

ANODOS DE SACRIFÍCIO PARA PROTEÇÃO CATÓDICA EM ESTRUTURAS DE
CONCRETO ARMADO

Joaquim Correia Rodrigues

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA
METALÚRGICA E DE MATERIAIS.

Aprovada por:

Prof. Luiz Roberto Martins de Miranda, D. Sc.

Eng^a Michele Cristina Resende Farage, D.Sc.

Prof^a. Simone Louise Delarue Cezar Brasil, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO DE 2005

RODRIGUES, JOAQUIM CORREIA

Anodos de Sacrifício para Proteção
Catódica em Estruturas de Concreto Armado
[Rio de Janeiro] 2005

IX,77 p. 29.7cm (COPPE/UFRJ,. M.Sc.,
Engenharia Metalúrgica e de Materiais,
2005)

Tese - Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE

1. Proteção catódica
2. Concreto Armado

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

AGRADECIMENTOS.

Meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que me ajudaram na elaboração desse trabalho, desde as tarefas mais simples às mais complicadas. Sem eles não teria atingido meu objetivo.

Em especial, gostaria de agradecer às seguintes pessoas e empresa:

À minha esposa e filhos pelo apoio e incentivo, sem o qual seria difícil ou impossível a conclusão deste trabalho.

*Ao professor, orientador e amigo **Roberto Martins de Miranda** pela amizade, orientação e constante incentivo, dispensado durante a realização deste trabalho. Graças ao seu incentivo técnico é que foi possível concluir este trabalho.*

*Aos amigos **Eng^o André Luiz de Miranda Magalhães, Eng^o Marcinei Santos da Silva e Eng^o Luis Alexandre Soares** por toda ajuda e força durante a realização dos testes e ensaios nos anos de 2002 a 2004.*

*À **COPPE/UFRJ** e ao Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela oportunidade dada ao desenvolvimento desta tese de mestrado.*

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ANODOS DE SACRIFÍCIO PARA PROTEÇÃO CATÓDICA EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

Joaquim Correia Rodrigues

Fevereiro /2005

Orientador: Luiz Roberto Martins de Miranda

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

O uso de sistemas de proteção catódica em estruturas de concreto armado, utilizando-se anodos de sacrifício adequados, vem se tornando constante devido a crescente ocorrência de concretos contaminados, sejam por íons cloretos, sejam por carbonatação e a conseqüente surgência de processos de corrosão localizados em torno dos sistemas clássicos de recuperação.

Na dissertação foi feito um estudo para determinar as relações ideais entre áreas (de anodo / de ferro) na estrutura do concreto armado através da construção da curva experimental em que se estabeleceu a polarização necessária, considerando uma faixa entre 60mV e 100mV estabelecida pela norma SHRP-S -359, tornando-se eficiente o processo de proteção catódica na estrutura do concreto armado.

Foram realizadas medições da resistividade nos corpos de prova, sem qualquer ativação, seja por solução de Sal de Lítio ou água, obtendo-se resultados em torno de 25,2 K Ω .cm e, nos corpos de provas ativados com água e sal de lítio ocorreram valores médios de 12,0 K Ω .cm e 3,9 K Ω .cm, respectivamente. Constatou-se, através das medições subseqüentes baixo teor de cloretos no concreto e um pH alcalino, em torno de 12, em todos os corpos de prova deste estudo.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

SACRIFICIAL ANODES FOR CORROSION PROTECTION IN REINFORCED
CONCRETE STRUCTURES

Joaquim Correia Rodrigues

February/2005

Advisor: Luiz Roberto Martins de Miranda

Department: Metallurgical and Materials Engineering

The use of cathodic protection systems in steel concrete structures using adequate sacrifice anodes has become frequent due to the increasing occurrence of contaminated concrete by chloride ions or by carbonation, with the consequent emergence of corrosion processes located around the classical systems of recuperation.

In this work, a study for determining the ideal relationships of area (anodic area / iron area) in reinforced concrete structure was made making the experimental plot of depolarization (on/ off potential), considering a range of depolarization between 60 mV and 100 mV. This criterion was established by SHRP-359 standard concrete structure.

Resistivity measurements were made in specimen tests without activation by lithium nitrate (LiNO_3) or water. These values stayed near to 25.2 $\text{K}\Omega\cdot\text{cm}$. For the specimen tests activated by LiNO_3 and water, the resistivity values presented medium values between 12.0 $\text{K}\Omega\cdot\text{cm}$ and 3.9 $\text{K}\Omega\cdot\text{cm}$. Considering the measurements, it was observed a low chloride content in the concrete and an alkaline pH which stayed near to 12 in all specimen tests of this referred study.

ÍNDICE

	Página
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
II.1 - CORROSÃO	4
II.1.1 - Conceitos de Corrosão	4
II.1.2 - Corrosão no Concreto Armado	6
II.1.3 - Reações no Anodo e Catodo na Estrutura do Concreto Armado	8
II.1.4 - A Corrosão no Concreto Através da Curva de Polarização	9
II.2 - A INFLUÊNCIA DOS ÍONS CLORETOS	12
II.3 - A ALCALINIDADE DO CONCRETO	13
II.4 - PROTEÇÃO CATÓDICA	15
II.4.1 – Normas Aplicação ao Estudo	15
II.4.2 – Fundamentos de Proteção Catódica por Anodo de Sacrifício	17
II.4.3 – A relação entre áreas anódicas e catódicas	22
II.5 - RESISTIVIDADE DO CONCRETO	24
II.6 – MEDIÇÃO DOS POTENCIAIS DE CORROSÃO	26
II.7 – SAIS DE LÍCIO	27
CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS	
III.1 - PRIMEIRA FASE	29
III.1.1 – Características das Pastilhas e Telas Galvânicas Utilizadas como Anodos de Sacrifício	30
III.1.2 – Medições dos Potenciais de Proteção Após a Instalação da Proteção Catódica	33
III.1.3 – Medição dos Teores de Cloretos e pH	34
III.1.4 – Construção da Curva de Polarização Versus Relação entre Áreas Anódicas e Catódicas	37

III.2 – SEGUNDA FASE	40
III.2.1 – Determinação da Variação dos Potenciais de Proteção nos Corpos de Prova contendo Pastilhas e Tela Galvânica	40
IV.2.2 – Primeiro estudo das relações entre áreas e polarização	49
IV.2.3 - Segundo estudo da relação entre áreas e polarização	50
CAPÍTULO IV - RESULTADOS EXPERIMENTAIS	52
IV.1- PRIMEIRA FASE DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS	52
IV.1.1 - Dimensionamento e confecção dos corpos de prova	52
IV.1.2- Dimensionamento dos corpos de prova	54
IV.1.3 – Ativação dos corpos de prova e medição dos potenciais de corrosão	56
IV.1.4 – Obtenção da resistividade nos corpos de prova	56
IV.1.4 .1– Determinação dos valores de resistividade nos corpos de prova ativados com água, sal de lítio e sem ativação (à seco) com telas galvânicas	57
IV.2 - SEGUNDA FASE DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS	58
IV.2.1 - Determinação da Polarização nos corpos de provas ativados com água, sal de lítio e sem ativação (à seco) para pastilhas PEQUENAS na região I.	58
IV.2.2 - Determinação da Polarização nos corpos de provas ativados com água, sal de lítio e sem ativação (à seco) para pastilhas MÉDIAS na região I.	61
IV.2.3- Determinação da Polarização nos corpos de provas ativados com água, sal de lítio e sem ativação (à seco) para pastilhas MÉDIAS nas regiões II e III.	63
IV.2.4- Determinação da Polarização nos corpos de prova ativados com água, sal de lítio e sem ativação (à seco) para pastilhas GRANDES na região I.	66
IV.2.5- Determinação da Polarização nos corpos de prova ativados com água, sal de lítio e sem ativação (à seco) para pastilhas GRANDES nas regiões I e II.	68
IV.2.6- Determinação da Polarização nos corpos de prova ativados com água, sal de lítio e sem ativação (à seco) para telas Galvânicas na região III.	71

CAPÍTULO V – DISCUSSÃO	74
V.1 – PRIMEIRA FASE DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS	74
V.1.1 – Processo de proteção catódica em peças de concreto armado com a utilização de pastilhas galvânicas	74
V.1.2 – Quantidade de pastilhas necessárias para atender ao critério estabelecido pela norma NACE RP 0290-90.	74
V.1.3 – Processo de Proteção Catódica com utilização Tela Galvânica	75
V.1.4 – Curva de polarização em função da relação entre áreas	75
V.2 – SEGUNDA FASE DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS	77
V.2.1 – A polarização dos corpos de prova, com e sem ativação, contendo pastilhas e telas galvânicas.	77
CAPÍTULO VI – CONCLUSÕES	79
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82

CAPÍTULO – I

INTRODUÇÃO

Corrosão galvânica é uma manifestação de grande gravidade que afeta estruturas de concreto armado-protendido em todo o mundo. Os altos custos globais que envolvem tanto a perda do material deteriorado quanto a correção do problema, o comprometimento da estabilidade estrutural inerente ao desenvolvimento do processo corrosivo e, por fim, a elevada incidência do fenômeno são alguns dos aspectos que fazem da corrosão das armaduras, certamente, a principal manifestação patológica na construção civil e industrial [1].

Proteção catódica, por corrente galvânica, é uma técnica eletroquímica que inibe as reações de oxidação nas armaduras através da introdução de anodos de sacrifício, revertendo aquelas reações e evitando que a armadura sofra corrosão, tornando-a catódica. Nos materiais estudados utilizou-se uma liga de Alumínio, Zinco e Índio, com insignificante processo de passivação, permitindo eficiência no sistema de proteção catódica no ambiente concreto.

A relevância deste trabalho deve-se ao lugar comum em que se encontram as soluções clássicas do tratamento da corrosão nas armaduras do concreto que, invariavelmente, conduzem a processos mais sérios de corrosão, ao utilizarem-se massas cimentícias ou pinturas para tratá-las. Uma forma mais moderna de tratamento emprega, erradamente, pastilhas cimentícias envolvendo discos de zinco puro. É perfeitamente conhecido que o zinco é sensível ao ambiente alcalino do concreto, ocorrendo uma rápida passivação deste anodo, interrompendo a proteção catódica [8]. Assim, mais uma vez, o processo de corrosão deixa de ser interrompido.

O objetivo deste trabalho foi empregar uma liga metálica, que não o zinco puro, para utilização como anodo de sacrifício em peças de concreto armado. Esta liga é formada pela associação de alumínio, zinco e índio, perfeitamente adaptada ao ambiente alcalino do concreto através de pesquisas já conhecidas [9]. Adicionalmente, procurou-se obter uma análise dimensional através de uma relação ideal entre área de anodo (A_a) / área de ferro (A_{Fe}), com a construção de uma curva experimental que associa-se estas relações com a polarização necessária a proteção catódica. Para tanto, considerou-se a faixa de potencial de

polarização entre 60mV e 100mV, necessária para controlar a corrosão, estabelecida pela norma SHRP-S-359 [1]. Cabe ressaltar que a curva experimental foi construída através da realização de diversos ensaios em corpos de provas ativados com solução aquosa de Sal de Lítio (LiNO_3), de modo a promover a conseqüente redução na resistividade da massa do concreto endurecido, tornando o processo de proteção catódica bem mais efetivo devido a maior troca iônica no sistema.

Dentro dos objetivos do trabalho, foi abordada a importância do sistema de proteção catódica por anodos de sacrifício, com a utilização de corpos de prova contendo anodos na forma de pastilhas pequena, média, grande, além da forma de tela. Os corpos-de-prova foram divididos em três grupos: seis corpos de provas sem qualquer ativação química, apenas na umidade ambiente e temperatura do local do teste, seis corpos de prova ativados com água e, finalmente, seis corpos de prova ativados com solução aquosa de Nitrato de Lítio (LiNO_3), permitindo uma avaliação comparativa dos três sistemas.

Foram realizadas medições do teor de cloretos, introduzidas na água de amassamento dos corpos de prova, da ativação empregada e do pH do concreto. Posteriormente, constataram-se baixos teores de cloretos e um pH, alcalino, em torno de 12.

Inicialmente, estudou-se a variação dos potenciais de corrosão construindo-se curvas de potenciais versus tempo para se verificar o comportamento dos anodos. A curva obtida, pela polarização necessária versus relação entre áreas (A_a / A_{Fe}) foi linear, permitindo obter-se uma estimativa da relação ideal entre áreas que atendessem ao critério da polarização dos 100mV, estabelecido pela norma NACE-RP0290-90[2]. Utilizou-se o critério da queda/desenvolvimento da polarização de 100mV ou, simplesmente, polarização dos 100mV.

