994)

Alguns fatores relacionados ao concreto que podem fazer com que a corrosão se instale no concreto são: redução da reserva alcalina, permeabilidade e absorção de água, resistividade, relação a/c, cobrimento, adensamento, cura e fissuração.

A desp passivação do aço pode ocorrer devido principalmente a (BAUER, 1995):

- presença de cloretos em teor crítico, seja adicionada na massa ou devido à penetração por processo de difusão principalmente, chamando-se este mecanismo de corrosão induzida por cloretos;
- redução da alcalinidade, principalmente devido ao fenômeno da carbonatação, chamando-se este mecanismo de corrosão induzida por carbonatação.

2.1 ASPECTOS DA DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS RELACIONADOS À CORROSÃO

Segundo HELENE (1993), podem ser distinguidas pelo menos quatro vidas úteis a saber:

- vida útil de projeto;
- vida útil de serviço ou utilização;
- vida útil total;
- vida útil residual.

Tomando como referência o CEB / FIP Model Code 1990, por vida útil de serviço entende-se o período de tempo no qual a estrutura é capaz de desempenhar as funções para as quais foi

projetada, sem elevados custos de manutenção. Após uma eventual intervenção corretiva, poderá ser estimada uma nova vida útil residual (HELENE, 1993)

O final da vida útil total de uma estrutura corresponde ao momento onde seria necessária a sua demolição, pois os custos de reparação já se encontrariam superiores aos previstos para executar o mesmo projeto.

O estudo da durabilidade das estruturas de concreto armado e protendido tem evoluído, dentre outros aspectos, graças ao maior conhecimento dos mecanismos de transporte de líquidos e de gases agressivos nos meios porosos como o concreto. Há necessidade por um lado, de conhecer, avaliar e classificar o grau de agressividade do ambiente, e por outro, de conhecer o concreto e a geometria da estrutura, estabelecendo então a correspondência entre ambos, o seja, entre a agressividade do meio e a durabilidade da estrutura de concreto (HELENE, 1993).

Com uma previsão do comportamento das armaduras em relação à corrosão, bem como uma previsão do avanço dos agentes agressivos, pode-se aumentar a vida útil total de uma estrutura. Deste modo, pode-se intervir num estágio antes da propagação das reações de corrosão, onde a tarefa de reparo é menos dispendiosa. O momento ideal para a intervenção dependerá de vários fatores, como o estado de deterioração da estrutura, sua vida residual e o custo (NEPOMUCENO, 1992)

Segundo WIETEK e KUNZ (1998), em muitos países, como a Alemanha, EUA, Inglaterra, Suíça, Áustria e Japão, exigências de requisitos para a execução do concreto, como relação a/c e teor de ar incorporado, já são utilizados para prevenir o processo de corrosão. A Norma espanhola EHE-98 também mostra um comprometimento com a durabilidade das estruturas. No Brasil, o projeto da nova Norma de concreto, NB1-2000, expõe uma preocupação com o problema da durabilidade, pressupondo que os projetos devam garantir uma vida útil de pelo menos 50 anos, através do controle de fissuras, qualidade do concreto, definições de planos de inspeção e manutenção preventiva, entre outros.

O modelo proposto por TUUTTI (1982), mostrado na Figura 2.5, considera que os principais agentes agressivos que provocam a corrosão (Cl^- e CO_2) penetram do exterior, avançando progressivamente até a armadura. Este período de ingresso dos agentes agressivos, antes que

haja a despassivação da armadura, corresponde ao período de iniciação. Quando a armadura se despassiva, pelo aumento do teor de agentes agressivos próximos à barra de aço, começa a haver a perda de capacidade portante da peça. Este período é caracterizado pelo controle através de fatores como disponibilidade de oxigênio, temperatura, umidade relativa (resistividade), entre outros, e é chamado de período de propagação.

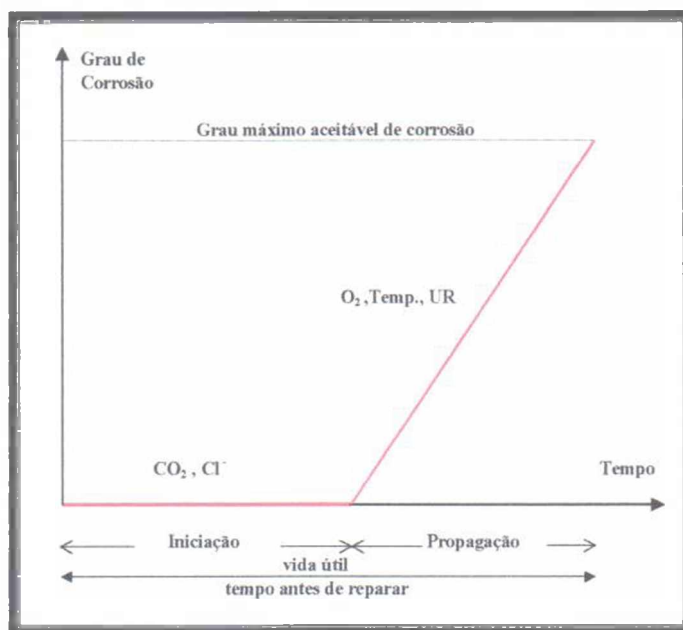


Figura 2.5 - Modelo de propagação da corrosão proposto por TUUTTI (1982)

HELENE (1993) propõe o estudo dos mecanismos e modelos de ingresso de CO_2 e Cl^- , estabelecendo critérios e valores de referência, para servirem de subsídio na etapa de projeto, definindo-se então a estimativa de vida útil de projeto e de serviço. Neste caso, torna-se importante o conhecimento do coeficiente efetivo de difusão de cloretos (D_{efCl}) e o coeficiente de carbonatação (k_{CO_2}). ANDRADE et al. (1990) apresentaram interessante modelo de previsão da vida útil total das estruturas de concreto a partir de medidas de taxa de corrosão, expressa em corrente de corrosão, conhecidas por i_{corr} , baseado na lei ou equação de Faraday, inicialmente adotando o modelo de vida útil de TUUTTI.

SITTER (1986), também baseado no modelo proposto por TUUTTI, estabeleceu o que chamou de “Lei dos 5”, para estimar os custos de recuperação de uma estrutura deteriorada por corrosão. Esta lei sugere que os custos de manutenção crescem a uma razão geométrica, em função das etapas da obra que são cumpridas sem preocupar-se com aspectos de durabilidade. Na etapa de projeto, admite-se um custo unitário, que sobe para 5 na fase

correspondente ao período de iniciação, passando para 25 no final da fase de iniciação e para 125 numa fase de corrosão generalizada.

Alguns parâmetros que influem na qualidade do concreto são os coeficientes de difusão, de permeabilidade, de absorção capilar, de migração, enfim os parâmetros do material concreto com relação ao transporte de certos íons, gases e líquidos através de seus poros. A vida útil desejada para uma estrutura pode ser alcançada através de uma combinação adequada e inteligente desses fatores, ou seja, ao empregar um concreto de melhor qualidade é possível reduzir o cobrimento, mantendo-se a mesma vida útil de projeto, e vice-versa. A questão da vida útil da estruturas de concreto deve portanto, ser enfocada como resultante de ações coordenadas e realizadas em todas as etapas do processo construtivo: concepção ou planejamento; projeto; fabricação de materiais e componentes; execução propriamente dita e principalmente durante a etapa de uso da estrutura. É nessa etapa onde serão realizadas as operações de vistoria, monitoramento e manutenções preventiva e corretiva, indispensáveis numa consideração correta e sistêmica da vida útil (HELENE, 1993).

2.2 ASPECTOS DA ESTRUTURA FÍSICA DO CONCRETO

A nível macroscópico, o concreto pode ser considerado como um material de duas fases: a primeira, constituída pelos agregados dispersos na segunda, que é uma matriz de cimento formada pela pasta. As fases não estão distribuídas de um modo homogêneo, uma em relação a outra. A massa da pasta, em algumas áreas, aparece bastante densa em relação ao agregado, e em outras é altamente porosa. Ainda há uma terceira fase, a zona de transição, que é constituída pela região da interface entre os grãos de agregado e a pasta. Devido ser uma película bastante delgada ao redor do agregado graúdo, a zona de transição é geralmente mais fraca do que este e a pasta (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Em consequência das reações produzidas durante o processo de hidratação e da quantidade de água utilizada para amassar o concreto, a pasta de cimento torna-se um material formado basicamente por 3 fases (sólida, poros e água) compostas por partículas de cimento anidro mergulhadas em uma matriz contínua de gel de cimento, a qual é atravessada por uma múltipla rede de poros que podem ou não estar cheios de água (MOPT, 1991 *apud* FIGUEIREDO, 1994).

A partir do desenvolvimento da estrutura interna do concreto, em consequência da hidratação do cimento, constata-se uma evolução do sistema sólido da pasta, que altera a estrutura dos poros, influenciando sobremaneira as mais diversas propriedades do concreto, como durabilidade, resistência mecânica, permeabilidade, difusão iônica, absorção capilar, dentre outras (BAUER, 1995).

O transporte dos agentes agressivos para o interior do concreto se dá através desta estrutura porosa do concreto, principalmente por mecanismos e absorção capilar, permeabilidade e difusão, podendo ainda ocorrer migração iônica, no caso da penetração de cloretos (SATO, 1998). A Figura 2.6 ilustra os principais mecanismos de transporte no concreto armado.

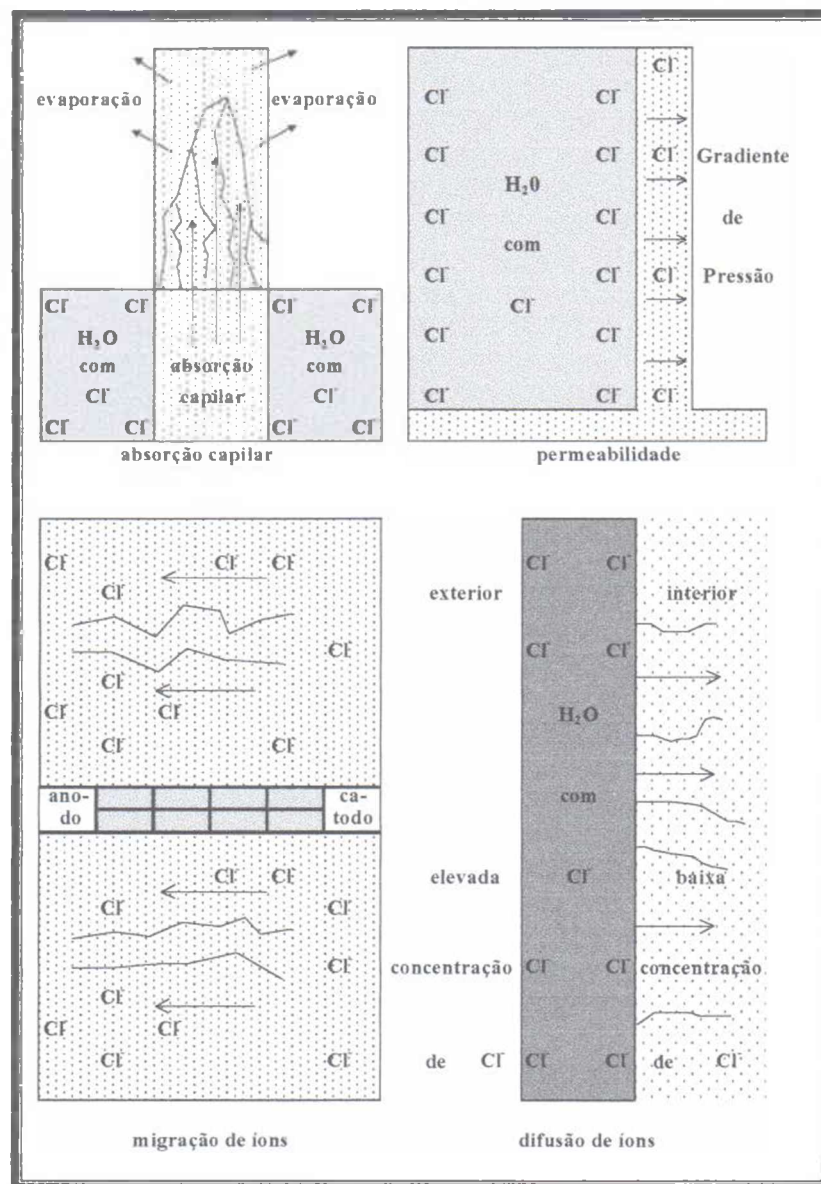


Figura 2.6 - Principais mecanismos de transporte no concreto (HELENE, 1993)

Visando o refinamento da estrutura porosa do concreto, podem ser empregadas adições minerais, com o intuito de aumentar a durabilidade. No entanto, as adições ao mesmo tempo que podem reduzir o coeficiente de difusão de cloretos, reduzem também o desempenho dos concretos no que diz respeito à carbonatação, principalmente pela redução da reserva alcalina (BAUER, 1995).

O conhecimento do comportamento dos materiais porosos quando em presença de água, tanto em fase de vapor quanto em fase líquida, é muito importante no estudo da susceptibilidade dos concretos à penetração de agentes agressivos. A taxa de penetração de agentes agressivos por meio da absorção e permeabilidade é governada pela taxa de penetração de água, além da umidade presente nos poros do concreto na forma de vapor.

O concreto apresenta sempre uma certa quantidade de umidade, mesmo quando exposto a ambientes relativamente secos, em decorrência da umidade adsorvida e condensada nos vazios interlamelares. Os concretos com maior número de poros menores são mais hidrófilos quando em ambiente úmido, retendo uma maior quantidade de água líquida. A umidade pode estar presente no interior dos poros tanto em forma gasosa, quanto na forma líquida, em função da dimensão do poro e da umidade relativa (METHA e MONTEIRO, 1994).

Devido à sua estrutura porosa, o concreto em contato com o vapor de água é capaz de fixar e transferir umidade, tanto na fase líquida quanto na forma de vapor. A umidade na forma de vapor é fixada nos poros superficiais do concreto através dos processos de adsorção física e condensação capilar.

A permeabilidade do concreto à água está relacionada com a porosidade do concreto, principalmente com a distribuição das frequências de ocorrência dos diâmetros de poros ao longo do material. Desta maneira, os fatores que influenciam na geração do espaço poroso do material, como a relação a/c, composição do cimento e o grau de hidratação, têm influência sobre a permeabilidade (SATO, 1998).

Há uma maior dificuldade de ocorrer corrosão do aço em concreto com disponibilidade de eletrólito muito baixa, nem no concreto imerso totalmente em água.

Os íons ingressam no concreto geralmente em forma de solução, ou seja, os íons dissolvidos

são transportados junto com água, através dos mecanismos de capilaridade e permeabilidade. Como a permeabilidade caracteriza um mecanismo de transporte de água em materiais saturados e submetidos a uma diferença de pressão, a absorção por capilaridade, que ocorre em meios porosos não saturados, é a situação mais comumente encontrada nos elementos de construção. Além disso, pode também haver transporte destes íons pelos mecanismos de difusão e de migração. O fenômeno da difusão ocorre quando existe um gradiente de concentração de íons ao longo do material, e é modelado pelas leis de Fick, sendo a primeira, aplicável a difusão em regime permanente (HELENE, 1993).

2.3 CORROSÃO INDUZIDA PELA CARBONATAÇÃO

SHORT et al. (1991) afirmam que a corrosão induzida pela carbonatação em estruturas de concreto é a maior causa para a deterioração prematura das mesmas. Variáveis como temperatura, umidade relativa e presença de cloretos (mesmo em baixas concentrações) são conhecidas por influenciarem nas taxas de corrosão em estruturas de concreto carbonatadas. Já RODRÍGUEZ e GONZÁLEZ (1994) afirmam que o ingresso de cloretos é a forma mais freqüente de ataque às estruturas de concreto, no entanto, a carbonatação tem se mostrado muito perigosa, já que inúmeras estruturas na Europa têm mostrado sinais deste ataque com poucas décadas de utilização.

Carbonatação é um processo químico de neutralização do concreto, com a redução significativa dos valores de pH. É também um fenômeno natural, decorrente da existência de CO₂ na atmosfera, em concentrações que variam de 0,3 a 1,2%, para ambientes rurais e urbanos respectivamente (HELENE, 1986).

A principal reação da carbonatação que ocorre no concreto é (KAZMIERCZAK, 1996):



Para que esta reação ocorra, é necessário que o anidrido carbônico seja solubilizado, através da reação:



No desenvolvimento da carbonatação, tanto o NaOH como o KOH carbonatam-se primeiro (precipitam na forma de carbonatos), aumentando a solubilidade do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para carbonatar (TUUTTI, 1982).

Normalmente, a carbonatação é um processo lento, devido à baixa concentração de CO_2 presente em atmosferas urbanas, no entanto pode ser acelerado em regiões de ambiente altamente contaminado, como túneis e garagens.

A reserva alcalina, caracterizada pelo teor de hidróxidos disponíveis em solução é um fator de controle da velocidade de carbonatação. Cimentos que liberam grandes quantidades $\text{Ca}(\text{OH})_2$ por unidade de volume permitem o desenvolvimento de menores velocidades de carbonatação (BAUER, 1996). Outro fator controlador da propagação da corrosão induzida pela carbonatação é a resistividade, que depende por sua vez do grau de umidade dos poros e da porosidade. A existência de controle resistivo implica no fato da velocidade de corrosão ser restringida ou limitada pelo fluxo de íons entre regiões anódicas e catódicas (BAUER, 1995).

A carbonatação ocorre por mecanismo da difusão, principalmente pela diferença de concentração entre o ambiente externo e os poros do concreto (BAUER, 1995), deste modo, a permeabilidade e a porosidade do concreto são parâmetros controladores da carbonatação..

Uma característica do processo de carbonatação é a existência de uma frente de avanço do processo, separando duas zonas de pH muito diferentes; uma com $\text{pH} < 9$ (carbonatada) e outra com $\text{pH} > 12$ (não carbonatada). O contato entre a zona carbonatada e a não carbonatada é transicional, e a carbonatação progride ao longo dos planos de descontinuidade, dados pela matriz grão-areia, na carbonatação natural, e grão-matriz, na carbonatação acelerada (KAZMIERCZAK, 1996).

A presença de fissuras pode ocasionar a lixiviação do carbonato de cálcio, fazendo com que o acesso à armadura dos agentes agressivos fique facilitado (BAKKER, 1988), como pode ser visualizado na Figura 2.7.

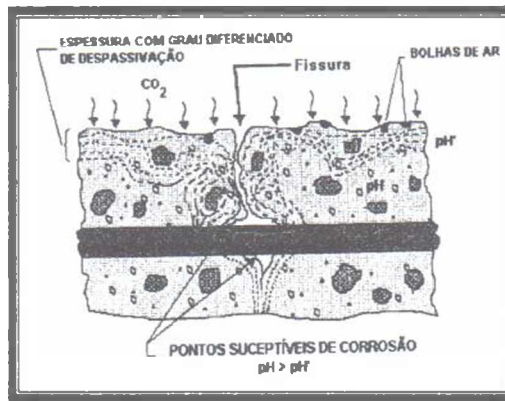


Figura 2.7 - Carbonatação através da superfície e fissuras no concreto (PRUDÊNCIO, 1986)

A carbonatação também está relacionada com a morfologia dos poros e com o fato deles estarem ou não preenchidos com água. Um esquema deste mecanismo pode ser visto através das figuras seguintes:

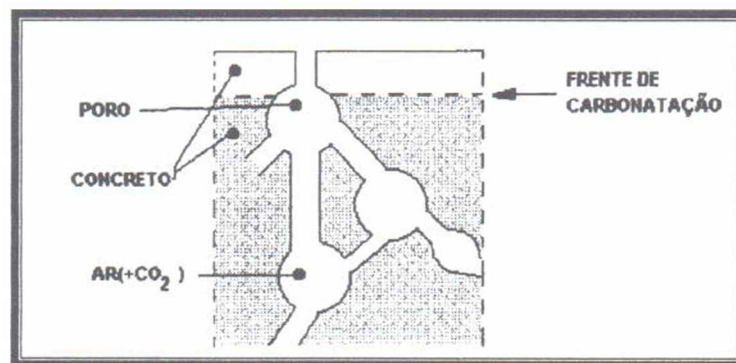


Figura 2.8 - Carbonatação dificultada com os poros totalmente vazios (BAKKER, 1988)

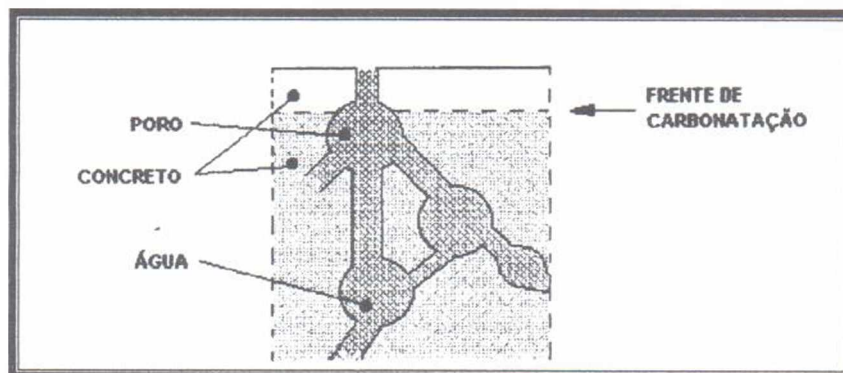


Figura 2.9 - Carbonatação dificultada com os poros totalmente preenchidos (BAKKER, 1988)

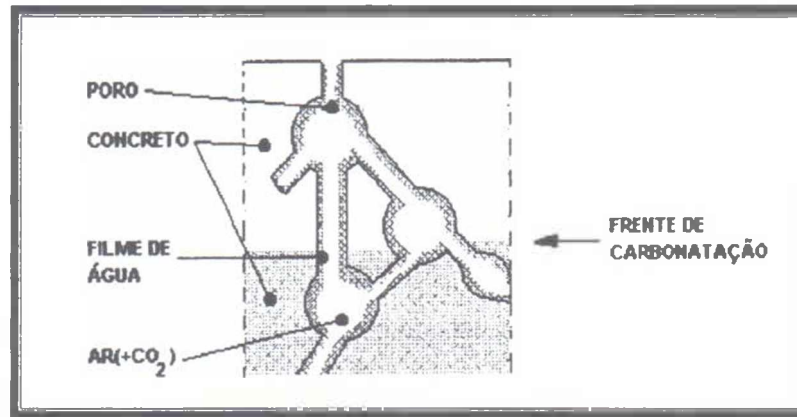


Figura 2.10 - Carbonatação acelerada em poros parcialmente preenchidos (BAKKER, 1988)

A difusão do CO_2 no concreto acontece tanto através dos poros com água quanto em poros vazios, no entanto, poros muito secos favorecem a difusão, porém dificultam a reação de carbonatação. A carbonatação propicia, por outro lado, uma redução da porosidade do concreto, através de significativas mudanças na microestrutura do concreto (NGALA e PAGE, 1997; BAUER, 1995).

NEPOMUCENO (1992), ao estudar o desempenho de materiais de reparo, cita que os principais fatores controladores do avanço da frente de carbonatação são:

- Relação água/cimento, que influi na microestrutura do concreto, principalmente na porosidade;
- Tipo de cimento, relacionado com teor de adições;
- Condições de cura, que controla a formação de fissuras e refinamento dos poros;
- Condições de umidade ambiental, que influi nos poros cheios de água;
- Concentração de CO_2 na atmosfera.

As previsões de velocidade de carbonatação são baseadas 2ª Lei de Fick para difusão, e considerando as simplificações para sua solução, se chega a expressão (HELENE, 1993):

$$X = K \sqrt[n]{t} \quad (2.5)$$

K = constante que depende da difusão efetiva do CO_2

t = tempo

n = normalmente igual a 2

Para medições de carbonatação, o método mais usual é a utilização de solução à base de fenolftaleína ou timolftaleína como indicadores de pH. Ainda podem ser utilizados outros métodos, a saber (KAZMIERCZAK, 1996):

- determinação do acréscimo de massa;
- observação de lâminas delgadas em microscópio petrográfico;
- análise térmica diferencial e termográfica.

2.4 CORROSÃO INDUZIDA POR CLORETOS

Considerado o principal agente causador da corrosão em armaduras, atuando principalmente através da corrosão localizada por pites (Figura 2.11), é o mais citado na literatura. É encontrado nas estruturas de concreto sob duas formas:

- adicionados à massa de concreto, como aditivos ou elementos contaminantes;
- incorporando-se ao concreto, através da superfície, penetrando pela estrutura porosa.

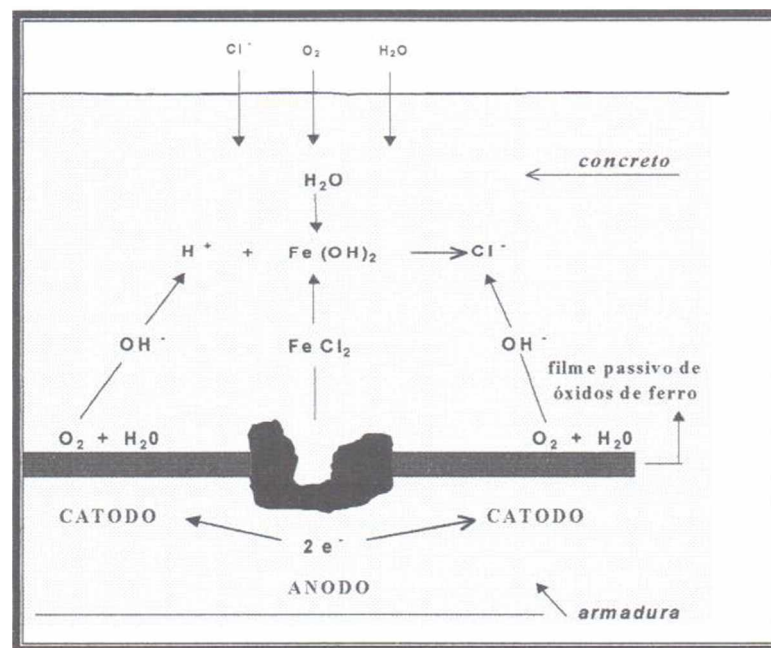


Figura 2.11 - Corrosão por pites (TREADAWAY, 1988).

Os íons cloreto (Cl^-), em contato com a armadura, produzem uma redução do pH do concreto, de aproximadamente 12 para valores em torno de 5, destruindo assim, geralmente de forma

localizada, a camada passivadora, resultando a corrosão por pite, que após instalada, permanece sempre ativa, reduzindo o diâmetro da barra.

A propagação dos pites na armadura depende (TREADAWAY, 1988):

a) Da disponibilidade de cloretos no pite, a qual depende de:

- concentração de cloretos no pite;
- reciclagem de cloretos;
- difusão de cloretos para o pite.

b) Da disponibilidade de íons hidroxilas, a qual é influenciada por:

- extensão de possível neutralização;
- taxa de hidrólise;
- composição do cimento e do concreto;
- utilização de adições ao cimento.

A natureza da corrosão por pites implica que se atingirá um valor de intensidade de corrosão máximo no qual a corrosão se estabilizará, sendo característico da fase de propagação. Isto ocorre devido ao fato de que ao se atingir o número máximo de pites, formados em função das características termodinâmicas e cinéticas existentes, a corrosão se desenvolve no sentido de propagação dos mesmos para o interior da armadura (BAUER, 1995).

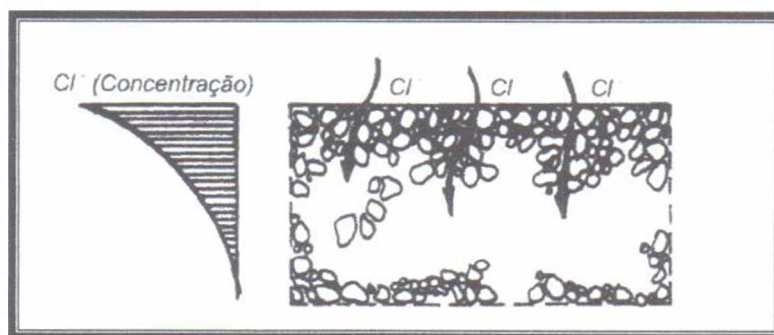


Figura 2.12 - Penetração de cloretos no concreto endurecido (SCHIESSL, 1988)

Os íons cloreto se apresentam de duas formas no concreto (ARYA et al. e DHIR et al. *Apud* BAUER, 1995):

- sob a forma de cloretos fixos, quimicamente combinados com as fases alumino-

- ferríticas (formando cloro-aluminatos) ou adsorvidos nas paredes dos poros (C-S-H);
- sob a forma de íons livres, dissolvidos na fase aquosa do concreto.

O teor de cloretos totais corresponde à soma dos teores de cloretos livres e teores relativos de cloretos fixos. Os cloretos livres são os principais causadores da corrosão, portanto, os que devem ser evitados e combatidos.

As reações prováveis dos íons cloreto com o ferro são as seguintes:



O ingresso de cloretos pela estrutura porosa do concreto ocorre em forma de solução, através de mecanismos de absorção capilar, permeabilidade, difusão ou migração. A penetração dos cloretos através do concreto pode ser representada pela “Lei de Jurin”, equações de difusão de Fick e pela Lei de Darcy (HELENE, 1993; BAUER, 1995; SATO 1988).

Várias normas e autores procuram identificar o teor crítico de cloretos na massa do concreto, onde a partir dele problemas de corrosão irão acontecer. Os parâmetros mais usados são o teor de cloretos por quilo de cimento e a relação [Cl- / OH-] (LIMA, 1996; TREADAWAY, 1988; HELENE, 1993; BAUER, 1995; NEPOMUCENO, 1992). As normas limitam o conteúdo de cloretos totais no concreto fresco, em relação a massa de cimento, conforme a Tabela 2.2. Tal conteúdo depende de parâmetros como: tipo e quantidade de cimento, relação a/c, conteúdo de umidade, agressividade do meio, adensamento, cura e outros, havendo, portanto, dificuldade de ser estabelecido um limite seguro abaixo do qual não haveria possibilidade de despassivação da armadura de aço.

As normas referem-se sempre ao limite de cloretos totais, porque os cloretos combinados podem voltar à dissolução por efeito de processos como a carbonatação.

Tabela 2.2 - Teor limite de cloretos (ANDRADE, 1992 - modificada)

Norma	Teor Limite de Cl ⁻ para concreto armado (% em relação a Massa de Cimento)
NB1-78 ¹	500 mg/l *
EHE - 98 ²	0,40
pr EN - 206 ³	0,40
BS - 8110/85 ⁴	0,20 - 0,40**
ACI - 318/83 ⁵	0,15 - 0,30 - 1,00***
* expresso em íons Cl ⁻ presentes na água de amassamento	
** O limite varia em função do tipo de cimento	
*** O limite varia em função da agressividade ambiental	

Estudos realizados por BAMFORTH et al., OSHIRO et al., LIAM et al., entre outros citados por HOBBS (1996), na avaliação de estruturas de concreto atacadas por cloretos, demonstram claramente que a relação a/c é o principal parâmetro influenciador no risco de corrosão induzida por cloretos.

2.5 CORROSÃO EM REGIÕES COM FISSURAS

RAUPACH (1996), diz que em regiões de fissuras, dois mecanismos básicos podem ocorrer:

- a) Mecanismo 1: os subprocessos anódico e catódico atuam na região da fissura. Ânodo e cátodo são extremamente pequenos (microcélulas). O suplemento de oxigênio para o processo provém basicamente da fissura;
- b) Mecanismo 2: a armadura na região da fissura atua principalmente como ânodo, e a superfície de aço passivo entre as fissuras atua como cátodo. Neste caso, o transporte de oxigênio ocorre principalmente pelo concreto não fissurado (corrosão por macrocélulas). Espera-se neste caso taxas de corrosão muito maiores que no mecanismo 1, já que a

¹ "Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado" NB1-78. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil, 1978.

² "España Hormigón Estructural" EHE-98. Madrid, Ministerio de Fomento, Espanha, 1998".

³ "pr EN-206 - Projecte Européen de Normalization (Mercado Comum Europeu). Performance production, mise en oeuvre et critères de conformité".

⁴ BS-8110/85 "British Standart (Inglaterra). Structural use of concrete".

⁵ ACI-318/83 - "Comitê Euro-International du Beton-CEB. Assessment of concrete structures and design procedures for upgrading (redesign). Paris, Bulletin D'Information n° 162, August 1983".

superfície de aço envolvida no subprocesso catódico é muito maior.

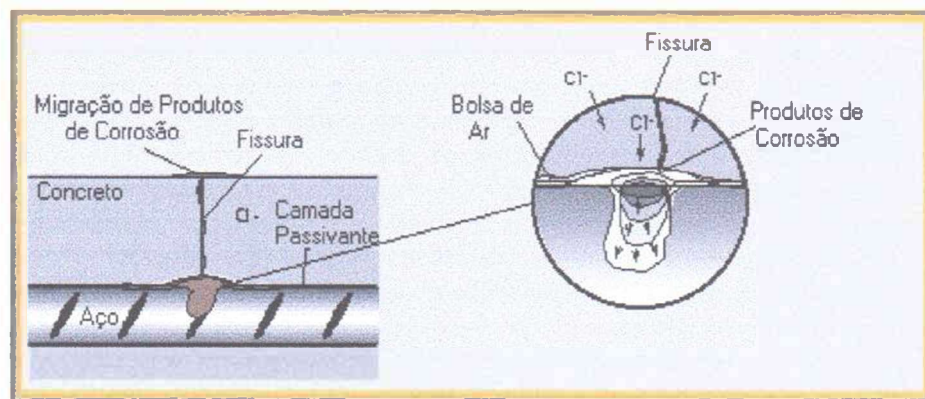


Figura 2.13 - Efeito das fissuras na corrosão do aço no concreto (www.a-bau.co.at)

A intensidade de corrosão usualmente cresce com o aumento da abertura das fissuras, no entanto, a influência da abertura das fissuras acaba decrescendo com o decorrer do tempo, e camada de cobertura e a composição do concreto acabam tendo uma influência maior no processo. No entanto, isto depende do nível de abertura das fissuras e do grau de agressividade do ambiente.

A taxa de corrosão na região de fissuras é influenciada pelas condições entre as fissuras, e a taxa de corrosão na zona fissurada decresce com distâncias menores entre fissuras. OHNO et al. (1996) afirmam que a dimensão da abertura de fissuras tem um significativo efeito no grau de corrosão em concretos sãos.

As fissuras reduzem o acúmulo de produtos de corrosão ao redor da superfície de aço. Estes produtos, em concretos não fissurados, poderiam inibir a dissolução anódica, que é um importante fator controlador na corrosão de macrocélula (OHNO et al., 1996).

É conhecido que a abertura de fissuras pode ser reduzida pela redução do diâmetro das armaduras. A redução do diâmetro das armaduras tem os seguintes efeitos (RAUPACH, 1996):

- a área superficial total de uma simples barra de aço entre as fissuras incrementa em proporção inversa à razão do diâmetro;
- a distância entre as fissuras decresce menos que proporcionalmente à razão dos

diâmetros.

Apesar disso, limitar o diâmetro das armaduras para restringir a abertura de fissuras resulta em perdas maiores de seção transversal. Deste modo, a proteção das armaduras deve ser provida prioritariamente por um adequado cobrimento e qualidade do concreto.

3. TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS E SENSORES DE CORROSÃO

É cada vez maior o interesse em sistemas de monitoramento de corrosão através de sensores embebidos no concreto, os quais são muito práticos de instalar, com um custo acessível, fornecendo informações sobre o potencial de corrosão e taxas de corrosão da armadura.

Algumas razões para utilizar sistemas de monitoramento de corrosão são (JOHN, 1996):

- determinar as condições gerais da estrutura;
- detectar qualquer mudança nas condições do estado de corrosão das armaduras, a fim de planejar investigações mais detalhadas ou projetos de controle de corrosão;
- determinar a eficiência de reparos, reforços e sistemas de controle de corrosão, como proteção catódica, remoção de cloretos, realcalinização e uso de inibidores de corrosão;
- minimizar custos operacionais relativos a inspeções;

Quando os sensores são utilizados como parte integrante de um programa extenso e efetivo de manutenção, os custos com inspeção, manutenção e reparo podem ser reduzidos significativamente.

Existem basicamente duas opções para realizar medidas com os sensores:

- Usando equipamento portátil;
- Usando sistema fixo de aquisição de dados, com opção para envio remoto de dados;

O primeiro necessita de visitas periódicas para a coleta de alguns dados que são limitados, no entanto, é um sistema de custo inferior. O segundo tipo leva à necessidade de um sistema de custo superior, devido à maior complexidade dos hardwares e softwares utilizados, principalmente no caso de incluir medidas de taxas de corrosão.

Para a utilização dos sensores de corrosão, se faz necessário o domínio de técnicas eletroquímicas compatíveis com o dispositivo em questão, portanto, as principais técnicas serão mostradas a seguir.

3.1 TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS USUAIS PARA O CONCRETO ARMADO

Para uma avaliação do estado de corrosão em que se encontra uma peça, pode-se lançar mão do uso de diversas técnicas eletroquímicas disponíveis, algumas já bem definidas e conceituadas e outras ainda em fase de aperfeiçoamento.

Dentre as técnicas usuais, pode-se destacar as seguintes:



Figura 3.1 - Técnicas eletroquímicas usuais para medidas no concreto armado (ALMEIDA, 1996)

Deve-se atentar que, de acordo com RODRÍGUEZ (1994), todos os métodos de monitoramento da corrosão apresentam alguma dificuldade, ou na medição ou na interpretação de resultados, principalmente na estimativa de taxas de corrosão típicas de aços em estado passivo ou com baixas taxas de corrosão.

3.1.1 Técnica da Resistência Elétrica

A técnica é largamente utilizada para o monitoramento da corrosão industrial, sendo utilizada para o concreto somente a partir dos anos 70. Não alcançou um grande sucesso nestes últimos 30 anos pois fornece um número limitado de informações (MATOS, 1997).

A técnica tem como base que, a área da seção transversal de um condutor metálico é inversamente proporcional à sua resistência elétrica e diretamente proporcional à temperatura, deste modo, mantendo-se a temperatura constante, quando houver um decréscimo da seção

transversal do condutor devido à corrosão, haverá um aumento da resistência, indicando um estado ativo. Uma grande limitação desta técnica é a necessidade de corrosão uniforme para se ter uma proporcionalidade entre alteração na resistência elétrica e estado de corrosão. A Lei de Ohm relaciona a resistência elétrica (R) com o potencial aplicado (V) e a corrente (I) através da equação 3.1.

$$R = \frac{\rho \cdot L}{A} \quad (3.1)$$

R = resistência elétrica do componente metálico (Ω)

ρ = resistividade elétrica do componente metálico ($\Omega \cdot m$)

L = comprimento do componente (m)

A = área da seção transversal do componente (m^2)

Para a utilização da técnica, o equipamento básico consiste de uma sonda metálica embutida no interior do concreto, sendo do mesmo material da armadura que se deseja monitorar.

Para que as medidas sejam representativas, as sondas devem ser colocadas o mais próximo possível da armadura e em pontos bem escolhidos. As características do concreto que recobre as sondas devem ser as mesmas do que recobre a armadura. No caso de estruturas já construídas, isto é algo difícil de conseguir. Deve-se conectar a sonda à armadura para poder ser registrado também a ação das macropilhas.

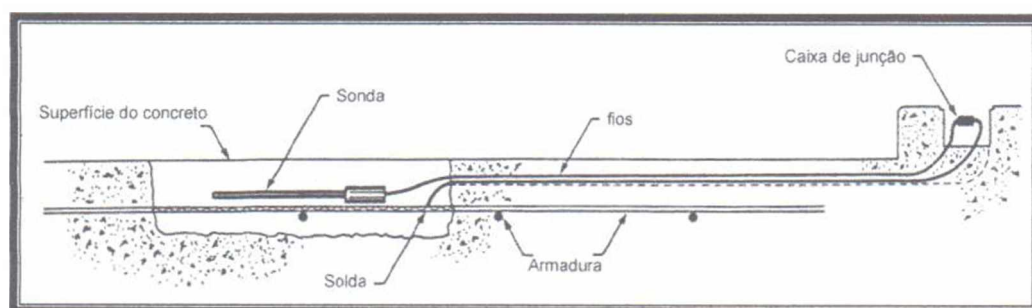


Figura 3.2 - Arranjo típico de sonda de resistência em concreto (MATOS, 1997)

Esta técnica estima a taxa de corrosão, podendo ter-se idéia do nível de deterioração das armaduras através de correlações com as tabelas de intensidade de corrosão e resistividade.

Tabela 3.1 - Critérios de avaliação da resistividade - CEB 192 (CEB, 1989)

Resistividade do Concreto ($k\Omega.cm$)	Probabilidade de Corrosão
> 20	Desprezível
10 a 20	Baixa
5 a 10	Alta
< 5	Muito alta

3.1.2 Técnica do Potencial de Eletrodo

No concreto, a corrosão leva a uma formação de micro e/ou macropilhas ao longo da superfície do aço. Pode-se obter o valor do potencial de eletrodo das macropilhas através do ânodo ou do cátodo, no entanto, para as micropilhas, este potencial é misto, pois o ânodo afeta o cátodo.

Os potenciais de corrosão são, portanto, parâmetros termodinâmicos que dependem de muitas variáveis, e seus valores numéricos indicam o balanço entre a reação anódica e catódica, não fornecendo no entanto, informações sobre a cinética da reação, ou seja, informações quantitativas sobre o estado da corrosão.

De acordo com RODRÍGUEZ (1994), a técnica de leitura de potencial de corrosão possui o problema de ter uma grande variação de valores de potencial numa mesma estrutura, dependendo de diversos fatores, como composição do concreto, disponibilidade de oxigênio e ocorrência de macropares. Deste modo as medidas de potenciais podem gerar erros na análise do grau de corrosão, pois são extremamente dependentes destes fatores, portanto, a avaliação dos dados fornecidos pela técnica deve ser muito cuidadosa. Apesar disto, ainda é uma das técnicas mais usuais para avaliação em campo de problemas relacionados com corrosão de armaduras, devido à sua facilidade de uso.

Em 1977 a ASTM normatizou o uso da técnica de potenciais de corrosão para o uso em concreto. Os valores propostos para avaliação são mostrados na Tabela 3.2:

Tabela 3.2 - Critério de avaliação de potenciais de corrosão segundo a ASTM C-876

Potenciais de Corrosão (ESC*) em mV	Probabilidade de Corrosão (%)
$E_{\text{corr}} < -350$	95
$E_{\text{corr}} > -200$	5
$-200 < E_{\text{corr}} < -350$	Incerteza de 50%
* Eletrodo de Sulfato de Cobre	

A magnitude dos potenciais pode dar uma idéia do risco de corrosão, e a variação repentina dos potenciais de corrosão pode indicar a passagem do estado passivo para o ativo, sendo um importante fator a ser analisado num monitoramento a longo prazo (MALO e URUCHURTU, 1996).

Alguns fatores podem afetar as medidas de potencial, levando a conclusões enganosas. Estes fatores são (MATOS, 1997):

- camadas superficiais de concreto de alta resistividade, que está intimamente ligado ao teor de umidade do concreto, pode fazer com que o eletrodo de referência não detecte a corrente iônica de corrosão, acarretando sérios equívocos na interpretação dos dados obtidos. A magnitude das distorções devido à esta camada está relacionada com a sua espessura;
- qualidade do concreto e profundidade do cobrimento, pois quanto melhor a qualidade do concreto, menor será a relação a/c, conseqüentemente terá uma maior compacidade e resistividade. Os potenciais lidos na superfície do concreto (potenciais mistos, menos negativos que os potenciais na região adjacente à armadura) terão um erro ainda maior que no caso de um concreto com maior relação a/c e menor espessura de cobrimento.
- frentes de carbonatação e cloretos, pois uma profundidade de carbonatação expressiva pode criar uma camada superficial altamente resistiva, dificultando as leituras, fazendo com que os potenciais lidos sejam mais positivos que os potenciais reais. Já os cloretos atuam de uma maneira diferente, pois quando estão presentes na massa de concreto ou penetraram pela superfície mas ainda não chegaram na armadura, a concentração variável destes íons no eletrólito pode levar a leituras de potenciais mais negativos do que os potenciais reais.
- teor de umidade do concreto, que pode fazer com que sujam variações nas medidas de uns poucos milivolts até 100-200 mV. É aconselhável, no caso de concreto muito seco, um pré-umedecimento antes de se realizar leituras.

- corrente de fuga.

A forma mais comum de apresentação de resultados de potenciais de corrosão é a geração de linhas equipotenciais da estrutura analisada ou mapa de potenciais por cores (MALO e URUCHURTU, 1996).

É importante salientar que, quando a causa principal da corrosão for a carbonatação, os valores sugeridos na Tabela 3.2 devem ser substancialmente diferentes (SCHISSL, 1988).

3.1.3 Técnica do Ruído Eletroquímico

Os ruídos eletroquímicos de um sistema podem ser definidos como as flutuações espontâneas de potencial e corrente em torno de um estado de equilíbrio, podendo este ser inclusive um estado de corrosão. Estas flutuações são aleatórias.

Com os dados obtidos a partir das flutuações de corrente e potencial, importantes informações podem ser identificadas a respeito da morfologia do ataque. Monitorando os desvios padrão e amplitude do ruído da corrente e do ruído do potencial pode-se obter a resistência do ruído, parâmetro equivalente à resistência de polarização, através da equação:

$$R_n = \frac{\sigma_v}{\sigma_i} \quad (3.2)$$

Através do valor de R_n pode-se obter o valor da R_p , obtendo-se assim informações sobre a cinética do processo. Usa-se a relação:

$$R_p = 2 \cdot R_n + R_s \quad (3.3)$$

R_p = resistência de polarização

R_n = resistência ao ruído

R_s = resistência da solução (ou do concreto e interface aço-concreto)

O equipamento utilizado para esta técnica é similar ao utilizado no potencial de eletrodo, com um voltímetro de alta impedância e alta resolução, um eletrodo de referência, como o de

calomelano saturado (preferido por causar uma menor perturbação no sistema, gerando menos ruídos espúrios que falseiam os resultados), uma interface para ligar o voltímetro a um computador que terá um registrador gráfico (plotter).

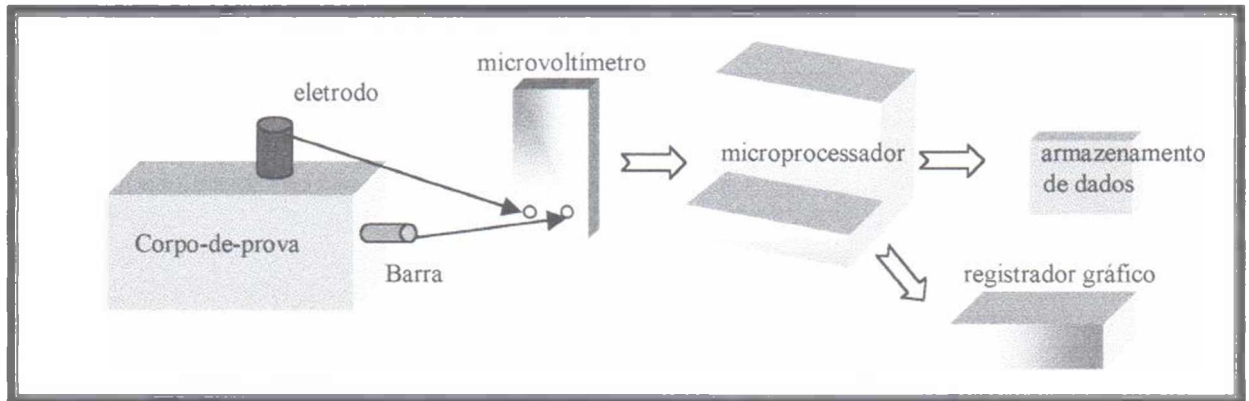


Figura 3.3 - Esquema mostrando a instrumentação para a medida de ruído eletroquímico

Para se monitorar as flutuações de corrente é necessário a utilização de um amperímetro de resistência nula de alta resolução. ANDRADE, citada por MATOS (1997) ressalta a importância do uso de um analisador de espectro a fim de se obter não somente medidas no domínio do tempo, mas também medidas no domínio da frequência.

As informações obtidas com a técnica são as seguintes:

- Informação do início da corrosão localizada;
- Informação sobre a morfologia do ataque (localizado ou generalizado);
- Caracterização do tipo de corrosão localizada;
- Informações sobre sistemas ativos ou passivos;
- Indicação da velocidade de corrosão através do parâmetro R_n ;
- Indicação da intensidade do ataque corrosivo mesmo sem o parâmetro R_n devido à uma aceitável correlação entre nível do ruído e taxa de corrosão.

Vários estudos já foram realizados verificando a resposta do ruído eletroquímico para o ataque corrosivo por pite, porém para o ataque generalizado ainda persistem dúvidas e a origem deste ruído não está completamente clara (VILELLA, 1996).

A apresentação dos resultados pode ser feita utilizando o domínio do tempo e o domínio da frequência.

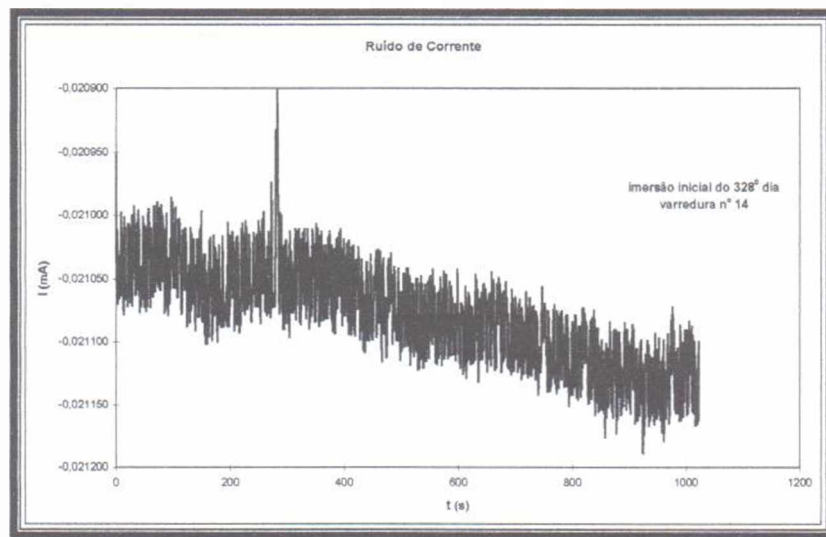


Figura 3.4 - Exemplo de curva de registro temporal do ruído de corrente (VILELLA, 1996)

RODRÍGUEZ (1994) afirma que o ruído eletroquímico não parece ser uma boa escolha para monitorar estruturas de concreto, pois entre outras coisas, as estruturas reais podem funcionar como antenas que captam ruídos não corrosivos, o que pode mascarar o verdadeiro estado das armaduras.

3.1.4 Técnica da Impedância Eletroquímica

Esta é uma técnica já utilizada na eletroquímica básica há bastante tempo, no entanto, só recentemente foi aplicada à corrosão no concreto armado. É uma técnica que vem se consolidando no meio científico devido à grande confiabilidade dos resultados obtidos.

A impedância eletroquímica representa o grau de dificuldade que um sinal elétrico encontra em percorrer um circuito elétrico, sendo uma combinação de reatâncias. Essas reatâncias podem ser expressas pelas expressões:

$$\begin{aligned}
 X_R &= R \\
 X_C &= \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C} \\
 X_L &= j \cdot \omega \cdot L
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

onde: X_R = reatância resistiva
 X_C = reatância capacitiva
 X_L = reatância indutiva
 ω = frequência angular
 R = resistência
 C = capacitância
 $J = (-1)^{1/2}$

A interface aço-concreto pode ser modelada através de uma combinação de elementos passivos de um circuito elétrico, e a análise da impedância deste circuito, normalmente através do diagrama de Nyquist, fornece as seguintes informações:

- velocidade de corrosão instantânea (i_{corr});
- identificação do tipo de mecanismo de controle da corrosão, por ativação ou por difusão;
- identificação da morfologia do ataque;
- identificação e caracterização do estado ativo ou passivo da armadura;

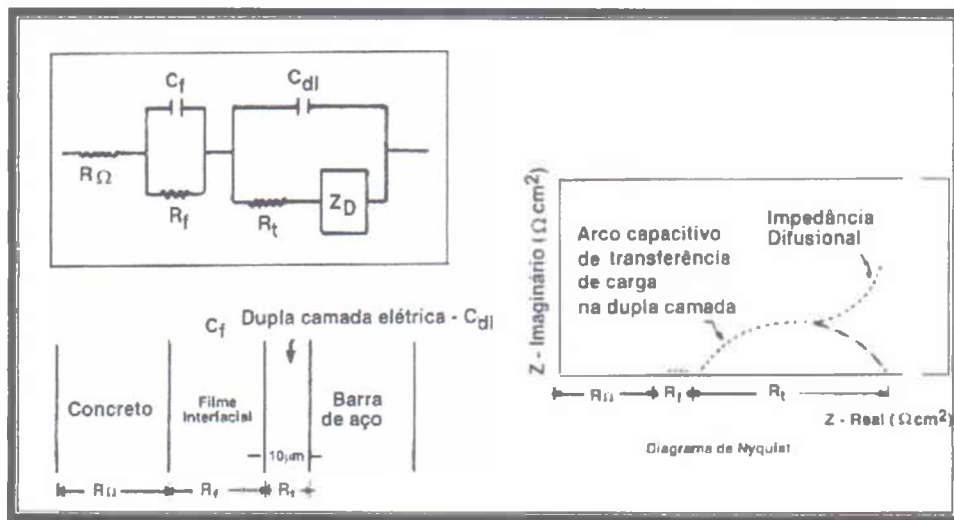


Figura 3.5 - Exemplo de circuito equivalente para concreto armado e diagrama de Nyquist (MATOS, 1997)

A técnica consiste em aplicar um sinal de pequena amplitude (+10 a +20 mV) à armadura, e comparar 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 (MATOS, 1997). Quanto maior for a impedância do sistema, mais passivo estará, portanto, apresentando menores taxas de corrosão.