Na construção das curvas polarização versus tempo, constatou-se a ocorrência de variações no valor final da polarização em relação à curva esperada, com os corpos-de-prova ativados com solução de Nitrato de Lítio, pelos valores encontrados da polarização mínima de 100mV, confirmando a eficiência do sistema, segundo o critério estabelecido pela norma NACE-RP0290-90 [2]. Os valores médios da resistividade nos corpos de prova sem ativação ficaram em torno de 25,2 $\text{K}\Omega \cdot \text{cm}$. Já nos corpos de prova ativados com água e solução de Nitrato de Lítio, os valores médios foram de 12,0 $\text{K}\Omega \cdot \text{cm}$ e 3,9 $\text{K}\Omega \cdot \text{cm}$, respectivamente.

Este trabalho é uma contribuição ao processo de dimensionamento da proteção catódica para o concreto armado, utilizando-se corrente galvânica com o emprego de anodos de sacrifício, visando estabelecer parâmetros seguros de proteção para estruturas aéreas e até enterradas. Trata-se de um trabalho inovador para sistemas de proteção catódica, porque a metodologia experimental utilizada para a construção da curva polarização necessária versus relação entre áreas, anódicas e catódicas, mostrou-se bastante eficiente e com resultados confiáveis, considerando-se um curto espaço de tempo e uma amostragem pequena. Objetivou-se, portanto, o dimensionamento ou a determinação das características funcionais de anodos de sacrifício para o ambiente concreto armado.

CAPÍTULO – II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

II . 1. – CORROSÃO

II.1.1 – Conceitos de Corrosão.

A corrosão é um processo eletroquímico, o que significa que ela envolve reações químicas (ganho e perda de elétrons) e corrente elétrica (fluxo de cargas através de um condutor). O mecanismo de corrosão pode ser compreendido considerando-se uma célula eletrolítica ou galvânica, que consiste num sistema que envolve dois eletrodos e dois tipos de reações químicas: uma que fornece e outra que consome elétrons. Para manter a neutralidade elétrica e sustentar as reações químicas, a transferência de carga elétrica ocorre através de caminhos internos e externos, conectando os dois eletrodos onde essas reações acontecem. Os elétrons fluem por uma conexão externa e os íons fluem entre as duas soluções que circundam os eletrodos [3].

No estudo da corrosão do concreto armado, as pilhas eletroquímicas são de grande importância.

Basicamente, uma pilha eletroquímica apresenta os seguintes componentes:

- a) Anodo: eletrodo em que há oxidação (corrosão) e onde a corrente elétrica, na forma de íons metálicos positivos, entra no eletrólito.
- b) Eletrólito: condutor (usualmente um líquido) contendo íons que transportam a corrente elétrica do anodo para o catodo.
- c) Catodo: eletrodo onde a corrente sai do eletrólito ou o eletrodo no qual as cargas negativas (elétrons) provocam reações de redução.
- d) Circuito metálico: ligação metálica entre o anodo e o catodo por onde escoam os elétrons, no sentido anodo-catodo.

Retirando-se um desses componentes elimina-se a pilha e, conseqüentemente, diminui a possibilidade de corrosão. Evidentemente, pode-se retirar o catodo, a ligação metálica ou

o eletrólito. O anodo, sendo a própria estrutura metálica que se deseja proteger, não pode ser retirado, então aplica-se nele revestimento protetor e/ou proteção catódica.

A corrente elétrica convencional tem sentido contrário ao de elétrons. Considerando o sentido convencional, o catodo é o eletrodo negativo (-) e o anodo positivo (+); no sentido real os sinais são contrários, isto é, anodo (-) e catodo (+).

A pilha é caracterizada por uma diferença de potencial entre seus eletrodos, em circuito aberto – é a sua **força eletromotriz**. Ela é igual a:

$$E_{\text{pilha}} = E_{\text{catodo}} - E_{\text{anodo}}$$

Onde E_{catodo} e E_{anodo} são os potenciais de redução dos eletrodos [3].

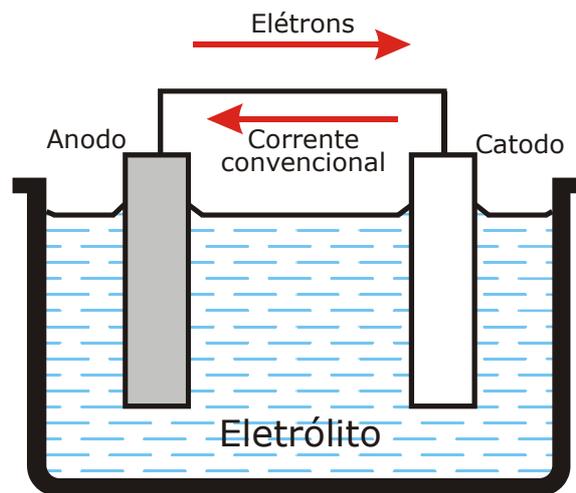


Figura – II.1 – Esquema de pilha eletroquímica.

II . 1.2 – Corrosão no Concreto Armado

“Estruturas de concreto armado são projetadas e executadas para manter condições mínimas de segurança, estabilidade e funcionalidade durante um determinado tempo de vida útil, sem custos previstos de manutenção e reparos” [3].

Admite-se que a armadura esteja protegida quando presente no ambiente concreto, devido ação barreira da massa do concreto e sua alta alcalinidade decorrente da formação principal de hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 , durante o processo de hidratação do cimento, ocorrendo um pH em torno de 12,5 [3].

O processo de corrosão no concreto armado, no entanto, compromete severamente a estabilidade e durabilidade da estrutura. O concreto, por ser um pseudo-sólido, possui uma rede de capilares e poros, os quais, com a introdução da água líquida ou em estado de vapor, oferece uma certa permeabilidade, promovendo dois estados típicos de ataque às armaduras [17].

No primeiro, a água, acompanhada de sais perniciosos presentes em salmouras industriais e na própria maresia, promove a contaminação do concreto por íons extremamente danosos à superfície do aço das armaduras, originalmente passivada por um filme resultante da combinação da ferrugem superficial, Fe(OH)_3 , e hidróxido de cálcio, rico em ferrato de cálcio. Neste estado original de passivação, a corrosão não é exatamente nula, mas é severamente limitada pela resistência ôhmica daquele filme. Em suma, compreende-se que na grande maioria dos casos, os mecanismos de transporte, através do concreto, dos íons nocivos às armaduras, com particular importância para os íons cloretos, são a absorção capilar e a difusão iônica. A primeira se manifesta na camada superficial do concreto, geralmente onde ocorre a molhagem. Mas para o interior do concreto, onde a presença do eletrólito é mais constante, tem-se a difusão.

No segundo, a água proveniente da chuva, cada vez mais ácida devido à crescente presença de CO_2 no ar, promove a diminuição da alcalinidade do concreto devido às reações da carbonatação. Como a alcalinidade da massa do concreto não cria a passividade, apenas a mantém, a alteração deste ambiente é, também, catastrófico para as armaduras [4].

As heterogeneidades na superfície do aço, tais como diferenças na estrutura e composição dos grãos, além de diferenças de concentrações no eletrólito em virtude da

natureza heterogênea da contaminação do concreto, fazem com que uma região da barra atue como anodo e outra região como catodo. Pelo fato do anodo e o catodo estarem na mesma barra, ocorre uma inevitável conexão elétrica entre os dois. Logo, verifica-se uma célula eletrolítica curto-circuitada.

O ferro, na zona interior da interface com eletrólito, ioniza-se e os elétrons libertados migram para a vizinhança, em direção às zonas catódicas onde concorrem para reações catódicas no contato com a água, libertando hidrogênio molecular que se combina com o oxigênio. O íon Fe^{2+} combina-se, então, com os íons OH^- formando-se hidróxido ferroso no anodo, de cor amarelada, e férrico no catodo, de cor vermelho acastanhada que constitui, essencialmente, a ferrugem. Se a película de hidróxido férrico mantém-se intacta, aquela região do aço comprometida torna-se passiva.

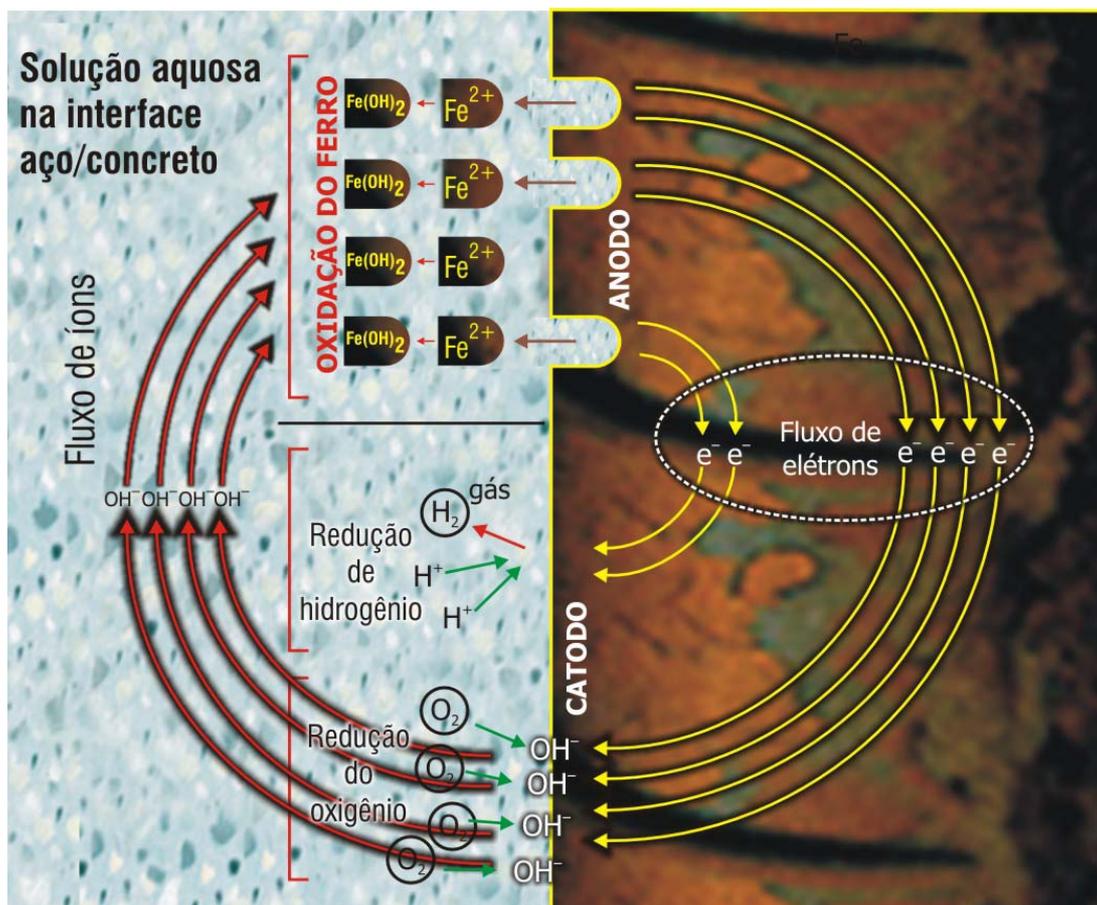


Figura II. 2 – Processo de oxidação e redução na armadura de concreto armado[4].

II . 1.3 – Reações no anodo e catodo na estrutura do concreto armado.

As reações de redução no catodo têm um importantíssimo papel no desenvolvimento da corrosão no concreto armado porque são decisivamente influenciadas pela solução que chega à interface aço-concreto (por exemplo a água acompanhada de oxigênio, dióxido de carbono e etc.) e que servem para alimentar a corrosão nos anodos, estabelecendo a natureza dos produtos da corrosão, como os hidróxidos férricos. A figura II.4 mostra um pilar de seção circular, contaminado com íons cloretos, devido ao ambiente marinho, fator acelerador da corrosão e a crescente taxa de corrosão característica deste meio [18].

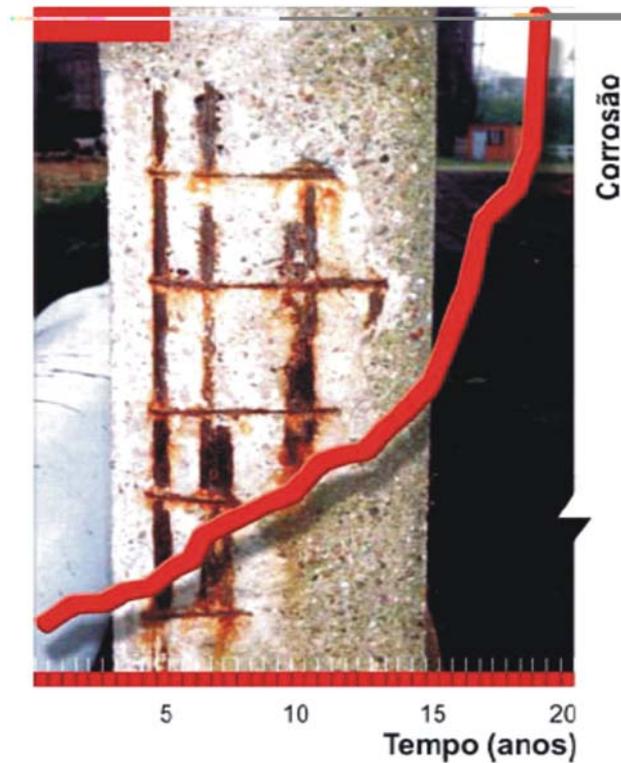


Figura II .3 – Pilar de seção circular, corroido pela influência do íon cloreto e a crescente taxa de corrosão [18].

A diferença de potencial que acontece entre as reações anódica e catódica é a força motriz que faz o aço desintegrar-se. Portanto, qualquer superfície de aço que tenha problemas de corrosão, na verdade, é uma combinação de anodos e catodos eletricamente ligados através do próprio corpo do aço e submetidos a um eletrólito interfacial [19].

II.1.4 – A Corrosão no concreto armado através da curva de polarização.

As características do concreto fazem com que o fenômeno da corrosão nas armaduras seja predominantemente um processo catódico. Isto pode ser explicado pela inclinação mais acentuada das curvas catódicas em relação à curva anódica [21]. O processo de corrosão nas armaduras do concreto ocorre em torno de suas reações de redução que acontecem nos catodos e não nas situações em torno das reações de dissolução dos anodos[20].

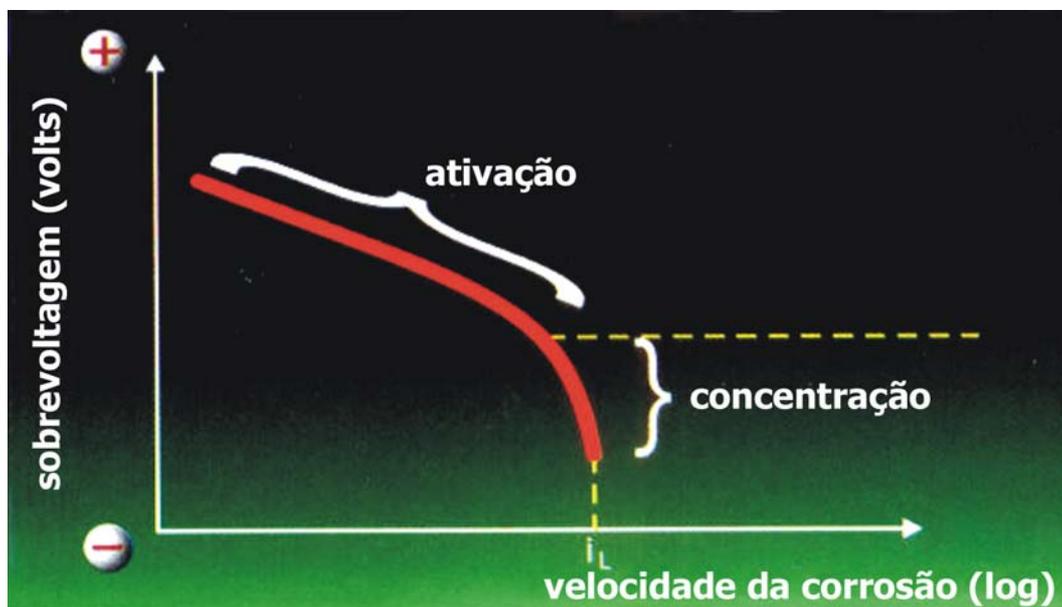


Figura- II.4 – Análise da curva catódica com a velocidade de corrosão em função da sobrevoltagem [4].

Analisando a curva catódica, figura –II.5, responsável pela corrosão do aço, pode-se observar que para pequenas velocidades de corrosão a reação catódica é controlada por processos de ativação [20]. Nesta região, à medida que o potencial torna-se mais negativo, a velocidade de corrosão aumenta, isto é, com aumento da sobrevoltagem, o processo de corrosão torna-se mais efetivo [49]. Pode-se constatar que a sobrevoltagem fica cada vez mais negativa até chegar ao ponto em que a velocidade de corrosão é interrompida. Nesta região ocorre a sobrevoltagem de concentração [24].

Este comportamento da curva catódica, figura II.5, pode ser explicado pelo processo de corrosão no concreto armado em estruturas aéreas, onde, tipicamente, ocorre a redução do oxigênio, sozinho ou dissolvido na água, em suas regiões catódicas [5].

Normalmente, na superfície da armadura do concreto de edificações, ocorre pouco acesso de oxigênio, mas o suficiente para promover processos generalizados de corrosão ocasionados por sobrepotenciais catódicos, característicos da região de ativação, figura II.5 [24]. Na prática, todo o oxigênio existente na interface concreto-aço é consumido, num determinado tempo, cessando o processo e interrompendo a velocidade da corrosão. Deste modo, o sobrepotencial catódico diminui, configurando-se num sobrepotencial de concentração, figura II.5 [24].

Por outro lado, processos triviais de corrosão no concreto armado, contaminados por sais cloretos, estabelecem casos típicos de corrosão localizada.

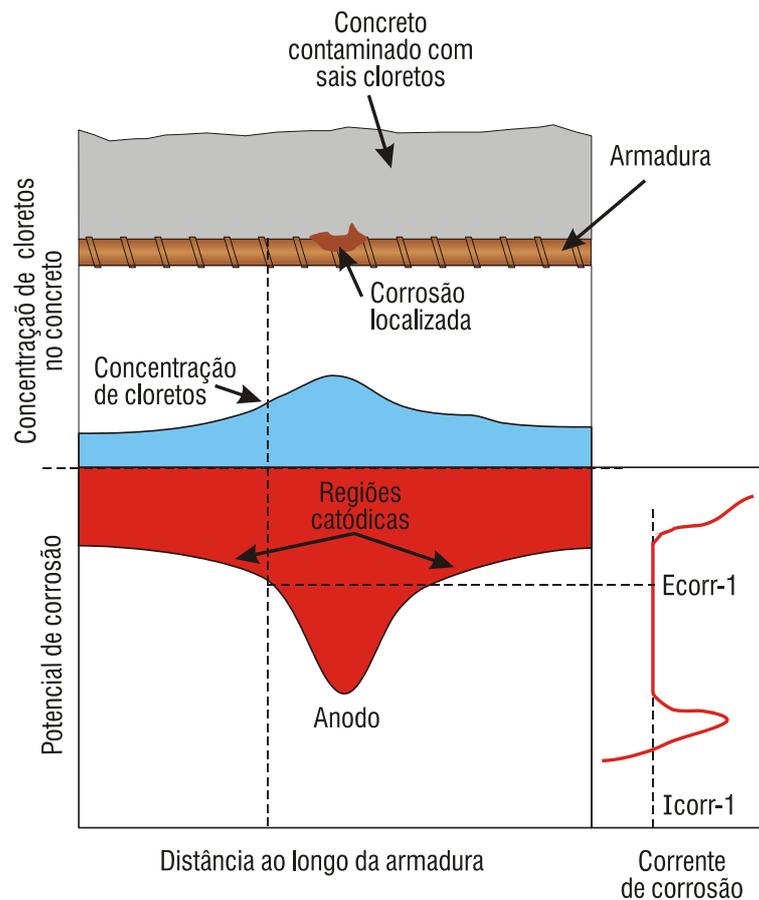


Figura II.5 - Relação entre as regiões do concreto original e a recuperada [5].

Casos típicos de corrosão localizada poderão ser visualizados através de sua curva anódica, especificamente nas posições de maior concentração de cloretos, onde se desenvolvem processos ativos de corrosão, e as regiões vizinhas que se mantêm passivas, figura II.6 [5].

Observa-se de forma trivial, também, que após trabalhos de recuperação convencionais, com a utilização de argamassas pré-fabricadas surgem, nas regiões vizinhas, novas áreas anódicas, figura II.7 [5].

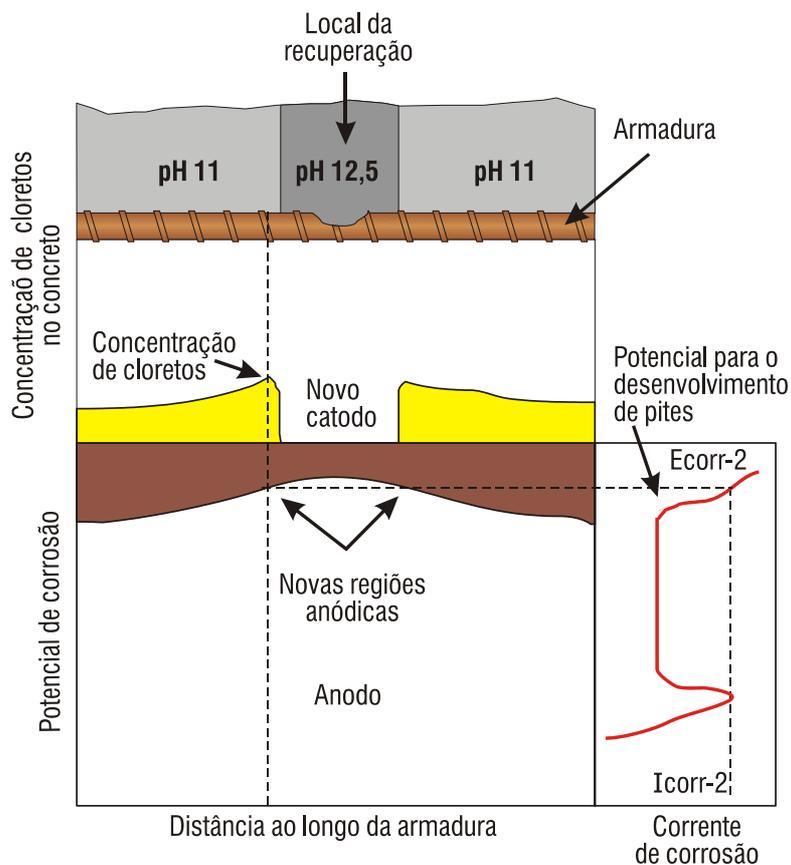


Figura II.6 - Relação entre as regiões do concreto original e a recuperada. Desenvolvimento de novas regiões anódicas vizinhas à “recuperação” efetuada [5].

II.2 – A INFLUÊNCIA DO ÍON CLORETO

Nenhum outro contaminante está tão extensivamente documentado na literatura como causador da corrosão no aço do concreto armado como os cloretos. Estes íons podem ser introduzidos intencionalmente no concreto, com agentes aceleradores de pega e endurecimento, e podem vir através dos agregados e na própria água de amassamento. Nestes casos diz-se que eles são incorporados à massa de concreto [5].

Podem penetrar por salmouras industriais, maresia ou névoa de ambientes marinhos, situação esta bastante comum em nosso país (nestes casos diz-se que a contaminação se deu por impregnação da superfície do concreto por agentes agressivos externos) [5].

Os mecanismos de transporte que levam ao movimento e a concentração iônica dos cloretos no concreto são os seguintes: absorção capilar, difusão iônica, permeabilidade sob pressão e migração iônica. O transporte não apenas dos cloretos, mas de outras substâncias dissolvidas, de líquidos em geral e de gases no interior do concreto é decisivamente influenciado pela estrutura porosa da pasta de cimento endurecida.

A interconexão dos poros, que determina a porosidade aberta, e a distribuição do tamanho dos poros, constituem-se fatores de suma importância. A porosidade aberta possibilita o transporte das substâncias e caracteriza a permeabilidade da pasta. Por sua vez, o tamanho dos poros interfere na velocidade de transporte. O tamanho dos poros na pasta de cimento varia segundo diversas ordens de grandeza, podendo ser classificados em poros de ar aprisionado (decorrentes dos processos de adensamento do concreto), poros de ar incorporado (obtidos quando do emprego de aditivos incorporadores de ar), poros capilares (oriundos da saída de água livre do concreto) e poros do gel (devido à água de gel), tendo os três primeiros tipos maior relevância para a durabilidade [6].