As medidas de impedância podem ser realizadas através de um dispositivo de dois eletrodos de planos idênticos, ou utilizando um potenciostato associado a um sistema de três eletrodos, mais indicado para o estudo no concreto armado.

Apesar da confiabilidade da técnica, esta ainda não tem aplicação *in situ* nas estruturas de concreto armado, devido à dificuldade de confinar o sinal elétrico numa região. Além disso, esta técnica requer um elevado período para aquisição dos dados, grande esforço computacional para elaboração dos dados e pessoal extremamente especializado.

3.1.5 Técnica da Resistência de Polarização

A resistência de polarização representa a inércia que um sistema possui em desenvolver um processo de corrosão através de uma polarização imposta. Deste modo, quanto maiores os valores da R_p , menores serão as taxas de corrosão.

Com o parâmetro R_p , básico para inferir quaisquer previsões sobre o estado de corrosão a partir desta técnica, pode-se obter os seguintes dados:

- estado da armadura: passivada ou despessivada;
- cinética do processo: velocidade de corrosão

RODRÍGUEZ (1994) mostra que o método da resistência de polarização é um dos mais amplamente utilizados, fornecendo uma alternativa simples para análise quantitativa da corrosão, tendo sido estudada e aplicada ao concreto armado por diversos pesquisadores. Ele ainda diz que todos os outros métodos de monitoramento de corrosão são de alguma forma uma extensão do método da RP, já que utilizam a equação de Stern-Geary.

A técnica da resistência de polarização é também conhecida como resistência de polarização linear, pois se procura aplicar um pequeno incremento de potencial, em torno de $\pm 10 - 30$

mV em relação ao potencial de corrosão E_{corr} , registrando-se os incrementos de corrente ΔI devidos à polarização imposta. Nesta faixa de incremento de potencial, assume-se a linearidade do gráfico $E \times I$, podendo então ser facilmente deduzido o valor de R_p . Além disso, o uso de pequenos potenciais em torno do E_{corr} visa garantir que, depois de aplicada a polarização, o potencial retorne ao seu estado original de equilíbrio, fazendo com que esta técnica seja menos perturbativa, podendo ser utilizada diversas vezes em um mesmo espécime.

Como no caso das curvas de polarização, a resistência de polarização pode utilizar os métodos potencioestáticos, potenciodinâmicos e galvanostáticos.

O valor de R_p é definido, de acordo com as condições de linearidade já expostas, como sendo:

$$\frac{\Delta E}{\Delta I} = R_p \quad (3.5)$$

Após a determinação da R_p , utiliza-se a equação de STERN e GEARY (1957) para a determinação da intensidade de corrosão instantânea.

$$I_{corr} = \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{2,3 \cdot (\beta_a + \beta_c)} \cdot \frac{1}{\left(\frac{dE}{dI}\right)_{\Delta I=0}} \quad \text{ou} \quad I_{corr} = \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{2,3 \cdot (\beta_a + \beta_c)} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta E} = \frac{B}{R_p} \quad (3.6)$$

$(dE/dI)_{\Delta I=0} = R_p$ = resistência de polarização ou declividade da curva de polarização no ponto $\Delta I=0$

B = constante de Stearn-Geary

β_a e β_c = constantes de Tafel

I_{corr} = intensidade de corrosão

A obtenção das constantes de Tafel, para o caso do concreto, principalmente quando se deseja fazer medições *in situ*, não é uma tarefa das mais fáceis. Deste modo, ANDRADE (1973) sugere que sejam usados dois valores para a constante B da equação de Stearn-Geary, um para o aço em estado passivo ($B = 52$ mV) e outro para o aço em estado ativo ($B = 26$ mV). Muitos pesquisadores têm usado estes valores, obtendo resultados de perda gravimétrica bastante aceitáveis (MATOS, 1997).

Alguns fatores que podem levar a erros nas medidas de R_p são:

- tempo necessário para que o sistema a ser analisado volte ao seu estado estacionário, após a aplicação de uma polarização;
- modificações do eletrodo durante a medida.

No sistema aço-concreto, a resistividade é muito superior a um sistema aquoso típico de laboratório, causando uma queda ôhmica entre o eletrodo de trabalho e o eletrodo de referência, queda esta definida pelo produto IR , onde I é a corrente que passa pelos eletrodos e R é a resistência ôhmica do meio. Como no caso das curvas de polarização, esta queda deve ser compensada a fim de não se obter um valor de R_p distorcido.

A falta de compensação de queda ôhmica leva a baixos valores de i_{corr} . Aconselha-se o uso de velocidade de varredura na faixa de 2,5 a 10 mV/min a fim de se obter uma melhor correlação com a perda gravimétrica.

De acordo com ANDRADE e ALONSO (1996), os valores indicativos de i_{corr} são:

Tabela 3.3 - Valores indicativos de i_{corr} (ANDRADE e ALONSO, 1996)

I_{corr} ($\mu A/cm^2$)	Nível
< 0,1	sem corrosão
0,1 – 0,5	baixa corrosão
0,5 – 1	moderada corrosão
> 1	alta corrosão

Os limites mais utilizados são os citados por ANDRADE (1996) que define que o aço passou do estado passivo para o ativo quando a intensidade de corrosão supera os valores de 0,1 a 0,2 $\mu A/cm^2$.

Existem diversos arranjos para medir a R_p . O arranjo laboratorial mais comum é o sistema de três eletrodos, um de referência, um de trabalho e um contra-eletrodo. Podem existir algumas variações, como o uso do contra-eletrodo externo ou do eletrodo de referência embutido no corpo-de-prova, por exemplo. Um outro arranjo para medida da R_p é o chamado anel de confinamento (*Guard Ring*), utilizado principalmente para medições *in situ*, onde não se pode

garantir qual a área que está sendo polarizada com precisão. Este dispositivo procura confinar o sinal elétrico numa região conhecida, fazendo com que seja possível medidas em grandes peças, como lajes e vigas, por exemplo (FELIU, et al., 1990; TEIXEIRA, 1998; BRITO, 1997).

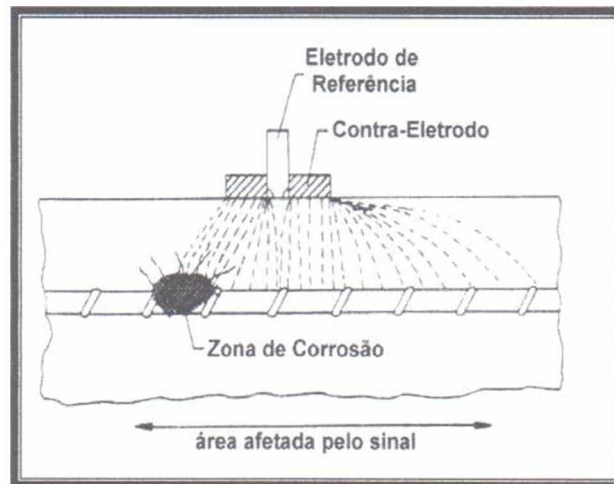


Figura 3.6 - Distribuição não uniforme do sinal elétrico pelo CE sobre a armadura - indefinição da área polarizada (FELIU et al., 1990)

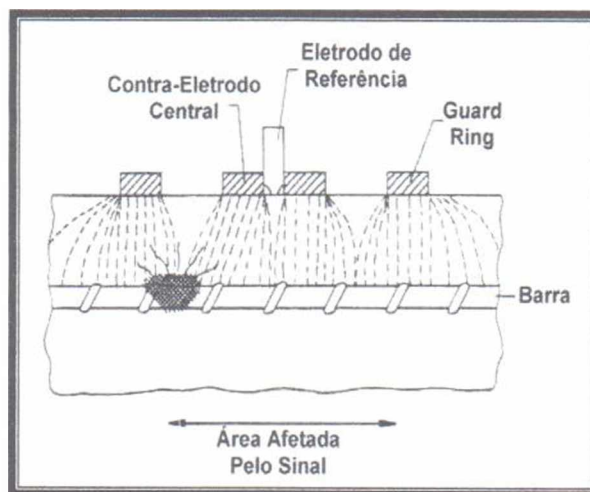


Figura 3.7 - Ilustração do sistema *Guard Ring* para confinamento de sinal elétrico em medidas de R_p (FELIU et al., 1990)

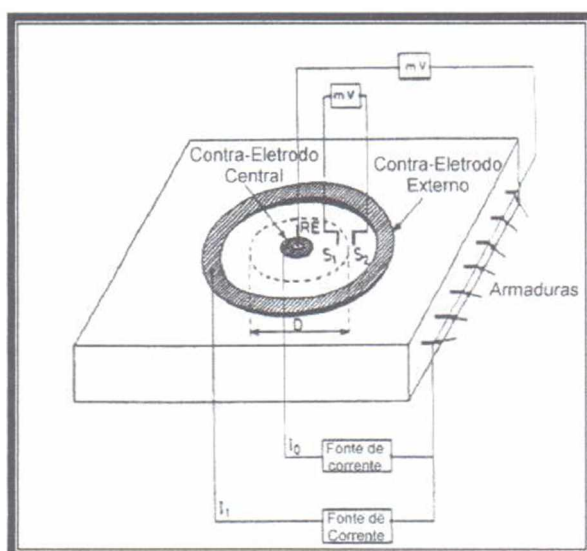


Figura 3.8 - Sistema semelhante ao *Guard Ring*, utilizando polarização galvanostática (FELIU et al., 1990)

3.1.6 Técnica da Corrente Galvânica (Estudo de Macropares)

Conforme afirma ANDRADE (1996), é um tipo de medida tão antiga quanto a própria ciência da corrosão. Ela foi utilizada no início do estudo da interface aço/concreto.

A corrente que flui da zona catódica para a zona anódica é conhecida como corrente galvânica I_{gal} ⁶. A intensidade desta corrente é influenciada pelos potenciais do ânodo e do cátodo, pela resistência ôhmica entre eles e pela geometria da peça. É conhecida a grande influência da relação área anódica/catódica e a distância entre cátodo e ânodo nas medidas galvânicas (ANDRADE e ALONSO, 1996; ARYA e VASSIE, 1996).

ARYA e VASSIE (1996) sugerem que um possível método para limitar a corrosão de armaduras seja restringir a razão efetiva entre cátodos e ânodos nas estruturas. Quanto maior a distância entre o ânodo e o cátodo, menor a densidade de corrente. Em seu experimento, a corrente galvânica aumentou com o acréscimo de barras catódicas até o limite de três barras, depois estabilizando.

⁶ Medida diretamente através de um amperímetro de resistência nula conectado às barras anódicas e catódicas.

A disposição geométrica do ânodo e do cátodo é importante. Estes podem estar em duas situações, coplanares e face a face (GALVEZ, 1980; NEPOMUCENO, 1992; ANDRADE, 1996).

Em geral, $i_{gal}^7 \ll i_{corr}$, portanto, avaliações precipitadas sobre a cinética do processo de corrosão através da corrente galvânica podem levar a enganos.

Quando uma peça de aço está corroída no concreto, ambas as áreas anódica e catódica desenvolvem-se simultaneamente, então, quando a peça corroída é ligada à uma completamente passiva, as áreas anódicas e catódicas são polarizadas para alcançarem um novo potencial de equilíbrio. No entanto, parte da peça corroída ainda contém cátodos, isto é, a atividade de microcélulas é mantida e a corrente galvânica de macrocélula passa a representar apenas uma parte da corrosão total. A corrente galvânica iguala-se a i_{corr} quando a parte corroída torna-se um ânodo puro, sem atividade de microcélula, o qual pode acontecer no concreto apenas quando uma atmosfera livre de oxigênio existe ao redor da área corroída, ou quando a área corroída é comparativamente muito pequena (pites).

GALVEZ (1980) e ANDRADE (1996) afirmam que, em meios aerados, a corrosão se sustenta fundamentalmente pela ação de micropilhas, portanto, a conexão do ânodo com um cátodo puro não aumenta significativamente a corrosão.



Figura 3.9 - Formação de macropilhas em meios aerado e não-aerados (GALVEZ, 1980)

SHORT et al. (1991), mostraram que relações entre áreas anódica e catódica da ordem de 1:200 fornecem valores aceitáveis de elevada atividade galvânica. O par galvânico pode ser

⁷ Intensidade galvânica, que representa à corrente galvânica dividida pela área exposta do ânodo.

utilizado como uma célula para medir a R_p , o E_{corr} e a R_{ohm} .

3.2 AVALIAÇÃO DAS TÉCNICAS DE MONITORAMENTO DA CORROSÃO

Além das técnicas citadas no decorrer deste item, existem outras que não foram citadas, como o método coulométrico, o pulso galvanostático e outros. Para o uso em concreto armado, os métodos mais utilizados e suas características são mostrados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Característica dos métodos de corrosão mais utilizados em concreto armado : A (ótimo), B (satisfatório), C (insatisfatório) - RODRÍGUEZ et al., 1994

Técnicas \ Características	Observação Visual Qualitativa	Observação Visual Quantitativa	Teste Gravimétrico	Mapeamento de Potencial	Resistência de Polarização	Guard Ring ⁸	Método Coulométrico	Ruído Eletroquímico	EIS ⁹	Harmônico
Velocidade de Medidas individuais	A	C	C	A	A	A	A	B	B	B
Velocidade de Resposta a Mudanças	C	C	C	A	A	A	A	A	A	A
Informação Quantitativa	C	A	A	C	A	A	A	B	B	A
Não-Destrutivo	A	C	C	A	A	A	A	A	A	A
Não-Perturbativo	A	C	C	A	C	C	B	A	B	C
Parâmetro de Medidas	Mudanças aparentes	Informações geométricas do ataque	Medida do I_{corr}	Probabilidade de corrosão	I_{corr}	E_{corr}	I_{corr}	I_{corr}	I_{corr}	I_{corr}

Observa-se que a resistência de polarização, o uso do sistema *guard ring* e o método coulométrico apresentam-se bastante eficazes para a maioria das características propostas, no entanto, outros métodos também surgem como boas ferramentas para a obtenção de informações quantitativas, como a análise de harmônicos. Apesar da observação visual quantitativa e do teste gravimétrico apresentarem uma boa performance pela tabela, ambos devem ser tratados com restrições.

⁸ Sistema comercial de medida de R_p através do confinamento do sinal elétrico, desenvolvido pelo IETCC (Instituto Eduardo Torroja - Espanha).

⁹ Espectro de impedância eletroquímica

3.3 SENSORES DE CORROSÃO PARA ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

Sensores de corrosão são elementos que devem ser inseridos nos elementos estruturais, a fim de fornecerem dados que ajudem a prever quando a armadura iniciará o processo de degradação por efeito da corrosão e/ou informar como está se desenvolvendo o avanço da frente de agentes agressivos, como o CO_2 e o Cl^- . A utilização de sensores de corrosão tem por objetivo levar a campo as possibilidades que existem no monitoramento da corrosão e que antes só eram possíveis em laboratório e com a utilização de equipamentos sofisticados e caros para medidas de campo.

Os sensores são aconselháveis principalmente em condições ambientais severas, no caso de concreto bastante contaminado ou para testar a eficiência de reparos, e devem ser instalados em locais críticos, como juntas, tabuleiros de pontes e viadutos, zonas de respingo em estruturas marítimas e locais frágeis de estruturas, relacionados à segurança estrutural.

De acordo com o relatório do RILEM (1994), os sensores para avaliação de estruturas apresentam as seguintes características:

Tabela 3.5 - Características dos métodos eletroquímicos e sensores (RILEM, 1994 - modificado)

Sensores		
Método	Favorável Para	Observações
Eletrodos de Referência	Todos os casos	
Sensores Galvânicos	Principalmente para ambientes com cloro, no entanto, trabalha também em concreto carbonatado	Não tem problemas com estabilidade a longo prazo. Mede o avanço da corrosão e fornece indicação da taxa de corrosão. Mede o avanço de agentes agressivos.
Sensores de Resistividade – Sondas de Umidade	Todos os casos	Mede a resistividade do concreto, e monitora a eficiência e durabilidade da camada de revestimento.
Sensores de Polarização	Todos os casos	Mede o avanço da corrosão e estima a taxa de corrosão.

3.3.1 Sensores de Resistência Elétrica

O seu princípio de operação é baseado na mudança de resistência do elemento da sonda que é exposta ao ambiente agressivo, no caso, o concreto contaminado por cloretos ou carbonatado. Os elementos sensíveis podem ser fabricados de diversos materiais e em uma variedade de espessuras. Um material possível para servir como sensor ou elemento sensível da sonda é o aço inoxidável.

Estes sensores têm aplicação restrita à sistemas sujeitos à corrosão generalizada, ou seja, controlada por processo resistivo, como é o caso da carbonatação. No caso de corrosão por cloretos, não há uma correlação entre os valores obtidos e a intensidade de corrosão.



Foto 3.1 - Tipos de sondas de resistência para usos diversos

3.3.2 Sensor Galvânico

A utilização de macropares galvânicos para o monitoramento da corrosão no concreto é um dos sistemas mais simples, pois conectando-se dois metais, pode ser desenvolvida uma corrente galvânica no circuito gerado, podendo ser detectada por um amperímetro de resistência nula e analisada para se obter dados sobre a corrosão (SCHIESSL, 1992).

Na Alemanha, os pesquisadores SCHIESSL e RAUPACH (1992) desenvolveram sensores para detectar o avanço da frente de corrosão que ingressa através da camada de cobertura do concreto. Estes sensores utilizam como técnica para o monitoramento a medida da corrente galvânica entre os macropares que formam o sensor. Um destes dispositivos é conhecido

como sistema de ânodos em escada.

As vantagens deste sistema de monitoramento de corrosão (Foto 3.2) são:

- Ele não apenas mostra se a armadura está corroída ou não, como também pode estimar quando a armadura irá começar a corroer;
- Ele mostra diretamente o avanço das frentes de agentes agressivos;
- É um sistema economicamente viável, principalmente para áreas de difícil acesso.

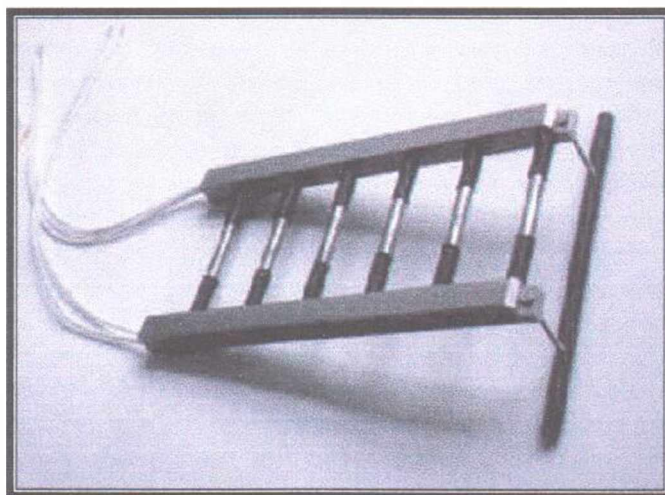


Foto 3.2 - Foto do sensor escada (www.sensortec.de)

Este sensor, que deve ser instalado em estruturas em construção, tem como princípio básico o monitoramento da corrente galvânica de macropares (Aço/Metal Nobre) que são colocados em posições que forneçam informações sobre quando e em qual espessura de revestimento haverá comprometimento através dos agentes agressivos. A sua colocação inclinada se deve ao fato que, deseja-se que não haja influência de macropares sobrepostos, deste modo, as características do revestimento acima de cada sensor não será alterada pela corrosão de um sensor sobreposto. O arranjo proposto pelos pesquisadores utiliza um metal nobre como cátodo, separado do corpo do sensor, e seis barras de aço carbono com ânodos.

O sensor em escada usa o cátodo em uma posição onde o concreto não esteja saturado de água, exatamente para haver oxigênio disponível para as reações de oxidação-redução na superfície do mesmo.

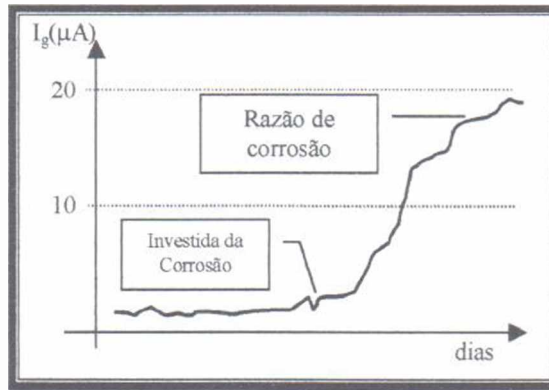


Figura 3.10 - Comportamento da corrente galvânica no tempo (SCHIESSL e RAUPACH, 1992)

A distância entre os ânodos é de 50 mm, para prevenir a interação entre eles. O suporte do sensor é de aço inoxidável, e a cavidade onde passam os cabos é preenchida com resina epóxi. Para o cátodo, é utilizada uma barra de titânio revestida de platina.

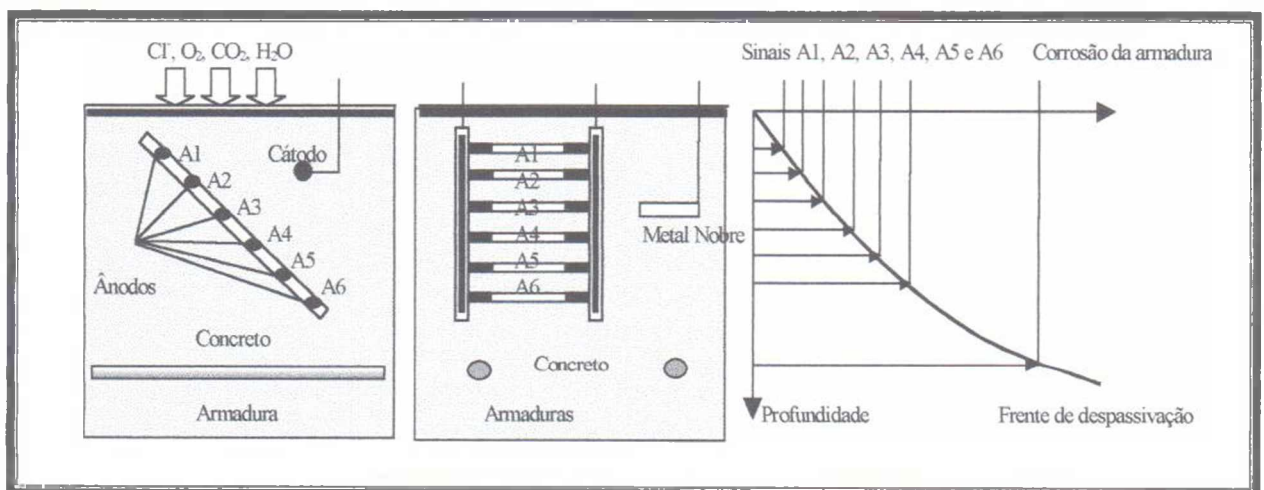


Figura 3.11 - Esquema do sensor em escada (SCHIESSL e RAUPACH, 1992)

O método para avaliar se existe corrosão atuante na macrocélula é simples. Num concreto livre de carbonatação e cloretos, ambos os eletrodos estão protegidos e a corrente elétrica entre eles é bastante baixa, sendo negligenciada. Quando o teor crítico de cloretos é atingido ou quando o pH decresce devido à carbonatação, a superfície do ânodo deixa de estar protegida, e como o cátodo é um metal nobre que não deve sofrer corrosão, surge então uma corrente galvânica que pode ser medida por um amperímetro de resistência nula.

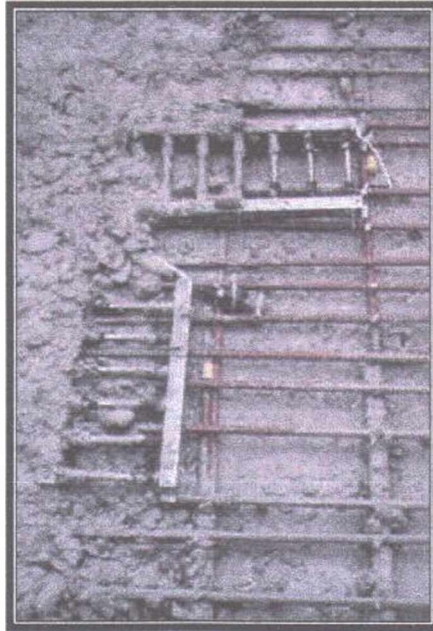


Foto 3.3 - Exemplo de aplicação do sensor em escada (www.sensortec.de)

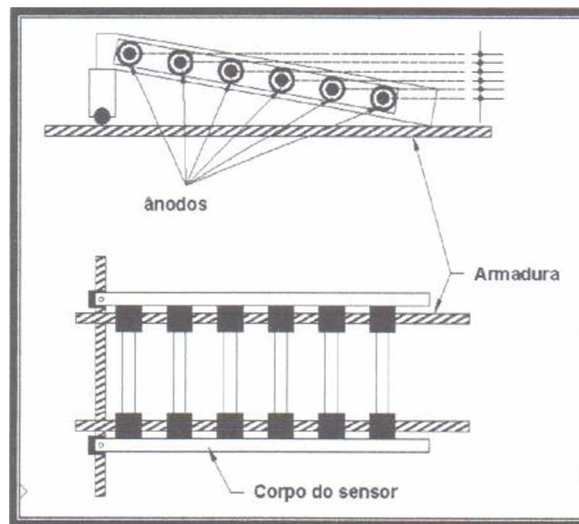


Figura 3.12 - Esquema do sensor em escada (SCHISSL e RAUPACH, 1992)

Um outro sistema proposto pelos mesmos pesquisadores, baseado no mesmo princípio eletroquímico, é o chamado sistema de anéis expansíveis (Foto 3.4). Este é composto por 6 anéis anódicos e uma barra catódica de metal nobre, e deve ser instalado em estruturas já construídas, em pequenos orifícios perfurados com equipamento apropriado, pois é necessário um perfeito encaixe (SCHISSL e RAUPACH, s.d.). O sistema de anéis expansíveis pode monitorar o risco de corrosão da armadura, através da medida de intensidade galvânica entre os anéis e o cátodo nas diferentes posições, que variam de 1 a 6 cm em relação à superfície do concreto. Este sensor também fornece informações sobre a medida de resistência elétrica.

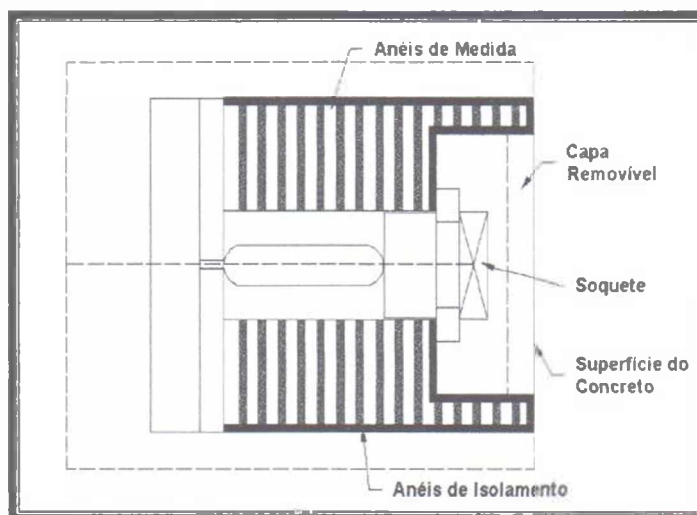


Figura 3.13 - Sensor expansível de multi-anéis (SCHISSL e RAUPACH, s.d.)

Pela medida da corrente e da voltagem entre os ânodos e cátodos, em intervalos regulares, a relação entre a profundidade do teor crítico de cloretos/carbonatação e o tempo pode ser determinada. O tempo para a corrosão da armadura existente pode ser estimado por extrapolação, utilizando-se de modelos de cálculo apropriados.

Testes laboratoriais mostraram que a ferrugem de um ânodo já corroído pode gerar um tipo de efeito selante, no entanto não afeta as medidas, pois neste tipo de sensor, o cloreto apenas pode entrar pelo lado dos anéis.

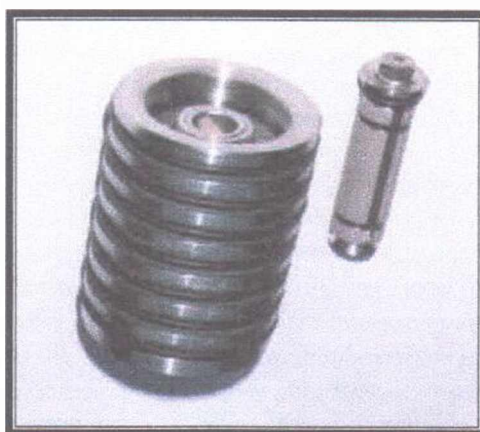


Foto 3.4 - Foto do sensor em anéis expansíveis (SCHISSL e RAUPACH, s.d.)

Os eletrodos são fixados no orifício através da rotação do dispositivo na parte superior do sensor, o qual aciona o mecanismo de expansão até que todos os sensores estejam apertados contra a parede de concreto. Para prevenir a fissuração do concreto devido à pressão

promovida pela expansão do sensor, este não deve ser instalado perto de cantos da estrutura. A distância entre os ânodos e o cátodo deve ser da ordem de 10 a 20 cm.

As medidas devem ser tomadas usando sistema computadorizado ou aparelhos de mão, em intervalos regulares.

Alguns campos de aplicação para estes sensores são:

- Estruturas offshore;
- Prédios perto da costa;
- Pontes e estruturas de garagem;
- Túneis e fundações;
- Monitoramento de sistemas de proteção;
- Áreas com dificuldade de acesso.

SHORT et al. (1991) avaliaram o comportamento de um sensor galvânico em um concreto carbonatado, comparando os resultados com uma técnica mais robusta, que é a resistência de polarização, onde os resultados já são bem compreendidos e bastante confiáveis. Para isto, desenvolveram um sensor bastante simples de construir, robusto para ser utilizado em campo e que necessitasse da instrumentação auxiliar simples.

Este sensor consistiu de um disco de aço carbono (ânodo) inserido através de um orifício perfurado perpendicularmente ao eixo de uma barra de aço inoxidável AISI 304 (cátodo). Para isolar o aço carbono do aço inoxidável e prevenir um ataque nas frestas, o disco de aço foi revestido por uma fina camada de argamassa modificada com polímeros, seguido por um tubo isolante que retrai com o calor e posteriormente foi fixado ao aço inoxidável por meio de uma camada de epóxi (Figura 3.14).

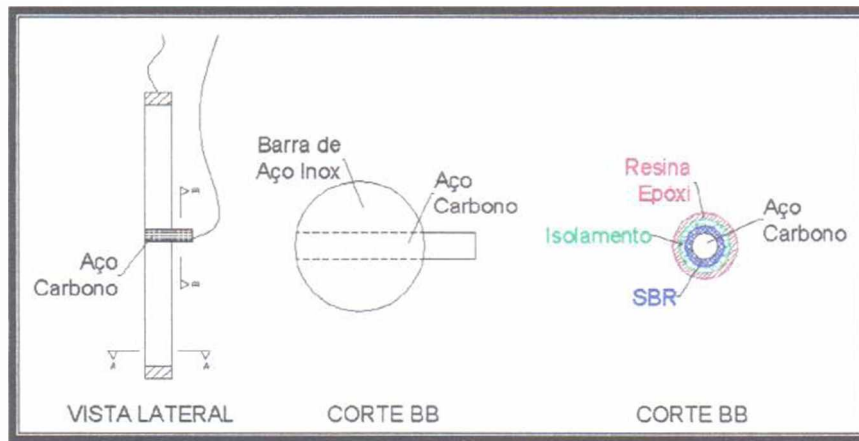


Figura 3.14 - Detalhe de construção do sensor galvânico (SHORT et al. , 1991)

Um capilar de ponte salina foi colocado próximo ao aço ânodo a fim de se obter medidas de R_p . Deste modo, formou-se um par galvânico para medidas de I_{gal} e uma célula eletroquímica para análise de R_p (Figura 3.15).

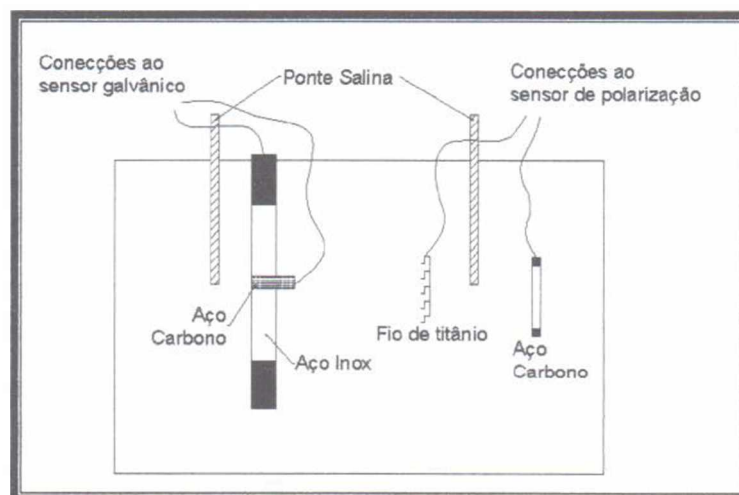


Figura 3.15 - Arranjo para medidas de R_p e I_{gal} em sistema proposto por SHORT et al. (1991)

O sensor mostrou-se apto a detectar as mudanças no estado de corrosão, e por ser simples de construir, constitui numa alternativa para a utilização comercial no concreto armado.

3.3.3 Sensor de Potencial de Corrosão

A CMS (*Corrosion Monitoring System*), de acordo com WIETEK (1996), utiliza-se de um eletrodo de referência bastante estável para ser usado numa região próxima a armadura, no

entanto sem toca-la, a fim de se obter valores de potenciais de corrosão da mesma. O eletrodo de referência é o já consagrado Ag/AgCl, numa matriz sólida, que é revestido por uma malha plástica não condutora, garantindo assim que não haja contato entre o aço e o eletrodo, no entanto, assegurando que eles estejam bastante próximos a fim de se eliminar interferências nas leituras de potenciais. Este sensor é comercializado com o nome de VETEK2000. Os valores de referência para as medidas de potenciais com o sensor são mostrados na

Tabela 3.6 - Referência de potenciais para o sensor VETEK2000 da CMS (WIETEK, 1996)

E_{CMS} (mV)	Estado da Armadura
< -270	Sem corrosão
-270 a -370	Possibilidade corrosão
> -370	Corrosão instalada

A sensibilidade deste eletrodo, segundo o fabricante, é tão alta que com um comprimento de 20 metros, uma área de 1 mm corroída poderia ser detectada. O monitoramento pode ser efetuado com um voltímetro de alta impedância ou usando dispositivos específicos que fazem o trabalho de coleta de dados contínua.

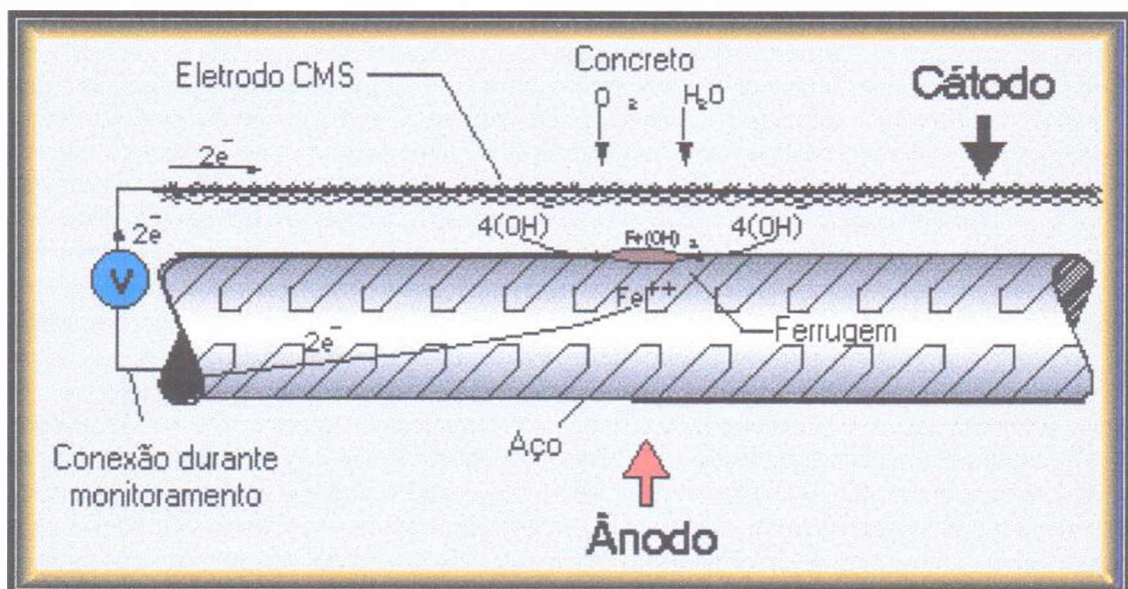


Figura 3.16 - Esquema do sensor da CMS (www.a-bau.co.at)

Apesar deste sistema ter sido desenvolvido para ser utilizado com medidas de potenciais, nada impede que medidas de I_{gal} ou R_p sejam efetuadas, deste modo, este dispositivo mostra-se

bastante flexível para ser usado com diversas técnicas.

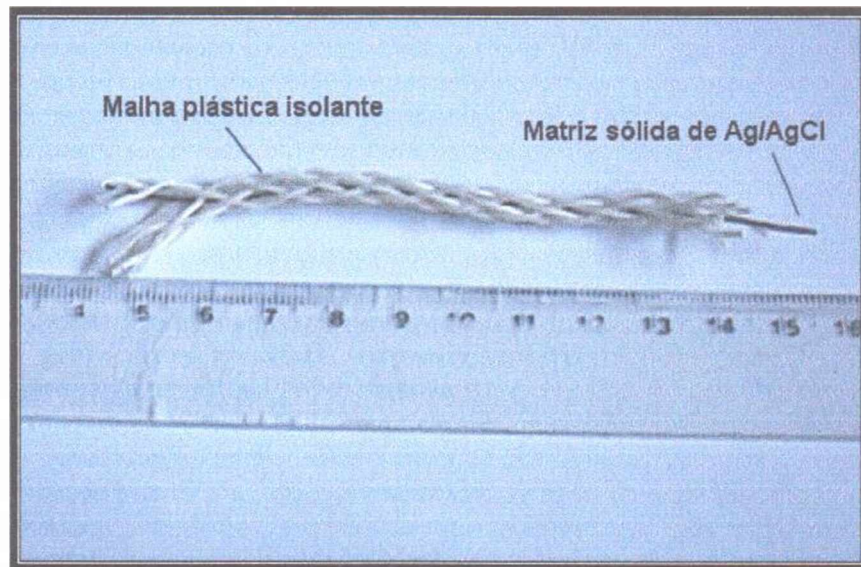


Foto 3.5 - Sensor VETEK2000 da CMS

Um dos diferenciais do sensor VETEK2000, segundo WIETEK (1996), é que este fornece um mapeamento linear da armadura, enquanto os outros métodos de mapeamento de potencial existentes fornecem informações pontuais apenas.

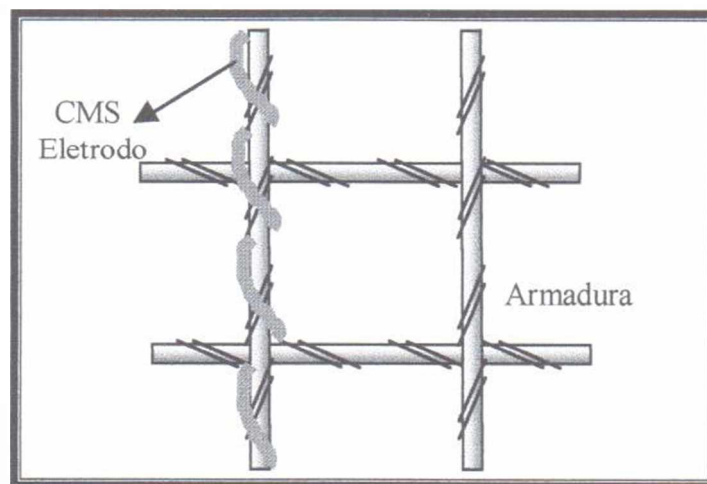


Figura 3.17 - Exemplo de utilização do sensor VETEK2000 em estrutura real

3.3.4 Sensor de Resistência de Polarização

Alguns tipos de sensores para estruturas de concreto são mostrados a seguir (JOHN, 1987):

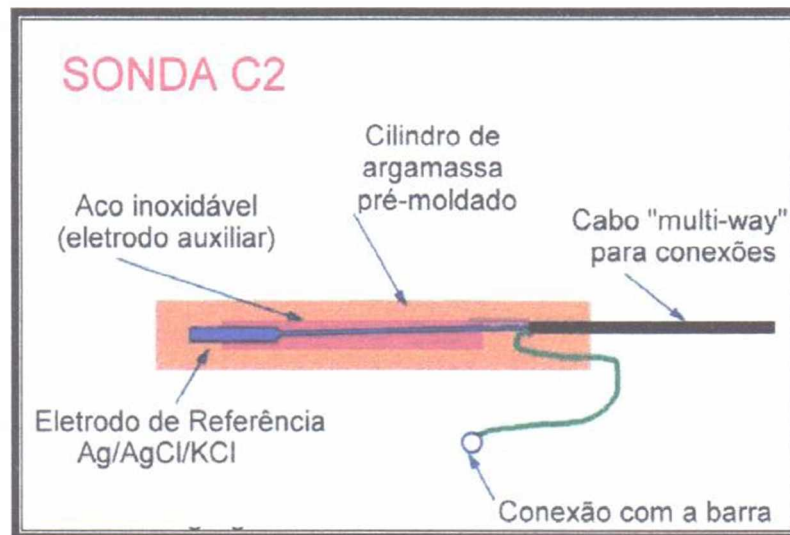


Figura 3.18 - Modelo de sonda C2 para concreto da CAPCIS (www.capcis.co.uk)

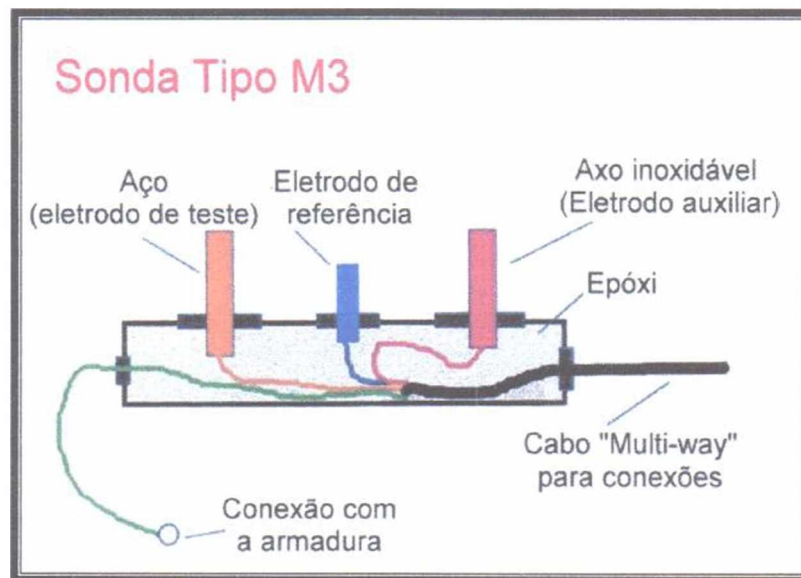


Figura 3.19 - Modelo de sonda M3 para concreto da CAPCIS (www.capcis.co.uk)

Estes modelos de sondas estão aptos a realizar os seguintes ensaios:

- Medidas de potencial de corrosão da armadura;
- Medidas de resistência de polarização;
- Resistividade do concreto.

Estes tipos de sensores são bastante simples, seguindo a idéia básica de uma célula de corrosão utilizada em laboratório para medidas de R_p , onde são necessários 3 eletrodos: um de trabalho, um de referência e um contra-eletrodo.

Outros dispositivos podem ser encontrados no mercado, como os fornecidos pela *Electrochemical Devices* (ANSUINI e DIMOND, 1994):

- Eletrodo de referência permanente de Ag/AgCl para ser colocado embebido no concreto e sondas de grafite, para medidas relativas de potencial (Figura 3.21)
- *Potential Wells probe*, para medidas de potencial acuradas, com eletrodos de referência portáteis (Figura 3.20);

Eletrodos termodinamicamente não verdadeiros ou pseudo-eletrodos, como os de grafite ou INOX, têm desempenho satisfatório para aplicações de curta duração, pois em ensaios de longa duração podem apresentar reações não-reversíveis, que possivelmente mascarariam os resultados.

Os pseudo-eletrodos não obedecem a equação de Nernst, portanto, seu potencial varia de acordo com as mudanças do ambiente, como umidade, resistividade e disponibilidade de oxigênio dissolvido (ANSUINI e DIMOND, 1994).

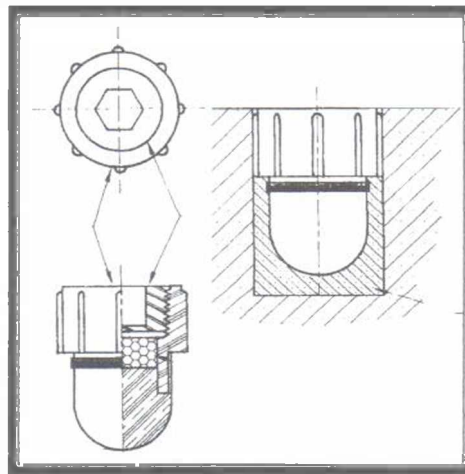


Figura 3.20 - Modelo de sonda para estruturas já construídas da *Electrochemical Devices* (*Potential Wells Probe*)

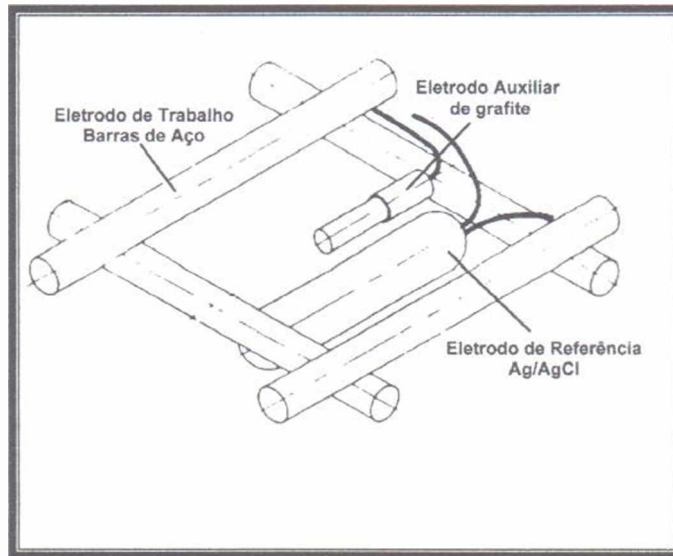


Figura 3.21 - Arranjo para colocação de eletrodo de referência e sonda de grafite em estrutura de concreto em construção (*Electrochemical Devices*)

BROOMFIELD (1996) propõe um dispositivo baseado na técnica de resistência de polarização, utilizando um par de elementos de aço inoxidável como contra-eletrodos e um elemento de aço carbono como eletrodo de trabalho, além do eletrodo de referência de Ag/AgCl. Os eletrodos de aço inoxidável também são utilizados para medidas de resistividade do concreto. Além disso, um sensor de platina para resistência e temperatura é adicionado. Ele pode ser visualizado nas Foto 3.6 e Foto 3.7.

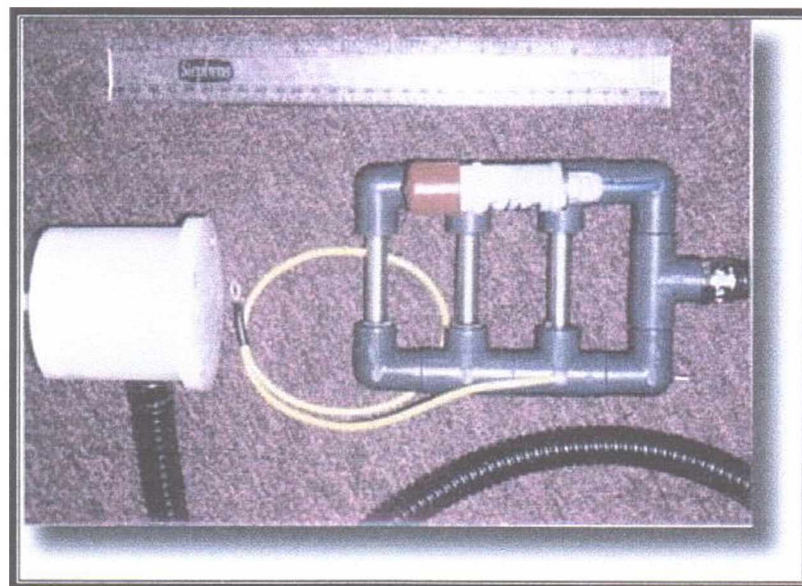


Foto 3.6 - Sonda de corrosão da *KH Design* (www.khdesign.demon.co.uk)

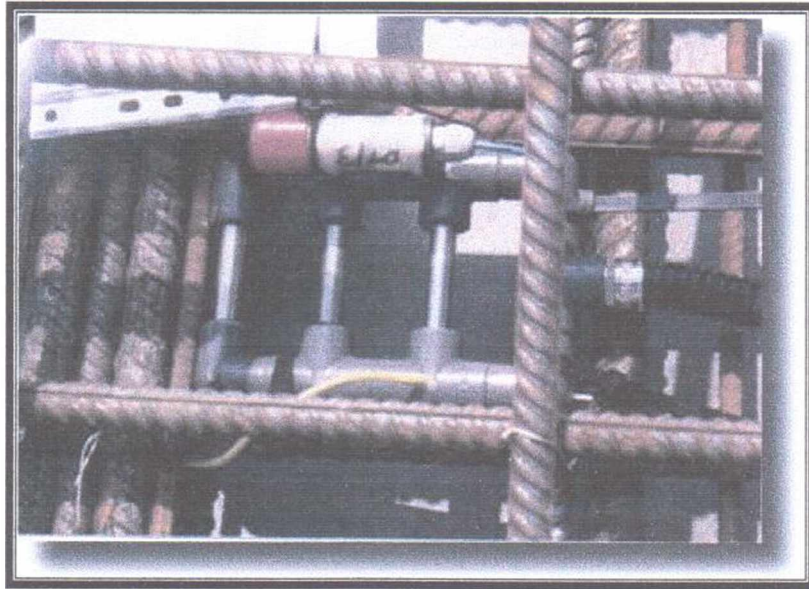


Foto 3.7 - Exemplo de aplicação de sonda da *KH Design* (www.khdesign.demon.co.uk)

4. PROJETO EXPERIMENTAL

Neste trabalho, objetivou-se avaliar o desempenho dos sensores de corrosão. Foi testado o comportamento dos sensores frente ao ingresso de Cl^- e CO_2 ¹⁰. Procurou-se a identificação do avanço da frente de agentes agressivos através dos sensores galvânicos em escada, e adicionalmente foi verificado o comportamento do sensor galvânico com 3 diferentes relações de área anódica/catódica. Foi também utilizado um sensor comercial (VETEK 2000 da CMS), com o objetivo de avaliar um sensor de corrosão de uso corrente, em comparação com o desenvolvido no presente trabalho.

Foram empregadas metodologias de ensaio acelerado¹¹, atentando-se para os princípios conceituais da Norma ASTM E632-82 (Práticas Recomendadas Para o Desenvolvimento de Ensaio Acelerados Visando a Previsão da Vida Útil de Componentes e Materiais de Construção).

Dentro do programa experimental, através dos ensaios acelerados de corrosão induzida por cloretos e carbonatação, procurou-se encontrar dados que balizassem algumas hipóteses lançadas:

- 1ª Hipótese: O sensor comercial CMS é capaz de identificar o período de iniciação da barra de aço longitudinal.
- 2ª Hipótese: O sensor comercial CMS consegue se manter estável e ter precisão no período de propagação.
- 3ª Hipótese: O sensor galvânico em escada consegue identificar o avanço da frente de despassivação através da corrente galvânica (I_g).
- 4ª Hipótese: A diferença de potencial entre o ânodo e o cátodo do sensor (Potencial INOX) medida através de um voltímetro, pode ser mais um parâmetro para identificar o avanço da frente de despassivação.
- 5ª Hipótese: A seqüência de despassivação do sensor galvânico em escada ocorre de maneira progressiva, das barras mais superficiais para as barras mais internas.

¹⁰ Não foi parte dos objetivos do presente trabalho uma avaliação das diferentes condições microestruturais em que os sensores podem estar imersos.

¹¹ Os ensaios acelerados utilizados neste trabalho, de carbonatação e cloretos, vêm sendo utilizados em diversas Dissertações de Mestrado e pesquisas orientadas pelos Professores Elton Bauer e Antônio Nepomuceno, sendo baseados em metodologias já consagradas na literatura internacional.