Destaca-se um perfil típico da concentração de cloretos ao longo da camada de cobertura do concreto, desde a superfície até a armadura, em peças de concreto armado onde a contaminação ocorre por impregnação de contaminantes do meio externo. A concentração tende a ser pequena na superfície dada a ação da lixiviação pelas águas das chuvas, que se verifica nessa zona de molhagem e secagem, o que carrega as soluções com cloretos, diminuindo sua concentração. Na zona de difusão, a partir do valor limite, a

concentração tende a diminuir com a profundidade, isto porque a contaminação por impregnação vem de fora para dentro [6].

Os cloretos apresentam-se em três formas no concreto: quimicamente ligado ao aluminato tricálcico (C_3A), formando cloroaluminato de cálcio ou sal de Friedel ($C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$); adsorvido na superfície dos poros; e sob a forma de íons-livres. Por maior que seja a capacidade de um dado concreto de ligar-se quimicamente ou adsorver fisicamente íons cloretos, haverá sempre um estado de equilíbrio entre as três formas de ocorrência desses íons, de forma que sempre existirá um certo teor de Cl^- livre na fase líquida do concreto. Esses cloretos livres são os que efetivamente causam preocupação [7].

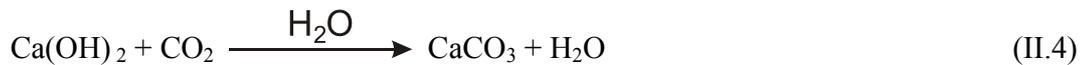
Portanto, é evidente a ação extremamente deletéria dos cloretos, que vai desde a despassivação da armadura até a participação plena no processo corrosivo; a saber, aumentam substancialmente a condutividade elétrica do eletrólito, acelerando o processo, além de participarem das reações para formação dos produtos da corrosão. Afora tudo isso, deve-se essencialmente aos cloretos a ocorrência da corrosão localizada por pites, a qual apresenta grande gravidade do ponto de vista das estruturas de concreto armado-protendido [4].

II.3 – A ALCALINIDADE DO CONCRETO

A perda da alcalinidade provocada pela carbonatação do concreto é condição para início da corrosão das armaduras. As superfícies expostas das estruturas de concreto, a alta alcalinidade, obtida principalmente às custas da presença de $Ca(OH)_2$ liberado das reações de hidratação do cimento, pode ser reduzida com o tempo. Esta redução ocorre essencialmente pela ação do CO_2 do ar, além de outros gases ácidos tais como SO_2 e H_2S . Esse processo é chamado de *carbonatação* e dá-se a uma velocidade lenta, atenuando-se com o tempo [4].

Isto pode ser explicado pela hidratação crescente do cimento, além dos próprios produtos da reação da carbonatação ($CaCO_3$) que colmatam os poros superficiais, dificultando cada vez mais o acesso de CO_2 presente no ar, ao interior do concreto [5].

Sua reação é:



Embora possa ocorrer reações do tipo:



O processo ocorre em várias etapas envolvendo diversas reações secundárias, embora seja certo que um dos produtos finais seja sempre o carbonato de cálcio (CaCO_3). Tendo em vista o pH de precipitação do CaCO_3 ser da ordem de 9,4 (à temperatura ambiente), tem-se com isto uma alteração substancial das condições de estabilidade química da película passivadora do aço [6].

Sob este aspecto, tem sido proposto um valor crítico de pH entre 11,5 e 11,8, abaixo do qual não se assegura a manutenção da passivação do aço [9].

Uma característica do processo de carbonatação é a existência de uma “frente” de avanço do processo, que separa duas zonas com pH muito diferentes; uma com pH menor que 9 (carbonatada) e outra com pH maior que 12 (não carbonatada). Ela é comumente conhecida por *frente de carbonatação* e deve sempre ser mensurada com relação à espessura do concreto de cobrimento da armadura. É importante que essa frente não atinja a armadura, sob pena de despassivá-la [6].

“É importante registrar, que existe uma grande diferença entre taxas de difusão de CO_2 no ar e na água (na água é cerca de 10^4 vezes mais baixa)” [4].

Com a carbonatação, descaracterizada a capa de passivação, o aço se corrói de forma generalizada, tal como se estivesse simplesmente exposto à atmosfera sem qualquer proteção, porém como o agravante de que a umidade permanece no interior do concreto e, portanto, em contato com a armadura muito mais tempo do que se esta estivesse exposta ao ar, já que o concreto absorve umidade muito rapidamente, mas seca bem mais lentamente [4].

II.4 – PROTEÇÃO CATÓDICA

II . 4.1 – Normas aplicadas ao estudo

Do ponto de vista da termodinâmica, a proteção total para o aço estará na zona de imunidade do metal. No entanto, poder-se-á obter adequada proteção sem incorrer-se em grandes e inúteis polarizações. O primeiro critério para aceitação da proteção catódica é o do potencial, o que poderá vir a ser excessivamente rigoroso para determinados casos. O valor prático deste potencial de proteção não é uma constante absoluta para qualquer metal. O valor de $-0,85V$, com o eletrodo de cobre sulfato de cobre, para o ferro tem sido satisfatório em muitos ambientes, principalmente o solo. Contudo, o potencial de proteção para cada caso varia com o eletrólito existente. Esta limitação conduz, na prática, ao uso de diversos outros critérios para a aceitação dos serviços de proteção catódica. Como a própria norma NACE RP 0290-90 [2] recomenda, poder-se-á utilizar uma combinação de critérios que objetivem a melhor proteção para um determinado sistema. Foi utilizado o critério de polarização dos $100mV$, sob o enfoque destas duas normas [1, 2].

Esta norma estabelece, para o sistema de proteção catódica em estruturas de concreto armado, uma queda de polarização mínima de $100mV$. Esta diferença de potencial é obtida a partir do momento que o circuito é interrompido, monitorando-se, em seguida, a queda do potencial através de um eletrodo de referência estável.

Segundo a norma, com a interrupção da corrente, ocorre um desvio imediato do potencial. Este desvio é o resultado da eliminação da voltagem ôhmica, resultante do fluxo de corrente iônica que percola pela solução nos capilares do concreto e que não deve ser incluída nas medidas. Desta forma, a norma propõe que seja utilizado o potencial lido imediatamente após o desvio, sendo este denominado potencial inicial E_i . O potencial final, E_f , é obtido pela leitura decorrido quatro horas do ensaio, onde a diferença de potencial ($\Delta E = E_f - E_i$) é chamada potencial de depolarização e deve ser maior ou igual a $100mV$, a fim de confirmar a eficiência do sistema de proteção catódica, conforme mostrado na figura II.1 [2].

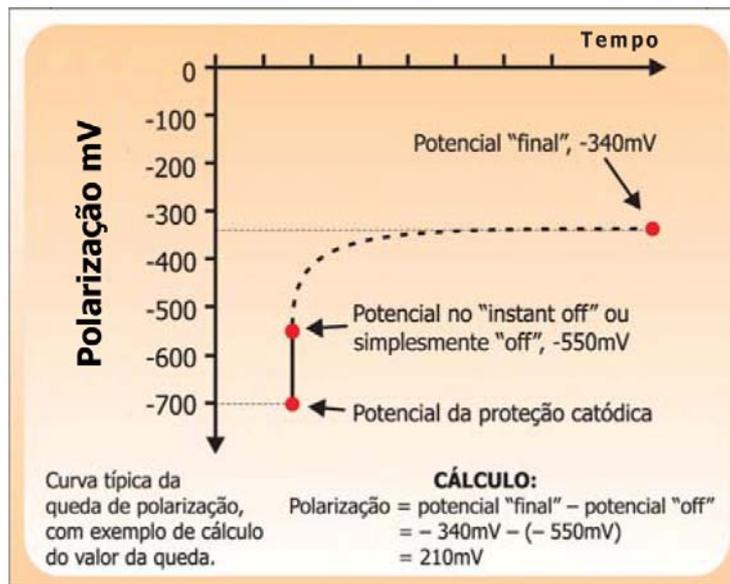


Figura – II.7 – Curva do Potencial de depolarização em função do tempo [2].

A norma SHRP-S-359 estabelece um maior grau de flexibilidade comparado com a norma NACE [2], uma vez que correlaciona a polarização necessária ou o potencial de depolarização à concentração de íons cloretos (Cl⁻) presentes na estrutura do concreto, conforme mostrado na tabela II.1.

Tabela II.1

Valores da Concentração de íons Cloretos e a Polarização Necessária para Estrutura de Concreto Armado

Valores de [Cl ⁻] em função do ΔE	
Concentração de íon Cl ⁻ (kg/m ³ de concreto)	Potencial de Depolarização ou polarização necessária (mV)
< 0,6	0
0,6 – 1,2	60
1,2 – 3,0	80
3,0 – 6,0	100
6,0 – 12,0	150

Esta norma relaciona somente o teor de íons Cl⁻ e não menciona outros íons nocivos à integridade da estrutura do concreto no sistema de proteção catódica.

O critério do intervalo de tempo para obter o valor do potencial final é idêntico ao intervalo de tempo adotado pela norma NACE [1], ou seja, quatro horas.

II.4.2 – Fundamentos da proteção catódica

Proteção catódica é definida como a redução ou eliminação da corrosão devido a transformação das armaduras em catodos, devido a imposição de corrente galvânica ou impressa [5].

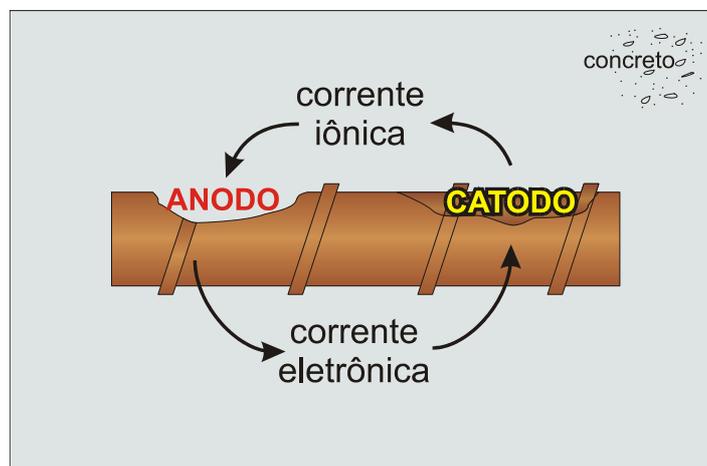


Figura II.8 - Esquema de uma pilha de corrosão quando presente em um trecho da armadura [5].

Sob determinadas condições, uma área da superfície da armadura torna-se anódica e uma outra torna-se catódica. A diferença de potencial, entre o anodo e o catodo, favorece o crescimento de uma corrente de corrosão galvânica que flui para o anodo dentro do ambiente concreto. Esta corrente penetra na estrutura do aço, a partir do catodo e através do concreto, sendo que o circuito é completado pelo fluxo eletrônico de corrente através da armadura retornando ao catodo, figura II.8. O resultado desta pilha de corrosão é a perda do metal, na forma de corrosão galvânica generalizada ou na forma de pites, nas áreas anódicas [4].

Um exemplo de proteção catódica é apresentado na figura II.9 onde, nas regiões susceptíveis ou propriamente nas pilhas de corrosão, supera-se as correntes de corrosão,

perniciosas ao aço, impondo-se correntes galvânicas de proteção em toda a área comprometida. As correntes galvânicas de proteção, uma vez atuando em toda a área especificada, impedirão o funcionamento de regiões anódicas e, portanto, parando a corrosão.