Dentro do programa experimental, procurou-se avaliar algumas grandezas eletroquímicas que fornecessem subsídios para um acompanhamento do processo de corrosão do aço imerso no concreto. Um resumo das grandezas eletroquímicas estudadas pode ser observado nas Figura 4.1 e Figura 4.2.

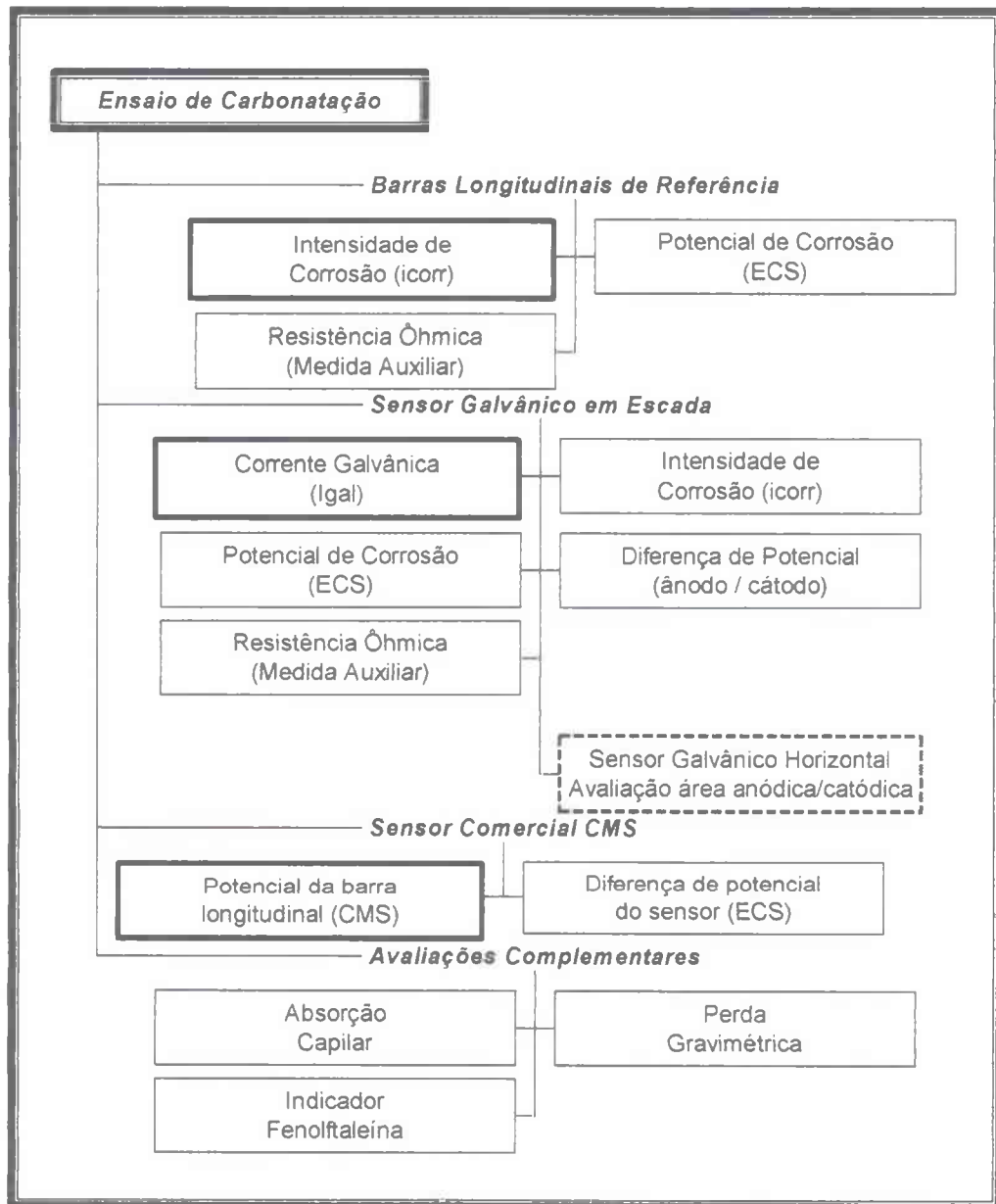


Figura 4.1 - Diagrama das medidas eletroquímicas envolvidas na série de carbonatação

As medidas do sensor comercial CMS são relativas às barras longitudinais, e a medida de diferença de potencial do sensor (ECS) é relativa à estabilidade do sensor comercial em relação ao eletrodo de calomelano saturado, que é um eletrodo de referência.

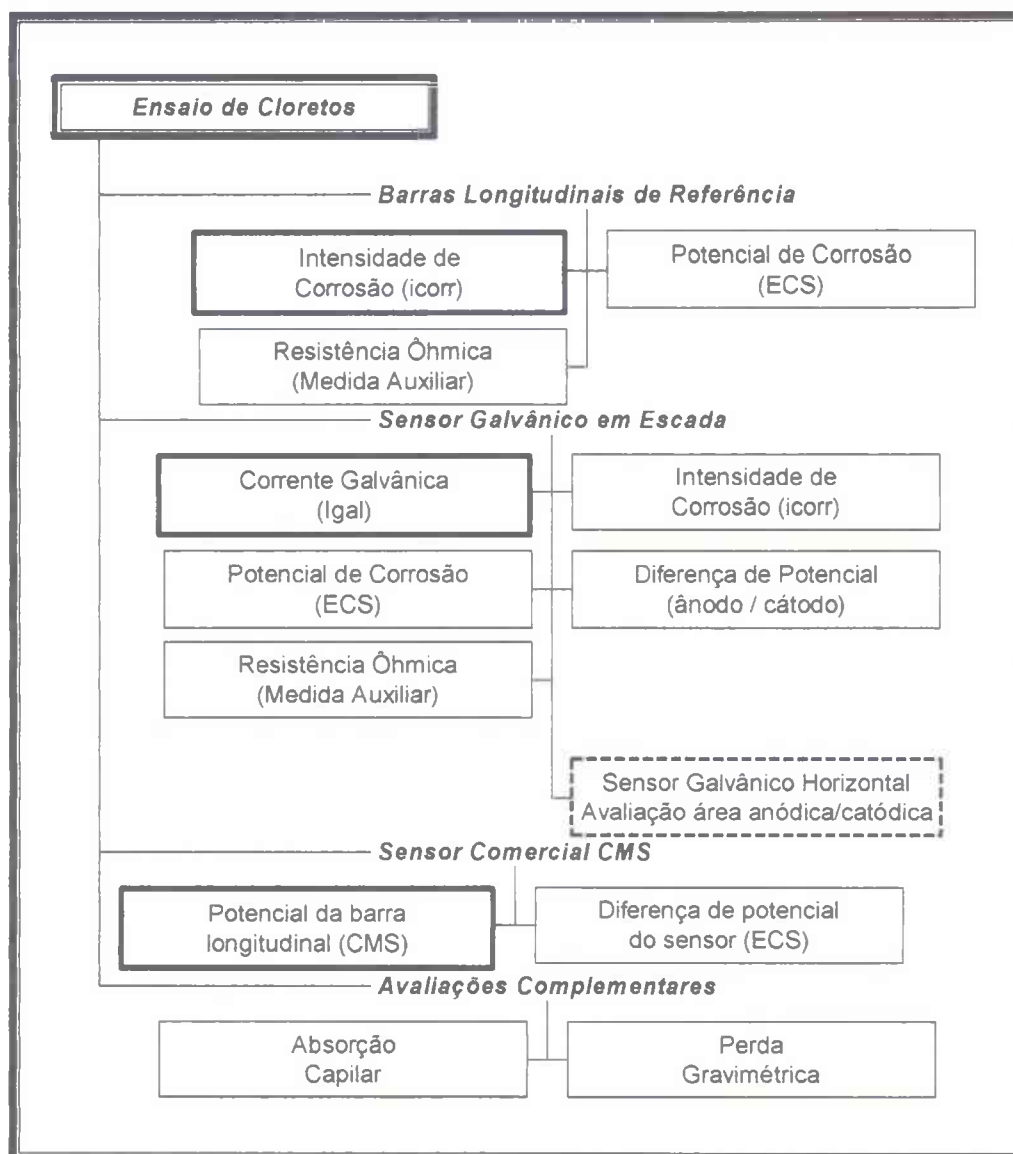


Figura 4.2 - Diagrama das medidas eletroquímicas envolvidas na série de cloretos¹²

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1 Cimento

O cimento utilizado para a confecção da argamassa foi o CPlI-F-32 da Ciplan. Suas características químicas e físicas são mostradas na Tabela 4.1 e na Tabela 4.2.

¹² Não foi realizada medida de teor de cloretos da argamassa por não ser o objetivo do trabalho uma avaliação da mesma, e sim da capacidade dos sensores serem sensíveis ao avanço da frente de cloretos, independente de sua concentração.

Tabela 4.1 - Análise química do cimento

Composição Química	Teores (%)
Perda ao fogo	6,26
Resíduo insolúvel	2,16
Óxido de magnésio (MgO)	5,23
Óxido de silício (SiO ₂)	20,20
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	3,35
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	4,25
Óxido de cálcio (CaO)	57,51
Óxido de cálcio livre (CaO)	1,45
Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,21
Óxido de potássio (K ₂ O)	0,74

(Fornecido pela fábrica de cimento Ciplan-DF)

Tabela 4.2 - Propriedades físicas dos cimentos

Característica		Norma	CPII-F 32 ¹³
Massa específica		NBR 6474-84	3,10 g/cm ³
Finura	P#200	NBR 7215-91	1,30 %
	*Blaine	NBR 7224-84	364 m ² /kg
Tempo de pega	Inicial	NBR 11581-91	3:09 horas
	Final	NBR 11581-91	4:43 horas
Resistência à compressão	3 dias	NBR 7215-91	24,9 Mpa
	7 dias	NBR 7215-91	30,4 Mpa
	28 dias	NBR 7215-91	35,4 Mpa

(Fornecido pela fábrica de cimento Ciplan-DF)

4.1.2 Areia

A areia utilizada no programa experimental é proveniente do rio Corumbá-GO, e possui uma distribuição granulométrica (Figura 4.3) que se enquadra na zona 4 (NBR 7211-83).

¹³ Cimento portland composto com filer.

Outras características da areia utilizada no preparo da argamassa estão listadas na Tabela 4.3:

Tabela 4.3 - Propriedades da areia utilizada no ensaio

Dimensão Característica Máxima	4,8 mm	NBR 7217
Densidade Aparente	1,446 kgf/dm ³	NBR 7251
Densidade Absoluta	2,604 kgf/dm ³	NBR 9776
Módulo de Finura	2,41	NBR 7217
Coefficiente de Vazios	0,445	NBR 7217
Teor de Materiais Pulverulentos	2,51 %	NBR 7219

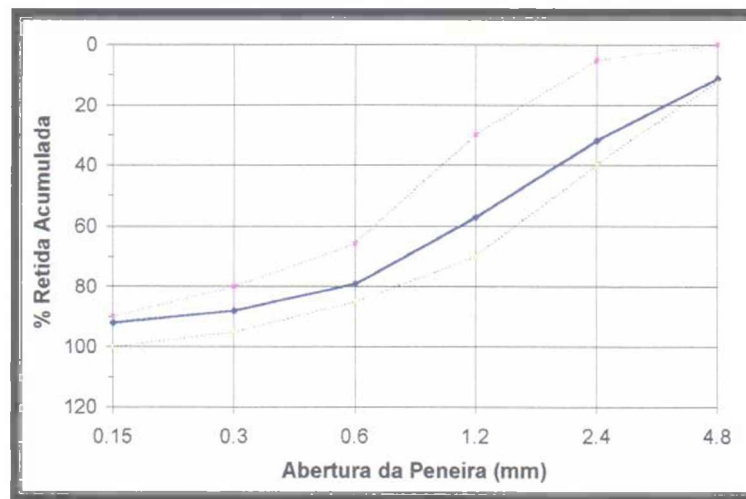


Figura 4.3 - Distribuição granulométrica da areia

4.1.3 Aço

Foram utilizados dois tipos de aço para a realização dos ensaios, e suas características químicas são mostradas na Tabela 4.4:

Tanto as armaduras de referência quanto as armaduras dos sensores foram submetidas a um procedimento de limpeza específico, de modo que todas as barras apresentassem as mesmas condições superficiais, estando isentas de qualquer produto de corrosão.

Tabela 4.4 - Análise Química das Armaduras (Absorção Atômica)

Referência	Elemento	Composição (%)
AÇO CARBONO (Ânodo dos Sensores) (Barras de Referência)	Al	0,01
	Cu	0,28
	Cr	0,03
	Mn	0,48
	C	0,151
	P	< 0,01
AÇO INOX (Cátodos dos Sensores)	Cr	12,2
	Mn	2,09
	Ni	8,94
	C	0,039
	P	< 0,01

(Ensaio Realizado pelo LPS da UFMG)

O procedimento de limpeza adotado foi o mesmo desenvolvido por BAUER (1995), baseado na Norma ASTM G1-88, onde foi utilizada uma solução de ácido clorídrico 1:1 com 3,5 g/l de hexametenotetramina. Os passos foram os seguintes:

- Imersão da barra na solução de ácido clorídrico e hexametenotetramina até limpeza visível;
- Lavagem das barras em água corrente usando escova não metálica;
- Imersão das barras em acetona por dois minutos, para retirada de eventuais gorduras;
- Secagem das barras com jato de ar quente.

Após a limpeza das barras, todas foram pesadas, tabeladas (Anexo V) e armazenadas em recipiente lacrado com sílica-gel até o momento da montagem dos corpos-de-prova e sensores.

Para a montagem dos sensores e dos corpos-de-prova, foram conectados fios flexíveis à extremidade das barras de aço, através de orifícios executados com uma broca, sendo que algumas barras receberam fita isolante para deixar uma área exposta previamente definida.

4.1.4 Sensores galvânicos de corrosão

Neste trabalho, adaptou-se o modelo de sensor galvânico em escada proposto por SCHIESSL e RAUPACH (1992), realizando algumas alterações significativas, principalmente com relação aos materiais empregados e à disposição dos eletrodos. Adicionalmente, foi investigado o comportamento do sensor com relação a variações de áreas anódica e catódica.

Os detalhes de montagem dos sensores podem ser visualizados na Figura 4.4. Os seus elementos constituintes são:

- corpo dos sensores - moldado em barras de fibra de vidro, com 6 orifícios a cada 2 cm para fixação das barras anódicas e catódicas dos sensores;
- barras catódicas - aço inox comercial, bitola de 4.2 mm, com área exposta de 9,236 cm² para ambos os sensores em escada e com variação de A_a/A_c ;
- barras anódicas - aço CA-60, bitola de 5 mm, com área exposta de 10,995 cm² para o sensor em escada e de 3,142, 6,283 e 10,995 cm² para o sensor com variação de A_a/A_c .

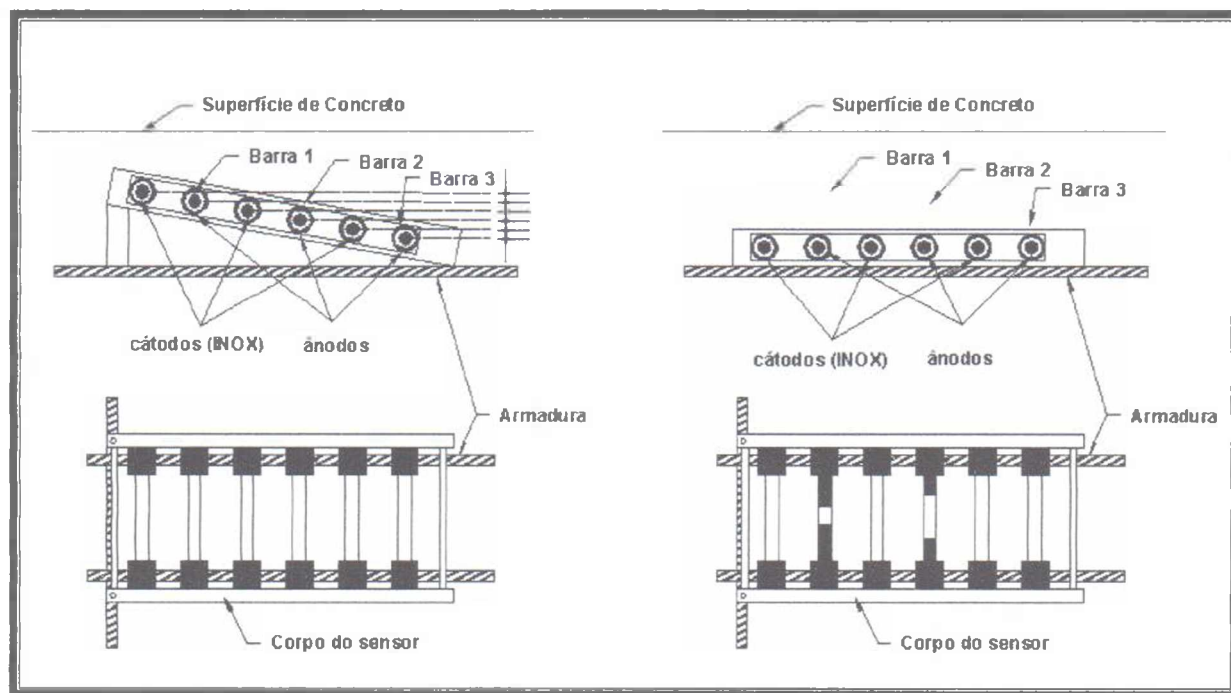


Figura 4.4 - Esquema de montagem dos sensores galvânicos em escada e com variação de A_a/A_c

Cada par galvânico recebeu uma conexão elétrica com fios de cores iguais, de acordo com a Tabela 4.5. O procedimento de ensaio pode ser visto no anexo VI.

Tabela 4.5 - Conexões elétricas nos sensores galvânicos

<i>Sensor galvânico escada</i>	
Par galvânico com maior cobrimento	Conexões amarelas
Par galvânico com cobrimento intermediário	Conexões verdes
Par galvânico com cobrimento semelhante à barra de referência	Conexões brancas
<i>Sensor galvânico com variação A_a/A_c</i>	
Par galvânico com menor relação A_a/A_c	Conexões amarelas
Par galvânico com relação A_a/A_c intermediária	Conexões verdes
Par galvânico com maior relação A_a/A_c	Conexões brancas

4.1.5 Corpos-de-prova

Para este estudo, foi utilizada argamassa de cimento e areia em substituição ao concreto. De acordo com BAUER (1995) e SATO (1998), a argamassa pode ser utilizada para substituir o concreto, pois as suas características de porosidade são muito semelhantes. WINSLOW e LIU (1990), citados por BAUER (1995), ratificam esta hipótese. As razões para esta substituição são:

- A reduzida dimensão do corpo-de-prova, adicionada à grande quantidade de barras e sensores que foram adicionados a este, o que geraria dificuldades na moldagem, como pode ser observado na Foto 4.1;
- Ser o agregado grão uma fonte de heterogeneidade, em relação às dimensões das barras e do corpo-de-prova.

A dosagem da argamassa foi realizada de modo que o volume de pasta fosse superior ao volume de vazios do agregado, de forma a evitar a penetração não controlada dos agentes agressivos através do refinamento e homogeneização da rede de poros da argamassa. Deste modo, foram obtidos os seguintes valores:

- Traço (1 : 2,36 : 0,60)
- Consistência = 250 mm - fluida - trabalhável (NBR 7215-91)
- A% = 17,85 % (Relação água/materiais secos)

O traço também teve o objetivo de garantir uma argamassa com características de trabalhabilidade para moldagem com a utilização de mesa vibratória.

Foram moldados quatro corpos-de-prova para acomodarem os sensores e as barras longitudinais de referência, com suas dimensões descritas na Figura 4.5. Para fazer o acompanhamento da evolução da carbonatação com o indicador fenolftaleína e para realizar o ensaio de absorção por capilaridade¹⁴, foram moldados vinte e dois corpos-de-prova cilíndricos, com um diâmetro de 5 cm e 10 cm de altura, de acordo com a NBR 7215-91.

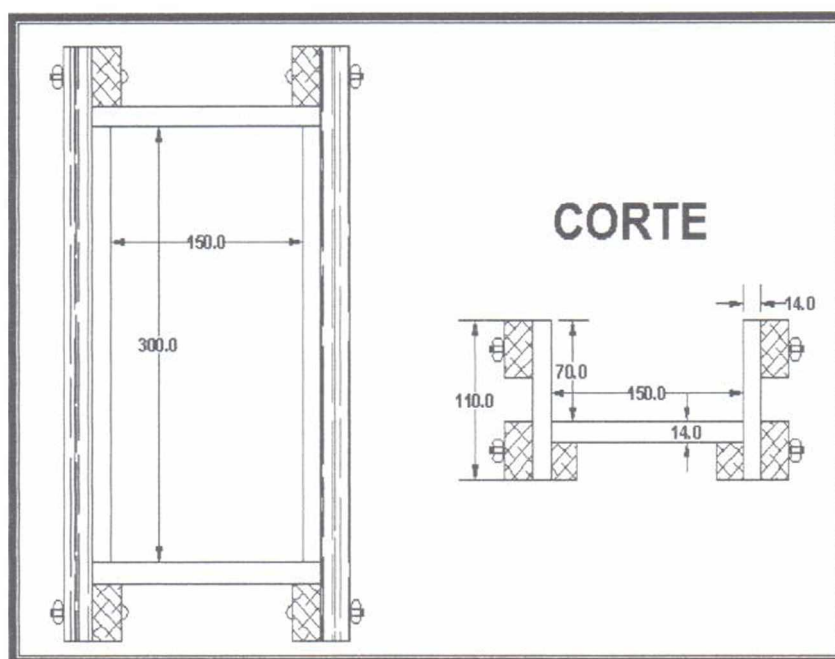


Figura 4.5 - Esquema da Forma dos Corpos-de-Prova

Os sensores de corrosão e as barras de referência foram acomodados dentro de cada corpo-de-prova de acordo com a Figura 4.6.

¹⁴ De acordo com a NBR 9779-95 (Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade).

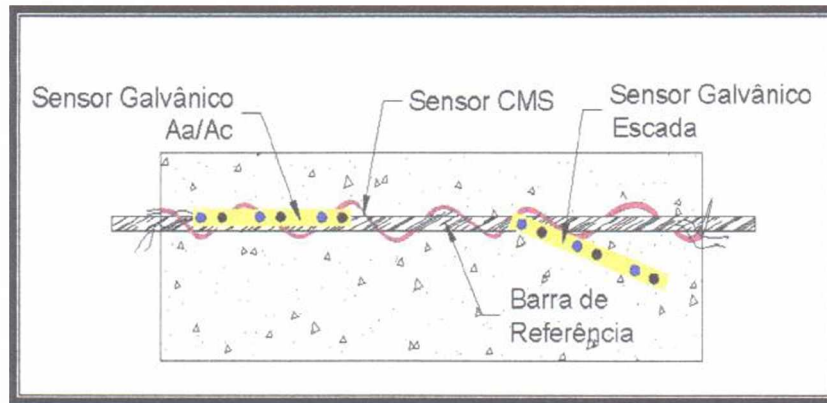


Figura 4.6 - Esquema de montagem dos corpos-de-prova

Em cada corpo-de-prova, foram usados:

- 2 barras longitudinais de referência, com uma camada de cobertura de 0,5 cm;
- 2 sensores comerciais da CMS, envoltos em cada uma das barras de referência;
- 1 sensor galvânico em escada, com a barra anódica mais superficial na mesma espessura de cobertura das barras de referência, e as demais barras anódicas com cobrimentos de 1,5 e 2,5 cm respectivamente;
- 1 sensor galvânico com variação de A_a/A_c , na mesma posição das barras de referência.

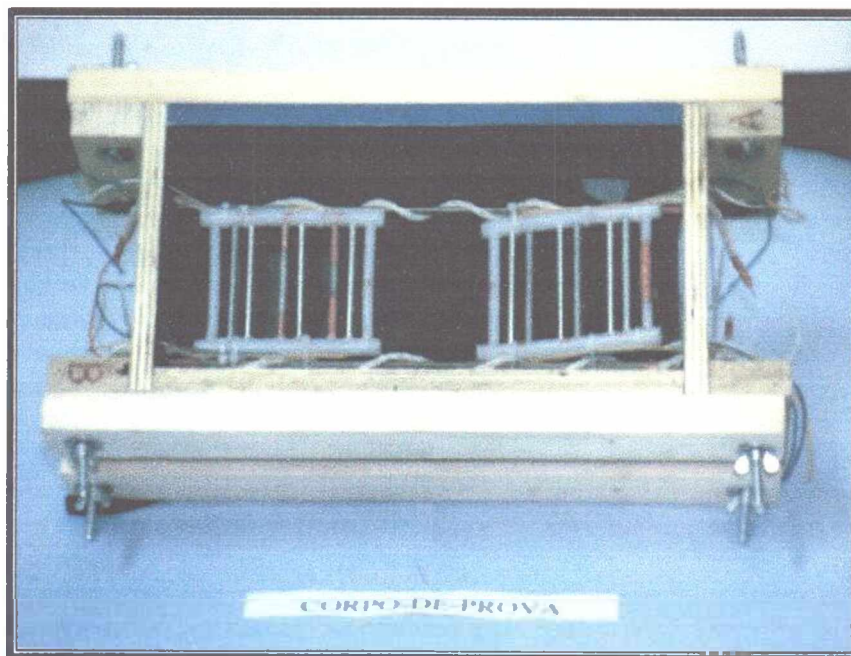


Foto 4.1 - Detalhe dos sensores e barras montados na forma do CP

O procedimento de moldagem consistiu no lançamento manual de três camadas de 2 cm de argamassa (misturada mecanicamente), utilizando uma mesa vibratória para realizar o

adensamento. Logo após a moldagem, os corpos-de-prova foram envolvidos em sacos de aniação pré-umedecidos, e mantidos em ambiente de laboratório por 24 horas. Após este período, foram desmoldados e mantidos em câmara úmida¹⁵ por 28 dias, a fim de efetuar a cura da argamassa¹⁶. Estudos do acompanhamento do cimento utilizado nesta pesquisa, através do LEM, evidenciam que o crescimento da resistência mecânica dos 7 aos 28 dias é muito lento, garantindo nesta última idade um grau de hidratação elevado (LEM, 1997).

Após o período de cura em câmara úmida, os corpos-de-prova foram levados a estufa ventilada, com temperatura de 60° C por 15 dias, a fim de acelerar o processo de estabilização da massa. Ao sair da estufa, os corpos-de-prova permaneceram em ambiente de umidade e temperatura controladas¹⁷ por um período suficiente para a estabilização de massa dos mesmos, propiciando condições para o início dos ensaios acelerados.

Antes de iniciarem os ensaios acelerados de corrosão, as laterais dos corpos-de-prova sofreram uma pintura com resina epoxi fluida, a fim de direcionar a entrada de agentes agressivos apenas pelas faces superior e inferior dos corpos-de-prova.

4.2 SÉRIES DE ENSAIO

Foram definidas duas séries de ensaios, cada uma com dois corpos-de-prova. A primeira série consistiu no ensaio acelerado de corrosão induzida por carbonatação e a segunda série consistiu no ensaio acelerado de corrosão induzida por cloretos.

Cada uma das séries foi subdividida em 4 sub-séries, dos objetos de ensaio em questão, ou seja, barras de referência e sensores.

A série relativa ao sensor CMS (VETEK 2000) mostra as medidas das barras de referência em relação a este sensor.

¹⁵ Este procedimento visa efetuar uma hidratação satisfatória da argamassa, propiciando uma melhor distribuição dos poros e redução das fissuras. Isto também procura eliminar adição de mais variáveis à pesquisa.

¹⁶ De acordo com ensaio realizado por BAUER (1995), a idade onde as reações de hidratação já estão mais lentas (cimentos com adição de escória), é de 63 dias, no entanto, a idade de 28 dias mostra um grau de hidratação superior a 90%, portanto, considerou-se esta idade de referência para a permanência dos corpos-de-prova em câmara úmida no período da cura.

¹⁷ Umidade em torno de 50 a 60% e temperatura de 20 a 25°C.

As nomenclaturas das séries são mostradas nas Tabela 4.6 e Tabela 4.7.

Tabela 4.6 - Série de Ensaio - Carbonatação

Ensaio de Carbonatação					
Série de Ensaio	Designação	CP	Posição	Cobrimento (mm)	Área Exposta (cm ²)
CA-BL1-1	Barra de Referência	1	1	5,0	40,841
CA-BL1-2	Barra de Referência	1	2	5,0	40,841
CA-SC1-1	Sensor CMS	1	1	5,0	-
CA-SC1-2	Sensor CMS	1	2	5,0	-
CA-SGE1-1	Sensor Galvânico	1	1	5,0	10,995
CA-SGE1-2	Sensor Galvânico	1	2	15,0	10,995
CA-SGE1-3	Sensor Galvânico	1	3	25,0	10,995
CA-SGA1-1	Varição $A_{anodica}/A_{catódica}$	1	1	5,0	3,142
CA-SGA1-2	Varição $A_{anodica}/A_{catódica}$	1	2	5,0	6,283
CA-SGA1-3	Varição $A_{anodica}/A_{catódica}$	1	3	5,0	10,995
CA-BL2-1	Barra de Referência	2	1	5,0	40,841
CA-BL2-2	Barra de Referência	2	2	5,0	40,841
CA-SC2-1	Sensor CMS	2	1	5,0	-
CA-SC2-2	Sensor CMS	2	2	5,0	-
CA-SGE2-1	Sensor Galvânico	2	1	5,0	10,995
CA-SGE2-2	Sensor Galvânico	2	2	15,0	10,995
CA-SGE2-3	Sensor Galvânico	2	3	25,0	10,995
CA-SGA2-1	Varição $A_{anodica}/A_{catódica}$	2	1	5,0	3,142
CA-SGA2-2	Varição $A_{anodica}/A_{catódica}$	2	2	5,0	6,283
CA-SGA2-3	Varição $A_{anodica}/A_{catódica}$	2	3	5,0	10,995

Tabela 4.7 - Série de Ensaio - Cloretos

Ensaio de Cloretos					
Série de Ensaio	Designação	CP	Posição	Cobrimto (mm)	Área Exposta (cm ²)
CL-BL1-1	Barra de Referência	3	1	5,0	40,841
CL-BL1-2	Barra de Referência	3	2	5,0	40,841
CL-SC1-1	Sensor CMS	3	1	5,0	-
CL-SC1-2	Sensor CMS	3	2	5,0	-
CL-SGE1-1	Sensor Galvânico	3	1	5,0	10,995
CL-SGE1-2	Sensor Galvânico	3	2	15,0	10,995
CL-SGE1-3	Sensor Galvânico	3	3	25,0	10,995
CL-SGA1-1	Varição $A_{anódica}/A_{catódica}$	3	1	5,0	3,142
CL-SGA1-2	Varição $A_{anódica}/A_{catódica}$	3	2	5,0	6,283
CL-SGA1-3	Varição $A_{anódica}/A_{catódica}$	3	3	5,0	10,995
CL-BL2-1	Barra de Referência	4	1	5,0	40,841
CL-BL2-2	Barra de Referência	4	2	5,0	40,841
CL-SC2-1	Sensor CMS	4	1	5,0	-
CL-SC2-2	Sensor CMS	4	2	5,0	-
CL-SGE2-1	Sensor Galvânico	4	1	5,0	10,995
CL-SGE2-2	Sensor Galvânico	4	2	15,0	10,995
CL-SGE2-3	Sensor Galvânico	4	3	25,0	10,995
CL-SGA2-1	Varição $A_{anódica}/A_{catódica}$	4	1	5,0	3,142
CL-SGA2-2	Varição $A_{anódica}/A_{catódica}$	4	2	5,0	6,283
CL-SGA2-3	Varição $A_{anódica}/A_{catódica}$	4	3	5,0	10,995

4.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL - METODOLOGIA

4.3.1 Medidas Eletroquímicas

Para caracterizar e avaliar o fenômeno da corrosão induzida pela carbonatação e por cloretos, foram utilizadas as seguintes técnicas eletroquímicas:

- Potencial de Eletrodo;
- Macropar galvânico;
- Resistência de Polarização;

As leituras em cada corpo-de-prova seguiram a seguinte ordem:

- a) leitura dos potenciais das barras de referência em relação ao sensor CMS;
- b) leitura dos potenciais das barras anódicas dos sensores galvânicos em relação ao aço inox (barras catódicas);
- c) conexão dos macropares do sensor e leitura das correntes galvânicas;
- d) leitura dos potenciais dos sensores comerciais da CMS em relação ao ECS (eletrodo de calomelano saturado);
- e) leitura dos potenciais das barras de referência e das barras anódicas dos sensores galvânicos em relação ao ECS e imediata leitura da R_p .

Para a leitura dos potenciais das barras de referência em relação ao sensor comercial, e para a leitura do potencial galvânico entre as barras anódicas e catódicas dos sensores, foi utilizado um voltímetro com precisão de três casas decimais.

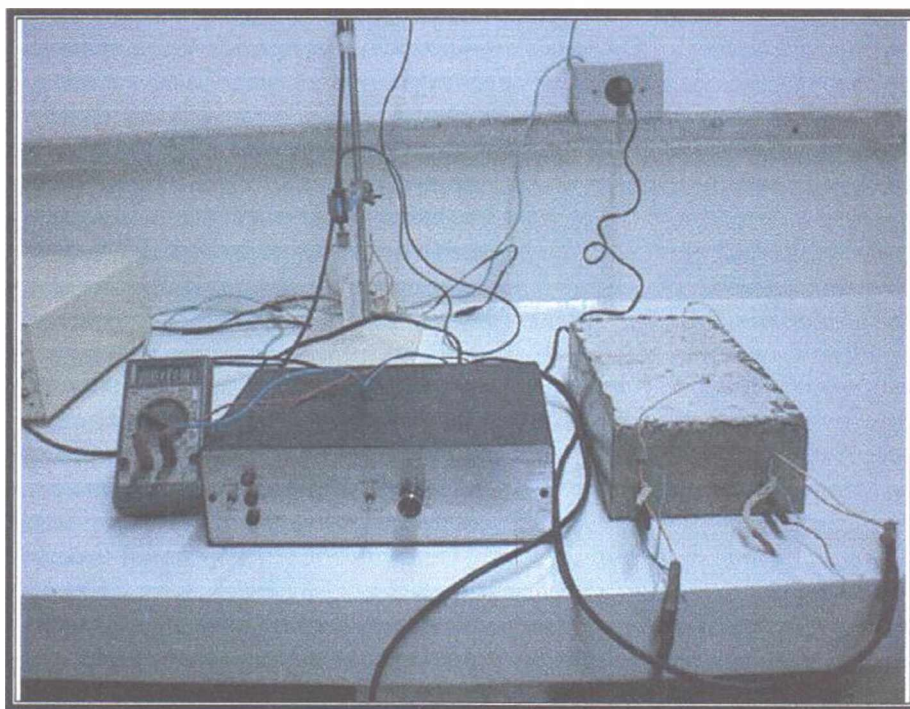


Foto 4.2 - Equipamento para medida de corrente galvânica

A leitura das correntes galvânicas era feita logo após a tomada dos potenciais, com a utilização de um amperímetro de resistência nula e multímetro (Foto 4.2). Os valores de I_{gal} foram lidos no multímetro após um período de estabilização de 1 minuto, que foi definido

como padrão para todo o ensaio¹⁸, adaptado a partir dos trabalhos de NEPOMUCENO (1992) e CASTANHEIRA (1997). Ao nível de avaliação com a intensidade de corrosão (i_{corr}), o que se espera é uma correlação entre esta e a corrente galvânica (I_{gal}). Logo após às medidas de corrente galvânica, as barras anódicas e catódicas eram desconectadas.

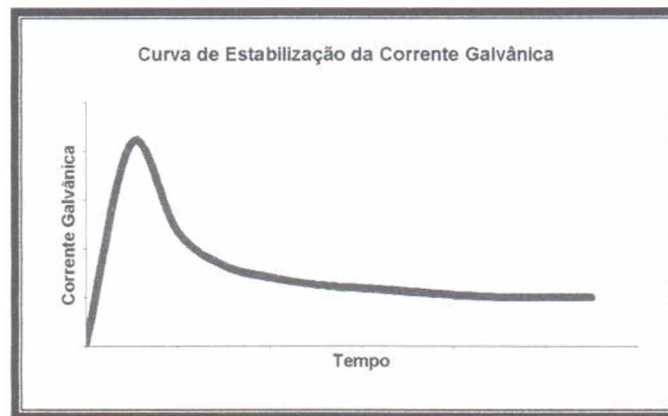


Figura 4.7 - Curva típica de estabilização da corrente galvânica utilizando amperímetro de resistência nula (ZRA), que pode variar em função do meio e do material utilizado

O ensaio de resistência de polarização, onde é obtida a intensidade de corrosão (i_{corr}), utilizou como equipamento um potenciostato desenvolvido na Universidade de Brasília¹⁹, com dispositivo para compensação de queda ôhmica, voltímetros com precisão de décimo de mV, tudo acoplado a um aquisitor de dados, que também é responsável pela análise dos gráficos de variação da corrente frente a variação do potencial, fornecendo a tangente da curva, que representa a R_p (Foto 4.3).

Como eletrodo de referência, foi utilizado o eletrodo de calomelano saturado (ECS). Uma chapa de aço inoxidável serviu como contra-eletrodo, para o caso das barras longitudinais de referência. No caso dos sensores galvânicos, as barras catódicas de inox do sensor serviram como contra-eletrodo para as medidas de R_p das barras anódicas do mesmo, portanto ânodo e cátodo do sensor estavam desconectados neste momento.

¹⁸ Este período não é o suficiente para a completa estabilização da corrente galvânica, no entanto, mostra-se adequado quando se trata de grande quantidade de medidas, o que seria comum em estruturas reais, portanto as I_g obtidas devem ser tratadas com critério. Admitiu-se que uma curva semelhante à da Figura 4.7 seria representativa para todas os corpos-de-prova do ensaio.

¹⁹ Equipamento desenvolvido em programa patrocinado pelo CNPq, na década de 80 (BAUER, 1991; BAUER et al., 1991; MONTALVÃO, 1992).

O eletrodo de calomelano saturado foi posicionado na face superior do corpo-de-prova, no centro das barras anódicas dos sensores galvânicos, uma a uma respectivamente para cada medida de R_p .

Através do dispositivo de compensação de queda ôhmica do potenciostato, obteve-se o valor da resistência ôhmica, que serviu como parâmetro auxiliar nas análises pertinentes.

Através do valor de R_p , chega-se à intensidade de corrosão (i_{corr}) utilizando a equação de STERN & GEARY (1957), de acordo com o que já foi visto no Capítulo 3, onde a constante B assume o valor de 26 para armadura no estado ativo e 52 para a armadura no estado passivo²⁰.

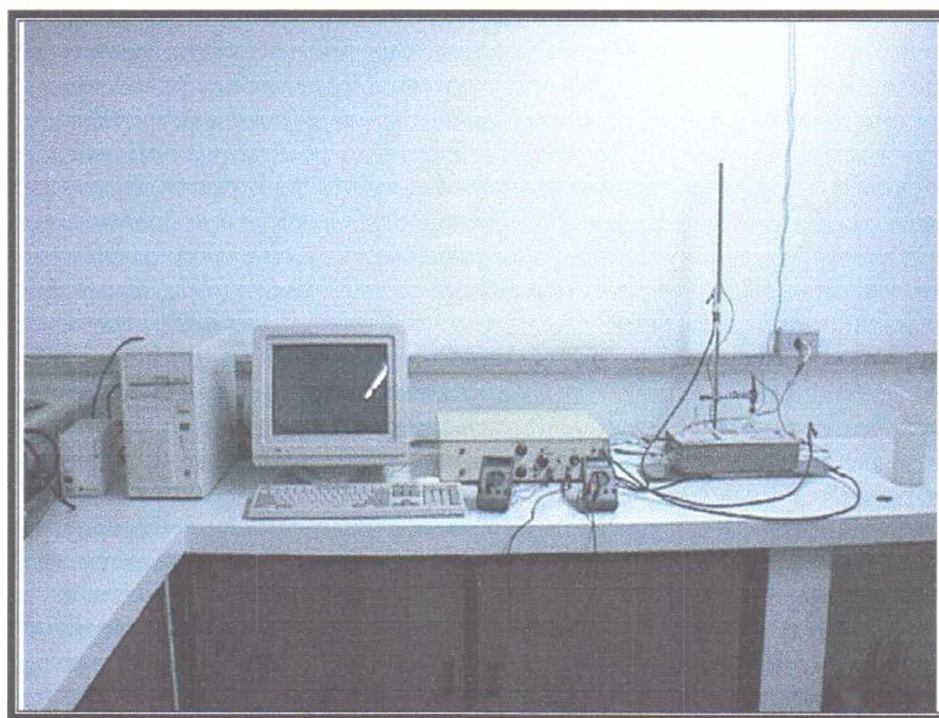


Foto 4.3 - Equipamentos para ensaio de resistência de polarização

Para a aquisição dos dados, foi realizada uma polarização anódica de -10 a +10 mV em relação ao potencial de corrosão (E_{corr}), durante um período de 2 minutos, gerando portanto uma velocidade de varredura de 10 mV/min.

²⁰ Valores propostos por ANDRADE (1973) e aceitos pela comunidade científica nacional e internacional, inclusive adotado pelo LEM (UnB).

4.3.2 Ensaios Complementares

Os ensaios complementares foram utilizados para uma melhor compreensão do processo de corrosão, avaliado através de técnicas eletroquímicas.

Foram realizados os seguintes ensaios: absorção capilar e perda gravimétrica.

- Absorção Capilar: O procedimento adotado foi baseado na NBR 9779-97, onde foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos da mesma argamassa dos corpos-de-prova dos sensores.
- Perda gravimétrica: Ao final dos ensaios, os corpos-de-prova foram rompidos, todas as barras foram retiradas e submetidas ao processo de limpeza utilizado no início do ensaio. Após a limpeza, as barras foram pesadas, e a perda gravimétrica comparada com a perda eletroquímica, através da integração da curva de i_{corr} x tempo e utilizando-se da Lei de Faraday (ANDRADE & GONZALEZ, 1978). NEPOMUCENO (1992), indica a seguinte equação para a obtenção dos valores de perda eletroquímica, em miligramas:

$$P_{\text{eletr}} = 0,025 \int i_{\text{corr}} dt \quad (4.1)$$

4.3.3 Ensaio de Corrosão Induzida por Carbonatação

Após o período de estabilização dos corpos-de-prova no ambiente de laboratório, foram utilizados os CP1 e CP2 para realização do ensaio acelerado de corrosão induzida por carbonatação.

O ensaio de carbonatação consiste na exposição dos corpos-de-prova a um ambiente com grande concentração de CO_2 , próximo a 100%. Para tanto, foi utilizada uma câmara lacrada, onde o CO_2 pudesse ficar confinado, gerando esta atmosfera.

Uma umidade na faixa de 50 a 70% é considerada como a ideal para uma maior penetração do CO_2 nos poros da argamassa (HELENE, 1981; GONZALEZ et al., 1984; NEPOMUCENO, 1992). Para isto, utilizou-se um lastro de H_2SO_4 na câmara de carbonatação, de acordo com a

Norma ASTM E 104-85 (*Maintaining Constant Relative Humidity by Means of Aqueous Solutions*).

Foram fornecidos fluxos intermitentes de CO_2 , com o primeiro fluxo suficiente para suprir 50% acima do volume da câmara, que era de $0,06 \text{ m}^3$. Isto garantiu um total preenchimento da câmara com CO_2 . Foram estipulados fluxos de 10 minutos, com uma vazão entre 4 a 7 litros/min, em intervalos de 1 hora para o primeiro dia, e fluxos de 15 minutos, com uma vazão entre 4 a 7 litros/min, em intervalos de 24 horas para o restante do ensaio.

O esquema de montagem da câmara de carbonatação pode ser melhor visualizado na Figura 4.8 e na Foto 4.4.

A metodologia adotada foi a mesma desenvolvida por BAUER (1995) e utilizada também por MONTEIRO (1996), TEIXEIRA (1998) entre outros²¹.

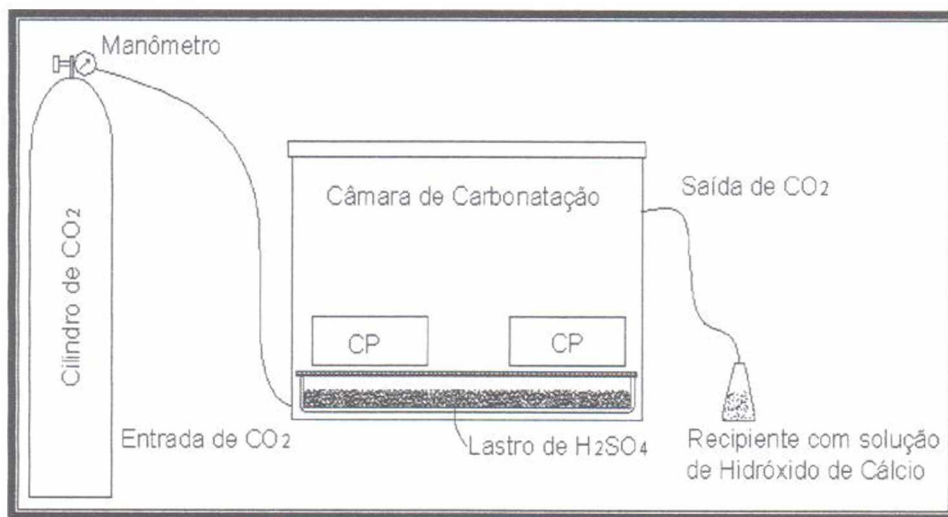


Figura 4.8 - Esquema da Câmara de Carbonatação

²¹ Metodologia desenvolvida e adaptada no LEM – Laboratório de Ensaio de Materiais da Universidade de Brasília.



Foto 4.4 - Câmara de Carbonatação

Para identificar o momento de interromper os fluxos de CO_2 e finalizar o ensaio de carbonatação acelerada, utilizou-se a análise dos seguintes parâmetros:

- identificação de uma redução dos valores de intensidade de corrosão (i_{corr}) após uma intensa evolução no decorrer da exposição ao ambiente saturado de CO_2 . Isto ocorre devido à dificuldade de penetração do gás pela saturação dos poros, à quantidade de água gerada nas reações de carbonatação e ao refinamento dos poros, principalmente os superficiais, com a formação dos carbonatos;
- avaliação com indicador fenolftaleína, que após um período de 20 dias, mostrou que foi alcançada uma profundidade de carbonatação acima de 2,5 cm, de acordo com os corpos testemunhos (Foto 4.5).

Após este período, onde já havia sido atingido o final da fase de carbonatação, passou-se então a etapa de umidificação em câmara úmida²². Uma vez que a carbonatação é controlada resistivamente, aumentando-se a umidade, espera-se que haja um aumento da taxa de corrosão.

²² As medidas foram tomadas em espaços de tempos não regulares, objetivando-se uma avaliação frente a diferentes condições de umidade, inclusive, sendo realizada uma secagem em estufa ventilada a 60°C por 7 dias, no decorrer da fase de umidificação, a fim de avaliar o comportamento dos sensores frente a variações bruscas de umidade. Este procedimento de ciclos irregulares também foi adotado por TAMURA et al. (1996).



Foto 4.5 - Profundidade de carbonatação através do indicador fenolftaleína

As condições de exposição dos corpos-de-prova estão mostradas na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Cronologia do ensaio de carbonatação

Idade ²³	Duração (dias)	Condição de Exposição
-	28	Desmoldagem e Cura em Câmara Úmida
-	79	Exposição ao ambiente de laboratório
0 - 19	19	Carbonatação
20 - 47	27	Câmara úmida
48 - 61	13	Estufa a 60° C
62 - 103	41	Câmara úmida

4.3.4 Ensaio de Corrosão Induzida por Cloretos

O procedimento experimental baseou-se nos ciclos de imersão e secagem, que vem sendo adotado em diversos trabalhos no Laboratório de Ensaio de Materiais - LEM (CASTANHEIRA, 1997; NEPOMUCENO, 1992; MONTEIRO, 1996 entre outros).

²³ Referenciada a partir do início do ensaio acelerado de carbonatação por fins práticos.

PAGE et al. (1991), concluíram que o procedimento de ingresso de cloretos utilizando metodologias de ciclos de imersão e secagem, ou contato com soluções de NaCl, constitui o regime mais severo quanto a relação $[Cl^-]/[OH^-]$, e o ingresso por absorção capilar é o mais significativo. Deste modo, esta rotina foi adaptada para o presente trabalho.

Objetivando uma maior variedade de condições de umidade dos corpos-de-prova, a fim de avaliar o desempenho dos sensores frente às mais diversas condições, desenvolveu-se um ensaio baseado nos ciclos de umidificação e secagem com períodos não regulares (TAMURA et al., 1996).

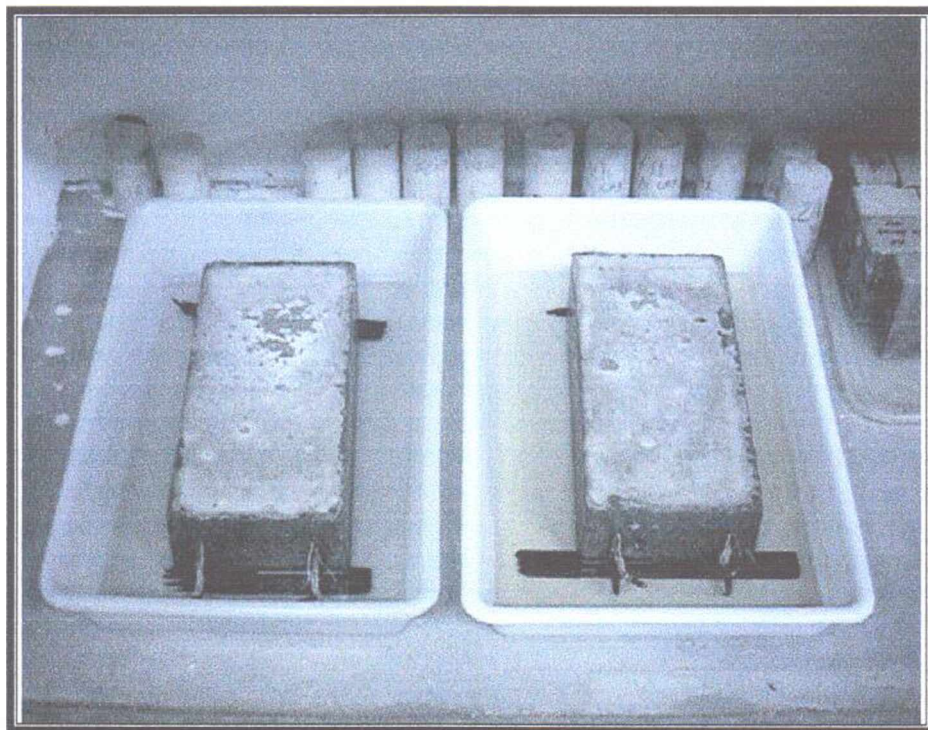


Foto 4.6 - Ensaio de cloretos - corpos-de-prova parcialmente submersos em solução de NaCl

Na condição úmida, os corpos-de-prova ficaram parcialmente submersos em um recipiente com solução de NaCl a 3%, como pode ser observado na Foto 4.6. Para efetuar a secagem dos corpos-de-prova, estes foram levados a uma estufa ventilada com temperatura constante de 60° C.

O ensaio seguiu a cronologia mostrada na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Cronologia do ensaio de cloretos

Idade ²⁴	Duração Dias	Condição de Exposição
-	-	Desmoldagem e Cura em Câmara úmida
-	167	Exposição ao ambiente de laboratório
0 - 21	21	Parcialmente submerso em Solução de NaCl a 3%
22 - 35	13	Estufa a 60° C
36 - 100	64	Parcialmente submerso em Solução de NaCl a 3%
101 - 104	4	Estufa a 60° C
105 - 107	2	Parcialmente submerso em Solução de NaCl a 3%
108 - 111	3	Estufa a 60° C
112 - 121	9	Parcialmente submerso em Solução de NaCl a 3%
122 - 134	12	Estufa a 60° C
135 - 148	13	Parcialmente submerso em Solução de NaCl a 3%

²⁴ Referenciada a partir do início do ensaio acelerado de cloretos por fins práticos.

5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com o objetivo de uma melhor visualização dos resultados nos gráficos, estes apresentarão os resultados a partir do início dos ensaios acelerados, de acordo com a cronologia mostrada nas Tabela 4.8 e Tabela 4.9.

A análise dos gráficos apresentados a seguir visa verificar o comportamento dos sensores de corrosão frente aos agentes agressivos, comparando as informações por eles fornecidas, e confrontando-as com valores tomados como referência, obtidos a partir de barras longitudinais de referência que foram dispostas em posições semelhantes às dos sensores.

É importante ressaltar que o objetivo deste estudo é avaliar o comportamento dos sensores frente às diversas condições ambientais e micro-estruturais proporcionadas pelos ensaios de carbonatação e cloretos, ou seja, se eles conseguem refletir, através de seus indicadores de deterioração, as variações das curvas das medidas eletroquímicas das barras de referência, mesmo que haja distorções oriundas de problemas nos ensaios, já que as condições são as mesmas, tanto para os sensores como para as barras.

O indicador de deterioração que será tomado como o principal para a avaliação de todos os resultados obtidos com os sensores será a intensidade de corrosão (i_{COR}), que é obtida a partir do ensaio de resistência de polarização. A comparação da curva de evolução desta grandeza com todas as demais é de grande valia para as considerações que serão expostas neste capítulo.

Como referência, serão utilizados os limites estabelecidos na literatura para indicar a passagem do estado passivo para o estado ativo de corrosão do aço. As medidas de potencial ECS seguirão as recomendações da ASTM C-876, com um limite de -275 mV para uma probabilidade de 95% de haver corrosão. A intensidade de corrosão seguirá o limite de 0,1 a 0,2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, de acordo com as recomendações de ANDRADE (1973).

5.1 ENSAIO ACELERADO DE CORROSÃO INDUZIDA POR CARBONATAÇÃO

5.1.1 Barras longitudinais de referência - Série CA-BL

As barras de aço longitudinais de referência foram inseridas no programa experimental com o objetivo de servir como parâmetro para a avaliar do comportamento dos sensores frente aos agentes agressivos, já que foram colocadas na mesma posição dos sensores galvânicos, e também com o sensor comercial CMS envolvido nas mesmas, com a mesma espessura de revestimento.

O principal indicador de deterioração para avaliar o estado das barras longitudinais de referência é a intensidade de corrosão (i_{corr}), já que é uma grandeza que permite avaliar de forma cinética o grau de corrosão das mesmas.

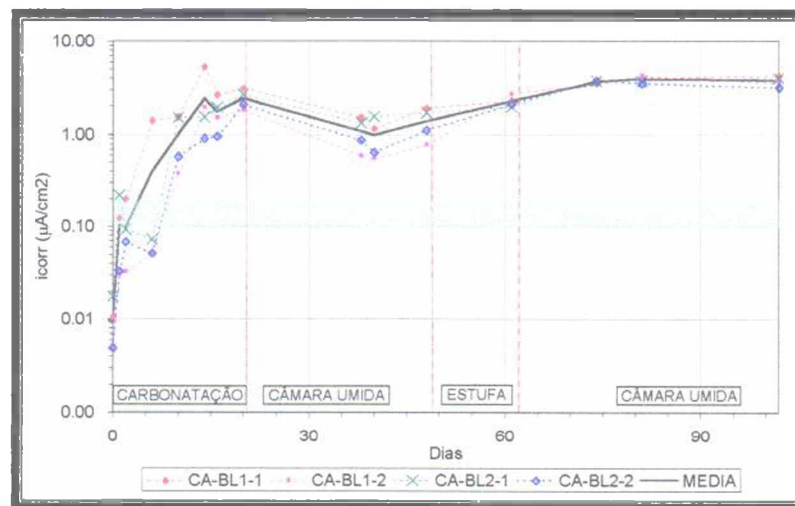


Figura 5.1 - Evolução da intensidade de corrosão - Série CA-BL

Como pode ser visto na Figura 5.1, a curva média apontou a despassivação das barras do 1º para o 4º dia, ou seja, quando o i_{corr} ultrapassa o limite de 0,1 a 0,2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Isto equivale a dizer que o período de propagação iniciou-se a partir deste momento. Durante a fase de exposição ao CO_2 no ambiente da câmara de carbonatação e no período de umidificação em câmara úmida, pôde ser notado que a maior intensidade de corrosão medida não foi superior a 6 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, sendo que o máximo valor da média ficou na ordem de 2,5 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Após o término da fase de carbonatação, iniciou-se a exposição dos corpos-de-prova ao ambiente de câmara úmida, e notou-se uma redução dos valores de i_{corr} nos primeiros 20 dias, chegando na

ordem de $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, na média. No 61º dia de ensaio, foi realizada medição dos corpos após um período em estufa a 60°C , e surpreendentemente houve um acréscimo do valor médio de i_{corr} , que a partir daí, com a retomada do ciclo de exposição à câmara úmida, tendeu a se manter estável, na faixa de 3 a $4 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Como a carbonatação é um processo corrosivo controlado resistivamente, a avaliação da grandeza Resistência Ôhmica se torna preponderante, principalmente para verificar o comportamento das outras grandezas quando sujeitas a variações de resistividade do meio.

A Figura 5.2 mostra o desenvolvimento da curva de resistência ôhmica durante o ensaio. No início da carbonatação, observou-se um pequeno aumento da resistência nas primeiras medidas, uma redução significativa no sexto dia de ensaio e um grande aumento na medição posterior, com subsequente redução até o fim dos fluxos de CO_2 . A partir daí as oscilações foram menores, apenas com um aumento da média na medição anterior à secagem em estufa, aos 61 dias de ensaio, quando a média dos valores apontou para aproximadamente 342 Ohm.

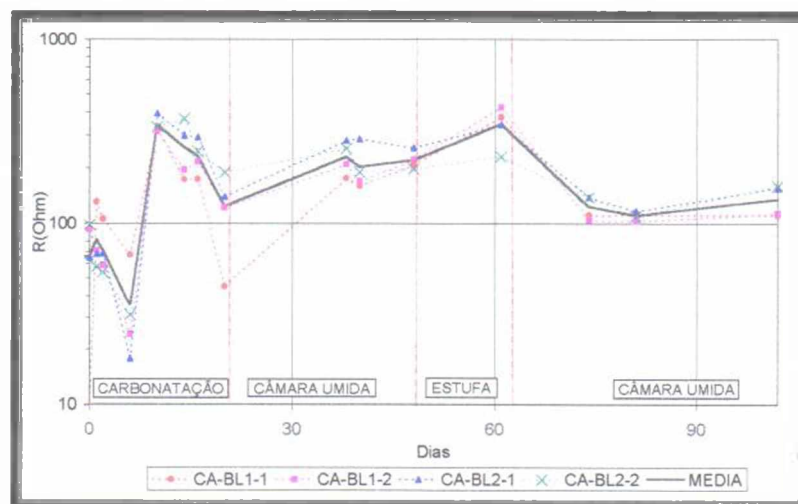


Figura 5.2 - Evolução da resistência ôhmica - Série CA-BL

Apesar da medida de potencial de eletrodo ser de caráter secundário, pois não é uma grandeza cinética, a evolução do potencial em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS) é mostrada na Figura 5.3.

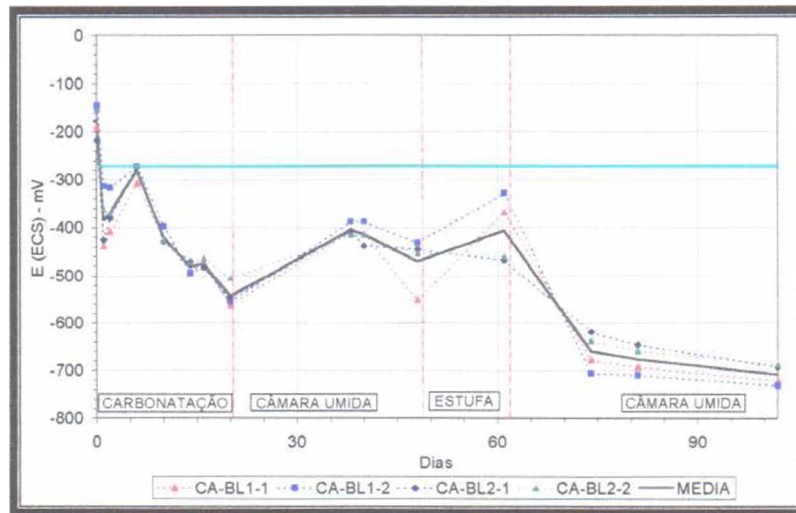


Figura 5.3 - Evolução do potencial ECS - Série CA-BL

O potencial variou de -151 mV a -732 mV no decorrer de todo o ensaio. Na fase de carbonatação foram atingidos potenciais acima de -550 mV, e a indicação de despassivação surgiu a partir do 1º dia, confirmando o que foi observado na intensidade de corrosão.

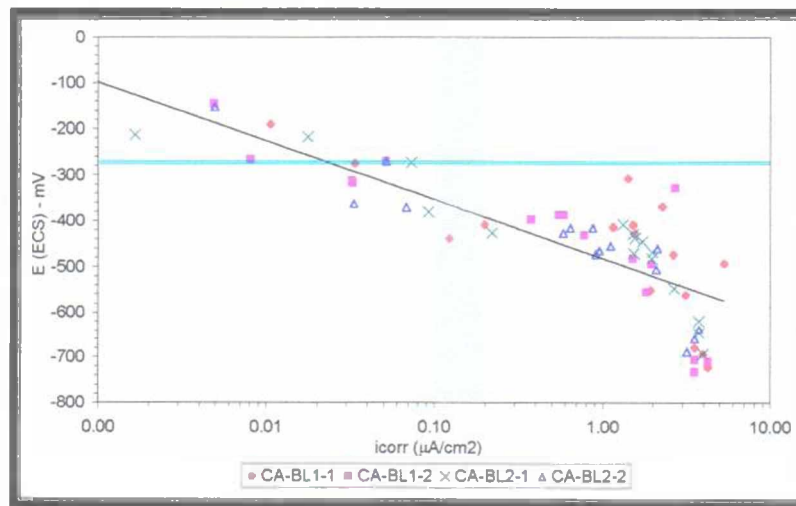


Figura 5.4 - Correlação entre intensidade de corrosão e potencial (ECS) - Série CA-BL

Através da Figura 5.4, verifica-se que houve uma boa correlação entre as grandezas, principalmente na faixa de potenciais até -600 mV. Os potenciais com valores mais negativos não tiveram o correspondente incremento na intensidade de corrosão. Isto era de se esperar, pois valores muito baixos de potenciais, principalmente após o processo de corrosão ter se instalado, não implicam no aumento de i_{corr} .

A relação entre a intensidade de corrosão e resistência ôhmica pode ser observada na Figura 5.5. Uma fraca correlação linear pode ser identificada²⁵, entretanto confirma o controle resistivo da corrosão induzida por carbonatação. A mesma relação linear pode ser observada na Figura 5.6, onde foi mostrado o potencial de eletrodo pela resistência ôhmica.

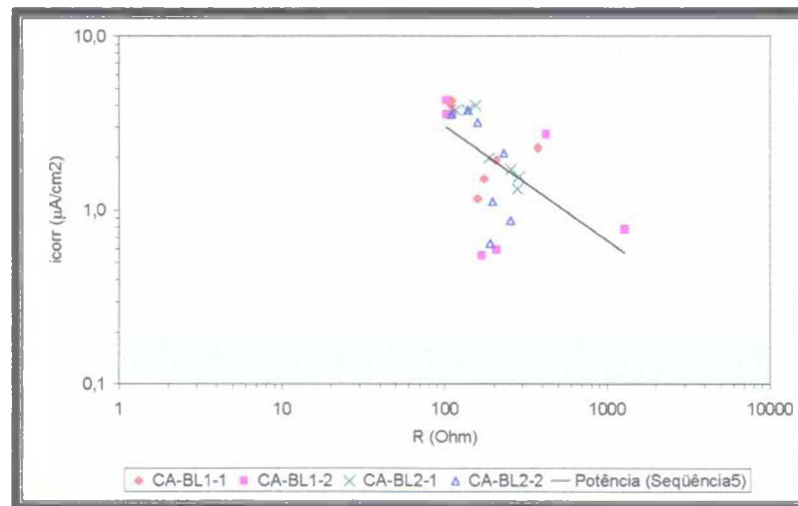


Figura 5.5 - Correlação entre resistência ôhmica e intensidade de corrosão - Série CA-BL

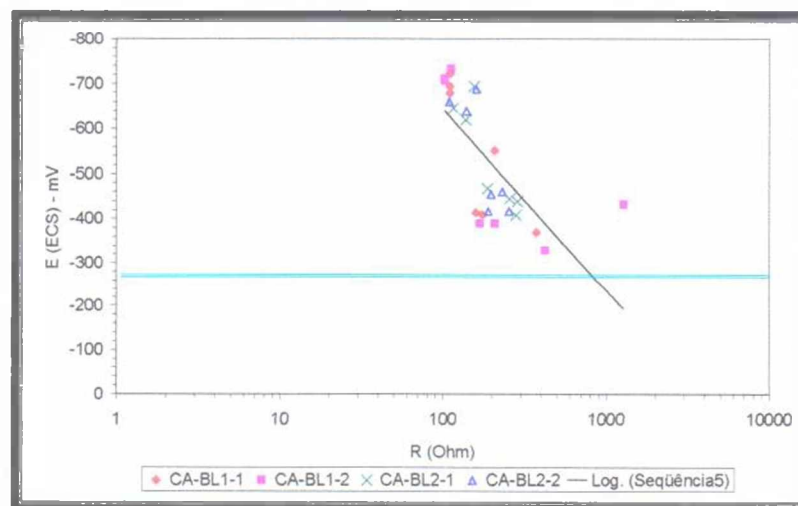


Figura 5.6 - Correlação entre resistência ôhmica e potencial (ECS) - Série CA-BL

5.1.2 Sensor Comercial CMS - Série CA-SC

Uma das avaliações empregando as barras de referência foi realizada com o sensor comercial

²⁵ Foram retirados os pontos relativos ao período da carbonatação, pois devido complexo processo que envolve este ensaio, ocorre uma alteração significativa da microestrutura da argamassa do corpo-de-prova, gerando distorções nos valores de R_{Ohm} .

VETEK 2000 - CMS. Este sensor procura medir o potencial de corrosão da barra em relação a um eletrodo de matriz sólida de prata-cloreto de prata²⁶. Os potenciais da barra de referência medidos em relação ao sensor CMS são mostrados na Figura 5.7.

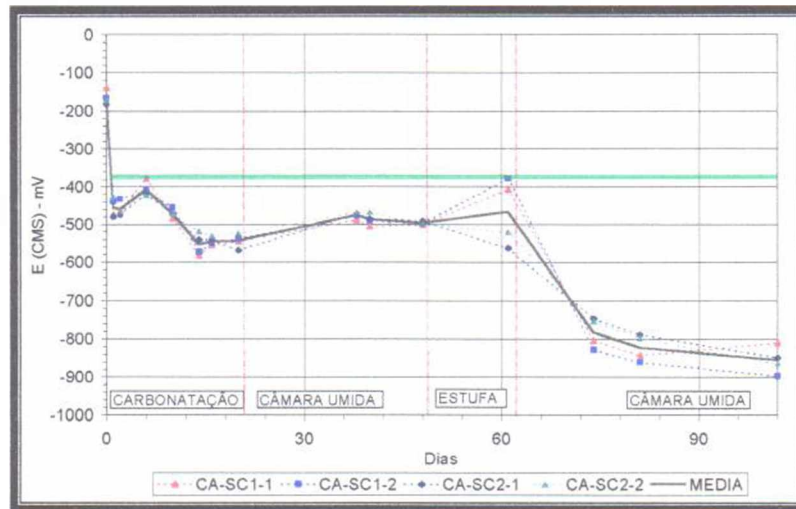


Figura 5.7 - Evolução do potencial em relação ao CMS - Série CA-BL

Na fase de carbonatação, mediu-se valores de -141 a -582 mV, e no decorrer do ensaio foi medido um valor mínimo de -897 mV. Também a partir do 1º dia pôde ser identificada a despassivação das barras, ultrapassando o limite de -370 mV proposto pelo fabricante.

Com relação a variação de umidade proporcionada pela secagem em estufa, com 61 dias de ensaio, verifica-se que o sensor CMS se comportou de acordo com os resultados obtidos com o ECS. Houve, na média, um aumento dos potenciais, que logo após voltaram a decrescer continuamente. A elevada temperatura, na faixa de 60°C, pode ser a causa do comportamento do sensor identificado neste período.

Existe boa correlação entre as medidas de potencial do sensor CMS e as medidas de intensidade de corrosão (Figura 5.8), principalmente na faixa até -600 mV. A partir daí, seguiu-se a mesma tendência da série CA-BL.

A partir desta correlação, chegou-se ao limite de aproximadamente -460 mV para a passagem do estado passivo para o ativo, superior ao estabelecido pelo fabricante.

²⁶ De acordo com o fabricante, esta matriz sólida funciona como um eletrodo de referência estável.

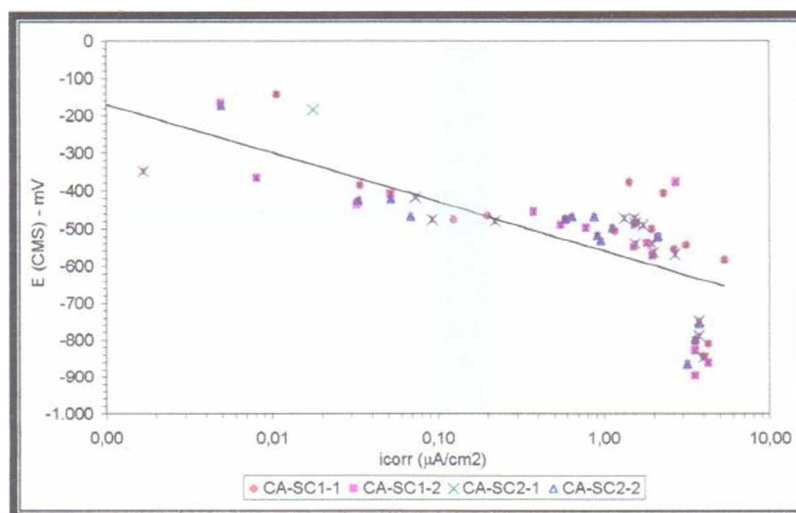


Figura 5.8 - Correlação entre intensidade de corrosão e potencial (CMS) - Série CA-SC

Pode ser verificada uma boa relação entre as medidas efetuadas pelo sensor CMS e as medidas em relação ao ECS (Figura 5.9). O potencial variou de -165 a -897 mV para as leituras efetuadas com o sensor CMS e de -146 a -732 mV para as leituras com o ECS.

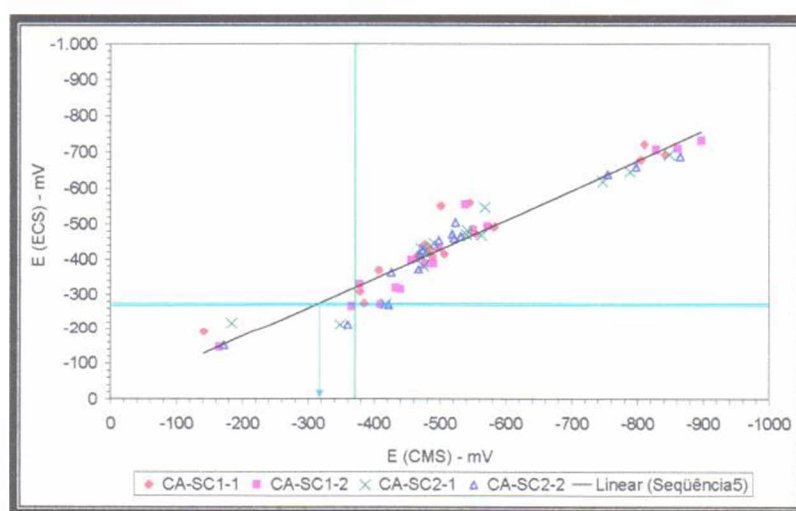


Figura 5.9 - Correlação entre potencial (CMS) e potencial (ECS) - Série CA-SC

Nota-se que através da análise dos valores de potencial de eletrodo, utilizando-se a referência de -275 mV (Derivada da Norma ASTM C-876), chega-se a outro limite para o sensor CMS, na ordem de -320 mV, que está próximo ao limite do fabricante, no entanto difere do valor anteriormente citado através da relação com i_{corr} , que representa uma relação mais confiável.

Com o objetivo de avaliar a estabilidade do sensor comercial CMS, foi medido o potencial de eletrodo do mesmo em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS), como pode ser

visto na Figura 5.10 .

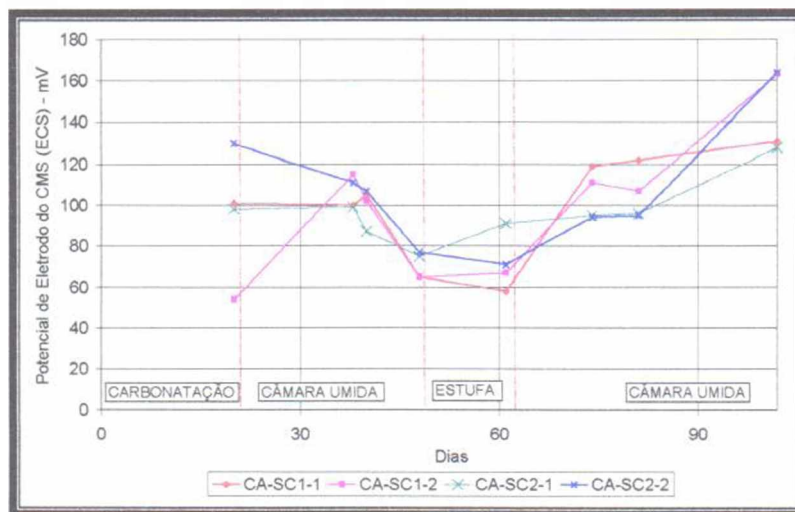


Figura 5.10 - Oscilação do potencial do sensor CMS em relação ao Calomelano - Série CA-SC

Observa-se uma variação razoável dos valores, na faixa de 110 mV. Esta variação de potencial do sensor CMS indica a sua instabilidade no ambiente carbonatado, deste modo fica difícil estabelecer limites ou faixas de potencial genéricas para indicar o grau de risco no qual se encontra a armadura, já que o sensor CMS aparentemente não se comporta como um eletrodo de referência estável, como o eletrodo de calomelano saturado. Pode-se concluir que o sensor, neste caso, comportou-se como um pseudo-eletrodo, variando as medidas em função das mudanças ambientais e de microestrutura da argamassa (ANSUINI e DIMOND, 1996).

5.1.3 Sensores galvânicos em escada - Série CA-SGE

As principais grandezas eletroquímicas para avaliar o sensor galvânico são as medidas de intensidade de corrosão e corrente galvânica.

A Figura 5.11-a mostra que a barra mais superficial do sensor, CA-SGE1-1, e a barra mais interna, CA-SGE1-3, foram as últimas a despassivar, entre o 10º e o 14º dia de ensaio. A barra CA-SGE1-2 mostrou sinal de atividade a partir do 1º dia, tal como as barras de referência. Após o 14º dia, as três barras alcançaram os valores máximos da fase de carbonatação, na ordem de $7 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, seguindo a partir daí de modo homogêneo. A Figura 5.11-b também mostra que a barra mais superficial do sensor, CA-SGE1-1, e a barra mais

profunda, CA-SGE1-3, foram as últimas a despassivar, entre o 10º e o 14º dia de ensaio. A barra CA-SGE1-2 mostrou sinal de atividade a partir do 10º dia. Após o 14º dia, as três barras alcançaram valores na ordem de 265 μA , seguindo a partir daí de modo semelhante.

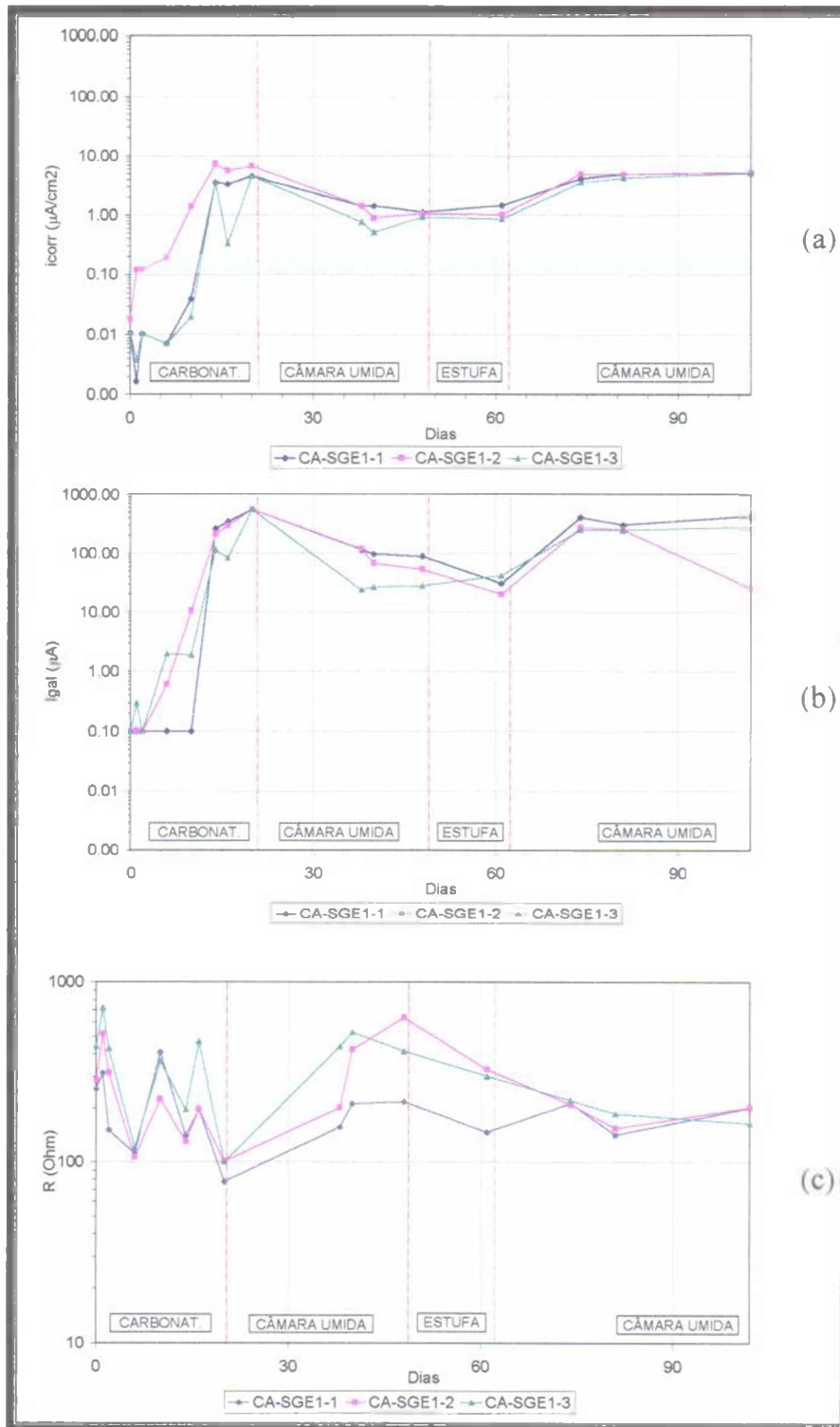


Figura 5.11 - Evolução da intensidade de corrosão (a), corrente galvânica (b) e resistência ôhmica (c) - Série CA-SGE1

O máximo valor de I_{gal} alcançado no término dos fluxos de CO_2 foi na ordem de $550 \mu A$.

Nota-se que tanto as medidas de I_{gal} como as de i_{corr} , neste caso, não conseguiram expressar o que aconteceu nos primeiros momentos do ensaio, exatamente na faixa de intervalo onde este sensor de corrosão é importante, exigindo estabilidade e sensibilidade às alterações do meio. A seqüência de despassivação também não foi a esperada, e esta tendência se repete em todas as medidas, o que evidencia algum problema no corpo-de-prova, como alguma conexão elétrica rompida, curto circuito ou contaminação de alguma barra do sensor. Deste modo, os dados da série CA-SGE1 serão descartados, e poderão ser visualizados nos anexos.

A série CA-SGE2 mostrou-se compatível com os resultados esperados, já que a barra CA-SGE2-1 mostrou sinais de atividade no 2º dia de ensaio, com valores de corrente galvânica (I_{gal}) na faixa de $15 \mu A$. A partir deste momento, verifica-se sinais de despassivação das barras CA-SGE2-2 e CA-SGE2-3 respectivamente, chegando a valores na faixa de 36 a $82 \mu A$ no 10º dia e acima de $1000 \mu A$ no final dos fluxos de CO_2 (Figura 5.12-b).

As medidas de i_{corr} comprovaram os valores de I_{gal} , mostrando a seqüência de despassivação das barras CA-SGE2-1, CA-SGE2-2 e CA-SGE2-3 respectivamente (Figura 5.12-a). No 2º dia, a barra CA-SGE2-1 apresentou sinais de atividade, com i_{corr} na faixa de $0,1 \mu A/cm^2$. No 10º dia, a barra CA-SGA-2 ultrapassou o limite de $0,1 \mu A/cm^2$ e a barra CA-SGE2-3 apenas no 14º dia. O máximo valor medido foi da ordem de $7 \mu A/cm^2$, próximo do final do ensaio.

Observa-se que durante toda a fase de carbonatação, houve uma grande variação das medidas de resistência ôhmica, na faixa de 50 a 700 Ohm (Figura 5.12-c). Quando o corpo-de-prova foi colocado em estufa, apenas a barra CA-SGE2-3 sofreu um acréscimo brusco de resistência ôhmica.

Pode ainda ser verificado que na fase de carbonatação as variações da resistência não tiveram uma perfeita correlação com as variações da intensidade de corrosão e corrente galvânica, devido aos aspectos já citados sobre a carbonatação, que modifica sobremaneira a microestrutura da argamassa.

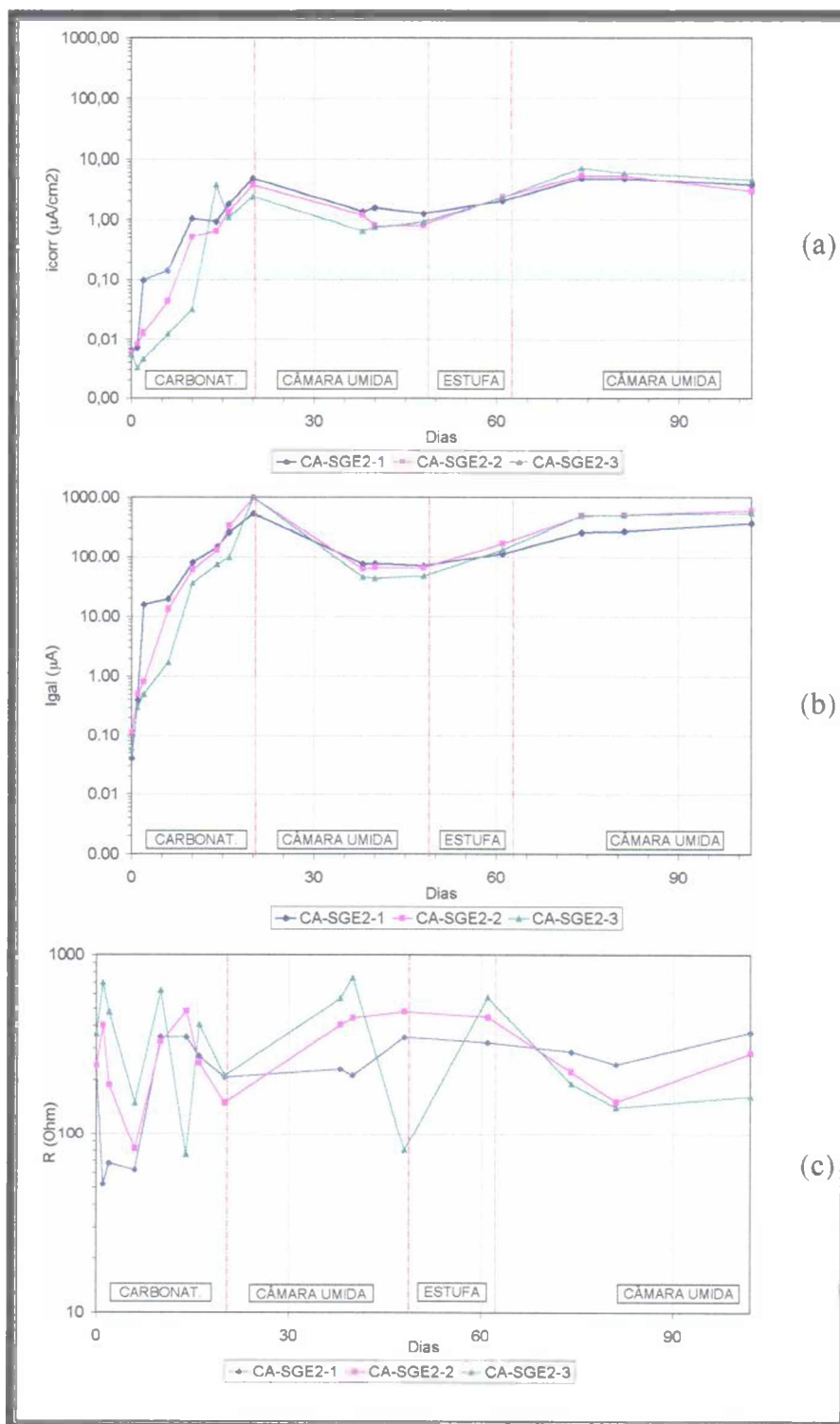


Figura 5.12 - Evolução da intensidade de corrosão (a), corrente galvânica (b) e resistência ôhmica (c) - Série CA-SGE2

A série CA-SGE2 não mostrou sensibilidade à variação brusca das condições de umidade e resistividade, proporcionada no 61º dia de ensaio, quando os corpos-de-prova foram submetidos à estufa. Pode-se notar que os sensores mantiveram a tendência das curvas de intensidade de corrosão e corrente galvânica, não apontando uma esperada queda de valores

neste período. Observa-se isto também nas medidas de potencial (Figura 5.13).

Após a fase de carbonatação, os sensores não indicaram variação significativa na intensidade de corrosão e corrente galvânica, evidenciando que, apesar do processo de corrosão estar instalado, não estava havendo incremento significativo.

As medidas de potencial de corrosão em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS) e em relação às barras catódicas do sensor (INOX²⁷) acompanharam a tendência identificada nos gráficos de intensidade de corrosão e corrente galvânica.

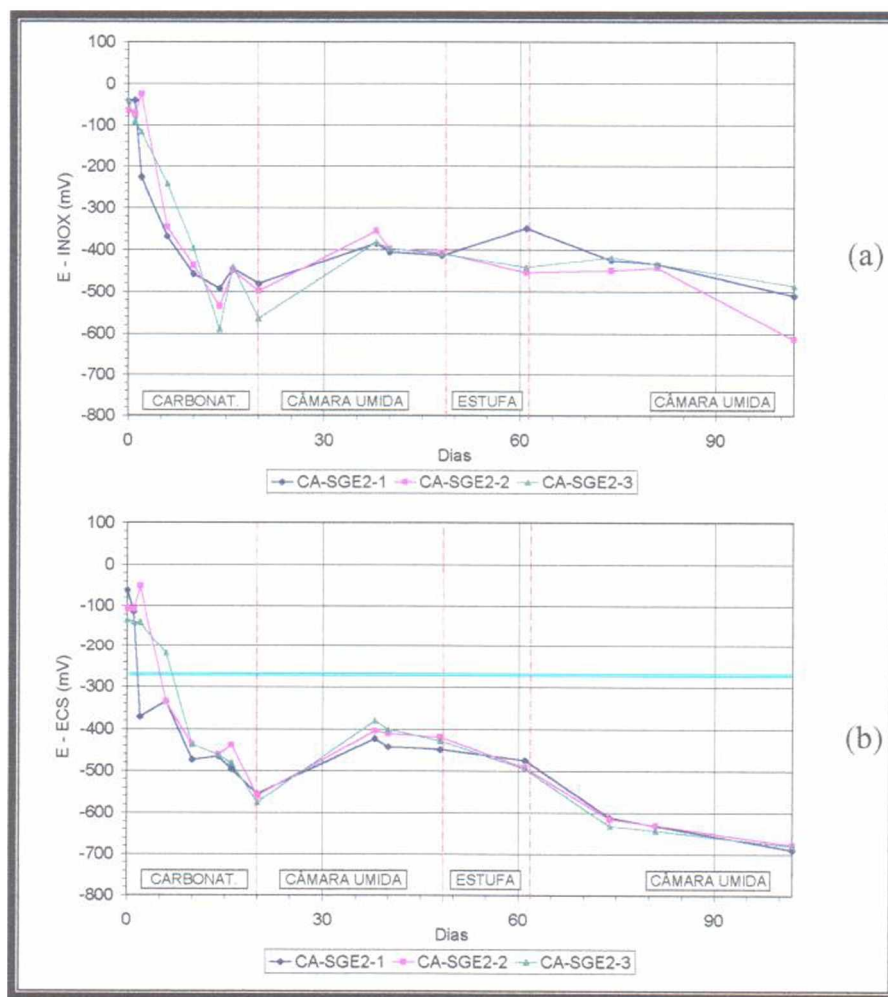


Figura 5.13 - Evolução do potencial INOX (a) e do potencial ECS (b) - Série CA-SGE2

²⁷ Os potenciais foram medidos através de um voltímetro acoplado às barras anódicas e catódicas, ou seja, as barras de aço inox e as barras de aço carbono, lado a lado.

A barra CA-SGE2-1 ultrapassou o limite estabelecido já no 2º dia. As barras CA-SGE2-2 e CA-SGE2-3 ultrapassaram os limites no 6º e 10º dias. Os valores oscilaram na faixa de -51 a -681 mV para o ECS e -24 a -614 mV para o INOX. Na secagem em estufa, as medidas de potenciais seguiram a tendência já observada na intensidade de corrosão e corrente galvânica, isto é, não sofrendo alteração significativa.

Pode-se notar que, mesmo sem uma equivalência numérica das medidas obtidas com o ECS e o INOX, o que era esperado, ambas tiveram a mesma tendência, o que leva a acreditar na validade das medidas de potencial INOX como mais um parâmetro para avaliar o avanço de agentes agressivos através do sensor galvânico, mesmo que o eletrodo de INOX se comporte como um pseudo-eletrodo.

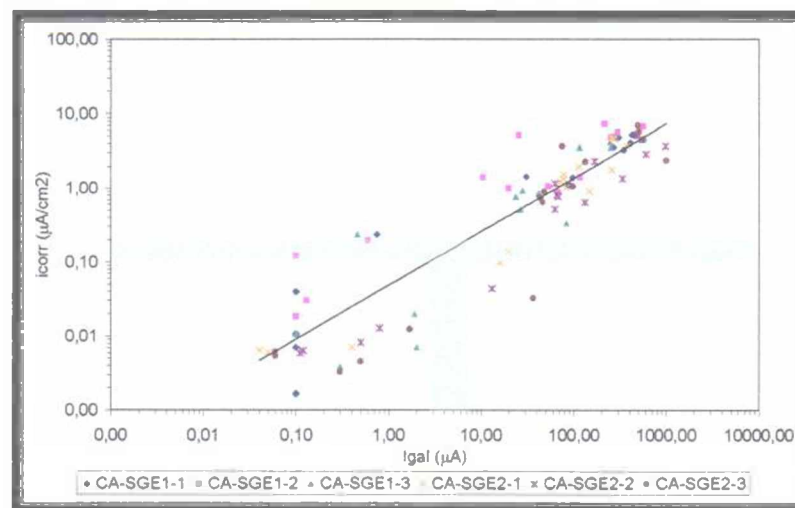


Figura 5.14 - Correlação entre corrente galvânica e intensidade de corrosão - Série CA-SGE

Através da relação entre corrente galvânica e intensidade de corrosão, mostrada na Figura 5.14, pode ser verificada uma boa relação entre as variáveis, o que proporcionou a definição de um limite para a corrente galvânica de 3 a 7 μA como sendo a faixa onde há a passagem do aço do estado passivo para o estado ativo, a partir da faixa de 0,1 a 0,2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Do mesmo modo como foi feito com as barras de referência, foram plotados apenas os pontos relativos à fase posterior à carbonatação, para o caso dos gráficos de resistência ôhmica.

Pode ser notada uma boa correlação tanto para a relação corrente galvânica/resistência ôhmica (Figura 5.15) como para a relação intensidade de corrosão/resistência ôhmica (Figura 5.16).

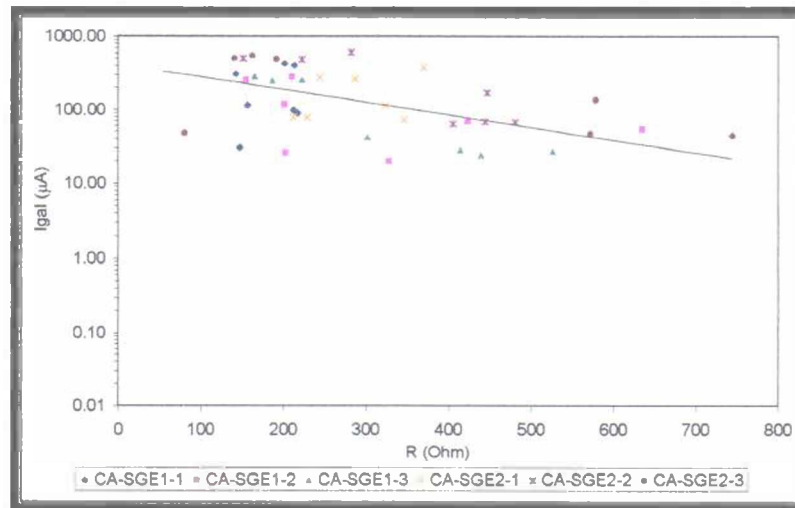


Figura 5.15 - Correlação entre corrente galvânica e resistência ôhmica - Série CA-SGE

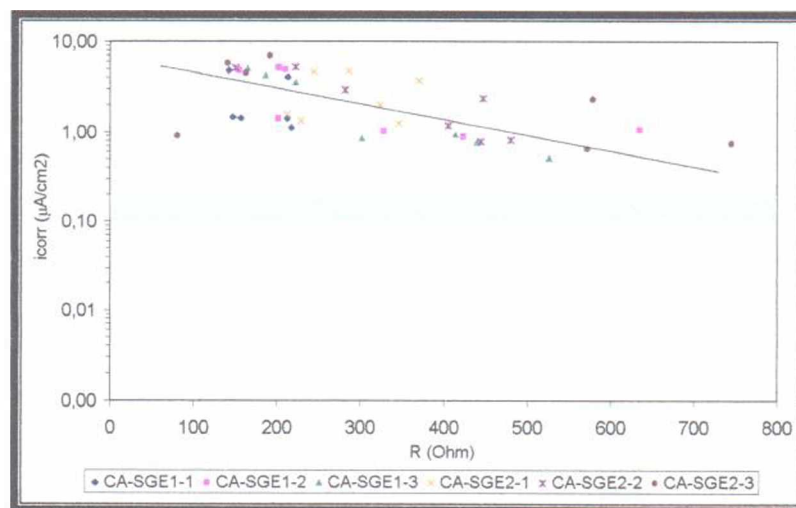


Figura 5.16 - Correlação entre intensidade de corrosão e resistência ôhmica - Série CA-SGE

A relação entre intensidade de corrosão e potencial de eletrodo do INOX (Figura 5.17) mostrou-se bastante satisfatória, confirmando mais uma vez a utilidade das barras catódicas do sensor para a obtenção de mais uma grandeza para análise. A faixa limite obtida com a regressão aplicada ao gráfico ficou entre -200 e -260 mV.

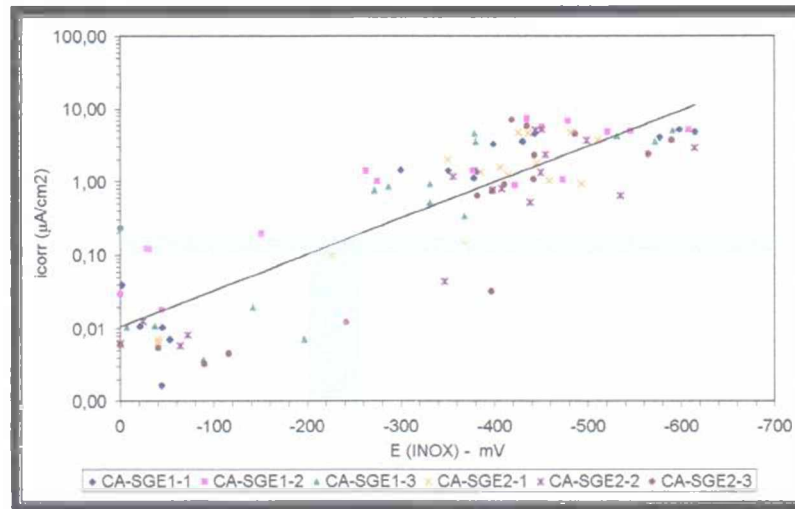


Figura 5.17 - Correlação entre potencial INOX e intensidade de corrosão - Série CA-SGE

Através da Figura 5.18, constata-se também a boa correlação entre os potenciais ECS e INOX, confirmando a viabilidade em se utilizar o cátodo do sensor como um pseudo-eletrodo de referência. O limite estabelecido foi de -160 mV, que está próximo da faixa anteriormente estabelecida pela relação com i_{corr} .

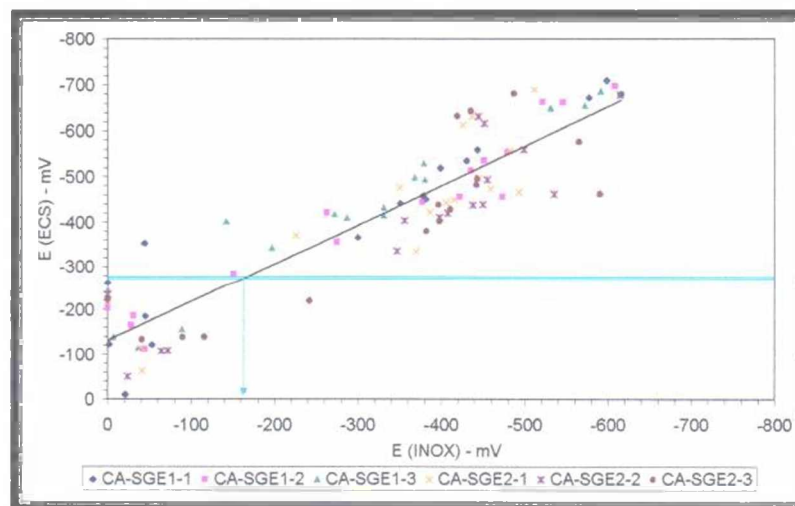


Figura 5.18 - Correlação entre potencial (INOX) e potencial (ECS) - Série CA-SGE

5.1.4 Sensores Galvânicos com Variação de Área Anódica/Catódica - Série CA-SGA

Com o intuito de avaliar as variações que poderiam existir a partir de diversas relações de área anódica e catódica, desenvolveu-se uma série para este fim.

Conforme já foi apresentado no capítulo anterior, quando foram definidas as séries de ensaio, as barras CA-SGA1-1 e CA-SGA2-1 apresentam a menor relação área anódica/catódica e as barras CA-SGA1-3 e CA-SGA2-3 a maior.

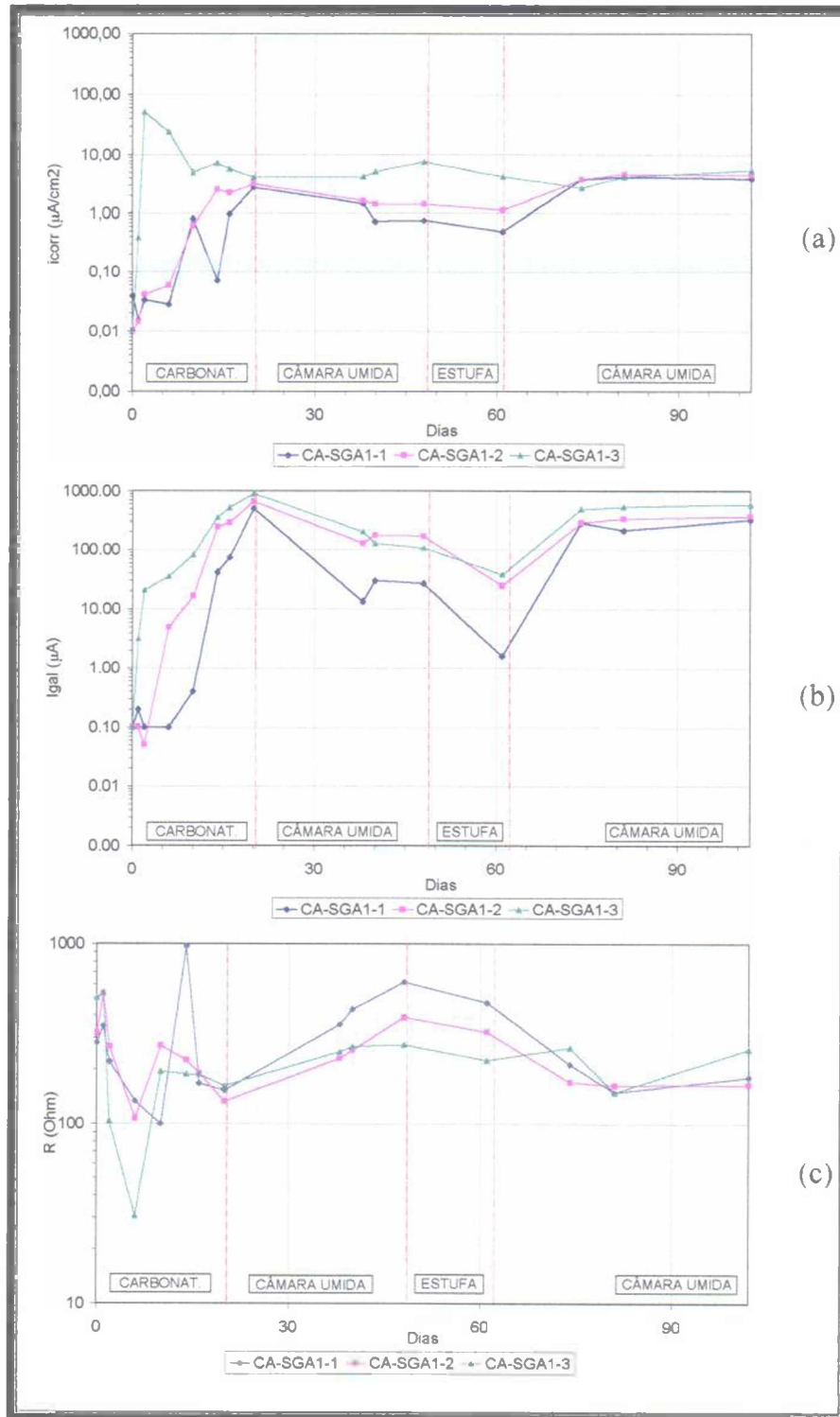


Figura 5.19 - Evolução da intensidade de corrosão (a), corrente galvânica (b) e resistência ôhmica (c) - Série CA-SGA1

Na Figura 5.19-b, observa-se que já no 1º dia, a barra CA-SGA1-3 mostrou sinal de despassivação, sendo seguida pelas barras CA-SGA1-2 e CA-SGA1-1 respectivamente, nos 6º e 14º dias. No final da carbonatação, chegou-se a medir valores de corrente galvânica acima de 900 μA . Durante a câmara úmida houve uma queda dos valores para a faixa de 10 a 200 μA , que voltou a subir a partir dos 61 dias de ensaio, chegando novamente a valores superiores a 550 μA .

A Figura 5.19-a mostra-se semelhante, com a barra CA-SGA1-3 despassivando já no 1º dia, no entanto seguida pelas barras CA-SGA1-2 e CA-SGA1-1 entre o 6º e 10º dias. Apesar disso, verifica-se que a curva da barra CA-SGA1-2 manteve-se quase na totalidade acima da equivalente à barra CA-SGA1-1, balizando as medidas com a corrente galvânica.

Era de se esperar que as barras do sensor apresentassem um comportamento de i_{corr} semelhante desde o início do ensaio, no entanto, provavelmente devido à maior área exposta da barra CA-SGA1-3, a frente de agentes agressivos, neste caso o CO_2 , que avança de modo difuso (BAUER, 1995) a alcançou primeiro. Verifica-se ao final do ensaio, que as medidas de i_{corr} são praticamente iguais, indicando uma grau de corrosão semelhante para todas as barras, como era esperado. A corrente galvânica apresentou comportamento semelhante à i_{corr} , indicando a pouca influência da relação A_a/A_c neste caso.

A resistência ôhmica, mostrada na Figura 5.19-c, mostrou-se bastante instável na fase de carbonatação, seguindo uma tendência crescente na primeira fase da câmara úmida, e basicamente uma tendência decrescente após a estufa e na segunda fase de umidificação.

A série CA-BL, que serve de referência para o ensaio, mostrou que a despassivação das barras ocorreu entre o 1º e o 4º dias, para 0,5 cm de recobrimento, que é a mesma posição das barras da série CA-SGA. Deste modo, a barra CA-SGA1-3 mostrou-se mais próxima do referencial.

Os potenciais em relação às barras catódicas (Figura 5.20-a) mostraram a mesma seqüência de despassivação identificada com a corrente galvânica, e os potenciais em relação ao ECS (Figura 5.20-b) seguiram a tendência de despassivação mostrada pela intensidade de corrosão. As duas grandezas mostraram-se sensíveis à variação de umidade proporcionada pela secagem em estufa aos 61 dias de ensaio.