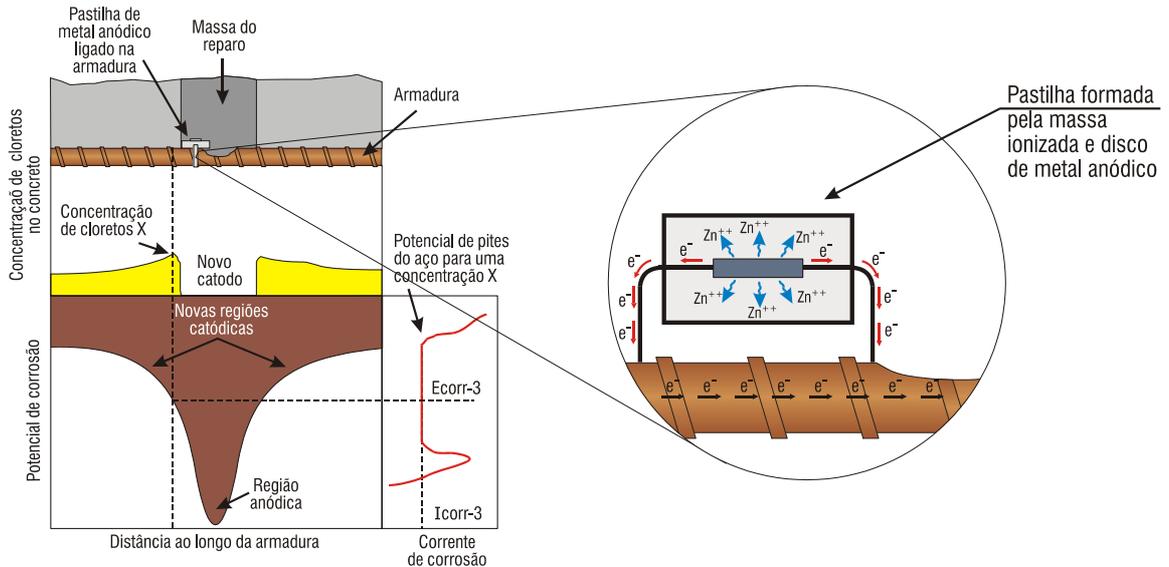


Figura II.9 - Seção de uma estrutura de concreto armado recuperada com a utilização de pastilha galvânica [5].

O conceito de proteção catódica está intimamente relacionado aos diagramas potencial – pH de Pourbaix, e as curvas de polarização eletroquímica, particularmente quando há presença de soluções químicas estranhas presentes na massa do concreto, tornando-o um eletrólito em potencial

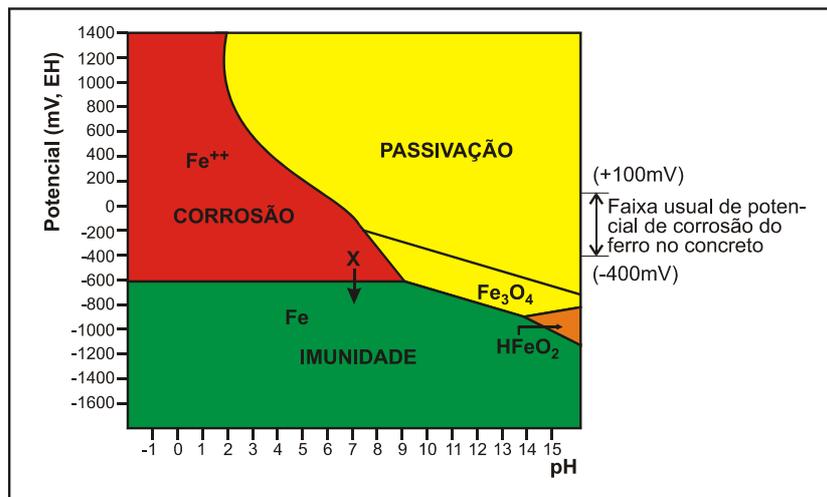


Figura II.10 - Diagrama de Pourbaix de equilíbrio termodinâmico simplificado. Potencial x pH para o sistema Fe-H₂O a 25°C, delimitando os domínios de corrosão, passivação e imunidade [4].

Pourbaix demonstrou, conforme o diagrama potencial versus pH do sistema ferro-água a 25°C, que para a ordem de grandeza do pH do concreto, aproximadamente 12,5, e para uma faixa usual de potenciais de corrosão da ordem de +100mV a -400mV em relação ao eletrodo padrão de hidrogênio, presentes usualmente em estruturas de concreto armado, as reações verificadas no ferro são de passivação, figura II.10 [4].

O que ocorre, então, é que a armadura presente no interior do concreto, em meio alcalino, fica conservada do fenômeno corrosão, devido originalmente a presença da película de óxidos protetora de caráter passivo, que envolve a armadura. Por outro lado, sob determinadas condições, o aço presente no eletrólito, formado pelo concreto contaminado, poderá ter uma combinação de potencial e pH na região de corrosão, como indicado pelo X no diagrama da figura II.10.

Nesta região, os produtos solúveis da corrosão são espécies estáveis e a corrosão é inevitável. O conceito de proteção catódica torna possível a mudança do potencial da região de corrosão para valores mais negativos, dentro da região de imunidade. Desta forma, impede-se a corrosão [4].

Da mesma forma, através de uma curva de polarização, evidencia-se que o aço encontra-se com um potencial na região de corrosão. A aplicação de proteção catódica muda o potencial para valores mais negativos, exatamente para uma região hachurada, abaixo das curvas apresentadas evidenciados na figura II-11.

A corrente, na intersecção com a área hachurada, indica a magnitude da corrente de proteção catódica necessária para manter o aço no potencial de proteção desejado. A localização da região de imunidade no diagrama potencial-pH, e nas curvas de polarização, pela forma e magnitude das correntes, são função da combinação aço-concreto, sendo este o eletrólito [6].

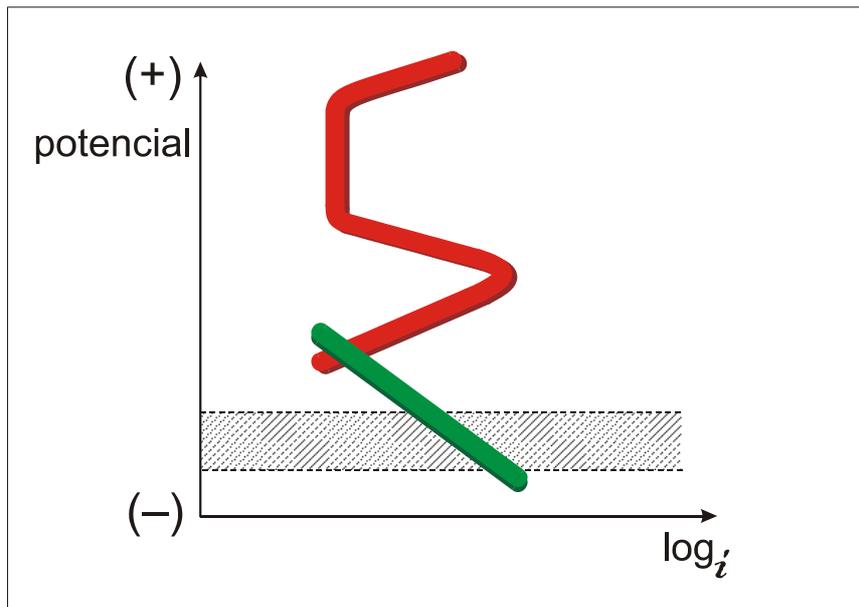


Figura II.11 - Esquema de proteção catódica relacionada às curvas de polarização eletroquímica [6].

Existem duas maneiras de produzir fluxo de elétrons na direção desejada. Ou seja, por corrente galvânica e por corrente impressa. Uma é ligando a estrutura com um metal mais ativo, como o zinco, imerso no eletrólito. O resultado é uma pilha galvânica na qual o metal ativo trabalha como anodo, promovendo um fluxo de elétrons para a estrutura, que torna-se catódica. Neste caso, o anodo é destruído progressivamente e é chamado de anodo de sacrifício

O mesmo resultado pode ser obtido usando-se uma fonte externa, usualmente um retificador. Neste caso, uma corrente direta é impressa entre um anodo auxiliar e a estrutura, fazendo com que esta seja protegida [8].

Na proteção catódica utilizam-se metais de sacrifício como o zinco, alumínio, magnésio e ligas destes materiais com a adição de outros metais [3].

Esses anodos devem satisfazer a certas exigências, entre elas:

- bom rendimento teórico da corrente em relação à massa a ser consumida;
- a corrente não deve diminuir com o tempo;
- não é aconselhável que o rendimento prático da corrente seja muito inferior ao teórico

Visto que a composição da liga é importantíssima para o bom desempenho do anodo galvânico, busca-se adicionar elementos a fim de que o anodo apresente características desejadas, entre os quais pode-se citar:

- potencial de corrosão suficientemente negativo - o manganês, por exemplo, é adicionado a anodos de diversas ligas;
- alta eficiência do anodo - não deve conter impurezas que originem a auto-corrosão do anodo ou que o tornem ineficiente. Neste caso, o teor de ferro deve ser baixo, pois sua presença, ainda que em pequenas quantidades, causa a formação de um revestimento denso sobre o metal mais ativo inibindo o fluxo de corrente. A adição de alumínio e cádmio ao zinco minimiza tal efeito;
- estado ativo para a corrosão uniforme do anodo, o que evita sua passivação. A adição mercúrio ou índio em anodos de ligas de alumínio reduz tal efeito [5].

A seleção dos anodos não deve ser feita de forma aleatória. Sua utilização deve ser estabelecida com base nas características da estrutura a ser protegida e também deve-se conhecer qual o eletrólito que estará em contato com o material metálico. Por exemplo, os anodos de liga de alumínio são usados em estruturas metálicas imersas offshore. Já os anodos de magnésio são utilizados em estruturas metálicas imersas em água doce, de baixa resistividade ou em solos com resistividade elétrica de até 3.000 Ω .cm. Desta forma, anodos de zinco puro não devem ser utilizados no ambiente alcalino do concreto, já que passivam-se facilmente neste meio [3].

Dos comentários acima, pode-se verificar que, em geral, os anodos galvânicos são aplicados a eletrólitos com pequena resistividade elétrica, ou seja, de até 3.000 Ω .cm e em estruturas cujo aço necessite de pequenas quantidades de corrente, normalmente até 5 A, uma vez que as diferenças de potenciais envolvidas são reduzidas, necessitando de circuitos com baixas resistências elétricas para o fornecimento da corrente de proteção catódica [3].

A figura II.9 mostra um exemplo de proteção catódica, feita com corrente galvânica em uma estrutura de concreto armado contaminada por cloretos, utilizando-se pastilhas galvânicas como as ensaiadas neste trabalho [4].

De modo a evitar a surgência de células incipientes de corrosão, tipicamente começando em torno do reparo, conforme figura II.7 anterior, injeta-se um determinado nível de corrente, com a utilização de pastilhas galvânicas como as ensaiadas neste trabalho, suficiente para promover a chamada “prevenção catódica” [21].

Este anodo de sacrifício é composto por um disco em liga de alumínio-zinco-índio, imersa em massa cimentícia rica em sal de lítio, que promove e sustenta a atividade do metal anódico [24].

Adicionalmente, a presença dos íons de lítio inibem qualquer intenção de ocorrência de reações entre o álcali do cimento e os agregados do concreto, ao mesmo tempo e que, na forma de sal de lítio, LiNO_3 , possui características higroscópicas, mantendo a interface anodo-massa cimentícia úmida e condutiva [55, 5].

II.4.3 – A relação entre áreas catódicas e anódicas

A relação entre áreas expostas de materiais tornados anódicos e catódicos, uma vez interligados, é muito importante, uma vez que interessa ao controle da velocidade da conseqüente corrosão galvânica.

Quanto maior o catodo, comparado ao anodo, maior a redução de oxigênio ou outra reação catódica, aumentando a corrente galvânica, com o desenvolvimento de mais corrosão no anodo. Assim, como a corrosão galvânica é freqüentemente dependente da velocidade de difusão do oxigênio dissolvido no catodo, a quantidade total de corrosão galvânica é independente do tamanho do anodo e é proporcional a área da superfície catódica [20].

Ao aplicar-se proteção catódica por corrente galvânica, utilizando-se anodos de sacrifício, estaremos formando um sistema galvânico com polarização catódica, ou seja, altera-se o potencial do aço, que está sendo protegido, em direção a valores mais negativos devido ao fluxo de corrente galvânica introduzido. Assim, a corrente galvânica introduzida

é proporcional a área superficial das armaduras a serem protegidas ou catodizadas. Logo, de acordo com a figura II.12, e sob condições ideais, como por exemplo um ambiente como o concreto úmido, desde que haja similaridade entre áreas anódicas e catódicas, evitar-se-á os efeitos adversos da relação entre áreas na proteção catódica por corrente galvânica [22].