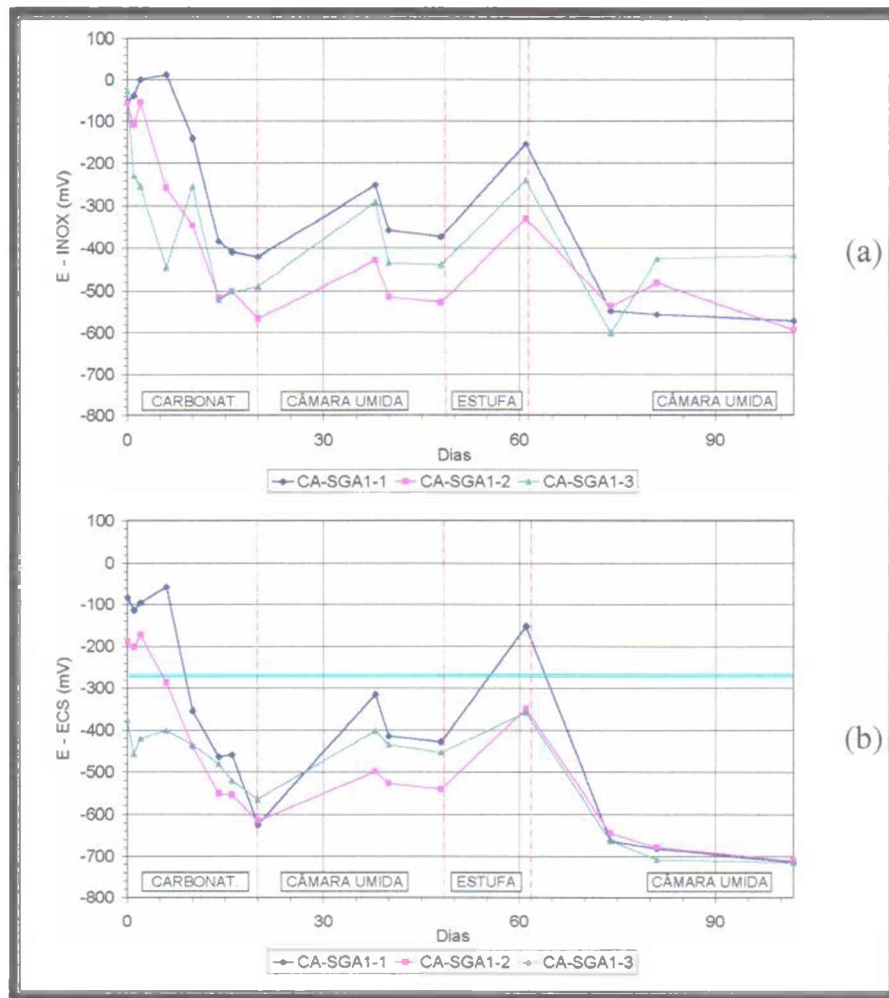


Figura 5.20 - Evolução do potencial INOX (a) e do potencial ECS (b) - Série CA-SGA1

Para as medidas com o INOX, os potenciais variaram de 13 a -621 mV, sendo que na fase de carbonatação o menor valor foi de -566 mV. As medidas com o ECS variaram de -58 a -715 mV, com o mínimo de -625 na carbonatação.

A série CA-SGA2 é mostrada na Figura 5.21. A Figura 5.21-a mostra a evolução da intensidade de corrosão, e pode ser notada também a despassivação da barra CA-SGA2-3 já no 1º dia, seguindo-se das barras CA-SGA2-2 e CA-SGA2-1 nos 6º e 14º dias, respectivamente. O máximo valor ao final da carbonatação foi de $3,21 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, tendo um acréscimo na fase de umidificação, e com um valor máximo de $9,85 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ no ensaio.

O perfil de evolução da corrente galvânica, mostrado na Figura 5.21-b, indica a despassivação da barra CA-SGA2-3 já no 1º dia, assim como na série CA-SGA1. As barras CA-SGA2-2 e CA-SGA2-1 ultrapassaram o limite de despassivação do 2º para o 6º dia de ensaio. Ao final

da carbonatação, foi alcançado um valor máximo de 770 μA , que também foi o máximo de todo o ensaio desta série.

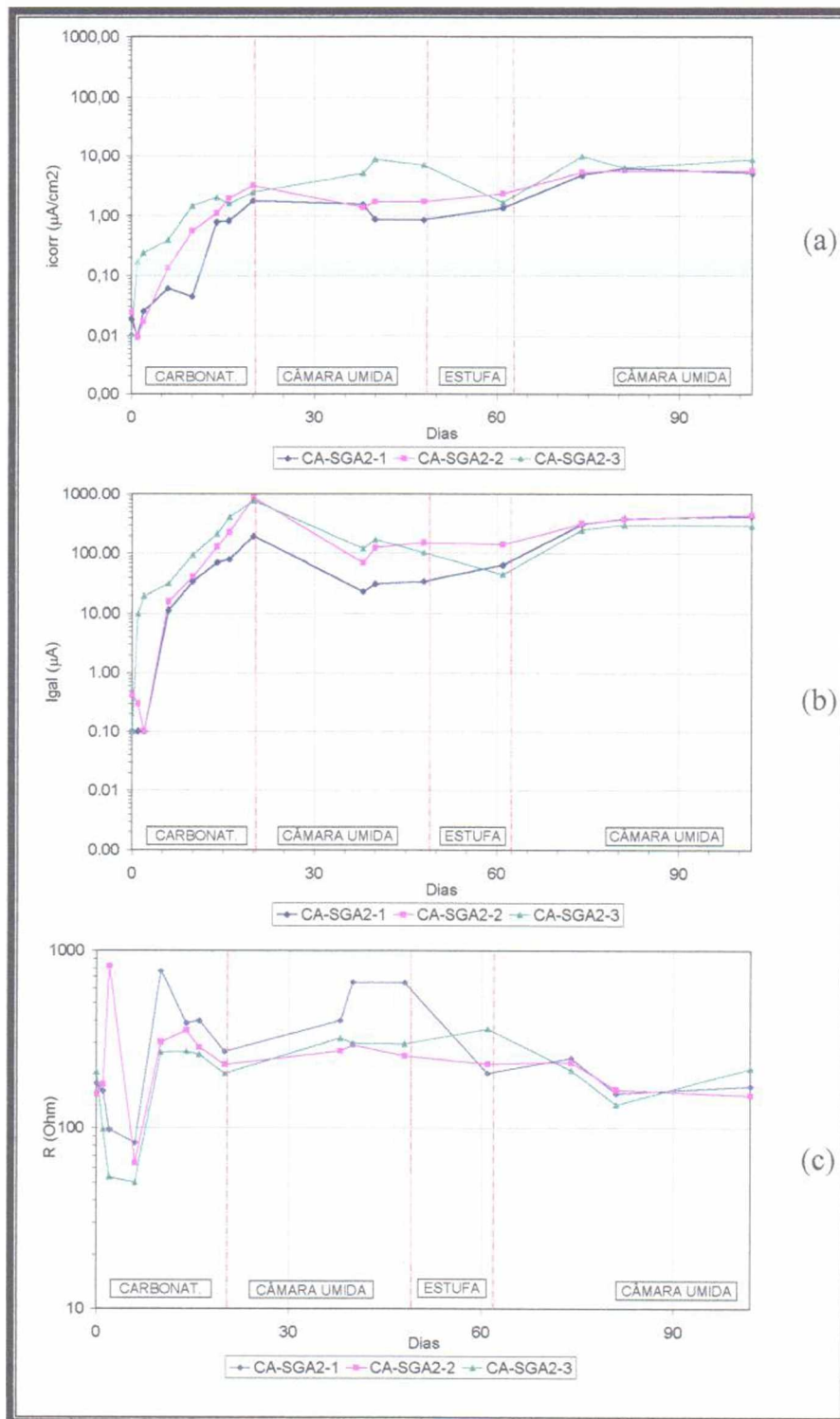


Figura 5.21 - Evolução da intensidade de corrosão (a), corrente galvânica (b) e resistência ôhmica (c) - Série CA-SGA2

Na secagem em estufa, houve uma redução de i_{corr} e I_{gal} apenas na barra CA-SGA2-3,

mantendo-se uma tendência crescente para as demais. Pode ser notado que apenas a barra CA-SGA2-3 teve um aumento na resistência ôhmica na secagem, evidenciando o que já foi observado.

O potencial em relação aos cátodos do sensor (INOX) é mostrado na Figura 5.22-a. Os dias necessário para se ultrapassar o limite estabelecido para a despassivação foram os mesmos da I_{gal} , ou seja, 1 dia para a barra CA-SGA2-3 e 6 dias para as demais. Alcançou-se um potencial de -573 mV no fim da carbonatação, que também foi o máximo obtido no ensaio.

A Figura 5.22-b mostra a evolução dos potenciais em relação ao ECS. A seqüência de despassivação foi a mesma obtida com o INOX. O menor valor medido no fim da carbonatação foi de -621 mV, chegando-se ao máximo de -691 mV ao final do ensaio.

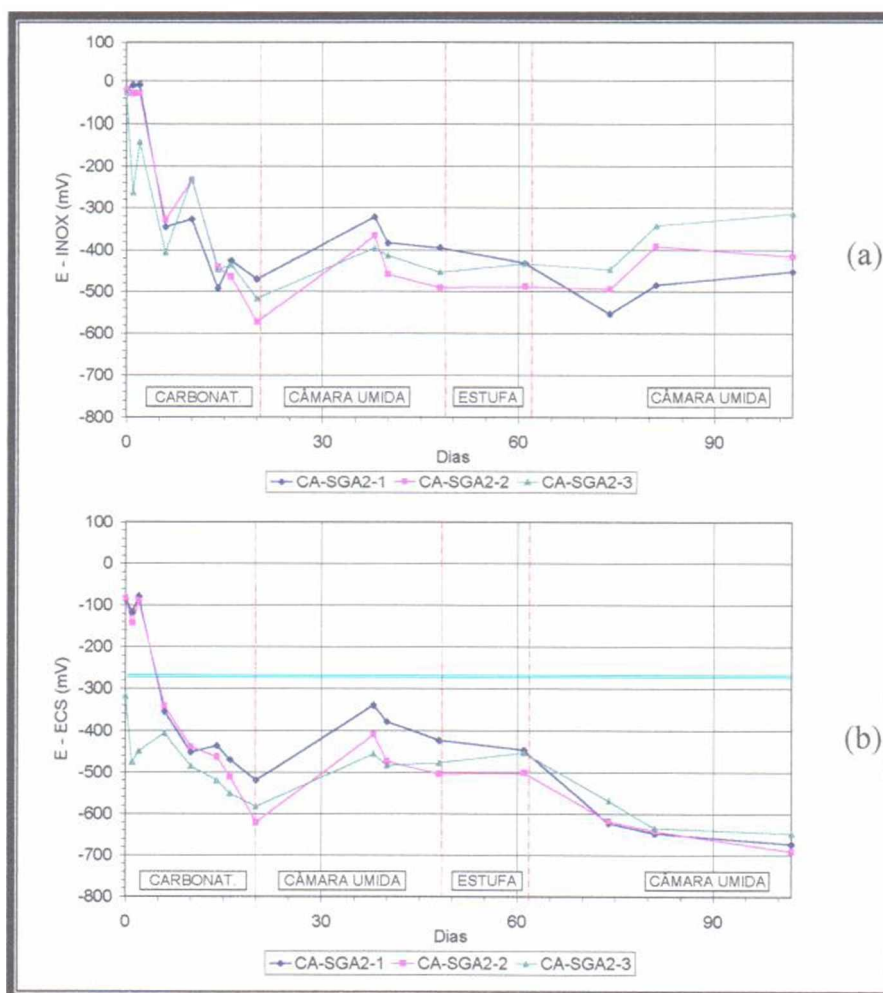


Figura 5.22 - Evolução do potencial INOX (a) e do potencial ECS (b) - Série CA-SGA2

Ambas as medidas não se mostraram sensíveis à variação de umidade proporcionada pela secagem, mantendo apenas a tendência das medidas anteriores à estufa.

A boa correlação entre a corrente galvânica e a intensidade de corrosão, mostrada na Figura 5.23, definiu uma faixa de aproximadamente 1 a 4 μA como limite para início da corrosão.

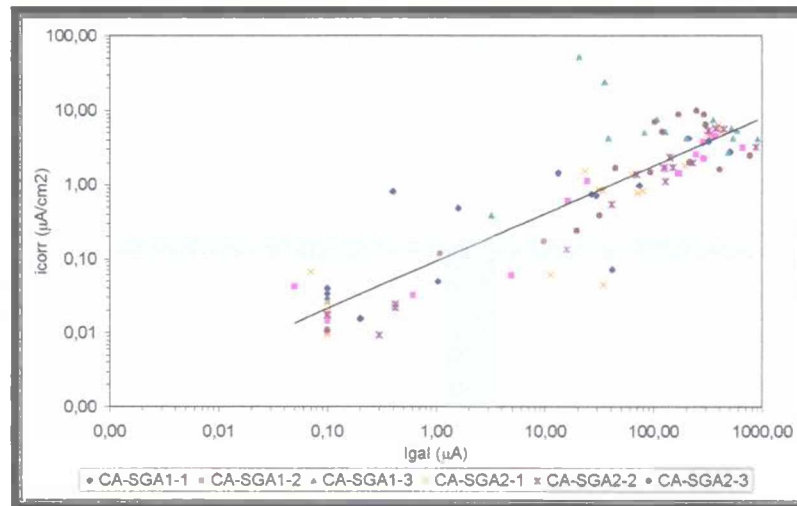


Figura 5.23 - Correlação entre corrente galvânica e intensidade de corrosão - Série CA-SGA

A Figura 5.24 mostra a correlação entre intensidade de corrosão e o potencial INOX. Através deste gráfico, chegou-se à uma faixa limite para a despassivação entre -115 e -195 mV. Esta faixa é inferior à obtida na série CA-SGE, que foi de -200 a -260 mV. Deve-se ressaltar que a área anódica média da série CA-SGA é cerca de 40% inferior a da série CA-SGE.

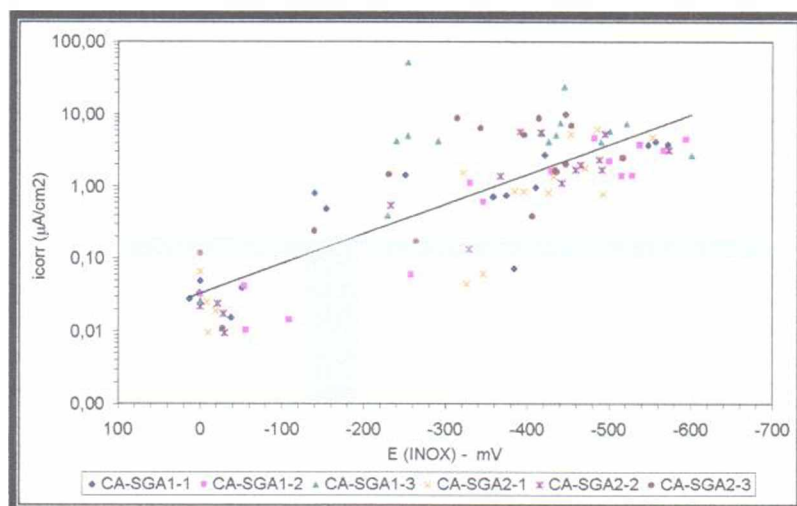


Figura 5.24 - Correlação entre potencial (INOX) e intensidade de corrosão - Série CA-SGA

Já o valor limite obtido na Figura 5.25, que relaciona potencial (ECS) e potencial (INOX), ficou em -125 mV, inferior aos -160 mV encontrado na série CA-SGE.

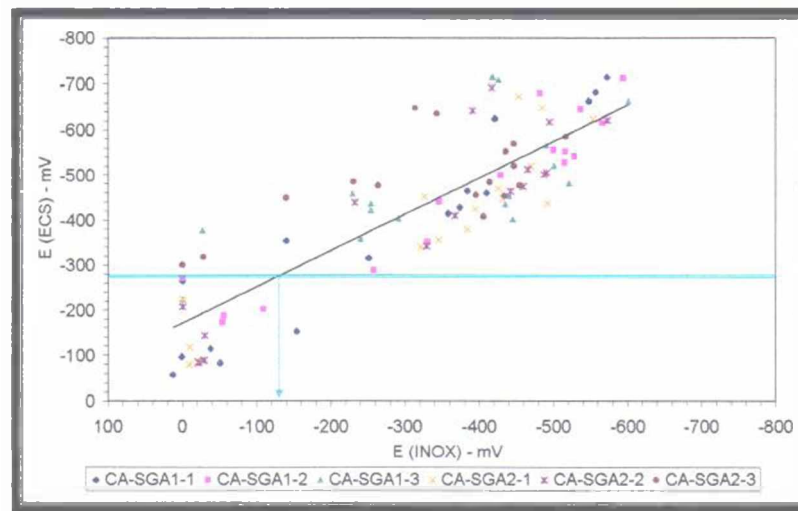


Figura 5.25 - Correlação entre potencial (INOX) e potencial (ECS) - Série CA-SGA

A Figura 5.26 e a Figura 5.27 mostram a relação entre corrente galvânica e resistência ôhmica e intensidade de corrosão e resistência ôhmica, respectivamente. As retas provenientes da regressão demonstram a boa correlação, confirmando os gráficos similares anteriormente mostrados em outras séries.

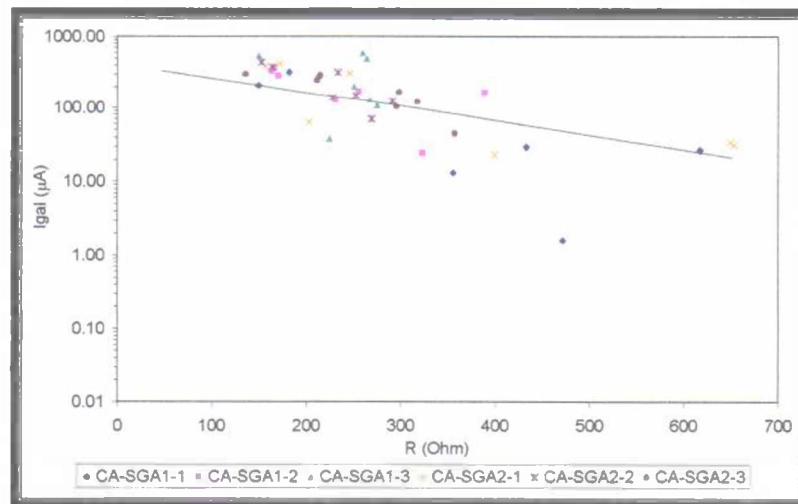


Figura 5.26 - Correlação entre corrente galvânica e resistência ôhmica - Série CA-SGA

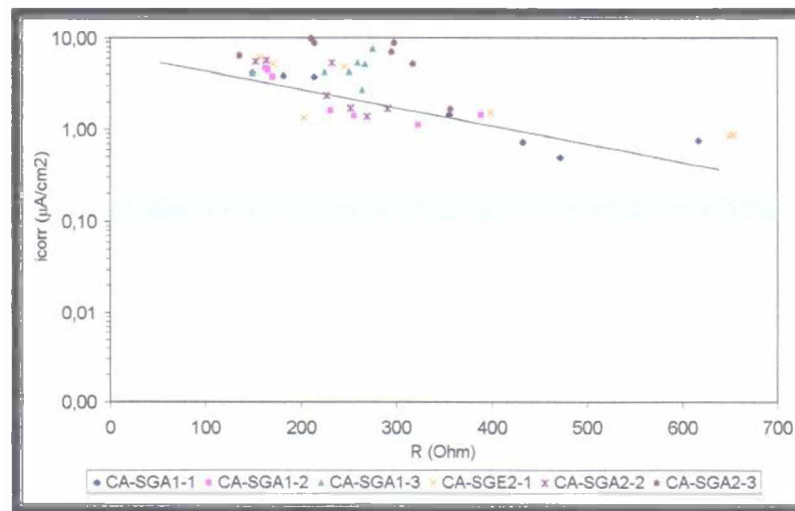


Figura 5.27 - Correlação entre intensidade de corrosão e resistência ôhmica - Série CA-SGA

5.2 ENSAIO ACELERADO DE CORROSÃO INDUZIDA POR CLORETOS

A série de ensaios com cloretos serviu para avaliar o desempenho dos sensores frente a um dos agentes agressivos mais importante e frequente, principalmente em faixas litorâneas.

Já que a corrosão induzida por cloretos é uma forma de ataque que esta se dá por pites, atuando de forma pontual, espera-se que os resultados obtidos com esta série de ensaio sejam diferentes dos anteriormente discutidos na série de ensaio de carbonatação, que atua de forma generalizada sobre a barra, normalmente corroendo toda a superfície exposta.

O mecanismo de ingresso dos cloretos é mais complexo, pois pode ser por absorção capilar, permeabilidade, difusão ou migração (BAUER, 1995), e a carbonatação tem a difusão como mecanismo preponderante (HELENE, 1993).

5.2.1 Barras longitudinais de referência - Série CL-BL

As barras longitudinais de referência, no ensaio de cloretos, também serviram como parâmetro para a avaliação de todos os resultados encontrados com os sensores.

A barra CL-BL1-1 apresentou um comportamento muito distinto das outras, evidenciando alguma anormalidade. Desta forma, foi retirada da média que será apresentada em algumas

figuras, sendo considerada apenas nos gráficos de correlação.

O momento no qual a média das medidas efetuadas com as barras CL-BL1-2, CL-BL2-1 e CL-BL2-2 ultrapassou o limite de 0,1 a 0,2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, de acordo com a Figura 5.28, foi entre os 24 e 26 dias de ensaio. Este período estranhamente compreendeu o início do primeiro ciclo de secagem em estufa, contrariando o que era esperado. No final da primeira secagem, alcançou-se um valor médio de i_{corr} de 1,69 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, e a partir daí, pôde ser notado uma tendência crescente dos valores nas fases de imersão, com quedas ou crescimentos menores nas secagens.

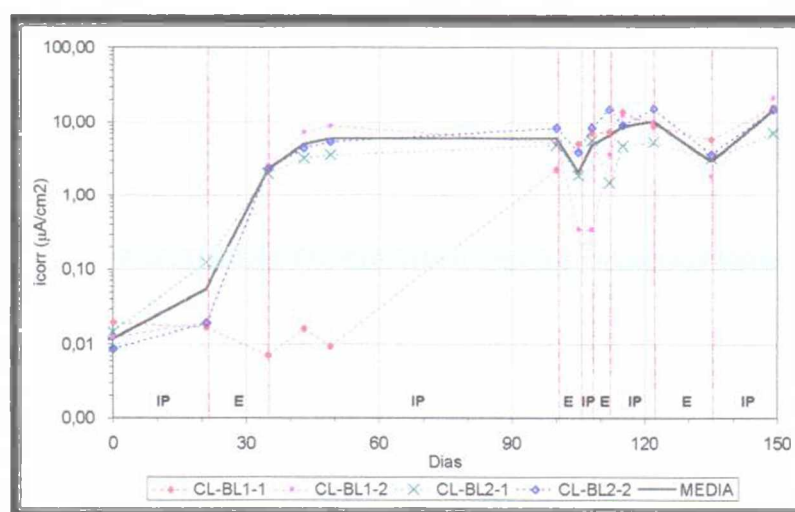


Figura 5.28 - Evolução da intensidade de corrosão - Série CL-BL²⁸

Uma explicação possível para o comportamento inesperado de i_{corr} na primeira etapa de secagem pode ser em função da variação de concentração de íons cloretos. Após o primeiro ciclo de imersão parcial, possivelmente não deve ter ocorrido ingresso de cloretos em teor suficiente para despassar a armadura. No entanto, após o início da secagem, que se dá de fora para dentro, pode ter ocorrido um aumento da concentração de cloretos na camada mais externa, devido à redução de água dos poros nesta região. Este gradiente de concentração possivelmente propiciou um avanço destes íons internamente, mesmo na etapa de secagem, e pela diferença de concentração, pode ter ocorrido um incremento na difusão de íons cloretos.

²⁸A simbologia "IP" corresponde ao período de imersão parcial e "E" corresponde a secagem em estufa.

Outro fator que contribui para este fenômeno se deve ao fato de ter sido utilizada uma temperatura não muito elevada na estufa, na faixa de 60°C, o que propicia uma secagem mais lenta do corpo-de-prova, principalmente porque as dimensões utilizadas para a confecção dos espécimes foram bastante elevadas, em relação às que normalmente são utilizadas em pesquisas semelhantes (BAUER, 1993; MONTEIRO, 1996; GONZÁLEZ et al., 1984; SHORT et al. 1991; RODRÍGUEZ et al., 1994 entre outros).

Os máximos valores de i_{corr} foram alcançados no final do ensaio, na faixa de $14 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, através da média entre as barras, e $22 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ com a barra CL-BL1-2.

Para dirimir dúvidas relativas aos ciclos empregados, a evolução da variação de massa dos corpos-de-prova e mostrada na Figura 5.29.

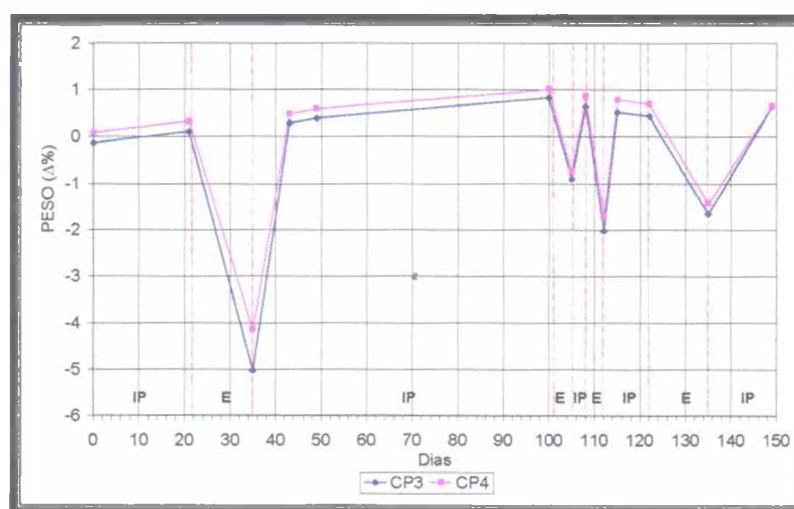


Figura 5.29 - Evolução da variação de massa da série de cloretos

O processo de corrosão por cloretos não é controlado pela resistividade, como é o caso da carbonatação, deste modo, esta grandeza não se mostra de grande utilidade para a avaliação da corrosão induzida por este tipo de agente agressivo. Nos gráficos de evolução da resistência ôhmica (Figura 5.30) e correlação da mesma com a intensidade de corrosão (Figura 5.31), podem ser verificados alguns pontos de boa correlação entre as grandezas, no entanto, a tendência geral é de dispersão²⁹.

²⁹ As demais séries não apresentarão os gráficos de resistência ôhmica, que podem ser encontrados nos anexos.

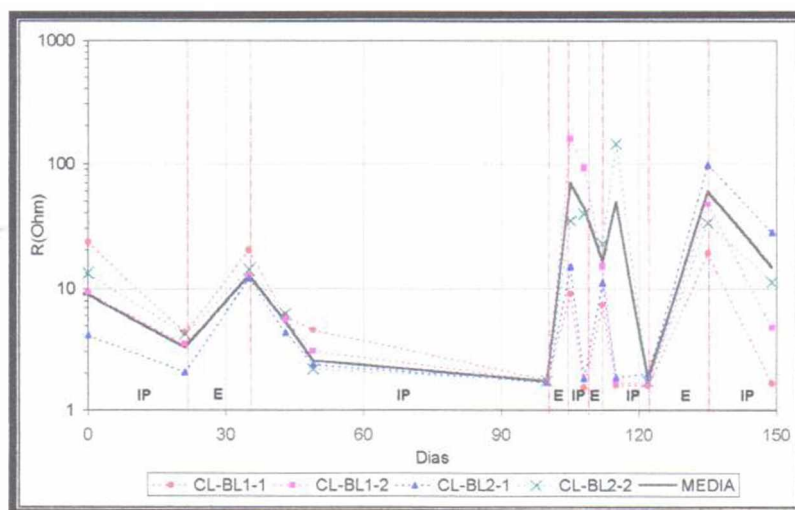


Figura 5.30 - Evolução da resistência ôhmica - Série CL-BL

Um fator importante a ser considerado, inclusive para explicar o comportamento não previsto de algumas barras nos ciclos ao qual foram submetidas, são os baixos valores de resistência ôhmica alcançados neste ensaio. Pode ser notado que o maior valor medido não superou os 105 Ohm, o qual é muito baixo, comparado por exemplo com os valores medidos nos trabalhos de TAMURA et al. (1996) e BAUER (1995), que superaram os 5000 Ohm, no entanto, encontra-se na faixa dos valores encontrados no trabalho de CASTANHEIRA (1997), em torno de 10 a 100 Ohm, que também utilizou corpos-de-prova de elevadas dimensões.

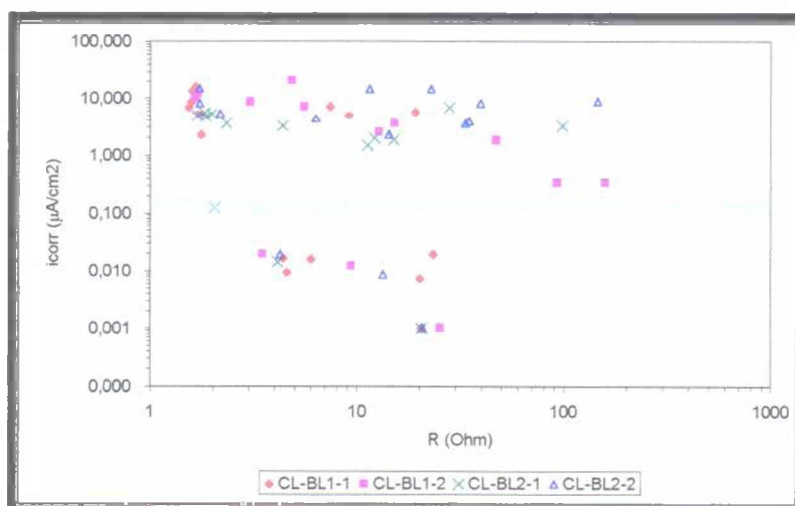


Figura 5.31 - Correlação entre resistência ôhmica e intensidade de corrosão - Série CL-BL

Estes pequenos valores de R_{Ohm} podem ser fruto de uma deficiência nos ciclos de secagem em estufa, que poderiam ter sido mais longos, e com temperaturas mais elevadas, já que as

elevadas dimensões dos corpos-de-prova dificultam a sua secagem, tornando-a mais lenta.

A Figura 5.32 mostra a evolução do potencial de eletrodo ECS. A faixa de despassivação, segunda recomenda a ASTM C-876, foi ultrapassada aos 14 dias de ensaio, próximo do fim da primeira fase de imersão parcial. No fim da primeira secagem, foi alcançado um valor de -462 mV na média das 3 barras válidas, havendo uma tendência geral de redução dos potenciais, e a partir daí, as medidas seguiram dentro do esperado, com aumento dos valores de potenciais nas secagens, e reduções nas imersões, chegando a valores na faixa de -485 a -605 mV no final do ensaio.

Ressalta-se que o potencial ECS da barra CL-BL1-1 confirmou o comportamento já identificado com i_{corr} no período inicial do ensaio, até os primeiros 35 dias.

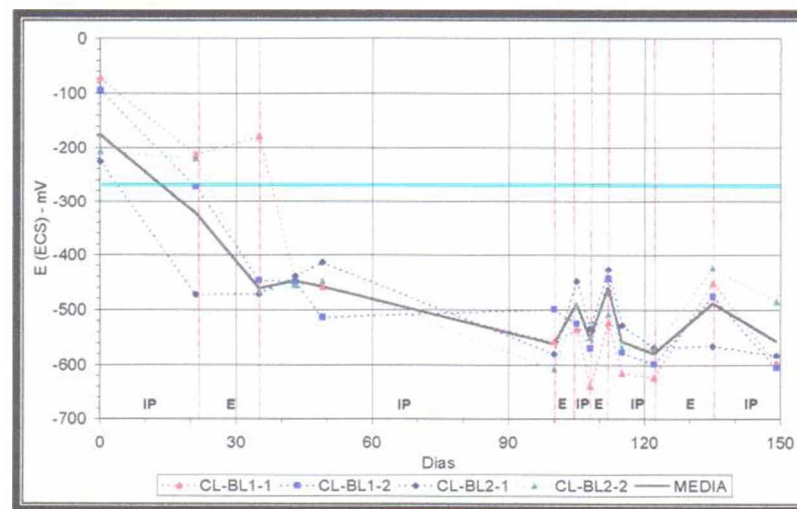


Figura 5.32 - Evolução do potencial ECS - Série CL-BL

A intensidade de corrosão e o potencial de corrosão evidenciaram a correlação mostrada na Figura 5.33. Pode-se notar a formação de duas nuvens de pontos bem distintas, uma na região de passivação e outra na região de despassivação, com poucos pontos dispersos em uma região de provável erro nas medidas.

Era de se esperar que a linha que define o limite de despassivação dos potenciais interceptasse a faixa limite de i_{corr} em um ponto mais próximo da reta de correlação linear. Esta defasagem que se apresentou pode ser em função de alguns pontos que forçaram a linha de tendência a se inclinar.

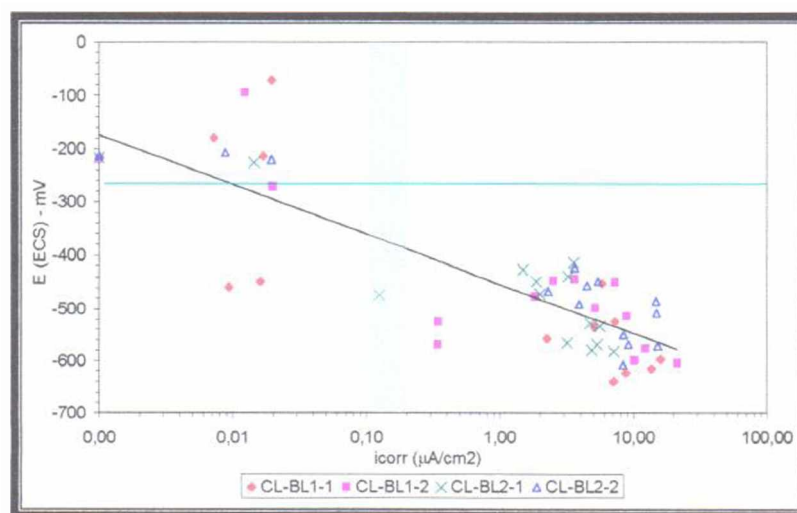


Figura 5.33 - Correlação entre intensidade de corrosão e potencial (ECS) - Série CL-BL

5.2.2 Sensor Comercial CMS - Série CL-SC

De acordo com o fabricante do sensor, valores de potenciais abaixo de -370 mV indicam 95% de probabilidade de estar havendo um processo de corrosão nas barras de aço.

Através da Figura 5.34, verifica-se que no 20º dia foi ultrapassado o limite de despassivação da média das barras³⁰, alcançando-se o valor do potencial CMS de -383 mV. Isto ocorreu no final do primeiro ciclo de imersão.

A barra CL-SC1-1 indicou sinais de despassivação tardia, apenas no 43º dia de ensaio, comportando-se distintamente em relação às outras, tal como foi identificado na série CL-BL. Em comparação com a Figura 5.28, evidencia-se que no período anteriormente citado, houve um incremento de i_{corr} da referida armadura, no entanto, ela despassivou apenas entre o 49º e o 100º dia.

O sensor manteve-se estável até os 49 dias de ensaio³¹, e a partir daí mostrou grande dispersão dos resultados, com variações de valores que não representaram o que estava sendo observado com as outras grandezas eletroquímicas (Figura 5.35).

³⁰ Também serão consideradas apenas os valores das barras CL-SC1-2, CL-SC2-1 e CL-SC2-2, pois os sensores estão ligados às barras de referência, e devem sofrer todas as variações e problemas apresentados pela série CL-BL.

³¹ De acordo com o fabricante, o sensor CMS deveria funcionar como um eletrodo de referência estável. Para ele ser considerado como tal, o potencial em relação ao ECS deveria ser constante.

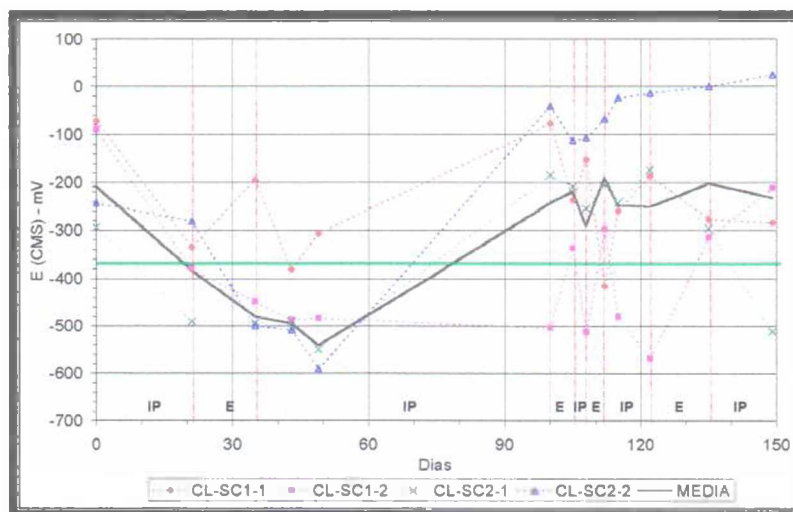


Figura 5.34 - Evolução do potencial em relação ao CMS - Série CL-BL

A Figura 5.35 demonstra este comportamento, com o potencial entre o sensor CMS e o ECS praticamente em torno de zero nos primeiros 49 dias de ensaio, indicando uma boa estabilidade do sensor diante das condições ambientais até então impostas, e a partir daí, apresentando grande variação, chegando inclusive a apresentar sinais de corrosão (sensor CL-SC2-2), com potencial relativo ao ECS na faixa de -606 mV.

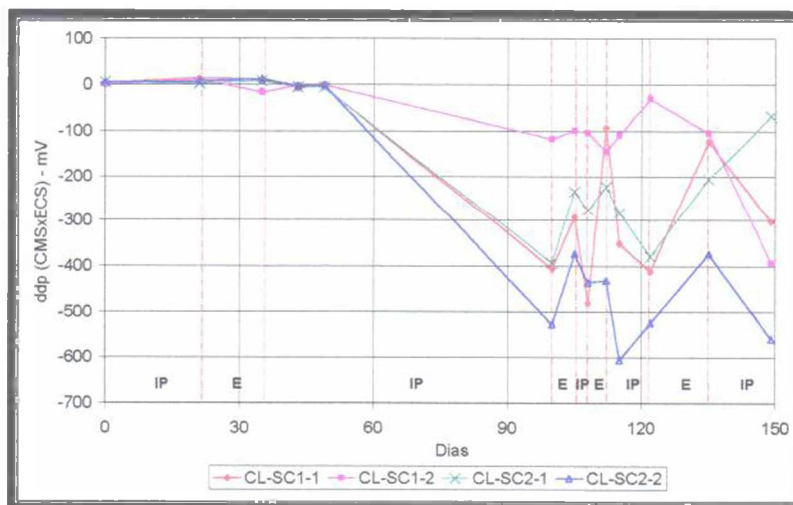


Figura 5.35 - Oscilação do potencial do sensor CMS em relação ao Calomelano - Série CL-SC

A Figura 5.36 mostra a correlação entre intensidade de corrosão e potencial em relação ao sensor CMS. Pode ser notada uma completa dispersão, principalmente na faixa de elevados valores de i_{corr} , ou seja, na fase de propagação.

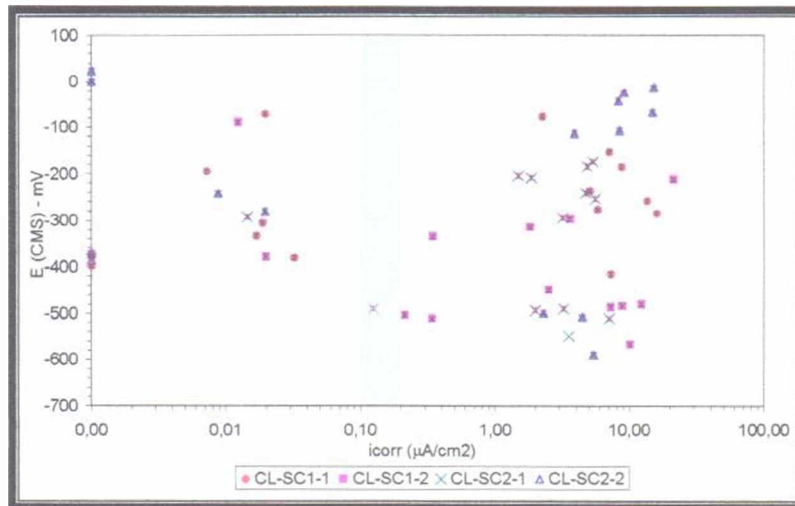


Figura 5.36 - Correlação entre intensidade de corrosão e potencial (CMS) - Série CL-SC

Desprezando as medidas posteriores ao 49º dia de ensaio, em função da perda de estabilidade do sensor CMS, mostrada na Figura 5.35, obteve-se o gráfico da Figura 5.37. Observa-se que neste caso já é possível a obtenção, mesmo que precária, de uma reta de regressão, que levou ao estabelecimento do limite de -390 a -400 mV para o início da despassivação. Este limite encontra-se próximo do valor proposto pelo fabricante, que é de -370 mV.

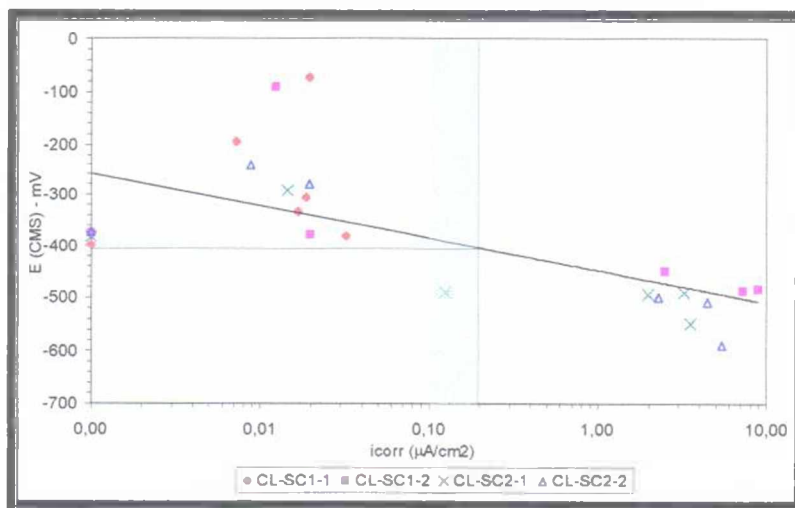


Figura 5.37 - Correlação entre intensidade de corrosão e potencial (CMS) - Período de Iniciação - Série CL-SC

O mesmo comportamento disperso pode ser observado na Figura 5.38, que correlaciona os potenciais das barras de referência em relação ao ECS e em relação ao a sensor CMS.

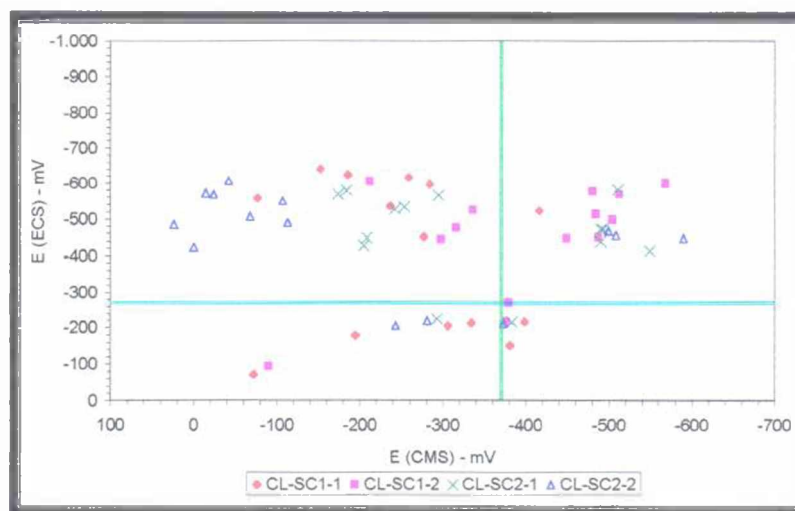


Figura 5.38 - Correlação entre potencial (CMS) e potencial (ECS) - Série CL-SC

A Figura 5.39 mostra a relação da figura anterior com os pontos entre o 1º e o 49º dia de ensaio. Observa-se a relação mostrada na figura, a qual levou ao estabelecimento do limite de -340 mV para a despassivação, também próximo do valor proposto pelo fabricante.

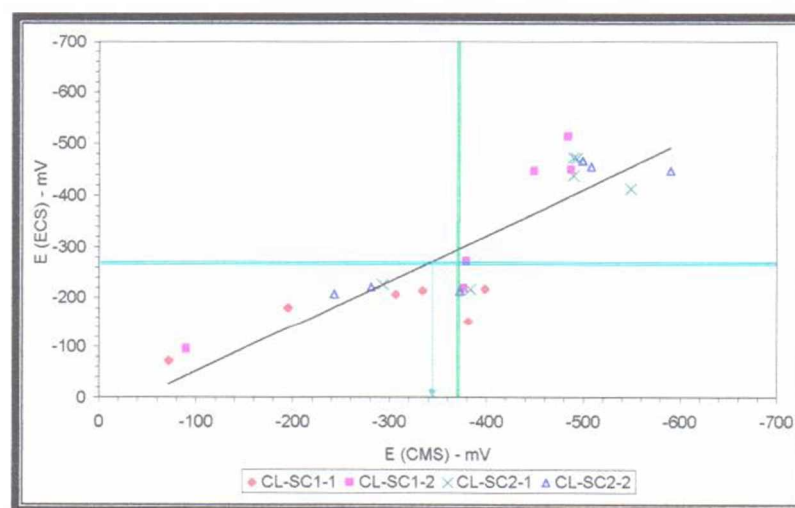


Figura 5.39 - Correlação entre potencial (CMS) e potencial (ECS) - FAIXA - Série CL-SC

Pode ser notada uma variação de -340 a -400 mV, em função das correlações com E (ECS) e com i_{corr} . Obtendo-se a média deste intervalo, chega-se ao valor de -370 mV, que coincidentemente é o valor proposto pelo fabricante. Deve ser novamente salientado que o sensor não se comporta bem após a despassivação das barras e início da corrosão, e isto é algo que deve ser melhor estudado.

5.2.3 Sensores galvânicos em escada - Série CL-SGE

Na série CL-SGE, esperava-se a mesma seqüência de despassivação da série CA-SGE, apesar das diferenças dos ensaios. Deveria despassivar primeiro a barra mais superficial, seguindo-se as demais.

A Figura 5.40-a mostra que todas as barras já iniciaram o ensaio com um valor de i_{corr} na faixa de $0,20 \mu A/cm^2$, acima do limite estabelecido para o início da corrosão. Entretanto, após a primeira secagem, o valor de i_{corr} da barra CL-SGE1-3 caiu para $0,01 \mu A/cm^2$ e a barra CL-SGE1-2 para $0,16 \mu A/cm^2$. A barra CL-SGE1-1 teve um incremento de i_{corr} no mesmo período, chegando a $0,57 \mu A/cm^2$, provavelmente em função do que foi exposto na série CL-BL.

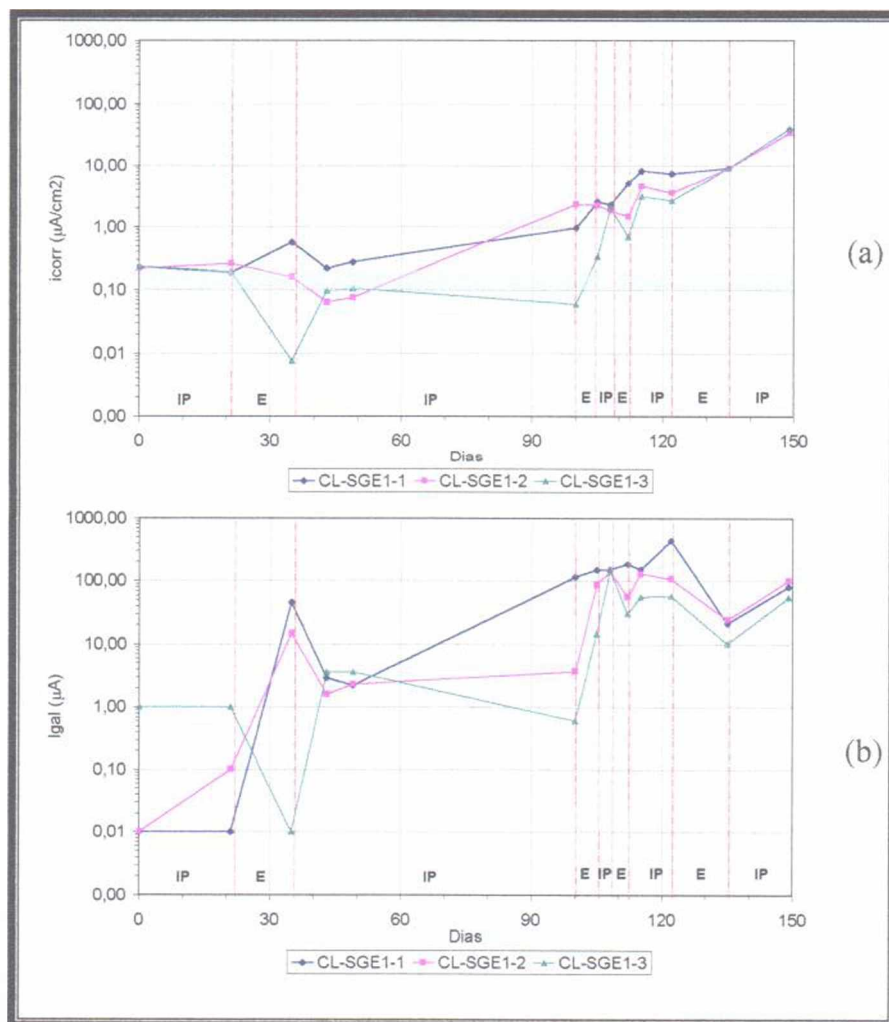


Figura 5.40 - Evolução da intensidade de corrosão (a) e corrente galvânica (b) - Série CL-SGE1

A partir do 35º dia, as barras voltaram a se comportar dentro do esperado, com a barra CL-SGE1-1 com os maiores valores de i_{corr} , seguida pelas barras CL-SGE1-2 e CL-SGE1-3 respectivamente. No fim do ensaio, foi alcançado o valor máximo de $39,41 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, com as três barras apresentando praticamente o mesmo valor de i_{corr} , indicando um ataque semelhante nas mesmas.

O trabalho de CASTANHEIRA (1997) também apresentou valores elevados de i_{corr} já no início da série de ensaio, evidenciando a possibilidade de ocorrerem sinais de corrosão precoces³². Uma das possíveis causas para este comportamento, neste caso, seria a contaminação dos sensores devido a prováveis fissuras localizadas, ocasionadas pela expansão térmica do material empregado no corpo do sensor. A influência de fissuras nas medidas eletroquímicas é muito importante e já foi estudada por pesquisadores como RAUPACH (1997) e OHNO et al. (1996).

Este comportamento foi seguido por I_{gal} . Até os 49 dias de ensaio, as medidas foram bastante confusas, e a partir deste ponto tornaram-se próximas do que era esperado. O máximo valor medido de I_{gal} foi de $440 \mu\text{A}$, aos 122 dias de ensaio.

Apesar de algumas medidas estarem diferente do que era esperado, deve-se atentar para o fato das medidas de I_{gal} terem se comportado de acordo com os dados obtido com a intensidade de corrosão, indicando a confiabilidade desta grandeza eletroquímica e o grau de sensibilidade do sensor.

A seqüência de despassivação também pode ser visualizada na análise dos potenciais de eletrodo. Observa-se na Figura 5.41-a que no primeiro ciclo de imersão parcial, as medidas de potenciais em relação às barras catódicas do sensor (INOX) mantiveram-se praticamente constantes, próximas de zero. Após a primeira secagem, a barra CL-SGE1-1 mostrou sinais de despassivação, juntamente com a barra CL-SGE1-2, ultrapassando o limite estabelecido no gráfico. Na imersão seguinte, houve um enobrecimento dos potenciais das barras anteriormente citadas e a redução do potencial da barra CL-SGE1-3, ficando todas na faixa de

³² CASTANHEIRA (1997) utilizou a contaminação através de adição de Cl^- à argamassa, o que possibilita um ataque precoce mais intenso, no entanto, este fenômeno também mostrou-se no caso de regiões ainda não submetidas a agentes agressivos, como regiões compostas por argamassa de reparo, que também apresentaram i_{corr} elevada já na primeira medida do ensaio, chegando a valores acima de $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

-50 a -70 mV, dentro do limite de despassivação. O menor valor medido no decorrer do ensaio foi de -455 mV, ao final do penúltimo ciclo de imersão.

A Figura 5.41-b, que mostra a evolução dos potenciais de eletrodo em relação ao ECS seguiu a mesma configuração da evolução dos potenciais em relação ao INOX. O máximo valor encontrado foi de -609 mV, também no penúltimo ciclo de imersão.