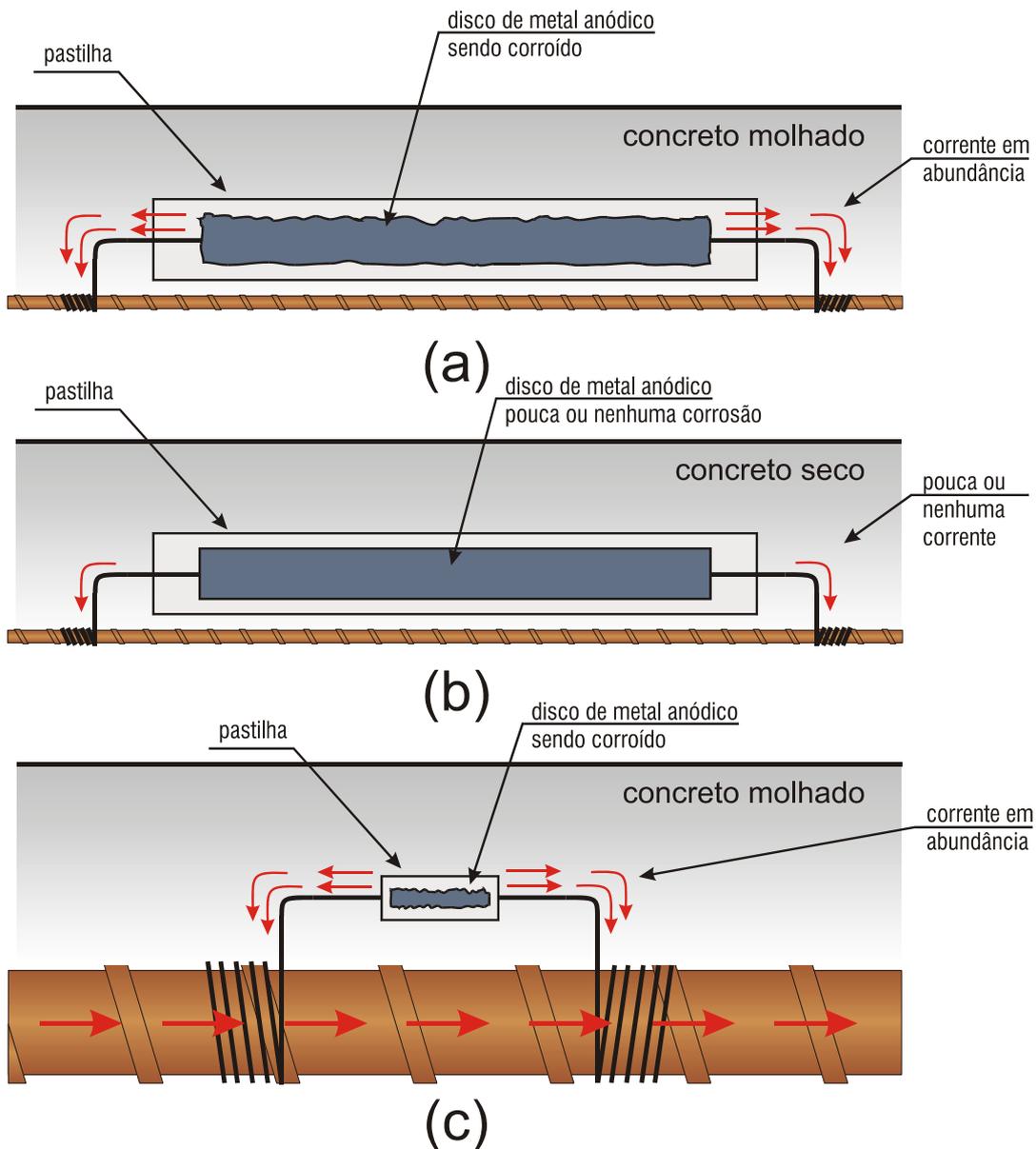


Figura II.12 - a) grande área de anodo, pequena área de catodo com alta condutividade eletrolítica. b) grande área de anodo, pequena área de catodo e baixa condutividade eletrolítica. c) pequena área de anodo, grande área de catodo e grande condutividade eletrolítica [22].

II.5 - RESISTIVIDADE DO CONCRETO

A resistividade iônica é um parâmetro que depende do teor de umidade, da permeabilidade e do grau de ionização do eletrólito presente no interior do concreto. Existe proporcionalidade direta entre a taxa de corrosão e a condutividade iônica presente no concreto armado. A resistividade ou, seu inverso, a condutividade é um dos principais fatores controladores da função eletroquímica que norteia processos de corrosão no concreto armado. As velocidades de corrosão máximas ocorrem em concretos com altos teores de umidade, os quais apresentam baixa resistividade, porém sem alcançar a saturação dos poros, de modo a não dificultar o acesso do oxigênio [5].

Segundo a bibliografia [9], não se deve utilizar argamassas ou concretos que contenham polímeros para aumentar a aderência e diminuir a retração da massa cimentícia pois, por outro lado, dificultam ou impedem o fluxo iônico necessário ao tratamento com proteção catódica. A tabela II.2 mostra a relação entre resistividade e a probabilidade de corrosão, de acordo com comitê euro-internacional do Beton-CEB [8].

TABELA - II.2
Relação entre a resistividade e a probabilidade de corrosão.
Comitê euro-internacional du beton - CEB

Resistividade do concreto K ohm.cm (ρ)	Indicação de probabilidade de corrosão
> 20	Desprezível
10 a 20	Baixa
5 a 10	Alta
< 5	Muito alta

Considerando a existência de umidade dentro do concreto teremos, como consequência, a redução da resistividade e a massa cimentícia funcionando como eletrólito na ligação entre anodos e catodos ao longo das armaduras. Por outro lado, em dias ensolarados e com a secagem do concreto e a redução da umidade do ambiente, o aumento da resistividade elétrica do concreto será favorecido, à ponto de diminuir o fluxo da corrente de corrosão existente nas armaduras. Como explicado anteriormente, a corrosão no aço do concreto é um processo eletroquímico que gera fluxo de corrente para dissolver

suas regiões anódicas. Quanto menor a resistência iônica do concreto, mais rapidamente a corrente fluirá e maiores serão as chances de corrosão [5].

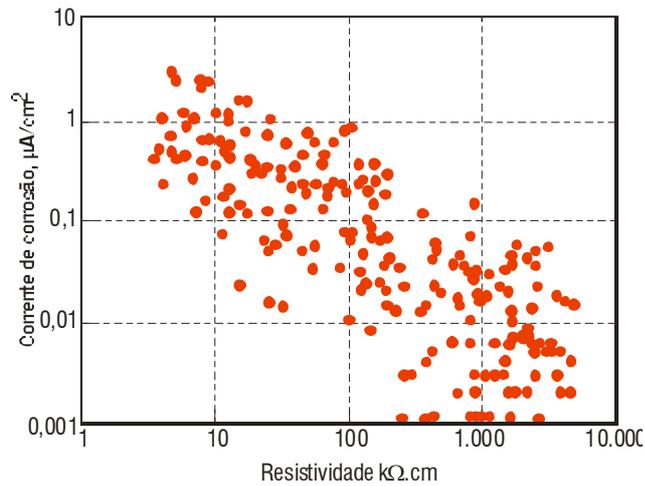


Figura II.13 - Comparação entre corrente de corrosão e resistividade do concreto [10].

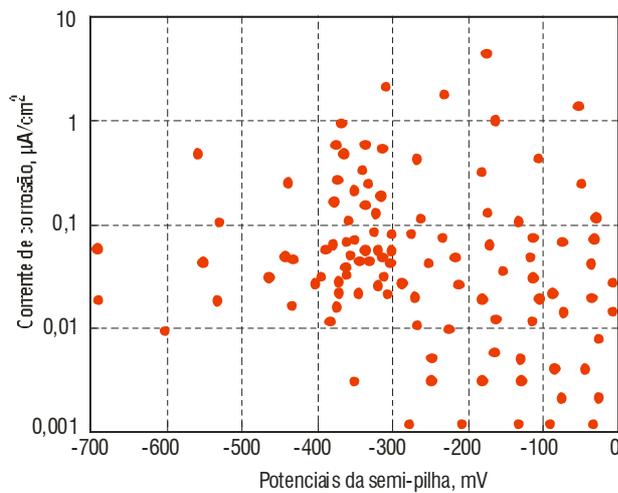


Figura II.14 - Comparação entre a corrente de corrosão e os potenciais de corrosão obtidos com a semi-pilha.

A figura II.3 mostra a relação entre a velocidade de corrosão no concreto e sua resistividade. Comparando-se com a figura II.10 fica evidente que, quando o aço perde sua passividade a resistividade do concreto versus sua velocidade da corrosão informa-nos da existência de processos de corrosão tanto quanto os potenciais [10].

De um modo geral ter-se-á para concretos de edificações, valores de resistividade situados entre 8 e 12K.ohm.cm [16].

II.6 - MEDIÇÃO DOS POTENCIAIS DE CORROSÃO

Existem vários tipos de eletrodos de referência inertes, próprios para se instalar no interior da massa do concreto, de modo a se obter dados da estrutura com ou sem proteção catódica. Estes eletrodos são elementos ativos que têm um coeficiente de equilíbrio dinâmico extremamente pequeno [9].

Metais como o grafite, a platina e algumas misturas de óxidos metálicos comportam-se de forma inerte, uma vez inseridos dentro da massa do concreto, contaminado ou não com íons cloretos, mantendo assim potenciais estáveis. São os chamados eletrodos permanentes. Como os elementos acima suportam bem as descargas anódicas, haverá pouca perda de material, mesmo deixando-se em aberto o circuito de medição dos potenciais por um grande período de tempo [9].

Se o sistema de proteção catódica é operado usando-se o critério de queda dos 100mV para 4 e 24 horas, deve-se utilizar esses eletrodos. Por outro lado, se o sistema é operado usando-se o critério dos potenciais absolutos ou tem a possibilidade de alcançar potenciais muito negativos, utiliza-se a semi-pilha portátil, conectando-se o polo terra ao fio que vem da armadura. A semi-pilha portátil, geralmente a de cobre-sulfato de cobre, também é recomendada para situações onde se deseja fazer comparações entre potenciais encontrados originalmente na estrutura comprometida e após os serviços de tratamento da corrosão. O ideal, na verdade, é fazer o monitoramento usando-se a semi-pilha para medições diretas, instalando-se eletrodos permanentes para servir como calibração, conforme mostrado na figura II.15 [9].

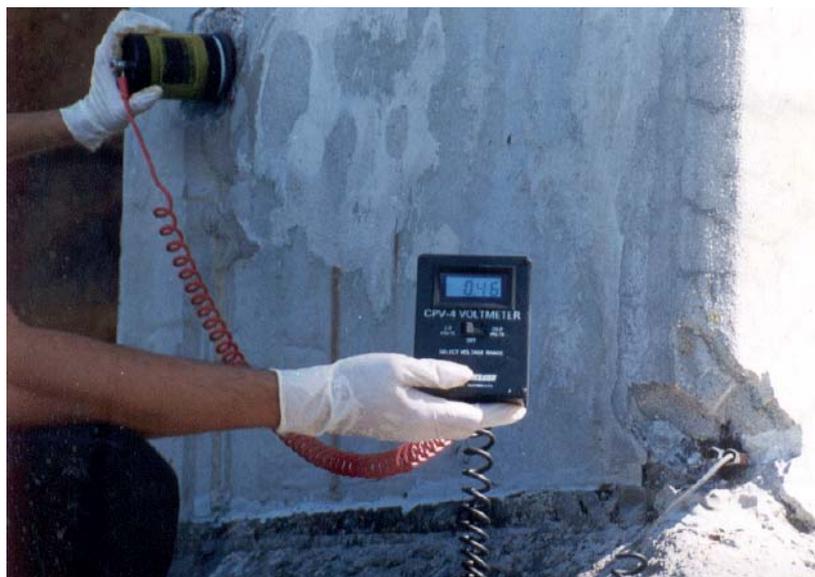


Figura II.15 - Semi-pilha portátil no levantamento do estado de corrosão no concreto armado [23].

II.7 - SAIS DE LÍTIO

Existem vários estudos sobre a utilização de sais de lítio, em especial o nitrato de lítio, para utilização no concreto, seja durante sua elaboração, seja após ter endurecido. A primeira das utilizações, que começa nos anos 50, associa os sais de lítio à melhoria e interrupção das patologias presentes em estruturas de concreto armado conhecidos como reatividade álcali-sílica. Neste particular, ressalta-se os efeitos benéficos dos sais na própria matriz cimentícia, assim como uma extraordinária compatibilidade, em partículas com o nitrato de lítio [12]. A segunda das utilizações, mais recente, associa o emprego de sais de lítio, como agente absorvedor de umidade e diminuidor da resistividade do concreto para emprego em trabalhos de proteção catódica [13, 14]. Nestes últimos trabalhos fica evidenciado a extraordinária característica do nitrato de lítio como agente intensificados de corrente, na medida em que, como sal iônico, diminui drasticamente a resistividade, assim como promove a absorção e a retenção de umidade no material concreto.