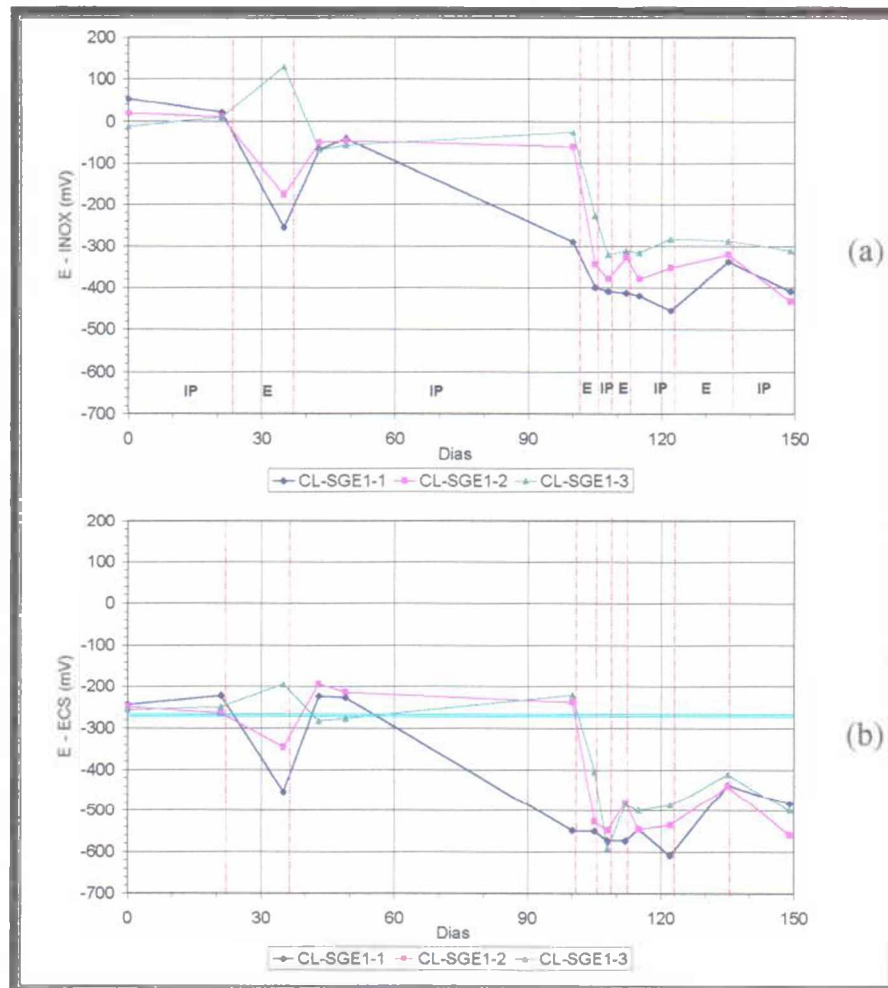


Figura 5.41 - Evolução do potencial INOX (a) e do potencial ECS (b) - Série CL-SGE1

A série CL-SGE2 mostrou-se bastante diferente do que era esperado, ou seja, a despassivação das barras superficiais de maneira mais rápida e as demais subsequentemente. Pode ser visto, na Figura 5.42-a e Figura 5.42-b que a barra CL-SGE2-2 mostrou-se ativa desde o início do ensaio, e o comportamento das demais barras também foi bastante estranho, indicando algum problema com esta série deste corpo-de-prova.

Provavelmente, alguma fissura próxima à barra CL-SGE2-2 teve abertura o suficiente para acelerar o seu processo de corrosão. O ingresso de agressivos, como os cloretos, é facilitado na presença de fissuras, e isto pode ter causado as distorções encontradas nesta série. RAUPACH (1997), afirma que a corrosão induzida por cloretos, em zonas com fissuras, induz a formação de macrocélulas de corrosão, que são influenciadas pelas condições entre as fissuras. Isto também pode ser atribuído às taxas elevadas no início do ensaio da barra CL-SGE2-2.

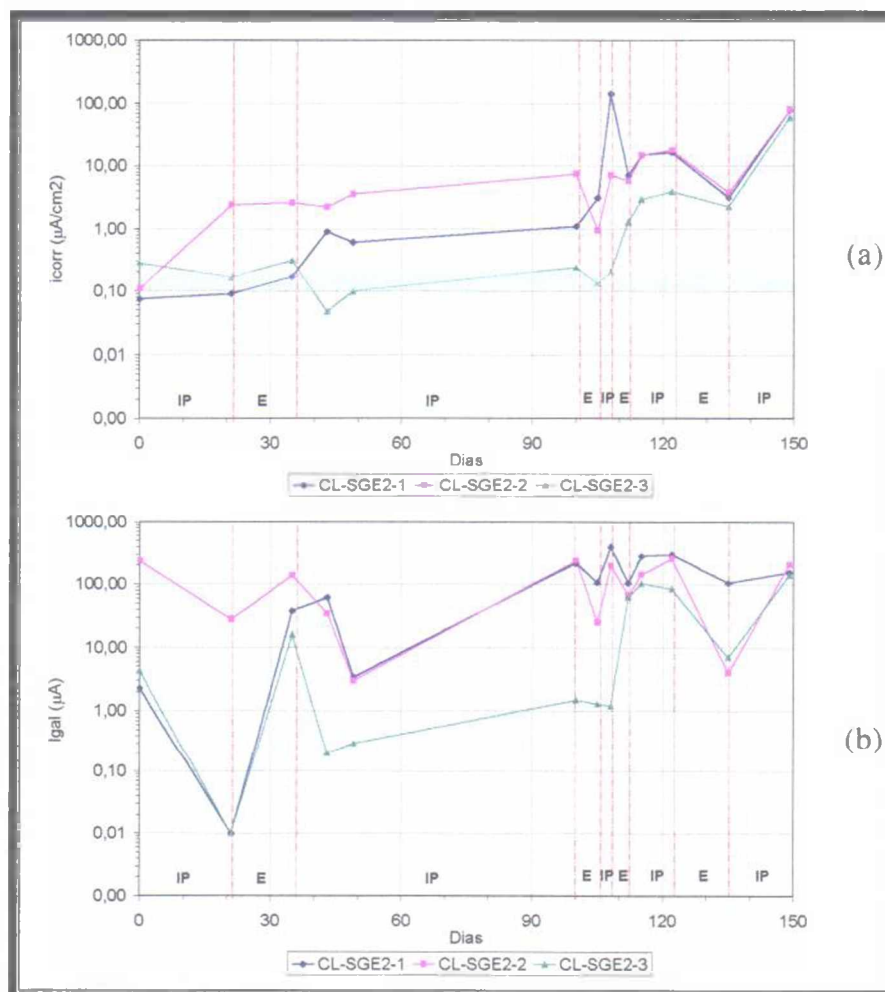


Figura 5.42 - Evolução da intensidade de corrosão (a) e corrente galvânica (b) - Série CL-SGE2

Observa-se no anexo IV que o ataque ao sensor foi muito intenso, e em comparação com a série CL-SGE1, que teve a mesma condição de exposição ao agente agressivo, verifica-se uma grande diferença, evidenciada também pelos elevados valores de i_{corr} , acima de $78 \mu A/cm^2$, muito superiores ao que foi alcançado na série anterior.

Novamente, é importante salientar o comportamento semelhante das medidas efetuadas com I_{gal} e i_{corr} . Isto demonstra que as medidas galvânicas foram sensíveis às variações do estado de corrosão das barras anódicas do sensor.

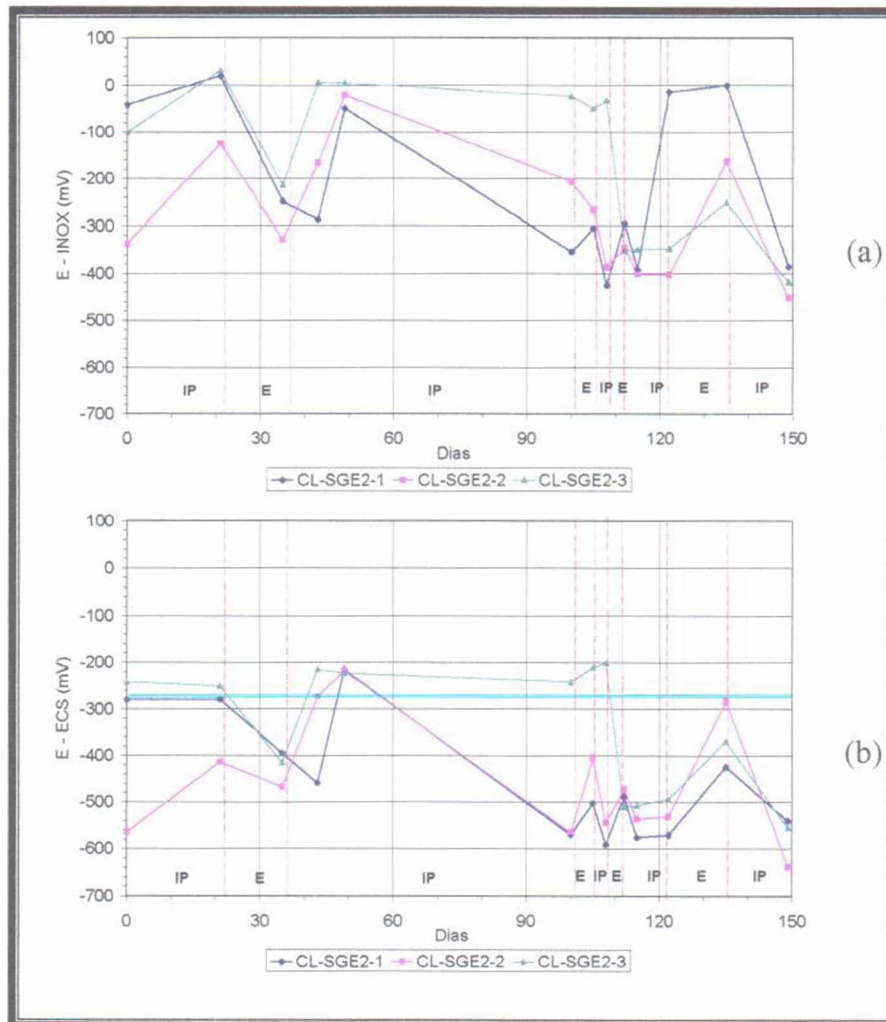


Figura 5.43 - Evolução do potencial INOX (a) e do potencial ECS (b) - Série CL-SGE2

Como o objetivo dos sensores é avaliar a frente de despassivação, indicando-a através da variação das medidas eletroquímicas, e neste caso houve um provável problema no corpo-de-prova que inviabilizou esta análise, esta série será abandonada, sem uma discussão mais aprofundada dos resultados, e seus dados serão aproveitados apenas para a avaliação conjunta dos sensores, na correlação entre as grandezas eletroquímicas.

Os gráficos de potencial de corrosão (Figura 5.43), mostrados anteriormente, não terão maiores comentários.

A correlação de i_{corr} com I_{gal} é mostrada na Figura 5.44. Através de uma regressão, obteve-se a faixa de despassivação para esta série, que ficou entre 0,2 e 0,7 μA .

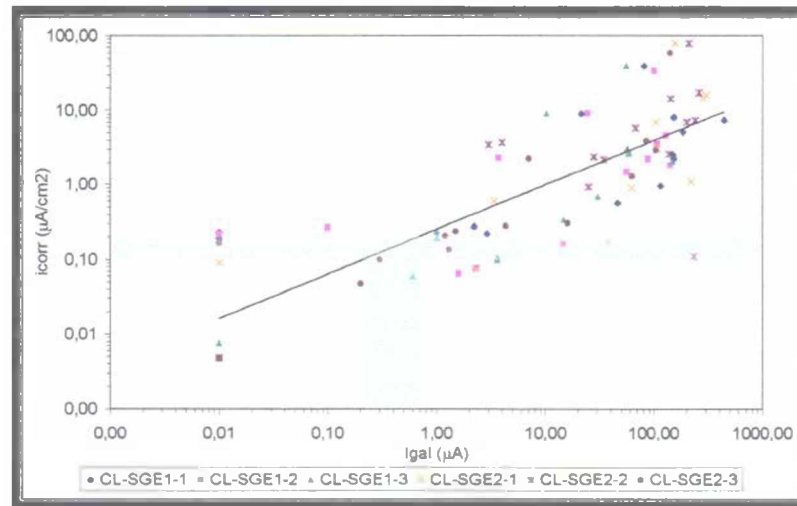


Figura 5.44 - Correlação entre corrente galvânica e intensidade de corrosão - Série CL-SGE

A correlação entre a intensidade de corrosão e o potencial INOX (Figura 5.45) levou também à definição de uma faixa de despassivação, já que houve uma tendência razoável entre as grandezas. A faixa ficou entre -20 e -70 mV. Já a correlação entre os potenciais INOX e ECS gerou um valor de -30 mV (Figura 5.46).

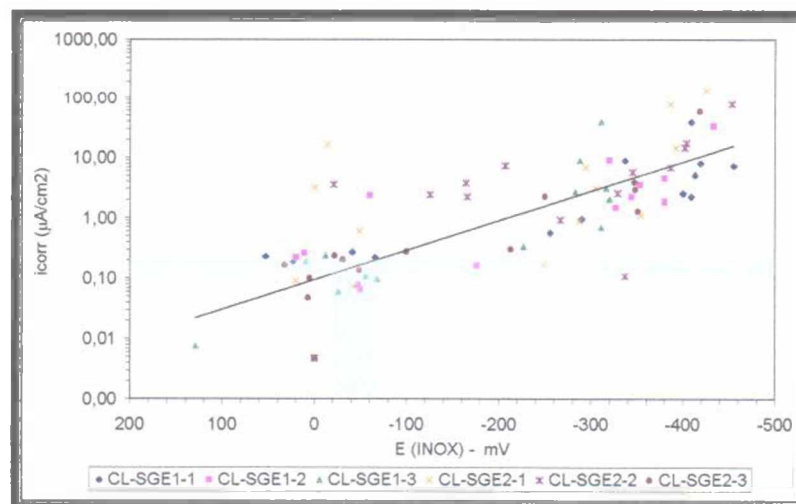


Figura 5.45 - Correlação entre potencial (INOX) e intensidade de corrosão - Série CL-SGE

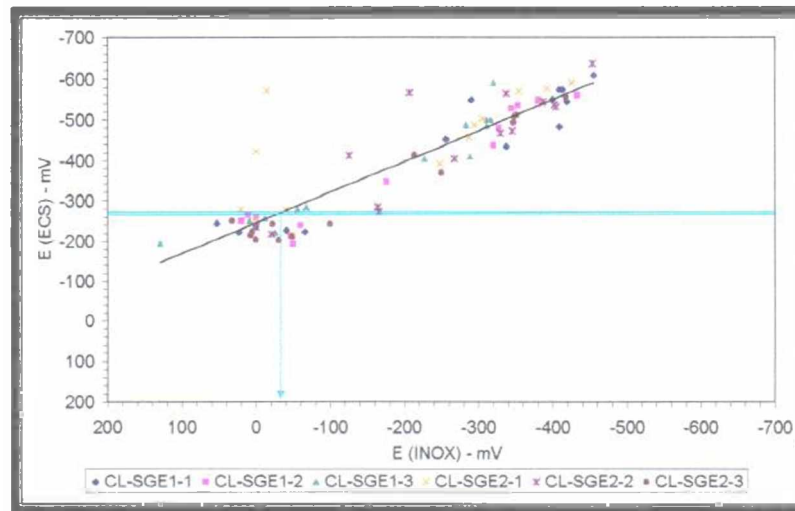


Figura 5.46 - Correlação entre potencial (INOX) e potencial (ECS) - Série CL-SGE

5.2.4 Sensores Galvânicos com Variação de Área Anódica/Catódica - Série CL-SGA

A série CL-SGA1 mostrou os mesmos sinais de atividade das barras antes do início do ensaio. Em comparação com a série de ensaios de carbonatação, onde a barra com relação de áreas anódica/catódica igual a 1 foi a primeira a despassivar, pôde ser notada uma diferença, já que a barra CL-SGA1-2 mostrou sinais de despassivação precoce mais intenso que a barra CL-SGE1-3, e somente após a primeira secagem, a i_{corr} ficou abaixo da barra CL-SGA1-3, seguindo a partir daí de forma semelhante à série CA-SGA (Figura 5.47-a). No início do ensaio, partiu-se de valores de até $0,3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, chegando-se ao máximo de $59,12 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ no final do ensaio. A partir da segunda secagem em estufa, as medidas variaram de acordo com o esperado, reduzindo i_{corr} nas secagem e aumentando nas imersões parciais.

Apesar das elevadas intensidades de corrosão no início do ensaio, as medidas relativas à i_{corr} (Figura 5.47-a) mostraram-se compatíveis com o que era esperado, já que a barra CL-SGA1-3 mostrou sinal de despassivação bastante intenso após a primeira secagem, inclusive seguindo a tendência identificada na série CL-SGE. As barras CL-SGA1-2 e CL-SGA1-3 despassivaram-se em seguida, respectivamente.

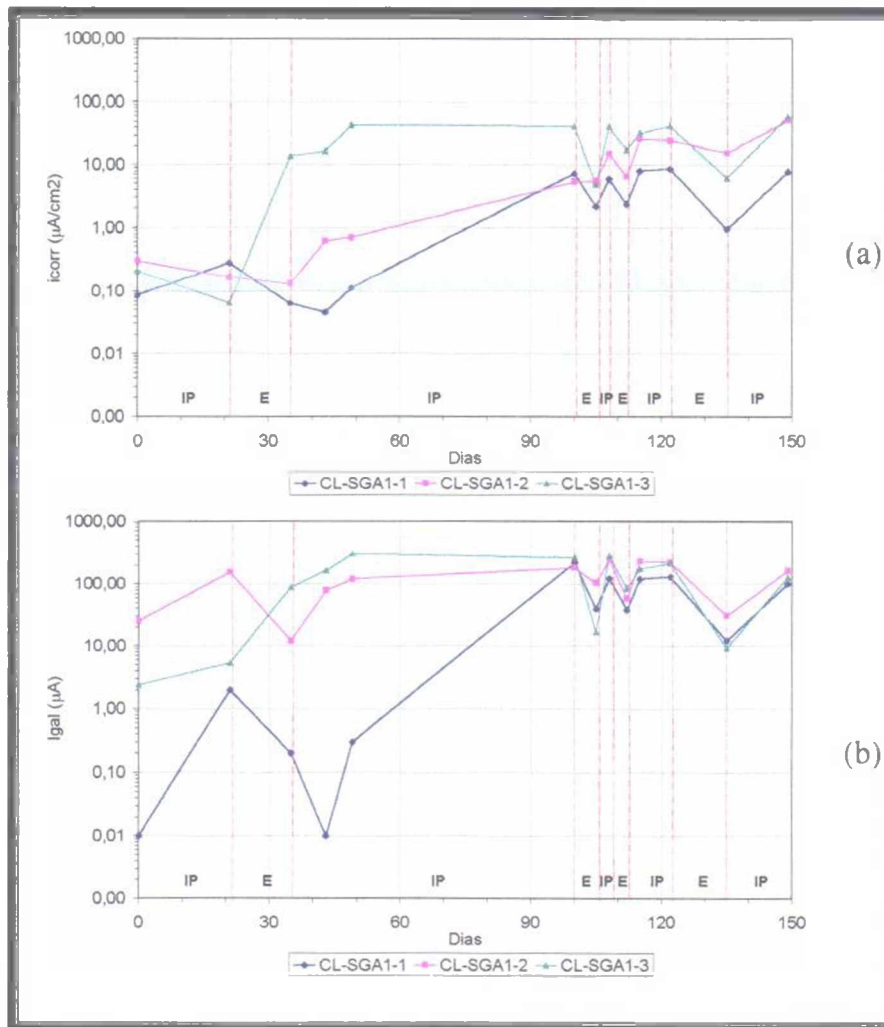


Figura 5.47 - Evolução da intensidade de corrosão (a) e corrente galvânica (b) - Série CL-SGA1

O mesmo comportamento é identificado na Figura 5.47-b. Partiu-se de valores da ordem de 0,01 a 25 μA no início do ensaio, chegando-se ao máximo de 307 μA aos 49 dias de ensaio.

As Figura 5.48-a Figura 5.48-b confirmam a evolução da intensidade de corrosão e corrente galvânica, mostrando a boa relação entre as grandezas neste tipo de ensaio de corrosão.

Os potenciais relativos às barras de INOX variaram de 66 a -457 mV, e estes limites foram alcançados pela barra CL-SGA1-1. Já os potenciais relativos ao ECS variaram de -137 a -640 mV, e também foram obtidos a partir da mesma barra anteriormente citada.

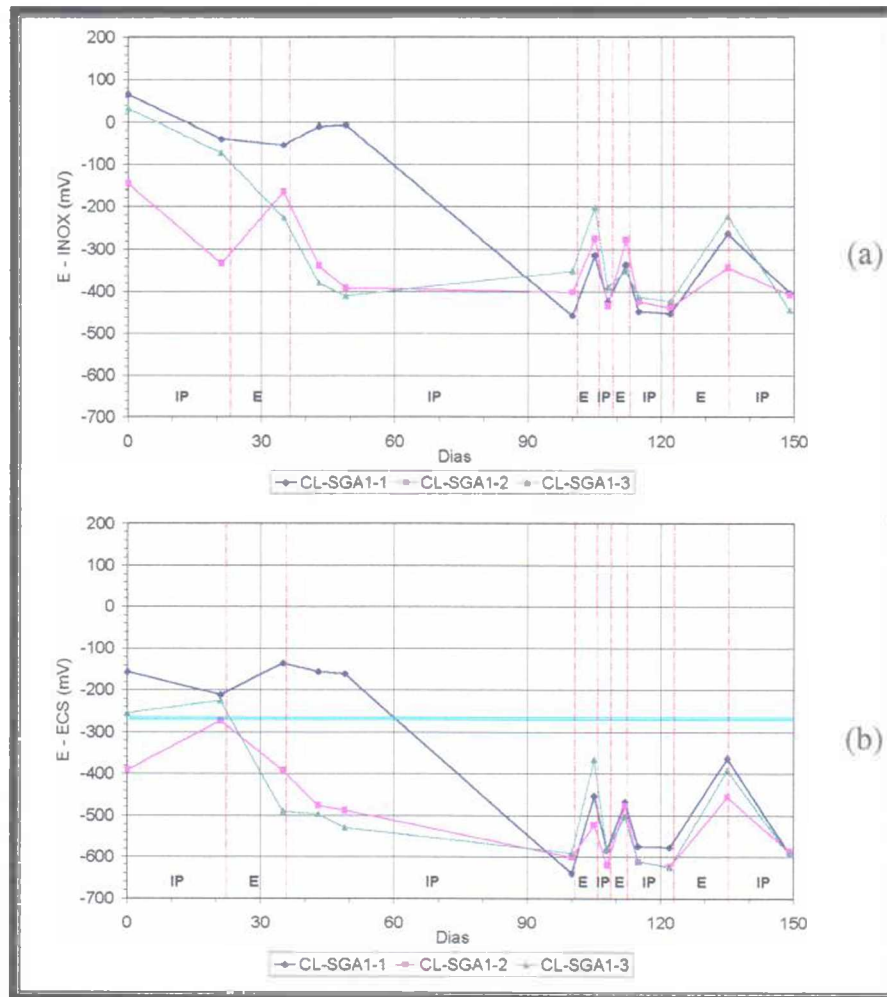


Figura 5.48 - Evolução do potencial INOX (a) e do potencial ECS (b) - Série CL-SGA1

Na série CL-SGA2, a intensidade de corrosão (Figura 5.49-a) mostrou um comportamento similar à série CL-SGA1, diferenciando apenas as barras que iniciaram o ensaio com taxas de corrosão elevadas, que desta vez foram a CL-SGA2-3 e CL-SGA2-1, e na série anterior, foram as barras CL-SGA1-3 e CL-SGA1-2.

Observa-se que a barra CL-SGA1-2 mostrou uma estranha inatividade por um período de 3 medidas (Figura 5.49-b), que não chega a ser um indicativo de problemas com o sensor, já que a intensidade de corrosão (Figura 5.49-a) indicou valores abaixo do limite de $0,1$ a $0,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ no mesmo período, o que sugere que esta barra do sensor ainda encontrava-se passiva, e provavelmente a formação da película passivante foi a causa deste comportamento. Mediu-se valores de I_{gal} na faixa de $0,01$ a $462 \mu\text{A}$ no decorrer do ensaio.

A intensidade de corrosão (Figura 5.49-a) mostrou uma evolução parcialmente compatível

com o observado na corrente galvânica, com destaque para as quedas de i_{corr} das barras CL-SGA2-1 e CL-SGA2-3 entre os 49 e 100 dias de ensaio e acréscimo no período de imersão parcial subsequente. Este comportamento pode indicar alguma falha nas leituras de i_{corr} no 100º dia. No último período de imersão parcial, a queda de i_{corr} da barra CL-SGA2-3 também mostrou-se estranha. Os valores variaram no decorrer do ensaio de 0,03 a 67 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$.

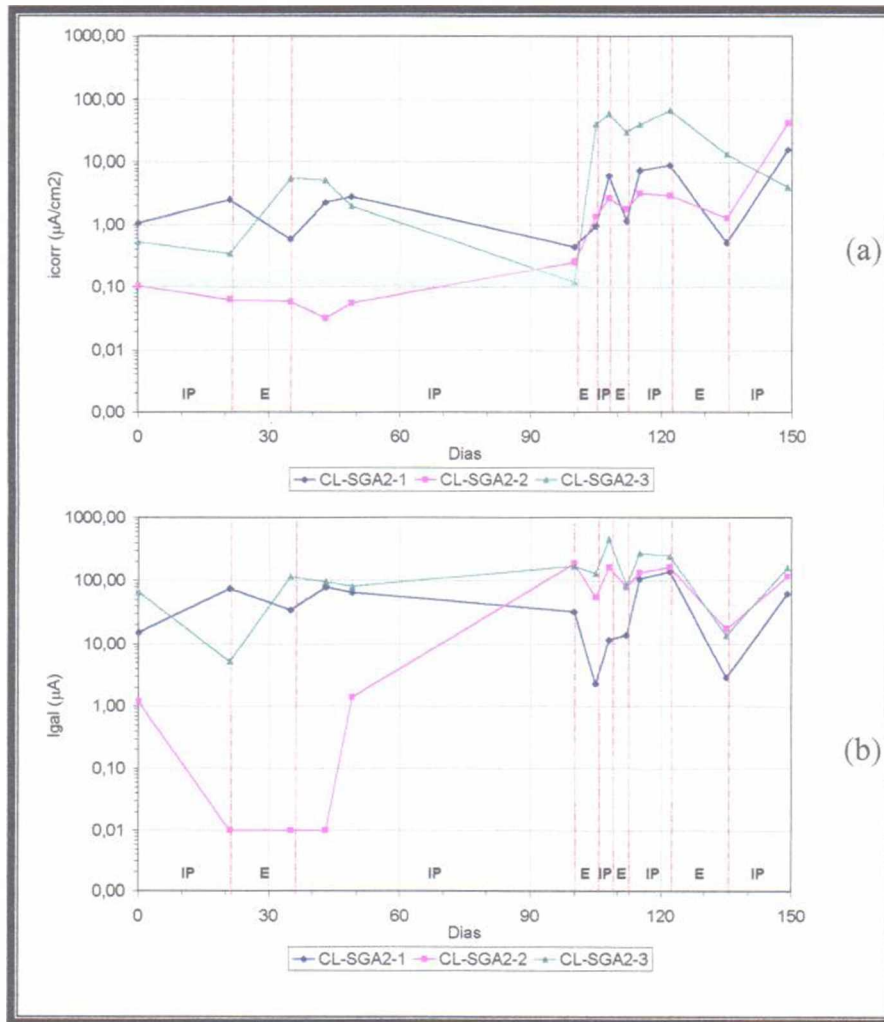


Figura 5.49 - Evolução da intensidade de corrosão (a) e corrente galvânica (b) - Série CL-SGA2

Os potenciais relativos ao INOX (Figura 5.50-a) mostraram-se compatíveis com I_{gal} , seguindo a mesma tendência, variando os potenciais de 78 a -464 mV. Os potenciais relativos ao ECS (Figura 5.50-b) mostraram-se compatíveis com a evolução da intensidade de corrosão, indicando inclusive a possível falha nas medidas efetuadas no 100º dia, já que ambas as grandezas foram medidas utilizando o mesmo equipamento e as mesmas conexões elétricas. A variação do potencial ECS ficou entre -191 e -640 mV.

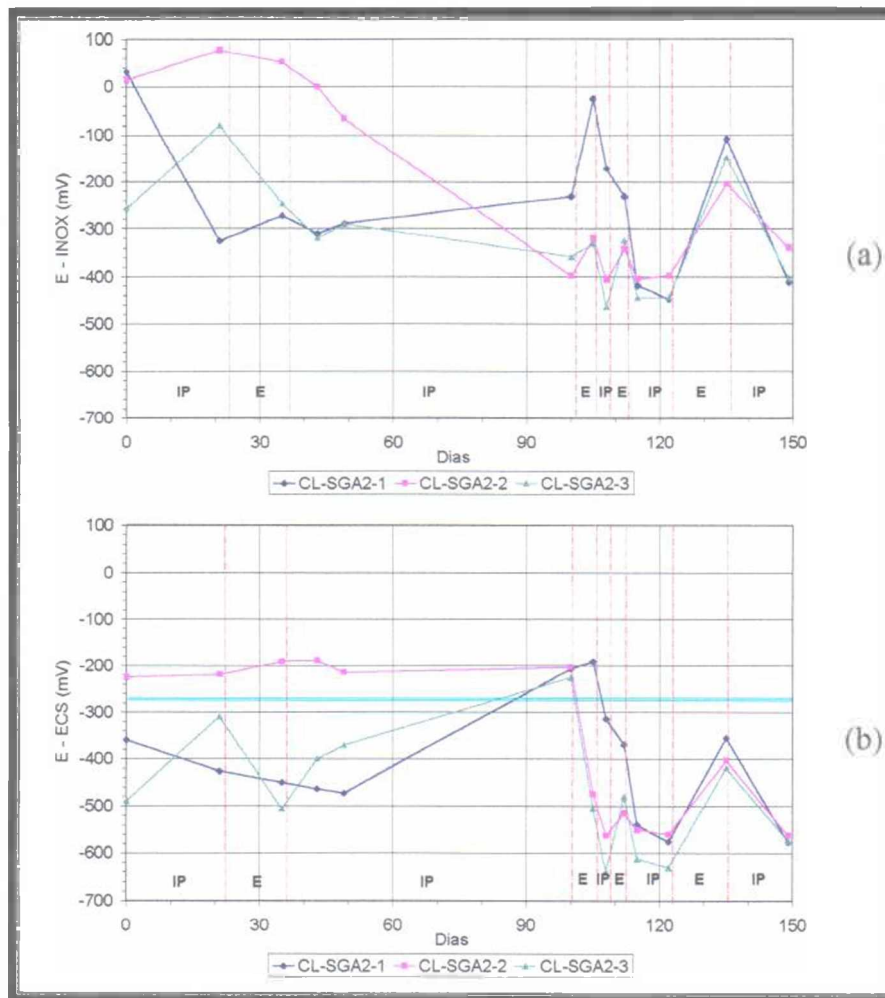


Figura 5.50 - Evolução do potencial INOX (a) e do potencial ECS (b) - Série CL-SGA2

A correlação entre corrente galvânica e intensidade de corrosão (Figura 5.51) mostrou-se satisfatória, chegando-se a uma faixa limite de 0,25 a 0,7 μA para a corrente galvânica. Observa-se uma grande nuvem de pontos na região de despassivação, indicando que poucas medidas mostraram as barras no estado passivo, evidenciando um ataque muito intenso dos íons cloretos desde o início do ensaio.

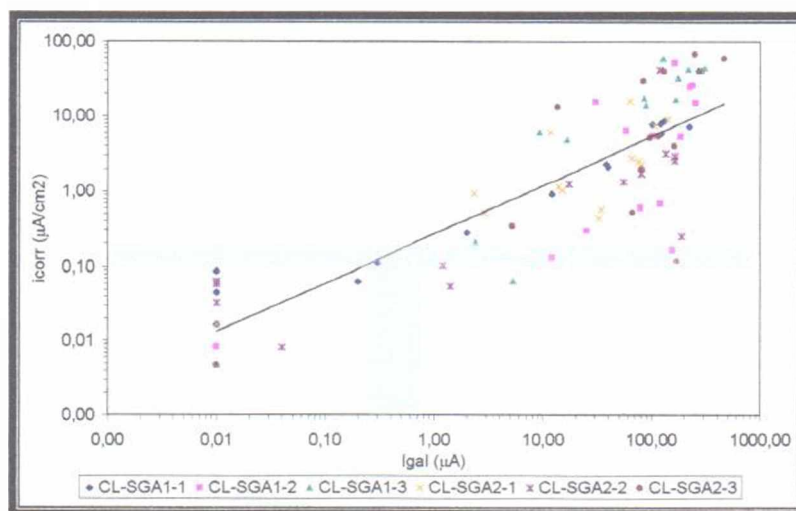


Figura 5.51 - Correlação entre corrente galvânica e intensidade de corrosão - Série CL-SGA

Tanto as medidas de potencial INOX relacionadas com i_{corr} (Figura 5.52) quanto as medidas relacionadas com o potencial ECS (Figura 5.53) mostraram-se bem ajustadas, e forneceram os limites de -30 a -80 mV e -60 mV respectivamente. LAMBERT & PAGE (1991) dizem que este bom relacionamento, com a configuração da reta de regressão obtida nas figuras, indica que o processo de corrosão foi sujeito a um controle anódico.

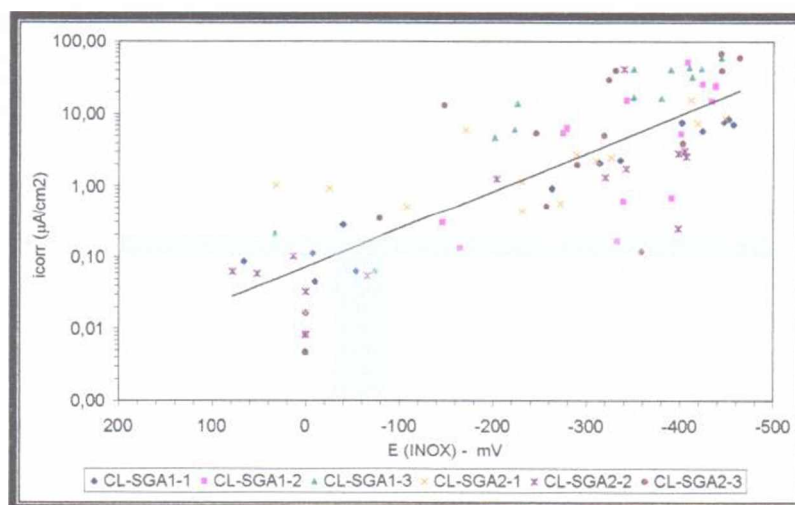


Figura 5.52 - Correlação entre potencial (INOX) e intensidade de corrosão - Série CL-SGA

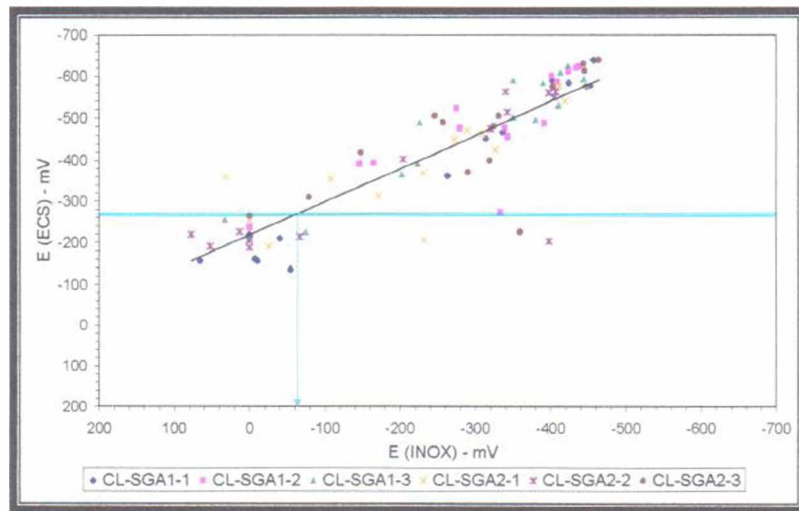


Figura 5.53 - Correlação entre potencial (INOX) e potencial (ECS) - Série CL-SGA

5.3 AVALIAÇÕES COMPLEMENTARES

5.3.1 Perdas Gravimétrica e Eletroquímica

Através da Figura 5.54, observa-se que a série de ensaio de carbonatação mostrou a melhor relação, ficando praticamente todos os pontos dentro da faixa de validade técnica, que apresenta um fator de erro de 2.

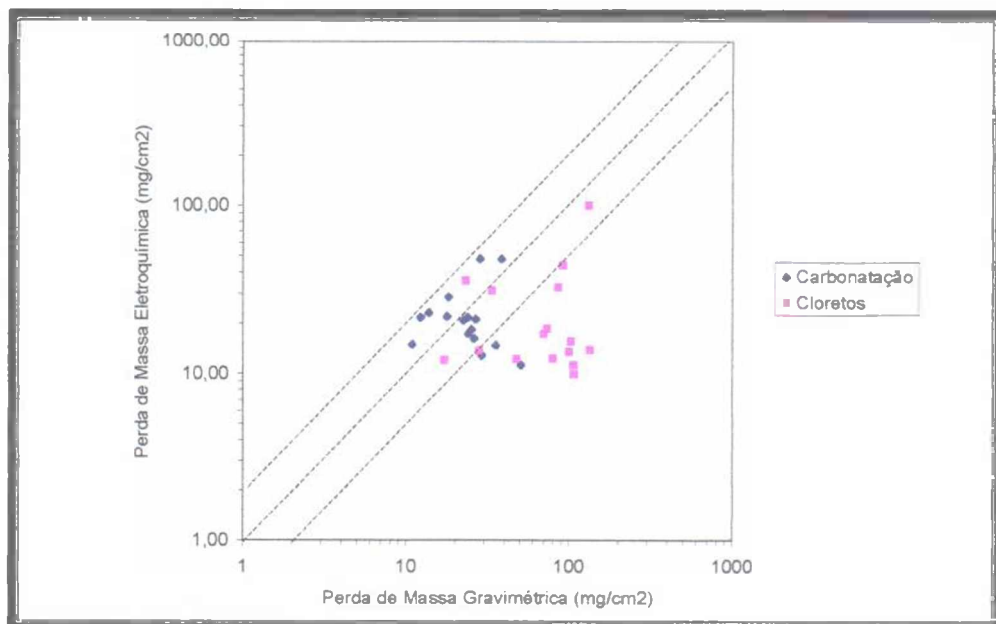


Figura 5.54 - Perda eletroquímica x gravimétrica

Os pontos relativos ao ensaio de cloretos mostraram-se diferentes da carbonatação, estando praticamente todos fora da faixa de validação, provavelmente devido à corrosão que foi detectada sob a fita isolante que delimitada a área exposta das barras, e que não é contabilizada nas medidas de i_{corr} . Isto é mais evidente na corrosão por cloretos, devido a intensidade que é muito maior que na carbonatação. Além disso, a corrosão induzida por cloretos atua na forma e pites, e no cálculo da perda gravimétrica, a contribuição destes ataques pontuais é dividida por toda a área exposta da barra, causando a diferença em relação à perda de massa real, claramente identificada na Figura 5.54.

5.3.2 Avaliação Conjunta das Séries de Carbonatação e Cloretos

Era de se esperar que as barras superficiais das séries SGE e as barras da série SGA despassissem ao mesmo tempo das barras de referência, e que alcançassem o mesmo patamar de i_{corr} . Observa-se que na maioria das vezes, a desp passivação ocorreu no mesmo período, como já foi mostrado anteriormente, no entanto, verifica-se que os patamares de i_{corr} das barras de referência foram muito inferiores aos dos sensores na corrosão induzida por cloretos, e praticamente iguais na corrosão induzida por carbonatação. Isto se deve provavelmente à grande dimensão da barra de referência, que sofre ataques pontuais de pites, e as medidas de i_{corr} tendem a apresentar um erro maior por se considerar toda a área exposta da barra no cálculo da taxa de corrosão (ANDRADE, 1996).

A Figura 5.14 (página 90) e a Figura 5.44 (página 114) serão novamente citadas para uma discussão sobre a relação entre as grandezas i_{corr} e I_{gal} para os dois ensaios, de carbonatação e de cloretos.

A Figura 5.14, relacionada ao ensaio de carbonatação, mostra que a relação entre i_{corr} e I_{gal} levou ao estabelecimento de um limite para se considerar a desp passivação da barra de aço entre 3 e 7 μA . A Figura 5.44, relacionada ao ensaio de cloretos, mostrou um limite entre 0,2 e 0,7 μA .

Observa-se que as medidas de i_{corr} efetuadas no ensaio de carbonatação atingiram níveis menores que as correspondentes no ensaio de cloretos, e as medidas de I_{gal} efetuadas no ensaio de carbonatação atingiram níveis maiores que as correspondentes no ensaio de cloretos. As razões que levam a isto são complexas, e podem ser em função da área anódica

exposta e da ação das microcélulas, que é mais intensa na corrosão por carbonatação (ANDRADE, 1996). No ensaio de carbonatação, a barra anódica dos sensores provavelmente funciona próximo a um ânodo puro, deste modo, a corrente galvânica, tenderia a alcançar níveis maiores de I_{gal} , pois no ensaio de cloretos, devido à morfologia do ataque, que se dá por pites, a barra anódica do sensor pode trabalhar como ânodo impuro, com áreas anódicas e catódicas na mesma barra, deste modo, a I_{gal} pode ser menor, mesmo que a i_{corr} indique um ataque mais intenso.

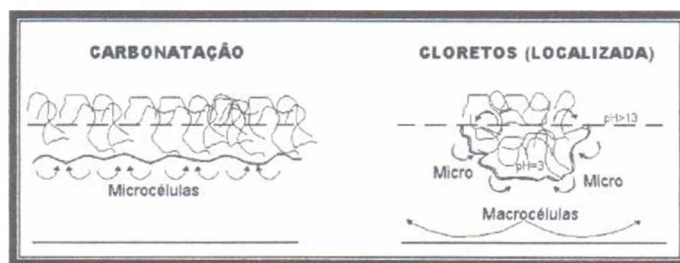


Figura 5.55 - Ação das microcélulas e macrocélulas nos ensaios de carbonatação e cloretos (ANDRADE e ALONSO, 1996)

Esperava-se que no ensaio de cloretos, a i_{corr} fosse menor, pois a contribuição dos pites é dividida pela área total do ânodo. No entanto, este problema é mais comum em barras de grande dimensão, o que não ocorre nas barras dos sensores, que são bastante reduzidas. Provavelmente, o ataque por cloretos foi mais intenso, e o grau de agressividade da corrosão foi preponderante em relação a área anódica exposta.

As série CA-SGA e CL-SGA mostraram que a variação das áreas anódica e catódica tem um comportamento diferenciado em função do tipo de ataque, por carbonatação ou por cloretos.

As Figura 5.19, Figura 5.21, Figura 5.47 e Figura 5.49, que encontram-se nas páginas 93, 96, 116 e 118 respectivamente, mostram que:

- a) Para o ensaio de carbonatação, a relação A_a/A_c aparentemente não foi preponderante, pois todas as barras chegaram ao final do ensaio com valores de I_{gal} na mesma ordem de grandeza. O que pôde ser observado foi uma tendência da barra com maior área exposta apresentar sinais precoces de corrosão, provavelmente em razão da maior probabilidade da frente de carbonatação alcançar algum ponto da mesma. Salienta-se que este comportamento não foi o mesmo para as séries CA-SGA1 e CA-SGA2.

b) Para o ensaio de cloretos, pode ser observada uma diferença sensível das medidas entre as três barras do sensor ao final do ensaio, através de I_{gal} , que demonstra uma maior sensibilidade quanto a variação de áreas neste tipo de ensaio. Os sinais de despassivação precoce de algumas barras no início do ensaio também devem ser em função da frente de cloretos ter alcançado-as primeiramente, e não em função da relação A_a/A_c .

Vale ressaltar que a relação área anódica/catódica é muito difícil de atribuída a outras grandezas, como mostrou SHORT et al. (1991). Em seu trabalho, esperava-se que a relação $I_{gal} = I_{corr} \times (A_a/A_c)$ fosse verdadeira, no entanto, mostrou-se ineficiente para as condições de ensaio proposto. Deste modo, as relações a partir deste parâmetro são muito difíceis e portanto, as observações acima citadas devem ser restritas às condições deste trabalho.

No decorrer das análises das séries de ensaio, através dos gráficos de correlação entre as grandezas, algumas proposições de faixas limites para definir o início da corrosão foram definidas, e um resumo das mesmas pode ser visualizado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Limites de despassivação padrões e encontrados nas séries de ensaio

Série	I_{gal}	E (INOX)	E (CMS)	i_{corr}	E (ECS)
REFERÊNCIA	-	-	-370 mV	0,1 a 0,2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	-275 mV
CA-SC	-	-	-440 a -460 mV -310 mV		
CA-SGE	3 a 7 μA	-200 a -260 mV -160 mV			
CA-SGA	1 a 4 μA	-130 a -200 mV -130 mV			
CL-SC	-	-	-390 a -400 mV -340 mV		
CL-SGE	0,20 a 0,70 μA	-20 a -70 mV -30 mV			
CL-SGA	0,25 a 0,70 μA	-25 a -80 mV -60 mV			

Fica clara a diferença na ordem de 10 entre os limites da carbonatação e cloretos, para medidas de I_{gal} e E(INOX). Os limites do sensor CMS foram praticamente os mesmos, mostrando que este sensor aparentemente não varia suas medidas sob diferentes condições de

ataque, apesar de não se manter estável.

Os limites encontrados para I_{gal} demonstram a dificuldade em avaliar a relação área anódica/catódica, já que podem mostrar comportamento distinto entre as séries, tornando este parâmetro confuso.

A utilização da barra catódica do sensor como referência para medidas de potenciais mostrou-se bem relacionada com as medidas de potencial ECS, no entanto, a diferença dos limites encontrados para os ensaios de carbonatação e cloretos impõe uma barreira a sua utilização, pois torna-se necessário uma melhor avaliação desta grandeza frente a condições variadas de ataque, inclusive sob ação conjunta de cloretos e carbonatação. O mesmo se aplica para os limites propostos para I_{gal} , que devem passar pela mesma avaliação, a fim de se obter valores representativos para indicar a despassivação das barras sob quaisquer condições de ataque.

Vale ressaltar que isto é um procedimento importante, a fim de não incorrer num erro, como o de utilizar os valores propostos pela ASTM C-876 para os ensaios de carbonatação, sendo que estes são relacionados apenas a cloretos. Ressalta-se que este procedimento é usual pela falta de referências sobre o assunto.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS

Através deste trabalho, que avaliou o desempenho de dois tipos de sensores de corrosão, um galvânico e outro de potencial de eletrodo, procurou-se verificar a estabilidade e sensibilidade dos mesmos frente às variações ambientais impostas, com o uso de metodologias de ensaio acelerado de corrosão, utilizando-se como elementos agressivos o CO_2 e os íons cloreto.

Durante o decorrer do trabalho, devido a alguns problemas não previsíveis, alguns desvios nas medidas ocorreram, no entanto, o desenvolvimento das séries de ensaio conseguiu proporcionar uma avaliação do comportamento dos sensores diante das variações ao qual foram submetidos, e a partir delas, pode-se chegar às seguintes conclusões:

- O sensor CMS não funcionou com a estabilidade necessária a um eletrodo de referência, como é preconizado pelo fabricante, principalmente quando submetido ao ataque de cloretos. Pode-se dizer que este sensor funcionou bem na detecção do avanço da frente de elementos agressivos, mesmo com a falta de estabilidade, tanto para o ensaio de carbonatação como para o ensaio de cloretos, no entanto, após o processo corrosivo ter se instalado, na fase de propagação, ele perde todos os parâmetros, inclusive podendo corroer-se. A princípio, o sensor não seria recomendado para avaliações a longo prazo, pois a cada processo corrosivo detectado, seria necessário a sua substituição por um novo. O ponto positivo para o mesmo é a facilidade de instalação e o baixo custo operacional, já que utiliza apenas um voltímetro para efetuar as medidas.
- A utilização do aço inox como elemento catódico do sensor mostrou ser uma opção de baixo custo, no entanto, eficiente na detecção do avanço de agentes agressivos. Esta idéia, proposta neste trabalho, em comparação com sensores de outros pesquisadores, que utilizam metais bastante nobres, como a platina e titânio, torna a utilização destes sensores galvânicos algo mais viável para a realidade brasileira. Ressalta-se que este sensor ainda carece de maiores estudos para poder se tornar comercial.
- Tanto no ensaio de carbonatação como no ensaio de cloretos, um dos sensores mostrou-se apto a detectar a despassivação da armadura de referência e o outro apresentou alguns problemas, mas as medidas galvânicas de ambos mostraram-se compatíveis com as medidas de i_{corr} , que foi a técnica eletroquímica de referência deste ensaio. Deste modo,

eles mostraram que são capazes de detectar variações do estado de corrosão das barras que servem como referência, e as medidas galvânicas podem vir a ser uma opção ao uso da técnica de resistência de polarização, após o estabelecimento de limites confiáveis para o início da despassivação. Isto é muito importante, pois o equipamento utilizado para executar medidas galvânicas é mais simples e menos dispendioso que um equipamento de R_p .

- As variações de áreas anódica e catódica utilizadas neste trabalho não mostraram-se significativas, apesar de em alguns momentos terem sido notadas diferenças nas medidas eletroquímicas. Torna-se necessário um estudo mais aprofundado para uma avaliação deste parâmetro. Verifica-se, no entanto, que a relação de áreas próximo a 1 mostrou-se adequada para ser usada nos sensores, pois apresentou os resultados mais próximos do que foi observado nas barras de referência.
- A utilização de fibra de vidro não se mostrou adequada para servir de corpo do sensor, pois propiciou o aparecimento de fissuras nos corpos-de-prova, o qual gerou um parâmetro a mais nas avaliações, que pode ter causado distorções em alguns resultados dos ensaios.
- A utilização da medida de potencial relativo à barra catódica do sensor como uma nova proposta de avaliação mostrou-se, em conjunto com I_{gal} , como um eficiente parâmetro auxiliar na identificação da corrosão das armaduras. Torna-se necessário, no entanto, um maior aprofundamento dos estudos para um estabelecimento de limites e parâmetros para a avaliação deste potencial.
- É possível a utilização de um potenciostato para medidas de R_p com o sensor galvânico, utilizando a barra catódica como contra-eletrodo e a barra anódica como eletrodo de trabalho. A vantagem disso é a eliminação do problema de confinamento de sinal, normalmente enfrentado nas medidas em estruturas reais. Este procedimento foi utilizado no decorrer deste trabalho, e mostrou-se eficiente. Apesar do potenciostato ser um equipamento mais dispendioso e de difícil manejo, as medidas de i_{corr} e E_{corr} por ele fornecidas são bastante confiáveis, e já estão bem estudadas e referenciadas na literatura científica nacional e internacional.

A partir das considerações expostas no decorrer deste trabalho, e em função do conhecimento adquirido nesta dissertação, sugere-se os itens abaixo discriminados como opções para futuros estudos sobre o tema:

- Montar e testar um sensor com um corpo metálico, revestido por uma pintura a base epoxi, que impedisse a sua corrosão e evitasse os problemas de fissuração do corpo-de-prova.
- Testar outros materiais metálicos para cátodo do sensor, como prata, ouro ou titânio, ou a combinação de mais de um metal, como cobre revestido de prata, ou prata revestida de ouro, por exemplo.
- Elaborar um estudo mais amplo, a fim de obter uma faixa limite de despassivação para as medidas de potencial com o aço INOX utilizado nas barras catódicas do sensor, e para as medidas de corrente e intensidade galvânicas relativas ao mesmo material.
- Avaliar o comportamento dos sensores sob outras condições micro-estruturais da argamassa, variando teor de cimento, relação água/cimento, uso de adições, etc.
- Avaliar o comportamento dos sensores submetidos à ação conjunta da carbonatação e dos íons cloretos, para predições de limites de despassivação mais genéricos.
- Deve-se procurar aumentar o tempo de permanência dos corpos-de-prova na estufa ou aumentar a temperatura, a fim de promover uma maior secagem do espécime, para que não surja mais um parâmetro a ser considerado nas avaliações do sensor, em função de haver água nos poros e possibilidade de corrosão na etapa de secagem.
- No ensaio de carbonatação, para o caso de serem utilizados cobrimentos na ordem de 0,5 cm, devem ser realizadas medidas menos espaçadas, a fim de melhor identificar o avanço da frente de CO₂.
- Investigar o mecanismo de ingresso de cloretos em corpos-de-prova de grandes dimensões, que apresentam baixa amplitude de resistência ôhmica.

- Avaliar a performance dos sensores sob condições reais de exposição às intempéries, verificando a sua estabilidade e sua sensibilidade com o auxílio de outras técnicas de monitoramento, como o uso do GECOR, por exemplo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AILING, D. et al. **The linear polarization method for corrosion rate measurement of reinforcing bar of concrete in situ.** 2º NACE - Latin American Region Corrosion Congress, Rio de Janeiro/Brasil, 1996, LA 96059.

ALMEIDA, M.V.V. **Contribuição ao estudo da corrosão no concreto armado através de medidas de polarização potencioestática.** Natal, 1996. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

American Society for Testing and Materials. **Standard practice for maintaining constant relative humidity by means of aqueous solutions. ASTM E 104.** In: Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 1992.

___ **Standard practice for developing accelerated test to aid prediction of the service life of building components and materials. ASTM E 362.** In: Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 1992.

___ **Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens. ASTM G1.** In: Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 1992.