Efetivamente, a presença de umidade na interface do anodo de sacrifício com a massa cimentícia aumenta a corrente em sistemas de proteção catódica por corrente galvânica, ao mesmo tempo em que ajuda a redistribuição dos produtos da dissolução do anodo [11].

O crescimento do volume dos produtos da corrosão do metal anódico, empregado como anodo de sacrificio na interface anodo-massa cimentícia, não é crítico, já que não costuma promover tensões naquela região. Contudo, qualquer presença d'água, líquido ou estado de vapor, naquela região tornará mais eficiente o funcionamento da proteção catódica devido a melhoria das condições da resistência do circuito presente entre o anodo e o catodo, formadas pela resistências interfaciais aço-pasta, zona de reação da pasta, interfaces zona de reação-anodo e as resistências próprias do aço, cimento, zona de reação e das fases do anodo [11].

Uma maneira, portanto, de se aumentar a quantidade de água na interface anodo-massa cimentícia é incorporando-se substâncias químicas conhecidas como umectantes, à massa que serve de invólucro ao anodo. Umectantes são substâncias que promovem a retenção de umidade.

Estudos microscópicos comparativos de estruturas de concreto armado, com e sem proteção catódica, tratadas com umectantes mostram que as zonas de reação da pasta permanecem idênticas a de um concreto sem umectante [11].

Umectantes diminuem a atividade da água, fazendo com que o sistema absorva mais líquido para dentro da zona de reação. Esta água adicional aumentará a condutividade total do concreto, diminuindo consideravelmente as resistências interfaciais, melhorando substancialmente o fluxo de corrente proveniente de anodos de sacrificio e a performance da proteção catódica [14].

O sal de lítio utilizado nos experimentos foi o nitrato de lítio comercial em solução aquosa e com concentração não informada pelo fabricante.

CAPÍTULO – III

MATERIAIS E MÉTODOS

III.1 - PRIMEIRA FASE

O objetivo desta fase dos ensaios é obter uma estimativa da melhor relação entre as áreas anódicas e de ferro que deverá ser utilizada para a obtenção dos potenciais adequados à efetivação da proteção catódica e que atendam as normas NACE RP0290-90 [2] e SHRP-359 [1]. Para tanto, ensaiaram-se nove corpos de prova, com dimensões variadas, instalando-se pastilhas galvânicas de diversos tamanhos e telas galvânicas.

Construiu-se, a seguir, uma curva experimental com os valores da polarização necessária versus relação entre áreas (A_a/A_{fe}) a partir dos potenciais de proteção obtidos com a incorporação aleatória de pastilhas e telas galvânicas, com o objetivo de obter-se a relação entre áreas A_a/A_{fe} . As diretrizes de construção desta curva foram as da norma NACE RP 0290-90 [2].

O traço do concreto utilizado na elaboração dos corpos de prova foi o de uso corrente em obras de edificações:

- Cimento CP-3 marca MAUÁ
- Traço em peso 1:2,17:2,94
- Fator água-cimento 0,60 litros/kg
- Resistência à compressão
 - 3 dias de idade 11,7MPa
 - 7 dias de idade 17,2MPa
 - 28 dias de idade 25,4MPa
- Consumo de cimento 344kg/m³
- Consumo de areia à 3% de umidade 686 litros/m³
- Pedra nº 1 720 litros/m³
- Água 210 litros/m³

- A cura do concreto foi feita cobrindo-se o concreto com sacos de papel Kraft molhados durante 7 dias consecutivos. Após esta idade, procedeu-se a molhagem do concreto uma vez por dia até a idade de 28 dias.

As pastilhas e as telas galvânicas foram instaladas sobre os corpos de prova, assentados sobre berço de argamassa cimentícia, com traço similar ao do concreto empregado nos corpos de prova, assim como tendo sua água de amassamento contaminada com o padrão utilizado para ativação de processos de corrosão em barras de ferro, ou seja 3% de NaCl [15].

III.1.1 –Características das Pastilhas e Telas Galvânicas Utilizadas como Anodos de Sacrifício

III.1.1.1 – Características das Pastilhas Galvânicas

As dimensões dos discos das pastilhas utilizadas nos ensaios foram determinadas através da expressão III.1 e os valores obtidos estão na tabela III.1.

$$A = 2 \Pi r^2 + 2 \Pi r h \quad \text{(III.1)}$$

Onde:

r = raio da pastilha

h = altura da pastilha

A = superfície da pastilha



Figura III.1 - A pastilha galvânica composta por argamassa cimentícia ionizada com sal de lítio e que envolve o anodo de sacrifício em forma de disco preso aos arames.

Tabela III.1

Dimensões dos Discos e Áreas Anódicas Utilizadas nos Ensaios de proteção Catódica.

Pastilhas	Dimensões e Áreas Anódicas		
	Dimensões		Área Anódica (cm ²)
	Diâmetro (2r) (cm)	Espessura (h) (cm)	
Pequena (PP)	2,5	0,7	15,31
Média (PM)	3,8	0,7	31,03
Grande (PG)	5,1	0,7	50,26

As pastilhas foram inseridas na massa do concreto, conforme figura III.2.



Figura III.2 - Pastilha coberta com massa similar ao do concreto do CP de modo a fechar o circuito da proteção catódica. O “V” invertido feito com massa é o cobrimento dos 2 arames de ligação da pastilha com a armadura.

III.1.1.2 – Características da Tela Galvânica

Cada tela galvânica tem dimensões de 50cm x 50cm. Seu fio tem diâmetro de 3mm e o espaçamento entre fios é formado por losangos com duas alturas internas. No processo de determinação da área superficial da tela galvânica, adotou-se o seguinte critério:

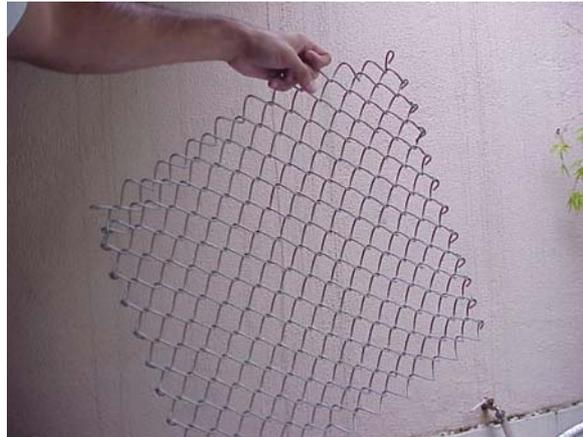


Figura III.3 - Tela galvânica padrão com 60cm x 60cm.

1º Determinação da maior altura interna do losango:

100 cm ----- 14 losangos

X cm ----- “a” losangos

$$a = 0,14 X.$$

2º Determinação da menor altura interna do losango:

100 cm ----- 25 losangos

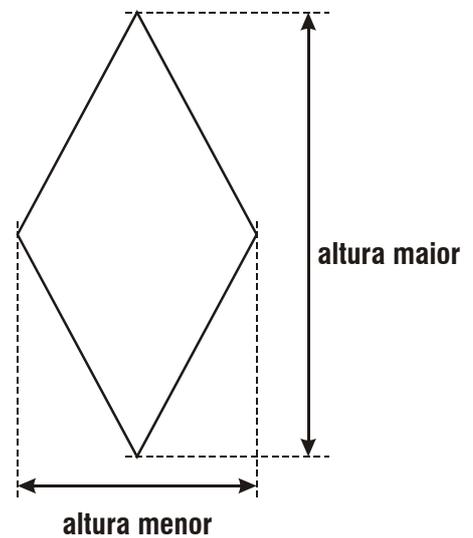
X cm ----- “b” losangos

$$b = 0,25 Y.$$

Se a área de 1 losango é $19,6 \text{ cm}^2$, Logo:

$$\text{Área total} = a \times b \times 19,6 \text{ cm}^2$$

$$\text{Área total} = (0,14 X) \times (0,25 Y) \times 19,6 = \mathbf{0,686XY}$$



A figura III.4 mostra a tela galvânica instalada no corpo de prova utilizada no ensaio.



Figura III.4 - Tela Galvânica instalada no corpo de prova. Nas extremidades do corpo de prova foram feitas as ligações com a armadura e coberto com argamassa.

III. 1.2 - Medições dos Potenciais de Proteção Após a Instalação da Proteção Catódica

As medições dos potenciais de proteção foram realizadas utilizando-se eletrodo de referência, de Cu/CuSO_4 e um voltímetro, marca CPV4. As medições foram feitas em um período de duas horas para cada corpo de prova. O valor final dos potenciais, durante este período, foi determinado através da extrapolação das curvas obtidas.

Nesta fase dos ensaios, mediu-se a resistividade de todos os corpos de prova com o equipamento RESI, de procedência Suíça, totalmente digital, figura III-5.

Os nove corpos de prova apresentam resistividade média de $25,2\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$. A seguir, foram borrifados com solução aquosa comercial de Nitrato de Lítio, passando a ter resistividade média de $3,9\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$, para que o processo de proteção catódica se tornasse mais efetivo [4]. A polarização necessária foi obtida de acordo com os critérios estabelecidos pela norma NACE RP 0290-90[2].



Figura III.5 - Medidor da resistividade do concreto - RESI.

III. 1.3 - Medição dos Teores de Cloretos e pH

A incorporação do cloreto de sódio (3%) na água de amassamento do concreto dos corpos de prova, para promover o processo de corrosão nas armaduras, exigiu a medição posterior do teor de cloretos de modo a enquadrá-los nos limites da norma NACE RP-0290-90[2]. Paralelamente, analisou-se também o pH do concreto.

A medição do teor de cloretos foi realizada pelo sistema de medição CHLOR – TEST- INTERNATIONAL INCORPORATION, conforme mostrado nas figuras III.3.1, III.3.2, III.3.3 e III.3.4. O reagente , Chlor Rid, utilizado para efetuar as medições é patenteado pela indústria, não sendo fornecida a fórmula nem sua composição química.

Os valores dos teores de cloretos encontrados foram constantes e igual a $0,4\text{kg/m}^3$ de concreto.



Figura III. 3.1. - Sistema de medição CHLOR – TEST utilizado nas medições dos teores de Cloretos. Observa-se o frasco com o reagente, a sonda de titulação e o suporte plástico.



Figura III. 3.2. - Sistema de medição CHLOR – TEST. O reagente é colocado dentro do “suporte “ para ser aplicado na superfície do concreto a ser inspecionado.



Figura III. 3.3. - Sistema de medição CHLOR – TEST o reagente, dentro do “suporte”, é esfregado na superfície da estrutura a ser inspecionada, recolhendo-se, posteriormente, o suporte com o líquido para medição.

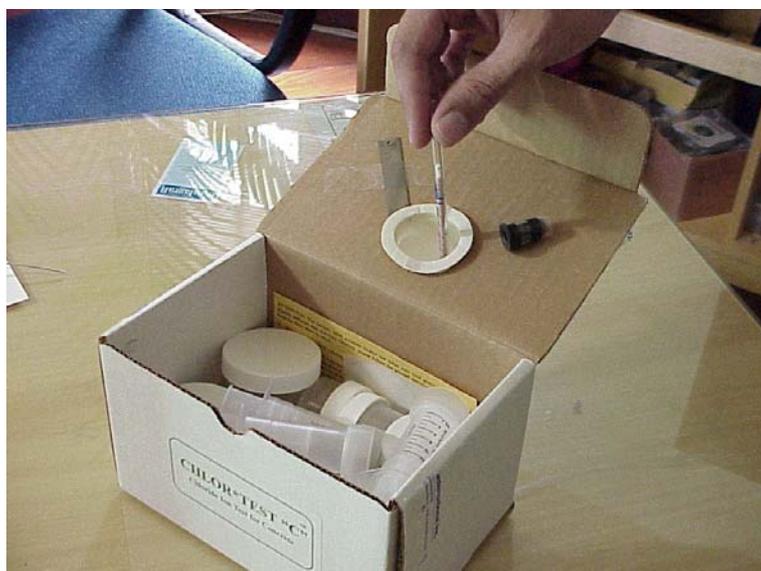


Figura III. 3.4. - Sistema de medição CHLOR – TEST. A sonda de titulação empregada para medir o teor de cloretos, é inserida no suporte contendo o reagente.