___ **Standard test method for half cell potential of uncoated reinforcing steel in concrete. ASTM C 876,** In: Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 1992.

ANDRADE, C. **Corrosión localizada del acero en contato con hormigón.** Rev. Iber. Corros. y Prot., Vol. XV, Núm. 4, 1984.

ANDRADE, C. **Durabilidad.** Revista Hormigón y Acero, No. 182, 1º trimestre, 1992.

ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras.** 1ª Ed., São Paulo, PINI, 1992.

ANDRADE, C. **Nueva técnica electroquímica de medida de la corrosión de armaduras en homigones armados y pretensados. Empleo de aditivos inhibidores como método de**

- protección.** Tesis Doctoral, Fac. C. Químicas, Univ. Complutense de Madrid, pp 129, 1973.
- ANDRADE, C.; ALGABA, S.; GONZÁLEZ, J. A., **Corrosión de armaduras embebidas en hormigón carbonatado.** Materiales de Construcción, No. 181, 1981.
- ANDRADE, C.; ALONSO C.; GARCIA, A.M. **Oxygen availability in the corrosion of reinforcements.** Advances in Cement Research, 1990, 3, No. 11, July, 127-132.
- ANDRADE, C.; ALONSO, C. **Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site.** Construction and Building Materials, 1996, 10, No. 5, 315-328.
- ANDRADE, C.; FELIU, S. **Corrosión y protección metálicas.** Consejo Superior de Investigaciones Científica, Madrid, 1991.
- ANDRADE, C.; GONZÁLEZ, J. A. **Tendencias actuales en la investigación sobre corrosión de armaduras.** Informes de La Construcción, Vol. 40, No. 398, Nov/Dez, 1988.
- ANDRADE, C.; ALONSO, M.C.; GONZALEZ, J.A. **An Initial Effort to Use the Corrosion Rate Measurements for Estimating Rebar Durability.** In: Neal S. Berke, Victor Chaker, and David Whiting, eds. Corrosion Rates of Steel in Concrete. Philadelphia, ASTM, 1990. p. 29-37 (STP 1065).
- ANDRADE, C.; SANTOS, P.; ALONSO, C.; MACIAS, M. **Técnicas de medida de la corrosión de armaduras que pueden utilizar a pie de obra.** IETCC, Madrid.
- ANSUINI, F.J.; DIMOND, J.R. **Long-term stability testing of reference electrodes for reinforced concrete.** Corrosion/94, paper No. 295, 1994.
- ARYA, C.; VASSIE, P.R.W. **Effective cathode to anode ratio and reinforcement corrosion in concrete.** In: Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction, p.33-42, The Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK, 1996.
- ASHWORTH, V. **Corrosion protection techniques.** Corrosion: Industrial problems, treatment and control techniques, KFAS Proceedings Series Volume 2, 1987, Pergamon

Press, UK, 1-15.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Agregado em estado solto - determinação da massa unitária. NBR 7251**, Rio de Janeiro, 1982.

___ **. Agregados - Determinação da Massa específica de agregados miúdos pelo frasco de Chapman. NBR 9776**. Rio de Janeiro, 1987.

___ **. Agregados - Determinação da composição granulométrica. NBD 7217**. Rio de Janeiro, 1987.

___ **. Barras e fios de aço destinados a armadura para concreto armado. NBR 7480**, Rio de Janeiro, 1985

BAKKER, R.F.M.. Initiation period. In: SCHIESSL, P. ed. **Corrosion of Steel in Concrete**, RILEM Technical Committee 60-CSC, London, Chapman e Hall, 1988.

BALASUBRAMANIAN, T.M. et al. **Testing methods for corrosion of reinforced concrete**.

BAUER, E. **Avaliação comparativa da influência da adição da escória de alto forno na corrosão das armaduras através de técnicas eletroquímicas - contribuição ao estudo da durabilidade das estruturas de concreto armado**. São Paulo, 1995 - Tese (Doutorado) - Escola Politécnica - Universidade de São Paulo.

BAUER, E. **Parâmetros e grandezas de importância no estudo da evolução da corrosão das armaduras no concreto**. 38ª REIBRAC, volume 1 - Reabilitação de Estruturas de Concreto, SP, 1996.

BAUER, E. **Técnicas de avaliação e monitoramento do estado de corrosão das armaduras em concreto armado**. Brasília, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, 1991. (Relatório Interno)

BERKE, N.S.; STARK, P. **Evaluating and testing for corrosion resistance**. Concrete

International, Sep. 1985.

BRITO, N.E.D. **Avaliação do grau de corrosão das armaduras em estruturas de concreto carbonatadas**. São Paulo, 1997. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica - Universidade de São Paulo.

BROOMFIELD, J.P. **Permanent corrosion monitoring**. Construction Repair:Concrete Repair 5, 44-49, 1996.

CASTANHEIRA, A. P. A. **Estudo de um sistema de reparo mais eficaz para uma estrutura de concreto armado contaminada por cloretos**. Brasília, 1997. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil - Universidade de Brasília.

COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON - CEB. **Bulletin d'Information**. Paris, n.192, 1989.

CEB-RILEM. **Durability of concrete structures**. Workshop Report, 1983, May, Copenhagen.

CHAWLA, S.K.; ANGUISH, T.; PAYER, J.H. **Microsensors for corrosion control**. Material Performance, 1990, May, 68-74.

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

DAROWICKI, K. **The application of impedance measurements for the determination of the probability of the course of corrosion processes**. Corrosion Science, 1997, 39, No. 6, 1087-1092.

FEIJÃO, C.H.L.; BAUER, E. **Galvanic Sensor for Reinforced Concrete Structures Using Stainless Steel Bars**. NDTISS'99 - International Symposium on Nondestructive Testing Contribution to the Infrastructure Safety Systems in the 21st Century, Torres/Brasil, 1999.

FEIJÃO, C.H.L.; BAUER, E. **Sensores de Corrosão Para Estruturas de Concreto Armado**. 40º Congresso Brasileiro de Concreto (REIBRAC), São Paulo/Brasil, 1998.

FEIJÃO, C.H.L.; BAUER, E. **Sensores para Monitoramento da Corrosão em Estruturas de Concreto**. 55º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Rio de Janeiro, 2000

FELIU, S.; FELIU, V.; GONZÁLEZ, J.A.; ANDRADE, C. **Polarization resistance measurements in large concrete specimens: mathematical solution for a unidirectional current distribution**. *Materials and Structures*, 1989, 22, 199-205.

FELIU, S.; GONZÁLEZ, J.A.; ESCUDERO, M.L.; FELIU, S. JR.; ANDRADE, C. **Possibilities of the "guard ring" for the confinement of the electrical signal in polarization measurements of reinforcements**. *Corrosion-NACE*, 1989, Paper No. 623.

FELIU, S.; GONZÁLEZ, J.A.; FELIU, S. JR.; ANDRADE, M.C.; **Confinement of the electrical signal for in situ measurement of polarization resistance in reinforced concrete**. *ACI Materials Journal*, 1990, 87, No. 5, 457-460.

FIGUEIREDO, C.R. **Contribuição ao estudo da capacidade de proteção de argamassas com sílica ativa para reparos estruturais**. Brasília, 1998. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil - Universidade de Brasília.

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

IORE, S.; POLDER, R.B.; CIGNA, R. **Evaluation of the concrete corrosivity by means of resistivity measurements**. In: *Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction*, p.273-282, The Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK, 1996.

FURTADO, P. **Introdução à corrosão e proteção das superfícies metálicas**. Imprensa Universitária da UFMG, Belo Horizonte, 1981.

GALVEZ, I.R.M. **Corrosión en estructuras de hormigón debida a la acción de macro pares situados en paralelo.** Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Químicas, Madrid, 1980

GENTIL, V. **Corrosão.** 3ª Ed., Rio de Janeiro, LTC, 1996.

GONZÁLEZ J.A.; ROCHA, G.; VALENCIA, M. **Efeito de los cloruros en la velocidad de corrosion de aceros al carbono en concreto armado.** Ver. Iber. Corros. Y Prot., 1987, 17-22.

GONZÁLEZ, J.A.; BAUTISTA, A.; RODRÍGUEZ, P; MARIACA, L. **Use of electrochemical noise for studying the rate of corrosion of reinforcements embedded in concrete.** Materials and Structures, 1997, 30, 613-617.

GONZÁLEZ, J.A.; FELIU, S.; ANDRADE, C. E.; RODRIGUEZ, I. **On-site detection of corrosion in reinforced concrete structures.** Materials and Structures, 1991, 24, 346-350.

GONZÁLEZ, J.A.; ANDRADE, C; ESCUDERO, M. L. **Corrosión de las armaduras por carbonatación del hormigón.** Rev. Iber. Corros. y Prot., Vol. XV, No. 4, 1984.

GRIMALDI, G.; RAHARINAIVO, A. **Measuring the half cell potential of steel embedded in immersed concrete: principles and application.** In: Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction, p.313-319, The Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK, 1996.

GUIMARÃES, E.A. **Avaliação da capacidade protetora da resina de óleo de mamona contra a penetração de agentes agressivos no concreto.** Brasília, 1997. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil - Universidade de Brasília.

GULIKERS, J. **Development of a galvanic corrosion probe to assess the corrosion rate of steel reinforcement.** In: Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction, p.327-336, The Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK, 1996.

GULIKERS, J.J.W.; MIER, J.G.M. **Determination of the corrosion rate of steel**

reinforcement by galvanic testing. Corrosion Science

HANSSON, C. M. **Comments on electrochemical measurements of the rate of corrosion of steel in concrete.** Cement and Concrete Research, 1984, 14, No. 4, 574-584.

HAWKINS, C.; MCKENZIE, M. **Environmental effects on reinforcement corrosion rates.** In: Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction, p.166-175, The Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK, 1996.

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

HELENE, P.R.L. **Corrosão em armaduras para concreto armado.** 1ª Ed., São Paulo, PINI, 1986.

HELENE, P.R.L.; FIGUEIREDO, E.P. **Assim caminha a corrosão.** In: Revista Técnica, no. 10, p. 28-33, São Paulo, 1994.

HLADKY, K.E.; DAWSON, J.L. **The measurement of localized corrosion using electrochemical noise.** Corrosion Science, 1981, 21, No. 4, 317-322.

HOBBS, D.W. **Chloride ingress and chloride-induced corrosion in reinforced concrete members.** In: Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction, p.124-135, The Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK, 1996.

JOHN, D.J. et al. **Electrochemical techniques for the investigation and monitoring of the corrosion of reinforcing steel in concrete.** Corrosion: Industrial problems, treatment and control techniques, KFAS Proceedings Series Volume 2, 1987, Pergamon Press, UK, 485-498.

JOHN, G. **Systems for monitoring corrosion in new and existing structures.** Construction Repair, 1996, Nov/Dec, 14-17.

KAZMIERCZAK, C.S.; LINDENMEYER, Z. **Comparação entre metodologias utilizadas para a determinação da profundidade de carbonatação em argamassas.** International Congress of High-Performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures, 1996.

KAUFFMAN, A.M. **Understanding electrochemical cells.** Technical Report Number 017/85, Solartron Instruments, 1985.

LAMBERT, P.; PAGE, C.L.; VASSIE, P.R.W. **Investigation of reinforcement corrosion. 2. Electrochemical monitoring of steel in chloride-contaminated concrete.** Materials and Structures, 1991, 24, 351-358.

LABORATÓRIO DE ENSAIO DE MATERIAIS - LEM. **Ensaio físicos do cimento CP II F-32.** Relatório interno. Brasília, UnB, 1997.

LIMA, M.G. **Influência dos componentes do concreto na corrosão das armaduras.** Porto Alegre, 1989. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LIMA, M.G. **Inibidores de corrosão - Avaliação da eficiência frente a corrosão de armaduras provocadas por cloretos.** São Paulo, 1996. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica - Universidade de São Paulo.

LORENZ, W.J; MANSFELD, F. **Determination of corrosion rates by electrochemical DC and AC methods.** Corrosion Science, 1981, 21, No. 9, 647-672.

MALO, J.M.; URUCHURTU, J. **Corrosion mapping of steel reinforced in concrete exposed to a galvanizing process atmosphere.** Intercorr96, Session1, 1996.

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

MATOS, O.C. **O controle da corrosão de armaduras em concreto - inspeção e técnicas**

eletroquímicas. Ed. UFG/Pini, Goiânia, 1997.

METHA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** Ed. Pini, SP, 1994.

MIRANDA, L.M.; NOGUEIRA, R. **Medidas de potencial de eletrodo em armaduras de concreto: avaliação do estado de corrosão.** In: Seminário Nacional da Corrosão na Construção Civil, 2., Rio de Janeiro, 1986. Anais. Rio de Janeiro, ABRACO, 1986.

MIYAGAWA, T. **Durability design and repair of concrete structures: chloride corrosion of reinforcing steel and alkali-aggregate reaction.** Magazine of Concrete research, 1991, 43, No. 156, Sept., 155-170.

MONTALVÃO, L.G. **Sistema e metodologia para a avaliação polarográfica da corrosão das armaduras em estruturas de concreto.** Brasília, 1992. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Elétrica - Universidade de Brasília.

MONTEIRO, E.C.B. **Estudo da capacidade de proteção de alguns tipos de cimentos nacionais, em relação à corrosão de armaduras sob ação conjunta de CO₂ e íons cloretos.** Brasília, 1996. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil - Universidade de Brasília.

MOSKVIN, V., IVANOV, F.; ALEKSEYEV, S.; GUZEYEV, E. **Concrete and reinforced concrete deterioration and protection.** Mir Publishers, Moscow, 1980.

NEPOMUCENO, A.A. **Comportamiento de los morteros de reparacion frente la carbonatacion y a la penetracion de cloruros en estructuras de hormigon armado dañadas por corrosion de armaduras, estudio mediante la tecnica de resistencia de polarizacion.** Tesis Doctoral, Universidad Politecnica de Madrid, 1992.

NEWTON, C.J.; SYKE, J.M. **A galvanostatic pulse technique for investigation of steel corrosion in concrete.** Corrosion Science, 1988, 28, No. 11, 1051-1074.

NEWTON, C.J.; SYKE, J.M. **Effect of mix specification on corrosion of steel in mortars**

immersed in chloride solutions. Br. Corros. J., 1991, 26, No. 1, 31-45.

NGALA, V.T.; PAGE, C.L. **Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes.** Cement and Concrete Research, Vol. 27, No. 7, pp. 995-1007, 1997.

OHNO, Y.; PRAPARNTANATORN, S.; SUSUKI, K. **Influence of cracking and water cement ratio on macrocell corrosion of steel in concrete.** In: Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction, p.24-32, The Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK, 1996.

OLTRA, R.; KEDDAN, M. **Application of impedance technique to localized corrosion.** Corrosion Science, 1988, 28, No. 1, 1-18.

PAGE, C.L. Basic principles of corrosion. In: SCHIESSL, P. ed. **Corrosion of Steel in Concrete**, RILEM Technical Committee 60-CSC, London, Chapman e Hall, 1988.

PANOSSIAN, Z. et al. **Corrosão e proteção contra corrosão em equipamentos e estruturas metálicas.** Volume 1, 1ª ed. São Paulo, IPT, 1993.

PAPADAKIS, M; VENVAT, M. **Manuel du laboratoire d'essais des ciments mortiers, bétons.** Éditions Eyrolles, 1969.

PEARSON, B.R.; BROOK, P.A. **The synthesis of electrode polarization curves.** Corrosion Science. 1991, 32, No. 4, 387-398.

PEBERE, N. et al. **Evaluation of corrosion performance of coated steel by the impedance technique.** Corrosion Science, 1989, 29, No. 9, 1073-1086.

POSADAS, D. **Introducción a la electroquímica.** Secretaria General de la Organización de los Estados Americanos, Programa de Desarrollo Científico y Tecnológico, Washington, D.C., 1980.

POURBAIX, M. **Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solution.** Oxford, Pergamon Press, 1966.

PRINCE, W.; PÉRAMI, R.; ESPAGNE, M. **Mechanisms involved in the accelerated test of chloride permeability.** Cement and Concrete Research 29, pp. 687-694, 1999.

PRINCETON APPLIED RESEARCH. **Electrochemistry and corrosion overview and techniques.** EG&G Electrochemistry Instruments Division, Application Note Corr-4.

PRUDÊNCIO, W.J. **Carbonatação da superfície das estruturas de concreto armado.** In: Sem. Nacional de Corrosão na Construção Civil, ANAIS, ABRACO, Rio de Janeiro, pp. 147-159, 1986.

RAMANATHAN, L.V.; COSTA, I. **Problemas em Controle de Corrosão.** 14º Seminário Nacional de Corrosão - Anais, 1987, São Paulo, pg. 15-25.

RAUPACH, M. **Chloride-induced macrocell corrosion of steel in concrete - theoretical background and practical consequences.** Elsevier Science Ltd., 1996.

RAUPACH, M. **Corrosion of steel in the area of cracks in concrete: laboratory test and calculations using a transmission line model.** In: Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction, p.13-23, The Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK, 1996.

RILEM DRAFT RECOMMENDATION (1994). **Draft Recommendation for repair Strategies For Concrete Structures Damage by Reinforcement Corrosion,** TC-124, 27, pp. 415-436.

ROCCHINI, G. **A contribution to the understanding of the linear polarization method.** Corrosion Science, 1992, 33, No. 10, 1593-1606.

ROCCHINI, G. **Corrosion rate monitoring by the linear polarization method.** Corrosion Science, 1993, 34, No. 12, 2031-2044.

RODRÍGUEZ, J.; ORTEGA, L.M.; CASAL, J. **Load bearing capacity of concrete columns with corroded reinforcement.** In: Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction, p.220-232, The Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK, 1996.

RODRÍGUEZ, P.; GONZÁLEZ, J.A. **Use of the coloustatic method for measuring corrosion rates of embedded metal in concrete.** Magazine of Concrete Research, 1994, 46, No. 167, 91-97.

RODRÍGUEZ, P.; RAMÍREZ, E.; GONZÁLEZ, J.A. **Methods for studying corrosion in reinforced concrete.** Magazine of Concrete Research, 1994, 46, No. 167, 81-90.

SATO, N.M.N.S. **Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concretos.** São Paulo, 1998. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica - Universidade de São Paulo.

SCHIESSL, P. **Corrosion of steel in concrete.** RILEM, Technical Committee 60-CSC. Chapman and Hall, New York, 1988.

SCHIESSL, P. et al. **Repair strategies for concrete structures damaged by reinforced corrosion.** Materials and Structures, 1994, 27, 415-436.

SCHIESSL, P.; RAUPACH, M. **Laboratory studies and calculations on the influence of crack width on chloride-induced corrosion of steel in concrete.** ACI Materials Journal, 1997, 94 No. 1, 56-62.

SCHIESSL, P.; RAUPACH, M. **Monitoring System for the Corrosion Risk for Steel in Concrete.** In: Concrete International (1992), Nr. 7, p.52-55.

SCHIESSL, P.; RAUPACH, M. **Monitoring the corrosion risk for the reinforcement. A new sensor system for use in existing structures.** Internal paper.

SHALABY, H.M.; AL-MAZEEDI, H. **The corrosion characteristics of reinforcing steel in actual and simulated marine environments.** Corrosion: Industrial problems, treatment and control techniques, KFAS Proceedings Series Volume 2, 1987, Pergamon Press, UK, 539-552.

SHORT, N.R.; PAGE, C.L.; GLASS, G.K. **Design and operation of a galvanic sensor for**

in service monitoring of the corrosion of steel in concrete. Proc. 2nd, European Conf. On Smart Structures and Materials, Eds. ^a McDonach, P.T. Gardner, RS McEwen, B Culshaw, SPIE - The International Society for Optical Engineering, Glasgow, 2361, 1994, pp 172-175.

SHORT, N.R.; PAGE, C.L; E GLASS, G.K. **A galvanic sensor for monitoring corrosion of steel in carbonated concrete.** Magazine of Concrete Research, 1991, 43, No. 156, 149-154.

SITTER, W. **Interdependence between technical service life prediction.** CEB-RILEM 2nd Int. Workshop. Prediction of Service Life of Concrete Structures, Bologna, Oct, 1986.

SRINIVASAN, S.; KANE, R.D. **Materials and corrosion resources on the internet.** 2^o NACE - Latin American Region Corrosion Congress, Rio de Janeiro/Brasil, 1996, LA 96233.

STERN, M.; GEARY, A.L. **Electrochemical polarization. 1 .A theoretical analysis of the shape of the polarization curves.** Jornal of Electrochemical Society, v.104, n.1, p.56-63, 1957.

TAMURA, H; NAGAYAMA, M.; SHIMOZAWA, K. **Rebar corrosion monitoring using embedded minisensors.** In: Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction, p.294-302, The Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK, 1996.

TANAKA, D.K. **Mecanismo eletroquímico da corrosão.** Coord. Corrosão e Proteção Contra Corrosão de Metais, São Paulo, IPT, 1979, 6-39.

TEIXEIRA, M.P. **Metodologias auxiliares para diagnóstico de patologias de corrosão em estruturas de concreto.** Brasília, 1998. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil - Universidade de Brasília.

TREADAWAY, K. Corrosion Period. In: SCHIESSL, P. ed. **Corrosion of Steel in Concrete,** RILEM Technical Committee 60-CSC, London, Chapman e Hall, 1988.

TULLMIN, M.A.A.; HANSSON, C.M.; ROBERGE, P.R. **Electrochemical techniques for measuring reinforcing steel corrosion.** Intercorr/96 - Session L.

TURNER, M.E.D. **Practical applications of corrosion monitoring**. Corrosion: Industrial problems, treatment and control techniques, KFAS Proceedings Series Volume 2, 1987, Pergamon Press, UK, 65-70.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1982.

VASCONCELOS, K.L. **Avaliação comparativa da eficiência de inibidores de corrosão em armaduras de concreto**. Brasília, 1997. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil - Universidade de Brasília.

VILELLA, T.R.S. **Monitoramento da corrosão em argamassa armada**. 2º NACE - Latin American Region Corrosion Congress, Rio de Janeiro/Brasil, 1996, LA 96220.

WHEAT, H.G.; ELIEZER, Z. **Some electrochemical aspects of corrosion of steel in concrete**. Corrosion-NACE, 1985, 41, No. 11, 640-645.

WIETEK, B. **Monitoring the corrosion of steel in concrete**. F.I.P. Symposium on Post-tensioned Concrete Structures, Concrete Society, London, 1996.

WIETEK, B; KUNZ, E.G. **Permanent corrosion monitoring for reinforced and prestressed concrete structures**. Internal paper, 1998

WOLINEC, S. **Cinética e processos de eletrodo**. In: Agostinho, S.N.L., Introdução à engenharia eletroquímica: processos eletrometalúrgicos. 2ª Ed., São Paulo, ABM, 1987, 77-129.

ANEXO I
FIGURAS DOS ENSAIOS DE CARBONATAÇÃO E CLORETOS

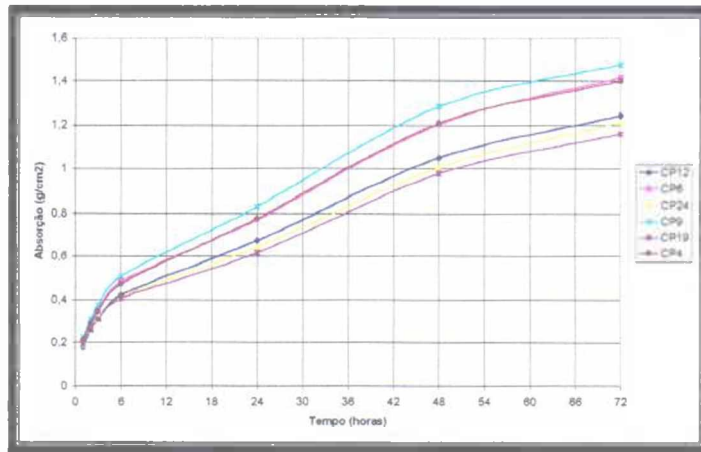


Figura I.1 - Ensaio de absorção capilar

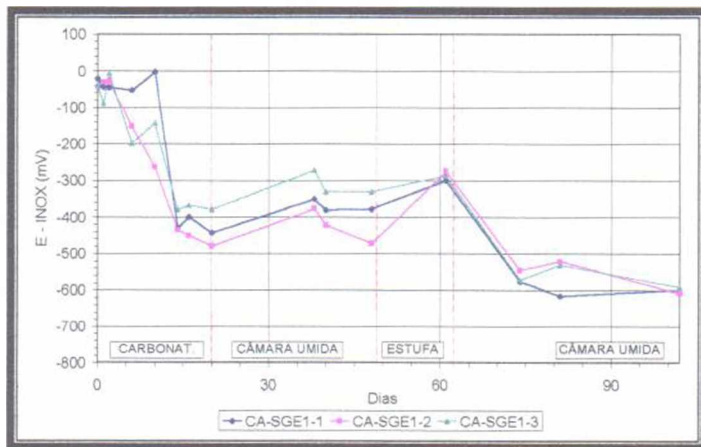


Figura I.2 - Evolução do potencial INOX - Série CA-SGE1

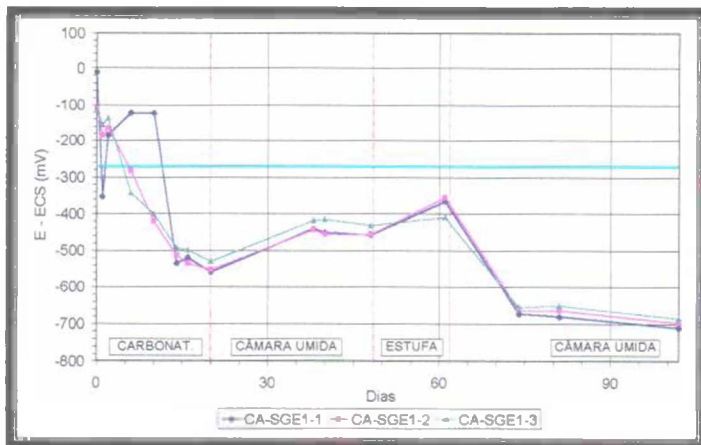


Figura I.3 - Evolução do potencial ECS - Série CA-SGE1

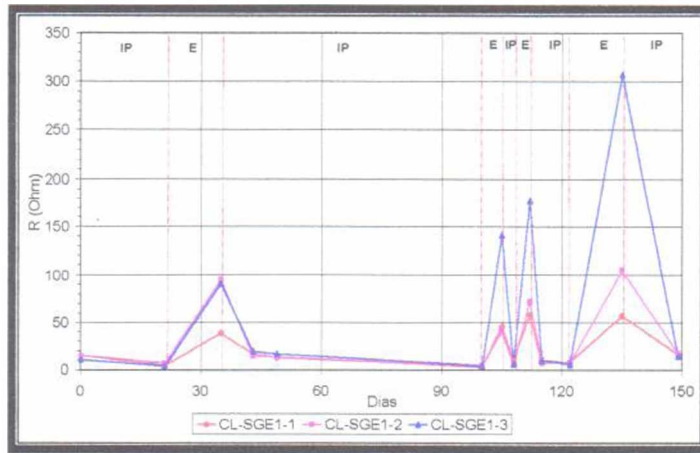


Figura I.4 - Evolução da resistência ôhmica - Série CL-SGE1

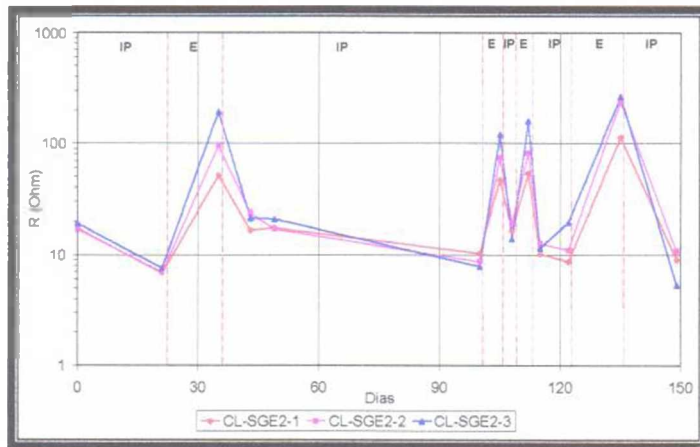


Figura I.5 - Evolução da resistência ôhmica - Série CL-SGE2

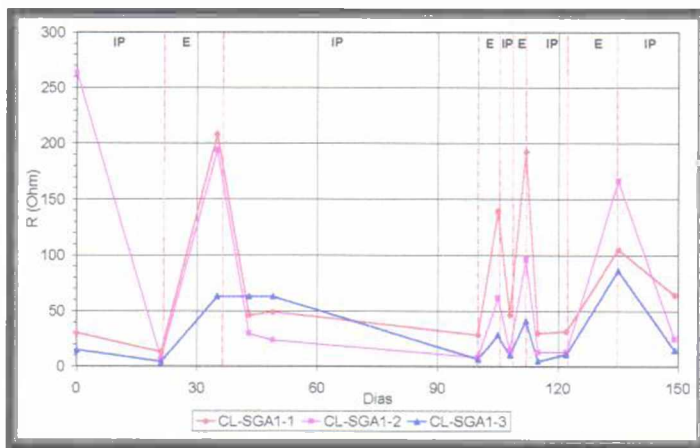


Figura I.6 - Evolução da resistência ôhmica - Série CL-SGA1

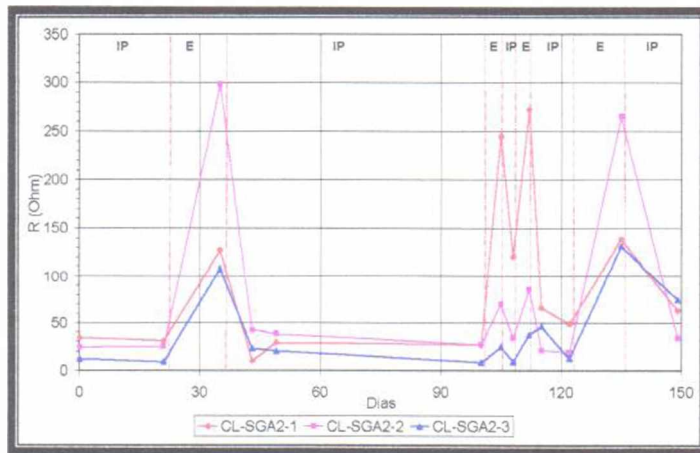


Figura I.7 - Evolução da resistência ôhmica - Série CL-SGA2

ANEXO II
TABELAS DE MEDIÇÕES

ANEXO III
FIGURAS AMPLIADAS DAS MEDIDAS ELETROQUÍMICAS

SÉRIES CA-BL E CA-SC

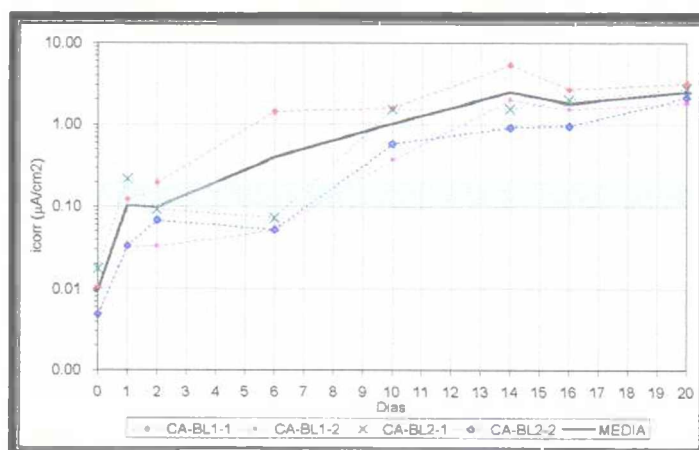


Figura III.1 - Intensidade de Corrosão - Série CA-BL - Ampliado

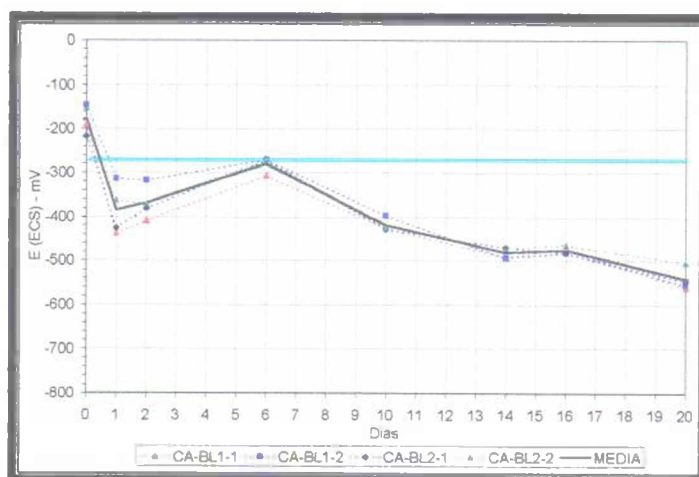


Figura III.2 - Potencial de Corrosão - Série CA-BL - Ampliado

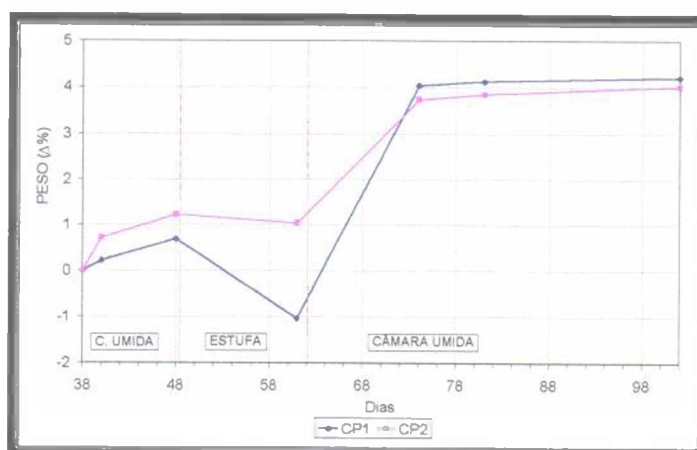


Figura III.3 - Evolução da massa dos CPs - Série CA-BL

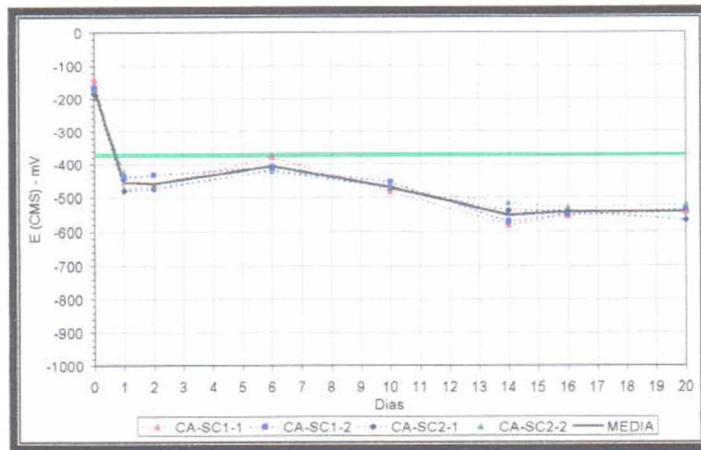


Figura III.4 - Potencial (ECS) - Série CA-SC - Ampliado

SÉRIE CA-SGE1

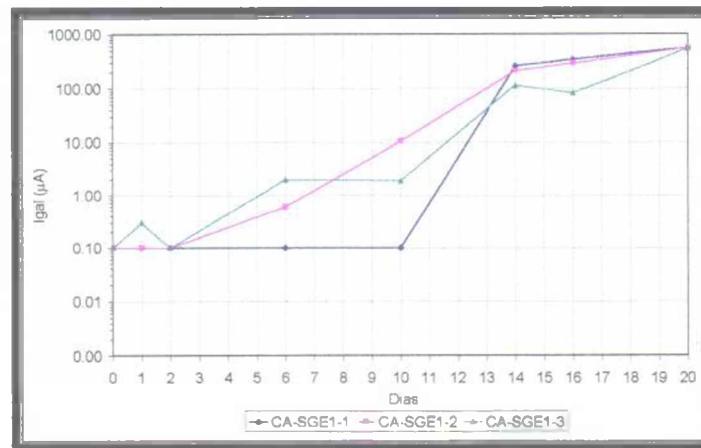


Figura III.5 - Corrente galvânica - Série CA-SGE1 - Ampliado

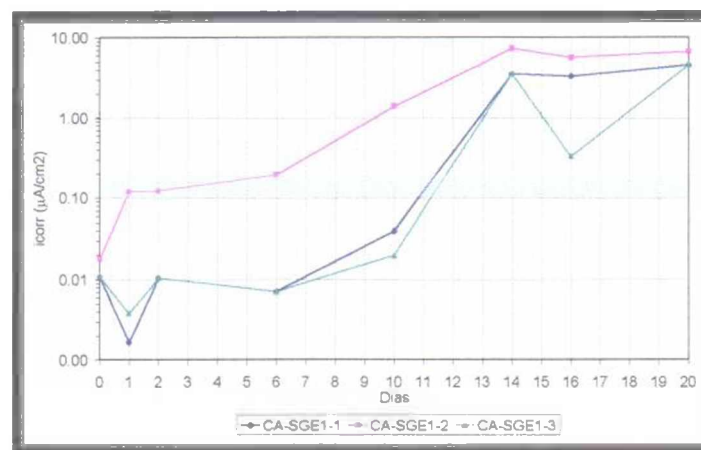


Figura III.6 - Intensidade de corrosão - Série CA-SGE1 - Ampliado

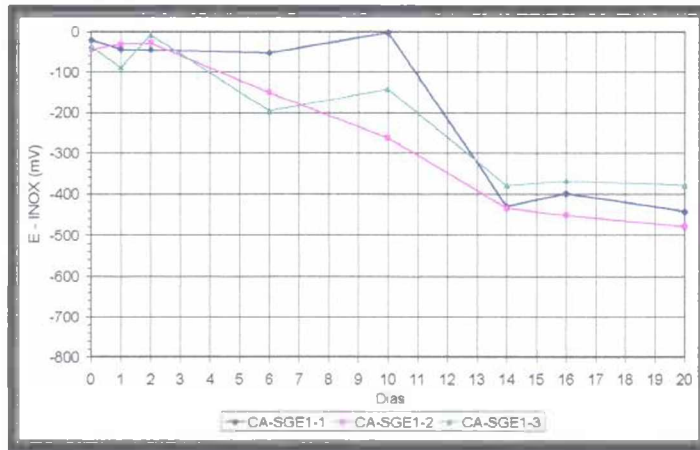


Figura III.7 - Potencial (Inox) - Série CA-SGE1 - Ampliado

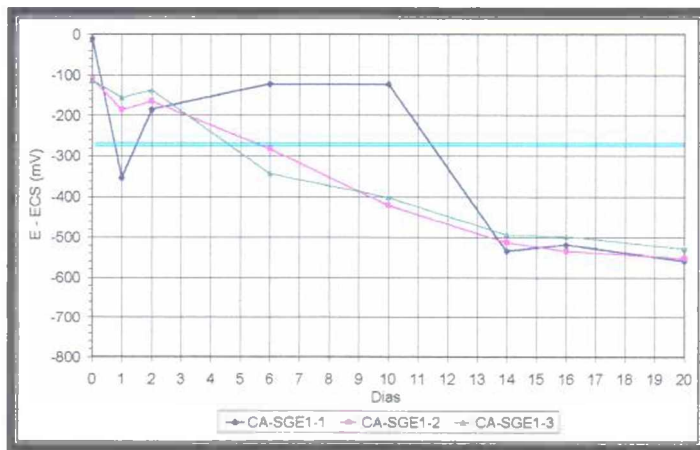


Figura III.8 - Potencial (ECS) - Série CA-SGE1 - Ampliado

SÉRIE CA-SGE2

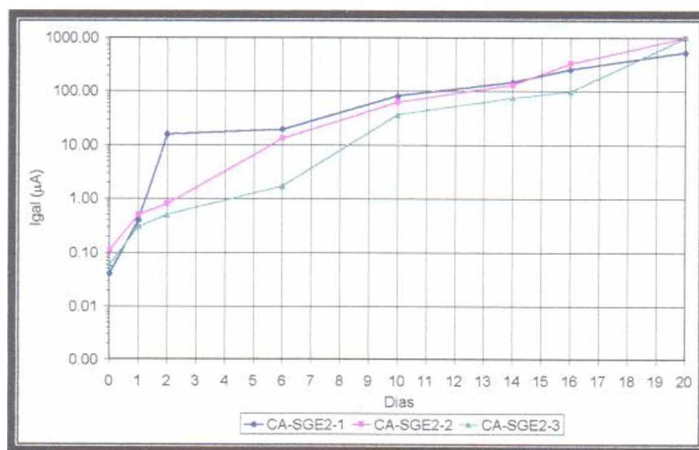


Figura III.9 - Corrente galvânica - Série CA-SGE2 - Ampliado

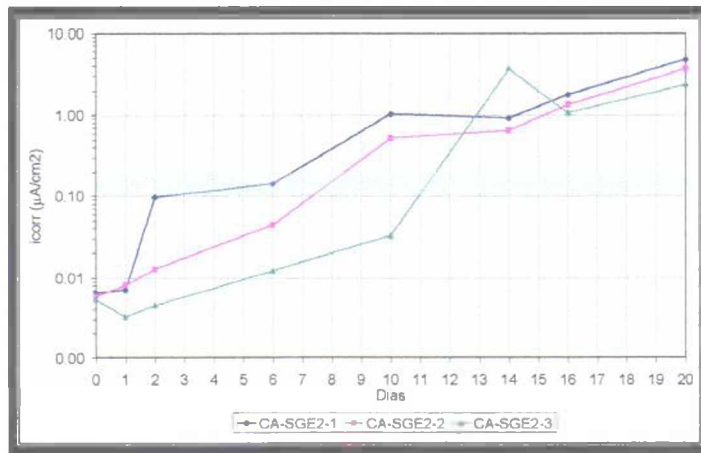


Figura III.10 - Intensidade de corrosão - Série CA-SGE2 - Ampliado

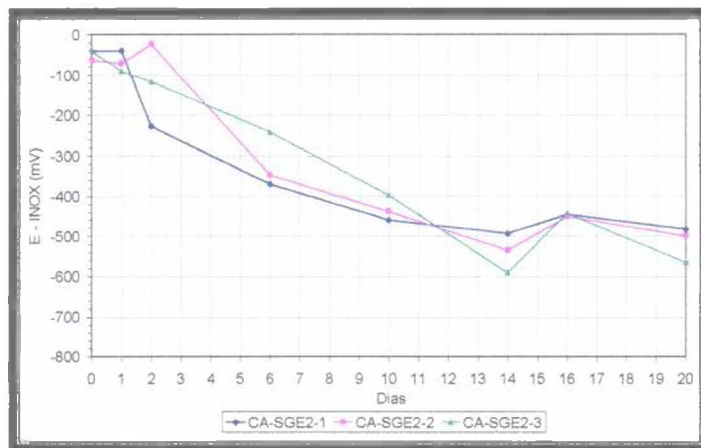


Figura III.11 - Potencial (Inox) - Série CA-SGE2 - Ampliado

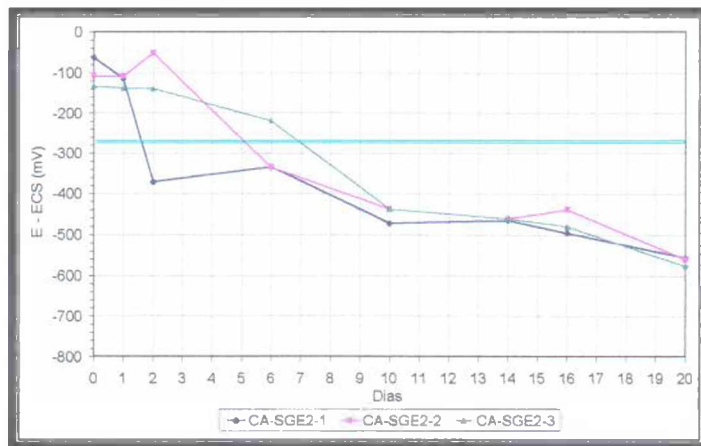


Figura III.12 - Potencial (ECS) - Série CA-SGE2 - Ampliado

SÉRIE CA-SGA1

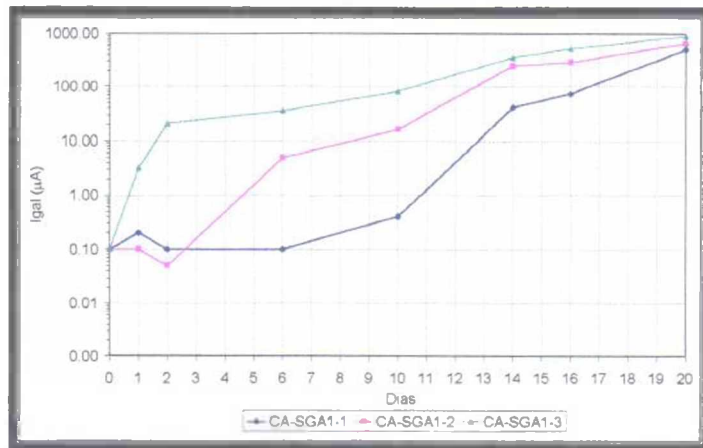


Figura III.13 - Corrente galvânica - Série CA-SGA1 - Ampliado

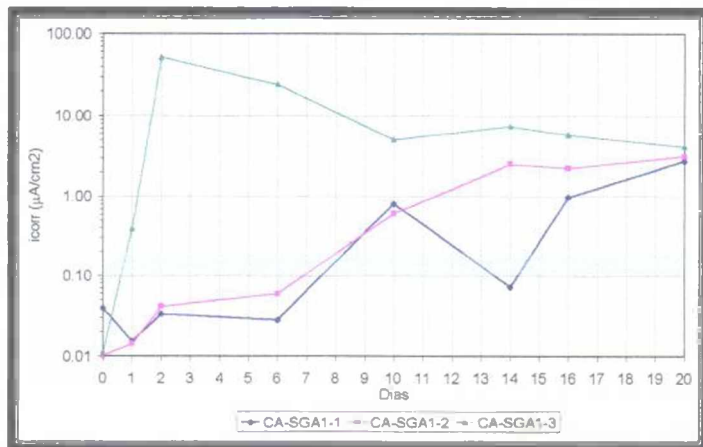


Figura III.14 - Intensidade de corrosão - Série CA-SGA1 - Ampliado

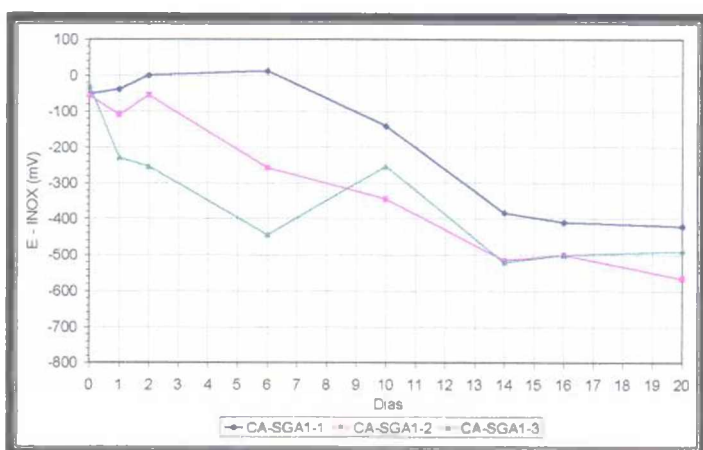


Figura III.15 - Potencial (Inox) - Série CA-SGA1 - Ampliado

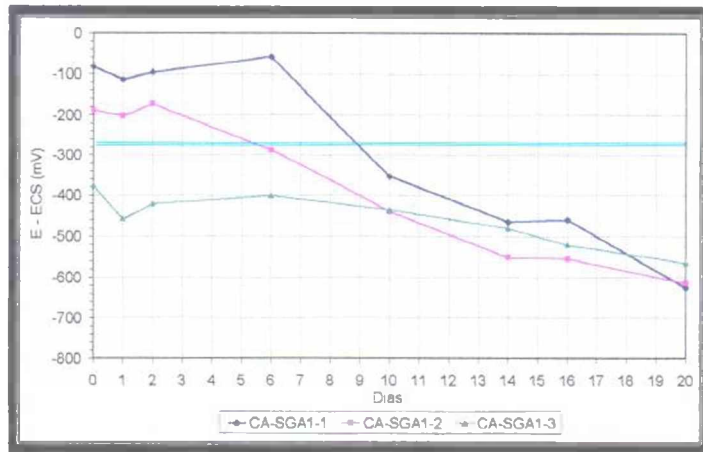


Figura III.16 - Potencial (ECS) - Série CA-SGA1 - Ampliado

SÉRIE CA-SGA2

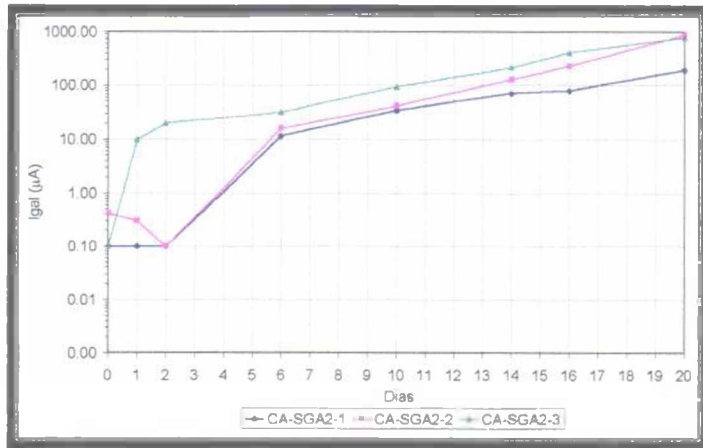


Figura III.17 - Corrente galvânica - Série CA-SGA2 - Ampliado

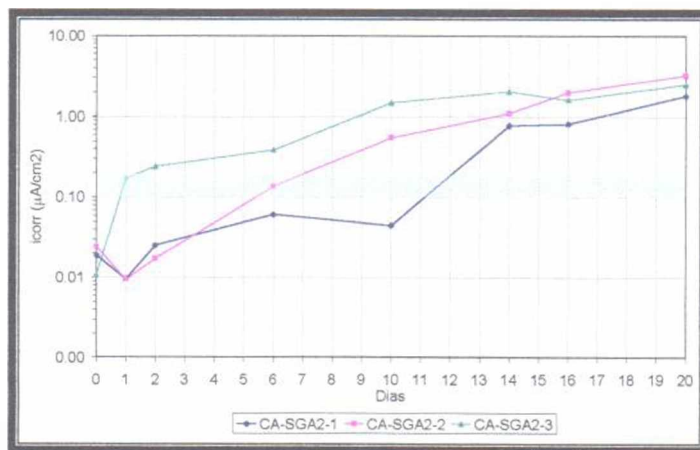


Figura III.18 - Intensidade de corrosão - Série CA-SGA2 - Ampliado

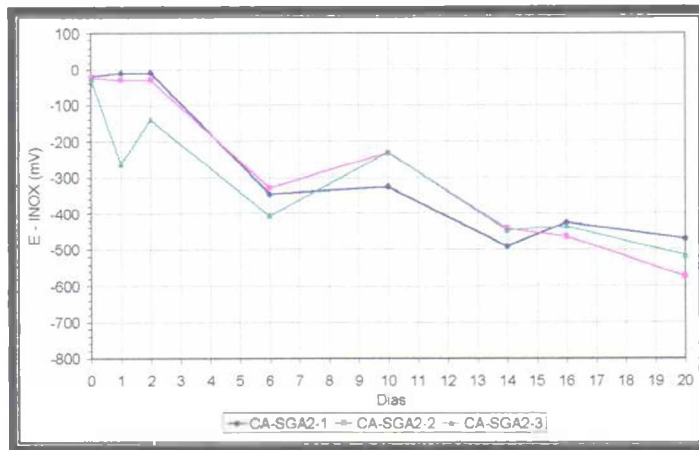


Figura III.19 - Potencial (Inox) - Série CA-SGA2 - Ampliado

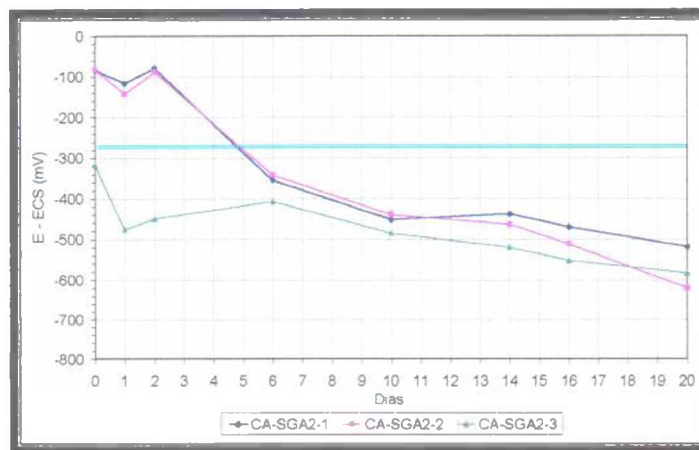


Figura III.20 - Potencial (ECS) - Série CA-SGA2 - Ampliado

SÉRIES CL-BL E CL-SC

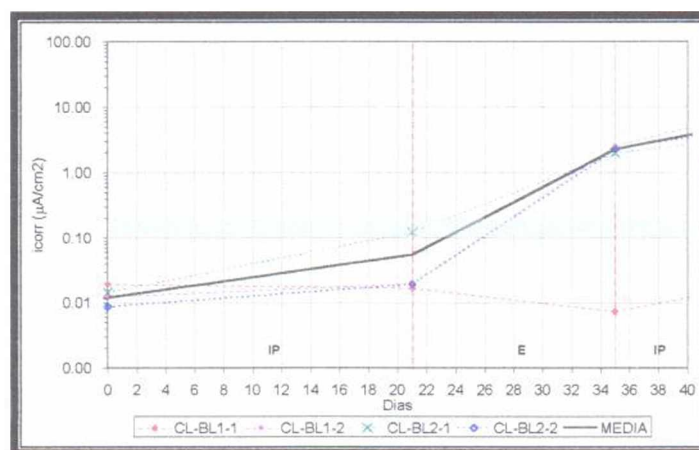


Figura III.21 - Intensidade de Corrosão - Série CL-BL - Ampliado

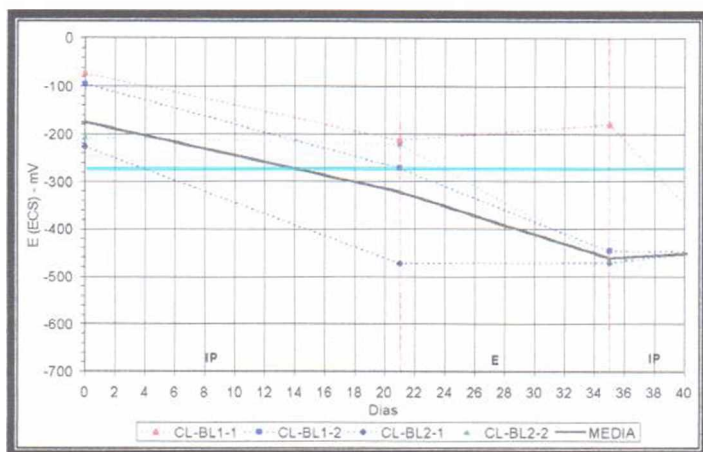


Figura III.22 - Potencial de Corrosão - Série CL-BL - Ampliado

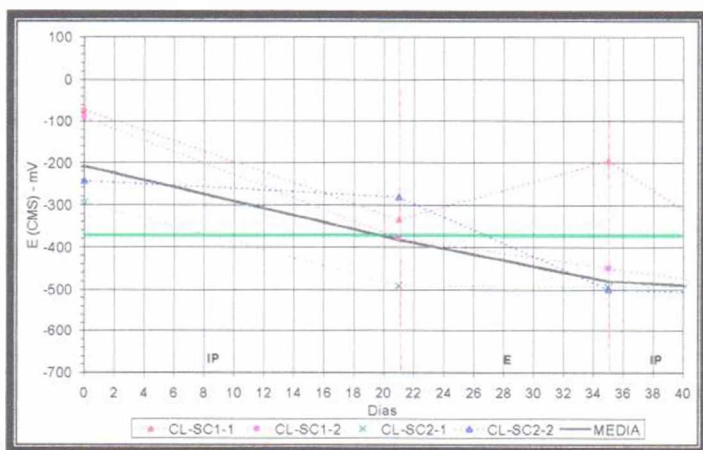


Figura III.23 - Potencial (ECS) - Série CL-SC - Ampliado

SÉRIE CL-SGE1

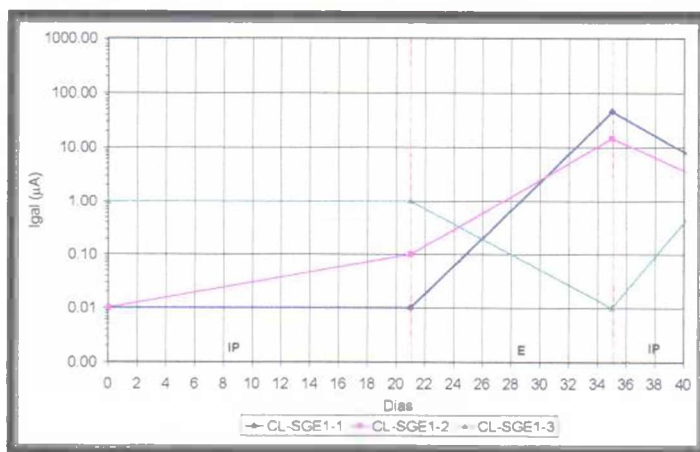


Figura III.24 - Corrente galvânica - Série CL-SGE1 - Ampliado

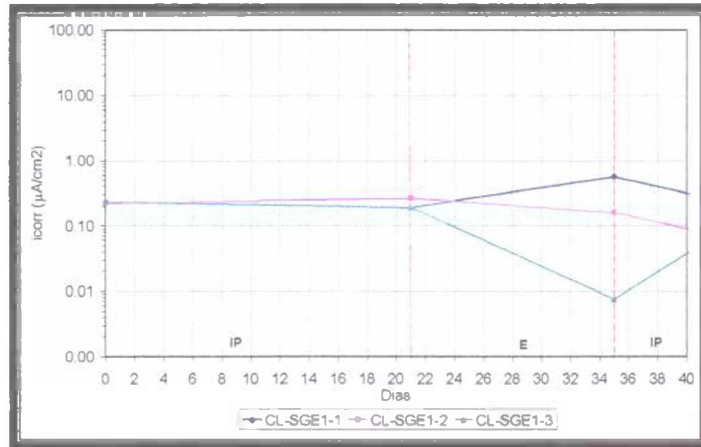


Figura III.25 - Intensidade de corrosão - Série CL-SGE1 - Ampliado

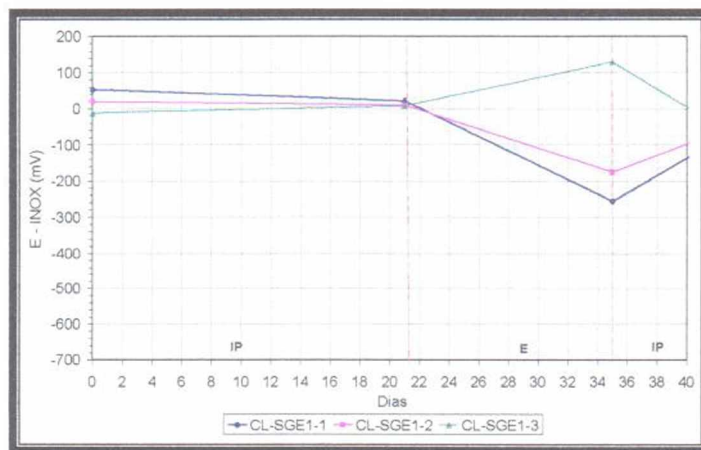


Figura III.26 - Potencial (Inox) - Série CL-SGE1 - Ampliado

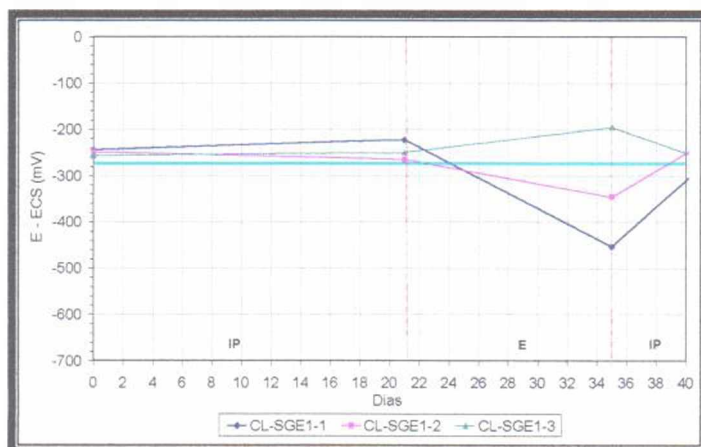


Figura III.27 - Potencial (ECS) - Série CL-SGE1 - Ampliado

SÉRIE CL-SGE2

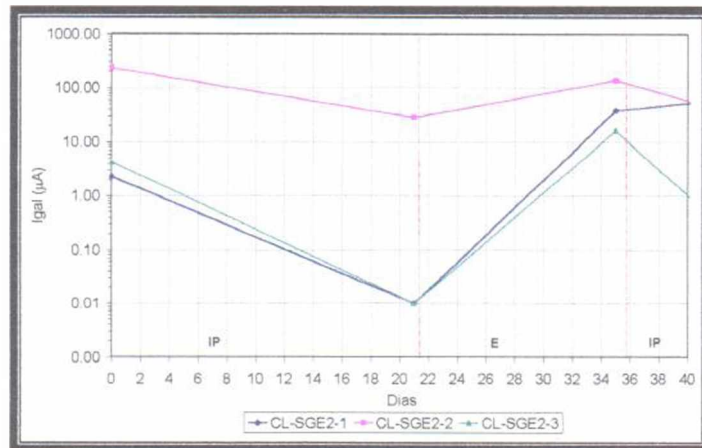


Figura III.28 - Corrente galvânica - Série CL-SGE2 - Ampliado

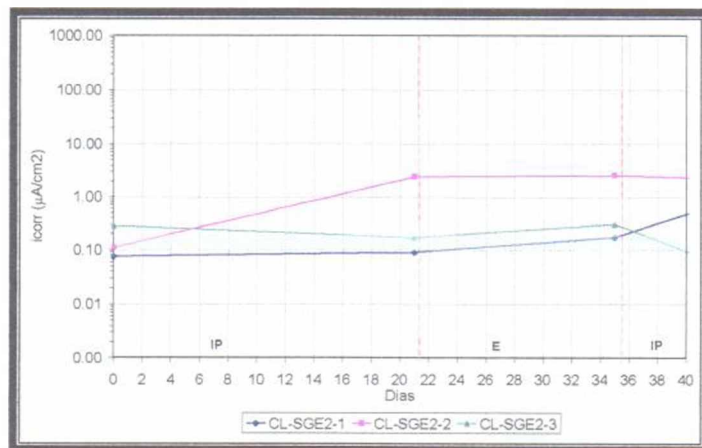


Figura III.29 - Intensidade de corrosão - Série CL-SGE2 - Ampliado

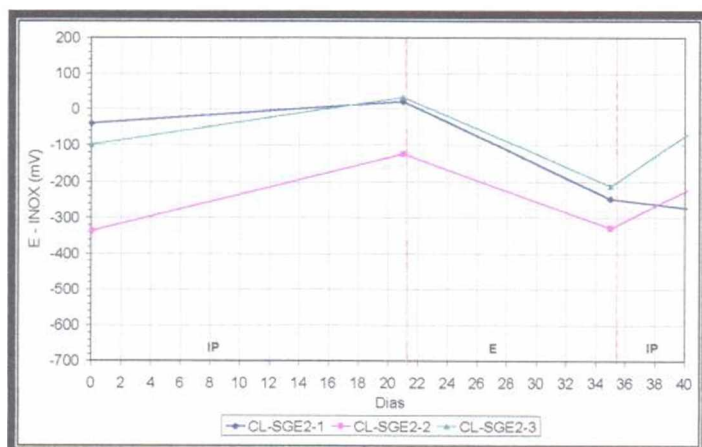


Figura III.30 - Potencial (Inox) - Série CL-SGE2 - Ampliado

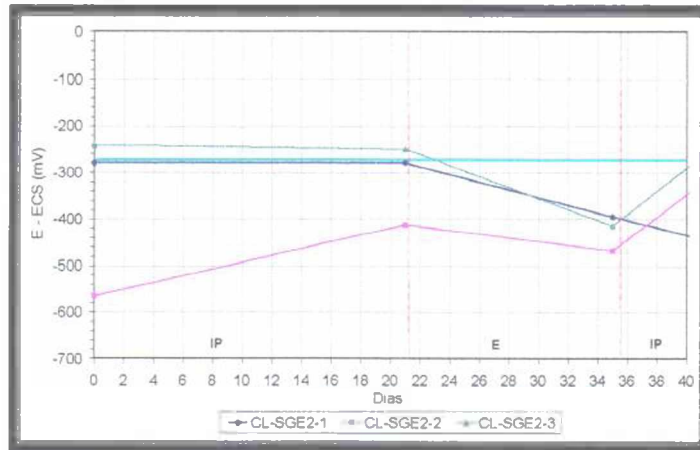


Figura III.31 - Potencial (ECS) - Série CL-SGE2 - Ampliado

SÉRIE CL-SGA1

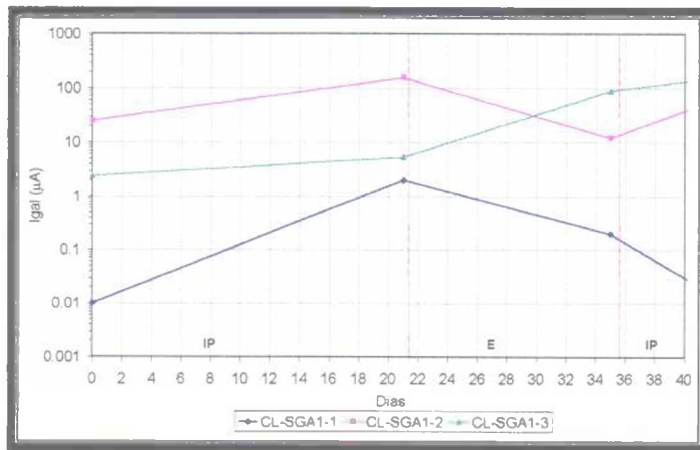


Figura III.32 - Corrente galvânica - Série CL-SGA1 - Ampliado

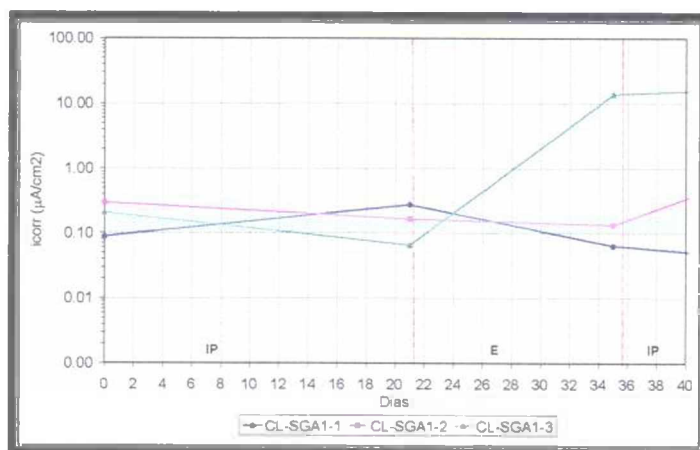


Figura III.33 - Intensidade de corrosão - Série CL-SGA1 - Ampliado

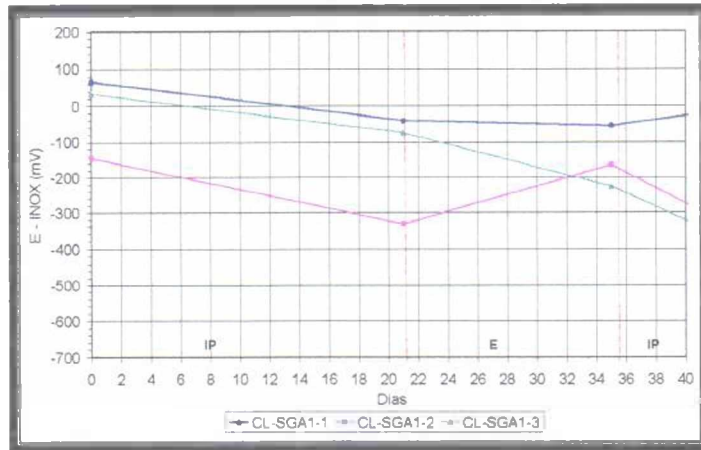


Figura III.34 - Potencial (Inox) - Série CL-SGA1 - Ampliado

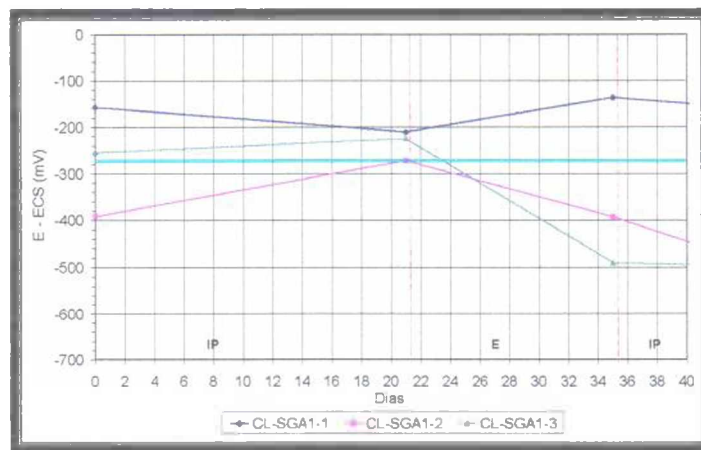


Figura III.35 - Potencial (ECS) - Série CL-SGA1 - Ampliado

SÉRIE CL-SGA2

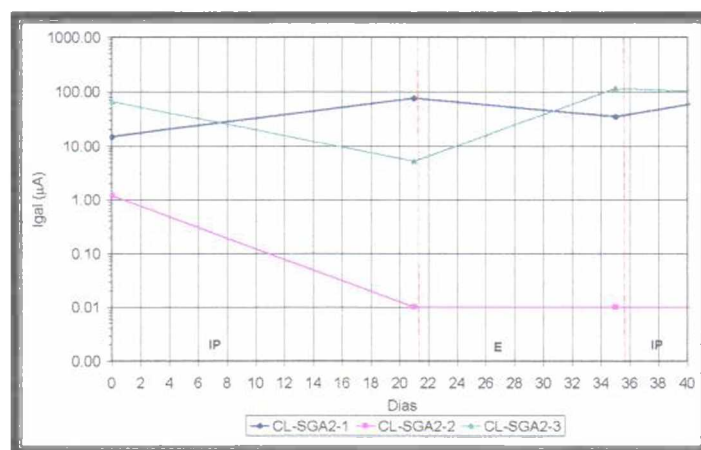


Figura III.36 - Corrente galvânica - Série CL-SGA2 - Ampliado

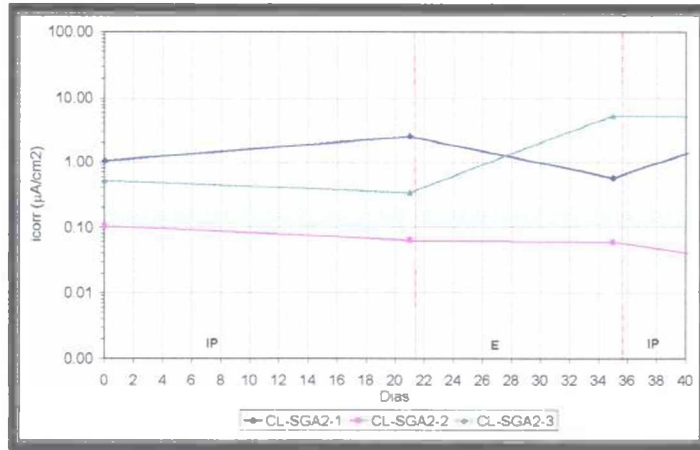


Figura III.37 - Intensidade de corrosão - Série CL-SGA2 - Ampliado

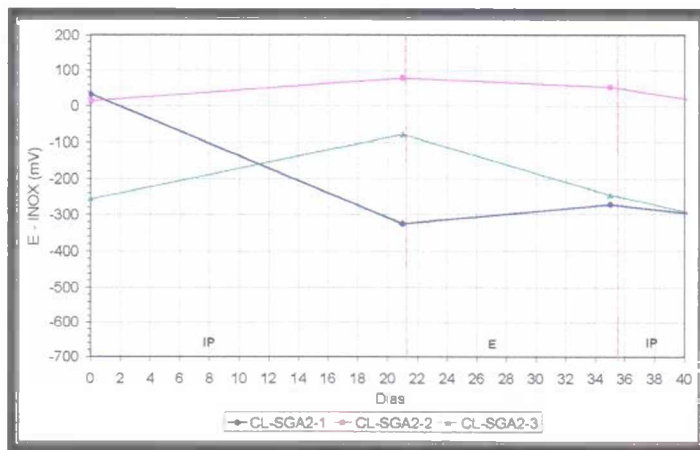


Figura III.38 - Potencial (Inox) - Série CL-SGA2 - Ampliado

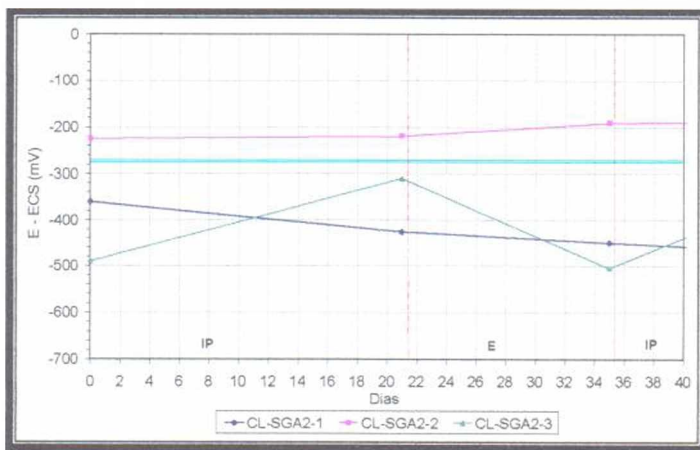


Figura III.39 - Potencial (ECS) - Série CL-SGA2 - Ampliado

ANEXO IV
FOTOS DAS BARRAS E SENSORES APÓS O TÉRMINO DO ENSAIO

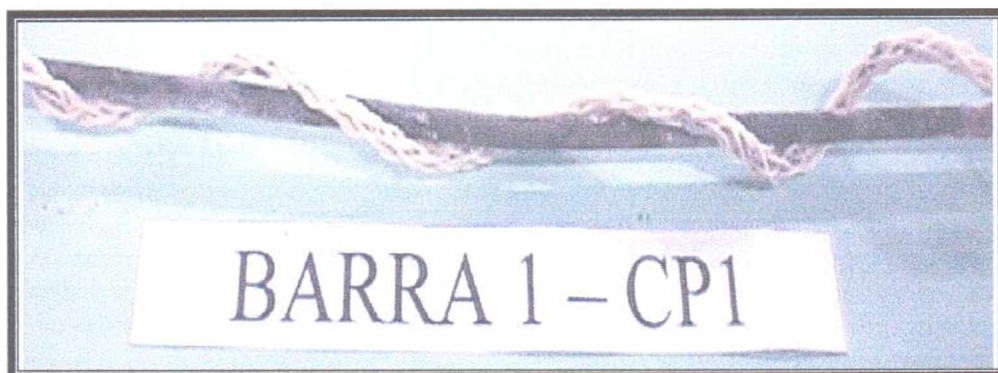


Foto IV.1 - Aspecto da barra CA-BL1-1 após o final do ensaio

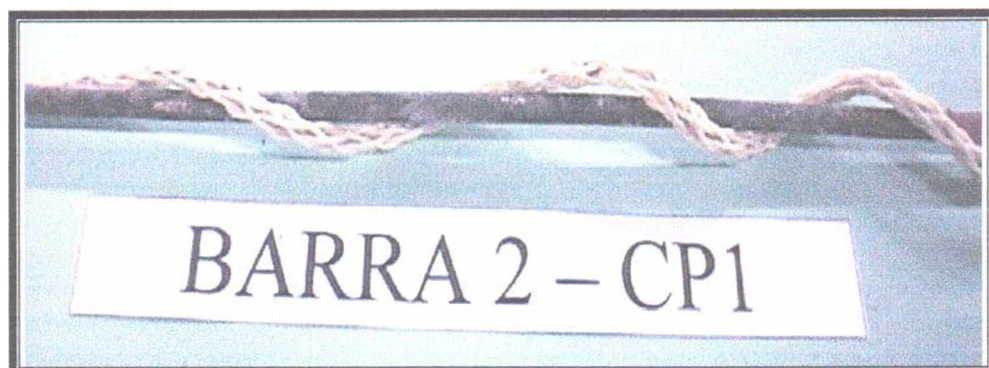


Foto IV.2 - Aspecto da barra CA-BL1-2 após o final do ensaio

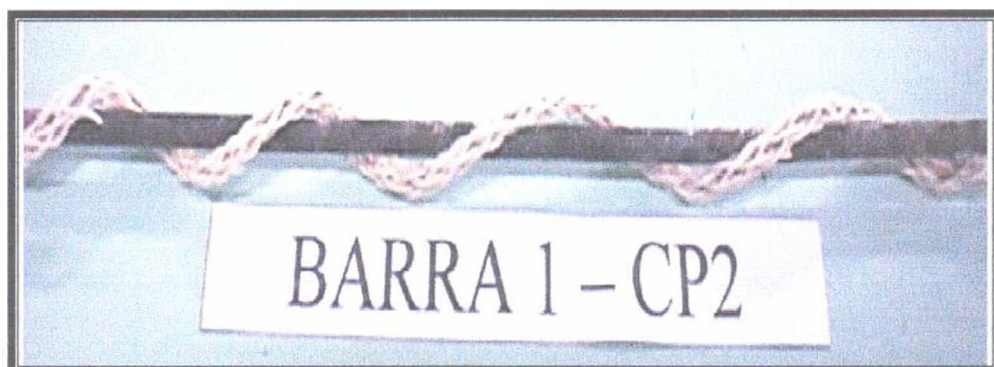


Foto IV.3 - Aspecto da barra CA-BL2-1 após o final do ensaio



Foto IV.4 - Aspecto da barra CA-BL2-2 após o final do ensaio

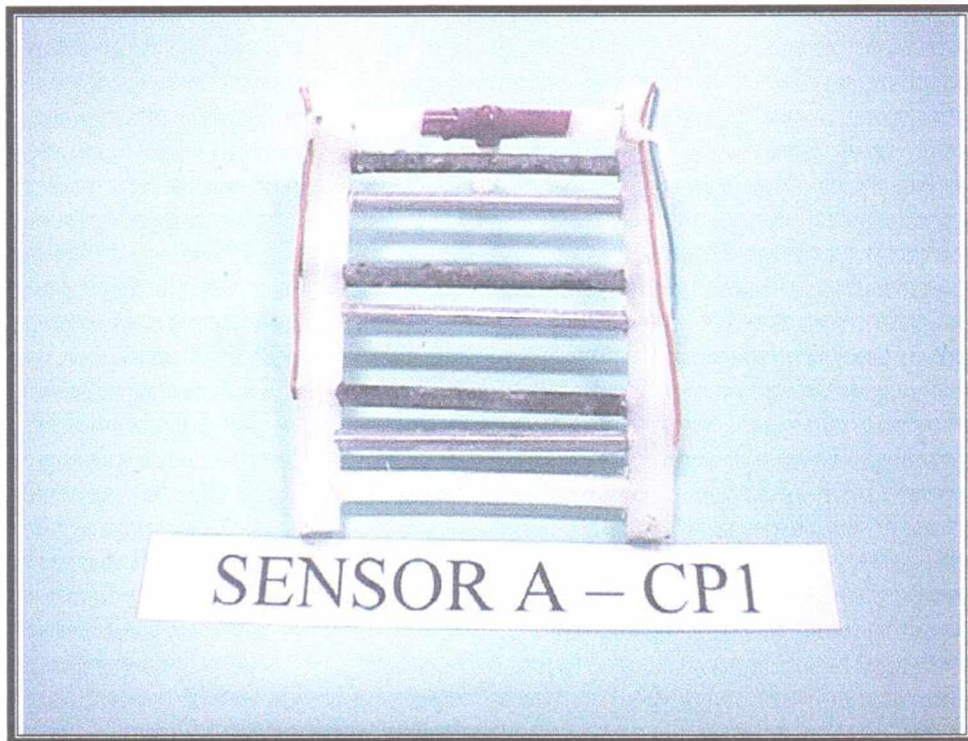


Foto IV.5 - Aspecto do sensor CA-SGE1 após o final do ensaio

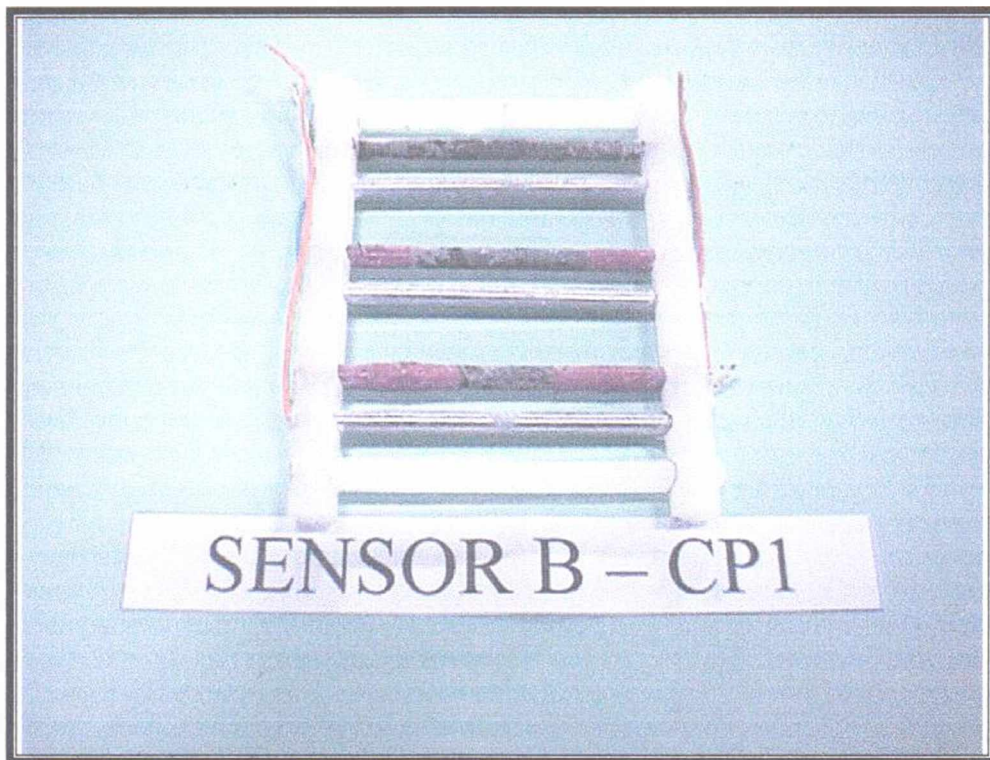


Foto IV.6 - Aspecto do sensor CA-SGA1 após o final do ensaio

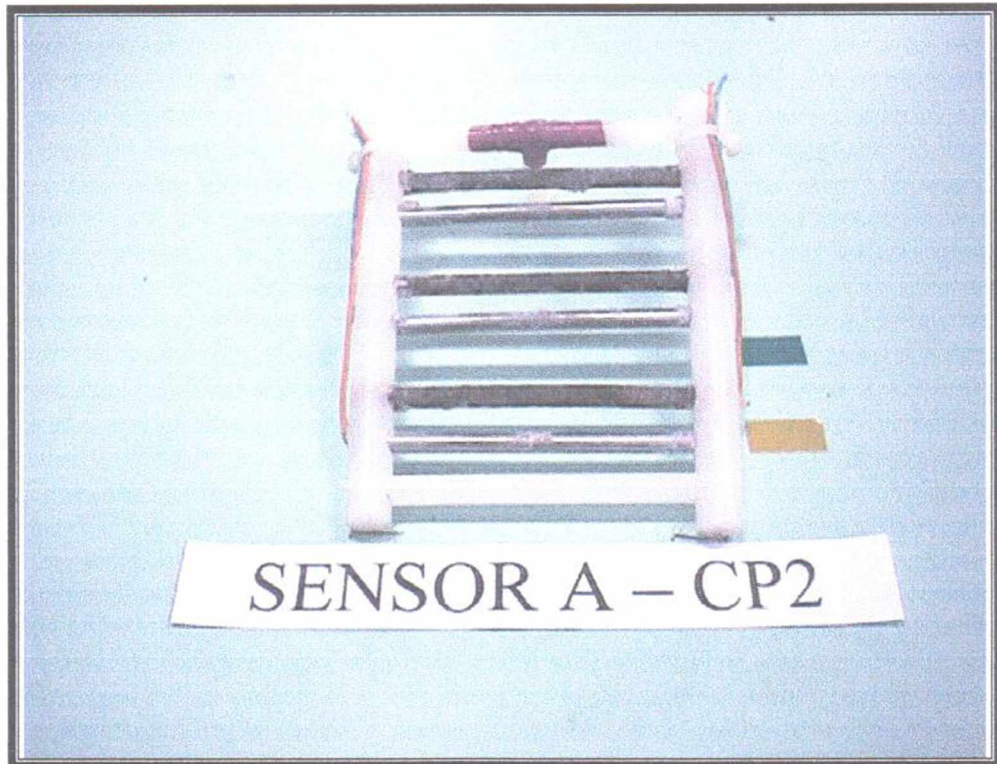


Foto IV.7 - Aspecto do sensor CA-SGE2 após o final do ensaio

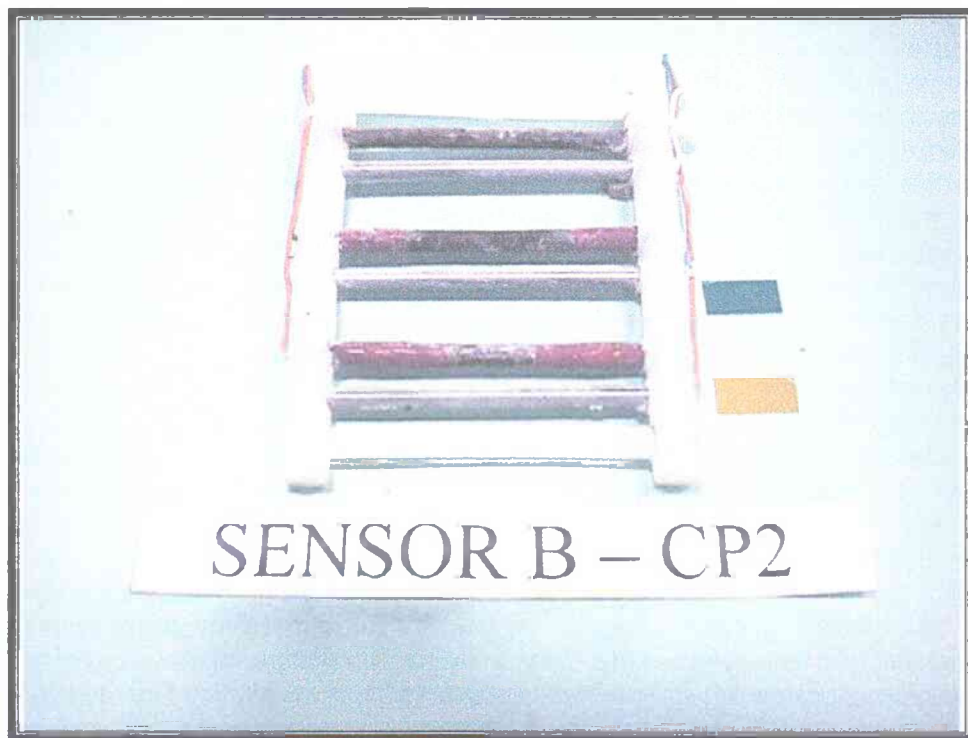


Foto IV.8 - Aspecto do sensor CA-SGA2 após o final do ensaio



Foto IV.9 - Aspecto da barra CL-BL1-1 após o final do ensaio



Foto IV.10 - Aspecto da barra CL-BL1-2 após o final do ensaio



Foto IV.11 - Aspecto da barra CL-BL2-1 após o final do ensaio

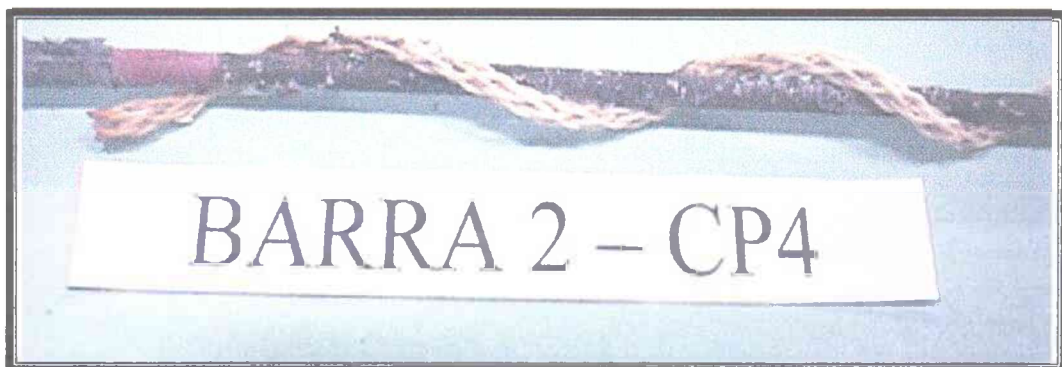


Foto IV.12 - Aspecto da barra CL-BL2-2 após o final do ensaio

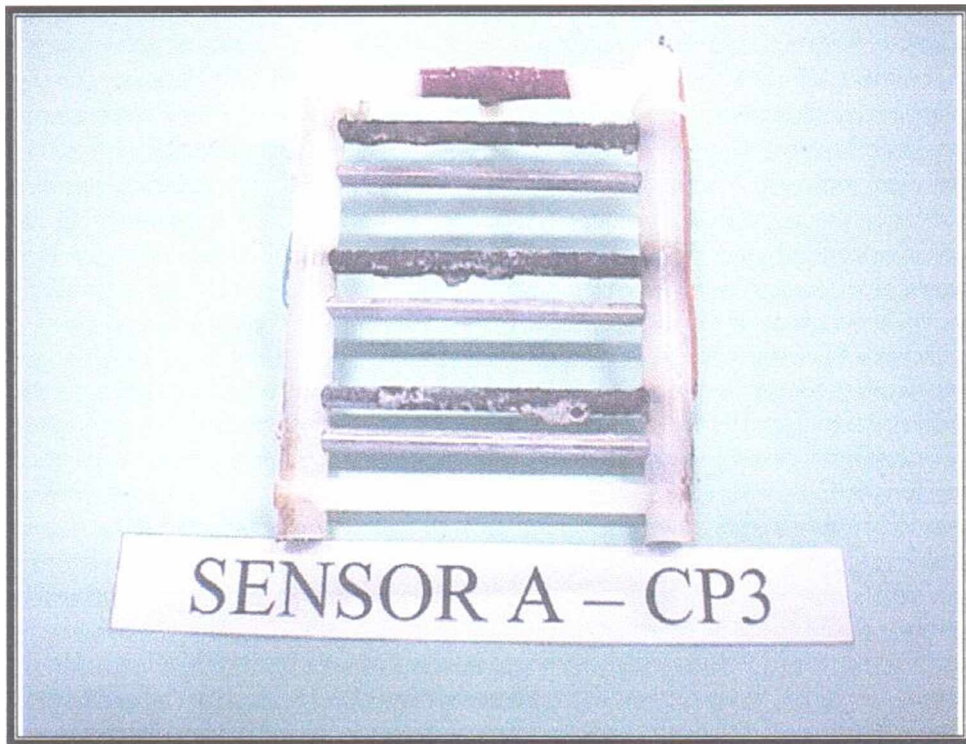


Foto IV.13 - Aspecto do sensor CL-SGE1 após o final do ensaio

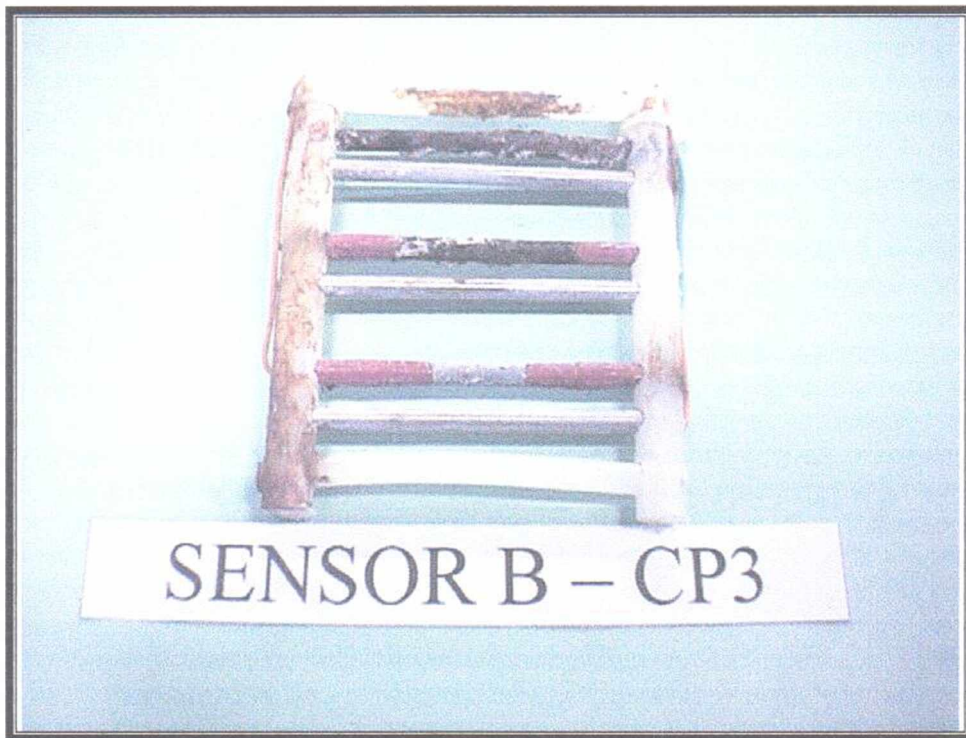


Foto IV.14 - Aspecto do sensor CL-SGA1 após o final do ensaio

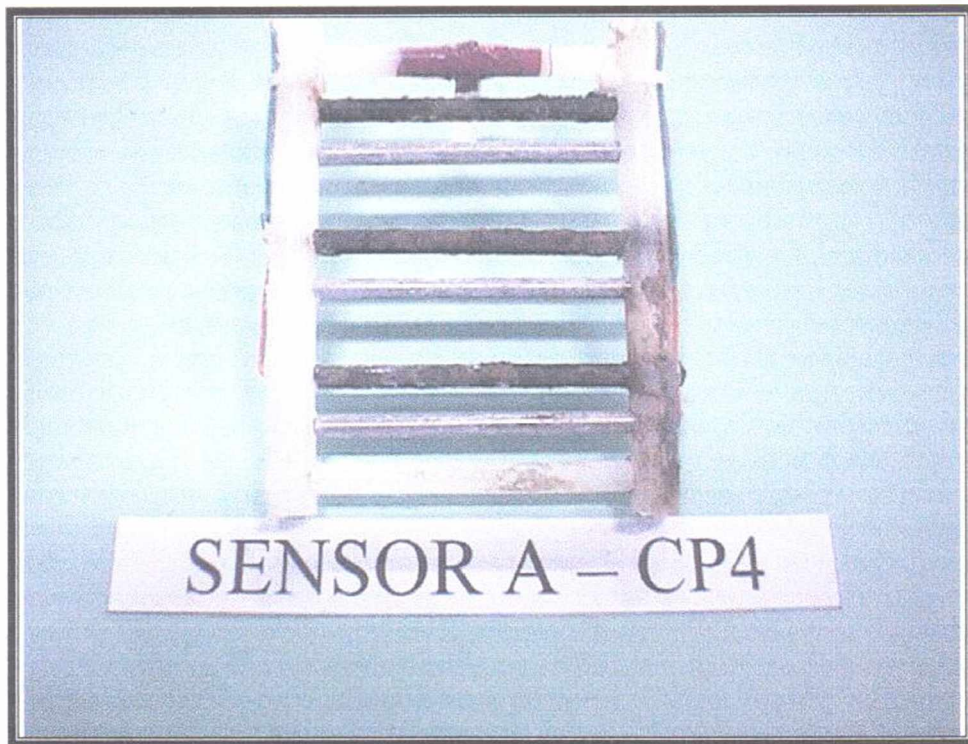


Foto IV.15 - Aspecto do sensor CL-SGE2 após o final do ensaio

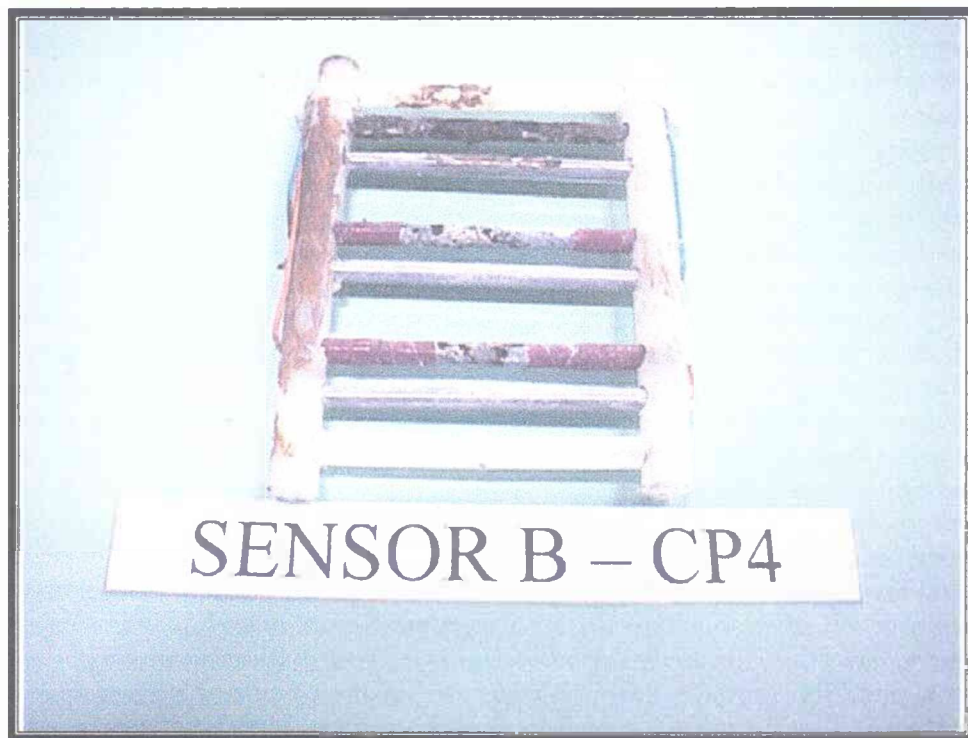


Foto IV.16 - Aspecto do sensor CL-SGA2 após o final do ensaio

ANEXO V
PESAGEM DAS BARRAS DE AÇO

Barra nº	Tipo	Peso	Sensor nº	CP nº	Posição	Área Exposta
1	CA-60	11,822	1	CP 1	1	10.995
2	CA-60	12,1208	1	CP 1	2	10.995
3	CA-60	11,7141	1	CP 1	3	10.995
4	CA-60	12,0382	2	CP 2	1	10.995
5	CA-60	12,1491	2	CP 2	2	10.995
6	CA-60	11,8754	2	CP 2	3	10.995
7	CA-60	11,9549	3	CP 3	1	10.995
8	CA-60	12,1520	3	CP 3	2	10.995
9	CA-60	11,7640	3	CP 3	3	10.995
10	CA-60	11,7815	4	CP 4	1	10.995
11	CA-60	12,1186	4	CP 4	2	10.995
12	CA-60	12,0537	4	CP 4	3	10.995
13	CA-60	12,2772	5	CP 1	1	3.142
14	CA-60	12,0619	5	CP 1	2	6.283
15	CA-60	11,8531	5	CP 1	3	10.995
16	CA-60	11,9127	6	CP 2	1	3.142
17	CA-60	11,8216	6	CP 2	2	6.283
18	CA-60	11,9563	6	CP 2	3	10.995
19	CA-60	12,2179	7	CP 3	1	3.142
20	CA-60	12,0606	7	CP 3	2	6.283
21	CA-60	11,9111	7	CP 3	3	10.995
22	CA-60	12,2027	8	CP 4	1	3.142
23	CA-60	12,0432	8	CP 4	2	6.283
24	CA-60	11,8875	8	CP 4	3	10.995

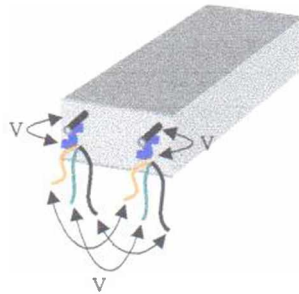
Barra nº	Tipo	Peso	Sensor nº	CP nº	Posição	Área Exposta
25	INOX	10,9132	1	CP 1	1	9.236
26	INOX	11,0747	1	CP 1	2	9.236
27	INOX	10,9317	1	CP 1	3	9.236
28	INOX	10,0392	2	CP 2	1	9.236
29	INOX	10,6887	2	CP 2	2	9.236
30	INOX	10,8281	2	CP 2	3	9.236
31	INOX	11,1181	3	CP 3	1	9.236
32	INOX	10,8611	3	CP 3	2	9.236
33	INOX	10,8307	3	CP 3	3	9.236
34	INOX	11,2293	4	CP 4	1	9.236
35	INOX	11,0642	4	CP 4	2	9.236
36	INOX	10,9007	4	CP 4	3	9.236
37	INOX	10,9987	5	CP 1	1	9.236
38	INOX	10,8457	5	CP 1	2	9.236
39	INOX	10,8927	5	CP 1	3	9.236
40	INOX	11,1923	6	CP 2	1	9.236
41	INOX	10,8083	6	CP 2	2	9.236
42	INOX	10,6841	6	CP 2	3	9.236
43	INOX	10,8499	7	CP 3	1	9.236
44	INOX	10,8044	7	CP 3	2	9.236
45	INOX	10,7372	7	CP 3	3	9.236
46	INOX	10,6940	8	CP 4	1	9.236
47	INOX	10,8429	8	CP 4	2	9.236
48	INOX	10,8114	8	CP 4	3	9.236

Barra n°	Tipo	Peso	Sensor n°	CP n°	Posição	Área Exposta
49	CA-60	55,5332	1 / 5	CP 1	1	40.841
50	CA-60	56,4002	1 / 5	CP 1	2	40.841
51	CA-60	55,8211	2 / 6	CP 2	1	40.841
52	CA-60	56,7408	2 / 6	CP 2	2	40.841
53	CA-60	56,0346	3 / 7	CP 3	1	40.841
54	CA-60	55,9297	3 / 7	CP 3	2	40.841
55	CA-60	56,0011	4 / 8	CP 4	1	40.841
56	CA-60	56,8892	4 / 8	CP 4	2	40.841

ANEXO VI
METODOLOGIA DE LEITURA DOS CORPOS-DE-PROVA

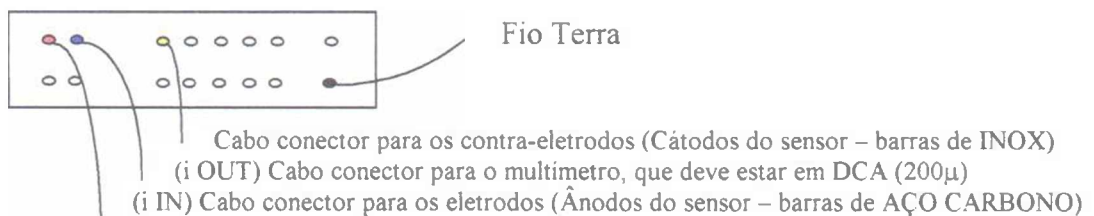
METODOLOGIA DE LEITURA DAS MEDIDAS ELETROQUÍMICAS DOS CORPOS-DE-PROVA

- 1) Retirava-se os corpos-de-prova da câmara de carbonatação (Quebrava-se um dos testemunho e era avaliado com solução de fenoftaleína) ou retirava-os do recipiente com solução de NaCl, de acordo com o ensaio em questão.
- 2) Eram feitas as leituras dos potenciais entre as barras catódicas e anódicas do sensor e entre os sensores CMS e barras de referência;

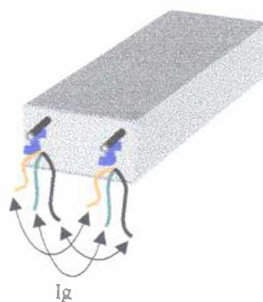


- 3) Preparava-se as conexões do amperímetro de resistência nula para as primeiras leituras dos CPs, de acordo com o esquema abaixo:

Amperímetro de resistência nula (Painel traseiro)



- 4) Cada par galvânico dos sensores era avaliado, usando um tempo de leitura de 1 minuto para a obtenção da corrente galvânica;



- 5) Após essas leituras, era montado todo o cabeamento do potenciostato, conferido os

parâmetros do equipamento, e iniciava-se a leitura, seguindo a seguinte ordem:

- Leitura do potencial ECS do sensor CMS da barra de referência 1;
- Leitura da barra de referência 1 (Potencial ECS e R_p), com a utilização de uma chapa de aço inox na parte inferior do CP como contra-eletrodo;
- Leitura do potencial ECS do sensor CMS da barra de referência 2;
- Leitura da barra de referência 2 (Potencial ECS e R_p), com a utilização de uma chapa de aço inox na parte inferior do CP como contra-eletrodo;
- Leitura das barra 1, 2 e 3 do sensor escada, com a utilização das barra de inox do sensor (cátodo) como contra-eletrodo;
- Leitura das barra 1, 2 e 3 do sensor com variação de A_a/A_c , com a utilização das barra de inox do sensor (cátodo) como contra-eletrodo.

OBS:

- Os CPs foram umedecidos por um período mínimo de 15 minutos antes das leituras;
- Os potenciais medidos esperaram um período de no mínimo 2 min para estabilização;
- As convenções de cores, numeração e posição das barras dos sensores foi a seguinte:

- Barra 1 do sensor – fio laranja
- Barra 2 do sensor – fio verde
- Barra 3 do sensor – fio branco