O pH foi medido através de um risco feito por um lápis medidor de pH, na superfície do concreto, conforme mostrado na figura III.4.1. O equipamento utilizado foi o INSTA-

CHECK. A tonalidade apresentada por cada risco indica o valor do pH na estrutura do concreto armado. Os valores dos pH encontrados foram praticamente constante, em torno de 12.



Figura – III.3.5 - Lápis INSTA-CHECK utilizado na medição do teor pH.

III.1.4 - Construção da Curva Polarização Versus Relação entre Áreas Anódicas e Catódicas

A curva com os valores da polarização necessária versus relação entre áreas (A_a / A_{Fe}), figura III.5, foi construída a partir dos valores dos potenciais de proteção e das relações entre áreas obtidas em ensaios experimentais com nove corpos de provas contendo pastilhas e tela galvânica, conforme mostrado na tabela III.2.

Tabela III.3

Polarização necessária em função da concentração de cloretos na superfície da armadura, de acordo com a norma NACE RP 0290-90 [2]

Regiões	Teores de Cloretos no Concreto[2] (kg/m^3 concreto)	Polarização necessária* (mV)
I	0,6 a 1,2	60 a 80mV
II	1,2 a 3,0	80 a 100mV
III	3,0 a 6,0	100 a 150mV
IV	6,0 a 12	Acima de 150mV

* Suficientes para encontrar velocidades de corrosão inferiores a 0,0025mm/ano, ou superiores a 20 anos até que ocorram deslocamentos devido a corrosão [2].

As regiões obtidas na curva tem a ver com a tabela III.3 que relaciona teores de cloretos versus polarização necessária da norma NACE RP 0290-90 [2].

Tabela III.2

Valores dos potenciais de proteção e relações entre áreas (A_a / A_{Fe}) necessárias para a construção da curva a partir dos 9 corpos de prova iniciais.

Corpos de Prova*	Anodos		(A_{Fe}) Área de ferro (Armaduras) (cm^2)	Relação entre áreas (A_a / A_{Fe}) (%)	Polarização (ΔE) (mV)
	Quantidade de Anodos	(A_a) Área Anódica (cm^2)			
1A	1 PG	50,26 cm^2	4 568,1 cm^2	1 %	14,8 mV
2C	1PM	31,03 cm^2	1282,5 cm^2	2 %	7,8 mV
4C	1PM + 1 PG	81,29 cm^2	2 341,2 cm^2	3,5 %	8,6 mV
2A	1 PM+ 1PG	81,29 cm^2	1282,5 cm^2	6,5 %	23,9 mV
3B	1 PG	50,26 cm^2	509,7 cm^2	10 %	7,8 mV
3C	1PM + 1 PG	81,29 cm^2	509,7 cm^2	16 %	30,6 mV
3A	2 PG+ 1PP	115,83 cm^2	509,7 cm^2	22 %	53,4 mV
4B	Tela Galvânica (40 cmx 40 cm)	1097,6 cm^2	2 341,2 cm^2	47 %	151,4 mV
1B	Tela Galvânica (60 cmx 60 cm)	2469,60 cm^2	4 568,1 cm^2	54 %	168,6 mV

* As dimensões e outras características pertinentes a cada corpo de prova encontram-se a seguir.

Legenda	
PP	Pastilha Pequena
PM	Pastilha Média
PG	Pastilha Grande
A_a	Área Anódica
A_{Fe}	Área de Ferro

Os valores que evidenciam a variação dos potenciais e as áreas de Ferro são mostrados no capítulo IV, tabela IV.1 à tabela IV.9.

A construção da curva, que informa a polarização necessária, figura III.5, permite delimitar as regiões I, II, III e IV, que levam em consideração a polarização necessária,

muito embora os valores dos cloretos encontrados de 0,4kg/m³ de concreto situe-se abaixo da região I, conforme mostrado na tabela III.3.

Os valores correspondentes aos CPs 1B e 4B não entraram no gráfico já que não corresponderam quanto ao percentual de cloretos.

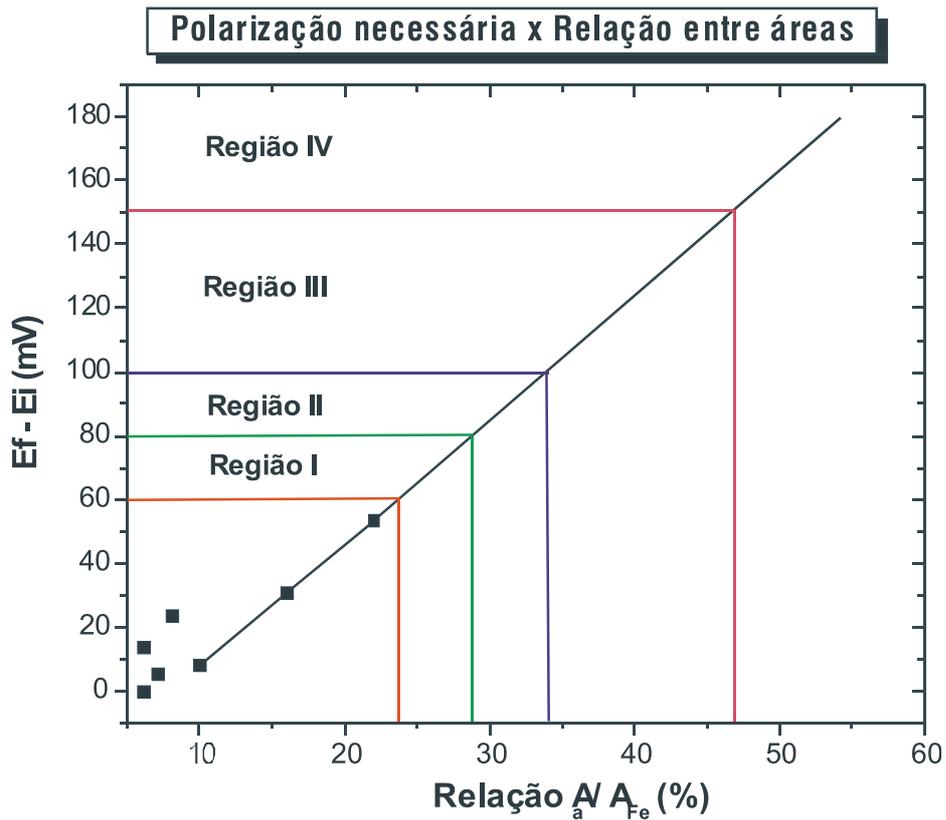


Figura III.5 - Curva polarização necessária em função da relação entre áreas (A_a / A_{Fe})

III.2 – SEGUNDA FASE

III.2.1 – Determinação da Variação dos Potenciais de Proteção nos Corpos de Prova contendo Pastilhas e Tela Galvânica

A seqüência de tabelas III.1 à III.8 e figuras III.1 à III.8 apresentam as variações dos potenciais de proteção e as relações entre áreas que culminaram na construção da curva da figura III.5. Em cada corpo de prova foram feitas cinco verificações do potencial de proteção, seguido da média e do desvio padrão.

TABELA –III.1
PROTEÇÃO CATÓDICA NO CP-1A

Ferro e Concreto								
Dim. (cm)	Volume (m ³)	Qtde. Ferro (qtde x r x h)	Área armadura (cm ²)	Volume armadura (cm ³)	Massa ferro (g)	% rel. padrão	Contaminante	Ativação
70x70x13	0,0637	20 x 0,5 x 65 3 x 0,2 x 120	4568,1	1066,25	8316,70	163%	Cloretos	Nitrato de Lítio
ANODOS								
Quant. anodos		Área anódica (cm ²)		Aa / Aarm		ΔE (Ef – Ei)		
1 PG		50,26		01%		14,8 mV		
Potencial								
DATA – 14 / 08 / 02								
t	1	2	3	4	5	Média	DP	
F	-366	-391	-356	-371	-400	-376,8	18,19	
Inst.	-358	-385	-355	-371	-380	-369,8	13,18	
1'	-343	-375	-353	-368	-365	-360,8	12,74	
10'	-337	-368	-350	-366	-363	-356,8	13,10	
20'	-337	-366	-350	-366	-363	-356,4	12,70	
30'	-337	-365	-350	-366	-363	-356,2	12,52	
45'	-337	-365	-350	-366	-363	-356,2	12,52	
60'	-337	-365	-350	-366	-363	-356,2	12,52	
75'	-337	-364	-350	-366	-358	-355,0	11,83	
90'	-337	-364	-350	-366	-358	-355,0	11,83	
105'	-337	-364	-350	-366	-358	-355,0	11,83	
120'	-337	-364	-350	-366	-358	-355,0	11,83	
240'	***	***	***	***	***	-355,0	***	

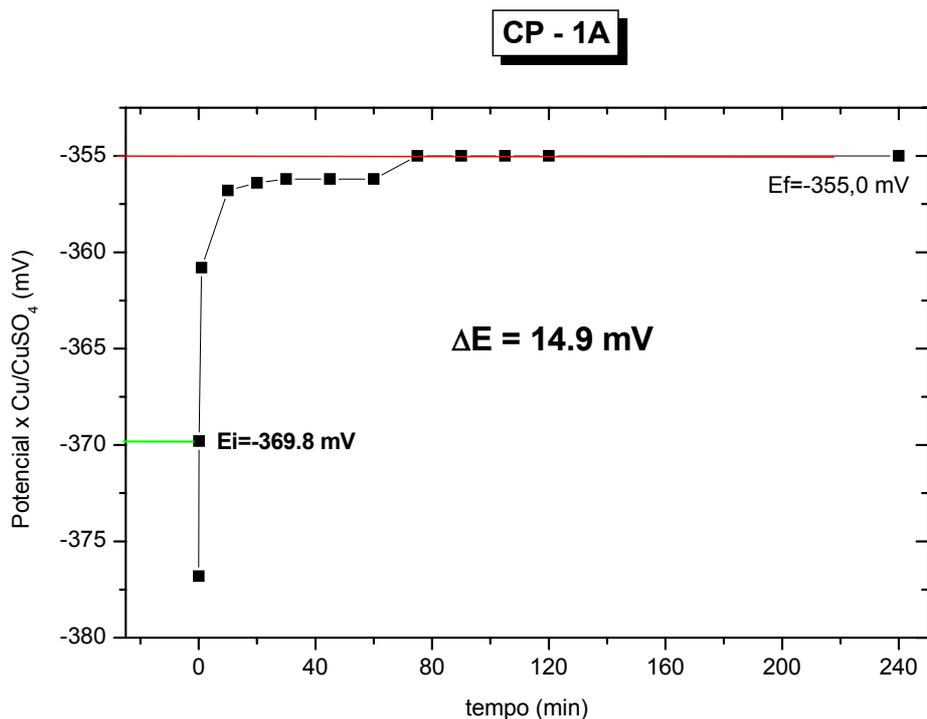


Figura III.1 – Curva potencial em função do tempo para o corpo de prova 1A

TABELA –III.2
PROTEÇÃO CATÓDICA NO CP-1B

Ferro e Concreto								
Dim. (cm)	Volume (m ³)	Qtde. Ferro (qtde x r x h)	Área armadura (cm ²)	Volume armadura (cm ³)	Massa ferro (g)	% rel. padrão	Contaminante	Ativação
70x70x13	0,0637	20 x 0,5 x 65 3 x 0,2 x 120	4568,1	1066,25	8316,70	163%	Cloretos	Nitrato de Lítio
ANODOS								
Quant. anodos		Área anódica (cm ²)		Aa / Aarm		ΔE (Ef – Ei)		
Tela galvânica (60cm x 60cm)		2469,60		54%		168,6 mV		
Potencial								
t	1	2	3	4	5	Média	DP	
F	-560	-584	-590	-568	-595	-579,4	14,86	
Inst.	-521	-545	-544	-550	-537	-539,4	11,28	
1'	-499	-502	-491	-514	-482	-497,6	12,01	
10'	-452	-440	-427	-445	-419	-436,6	13,43	
20'	-439	-421	-404	-429	-400	-418,6	16,50	
30'	-433	-410	-393	-418	-391	-409,0	17,59	
45'	-419	-403	-385	-409	-381	-399,4	16,09	
60'	-414	-395	-381	-403	-376	-393,8	15,61	
75'	-411	-393	-375	-402	-376	-391,4	15,85	
90'	-409	-390	-375	-400	-376	-390,0	14,85	
105'	-405	-386	-367	-395	-371	-384,8	15,97	
120'	-403	-382	-364	-391	-368	-381,6	16,13	
240'	***	***	***	***	***	-370,8	***	

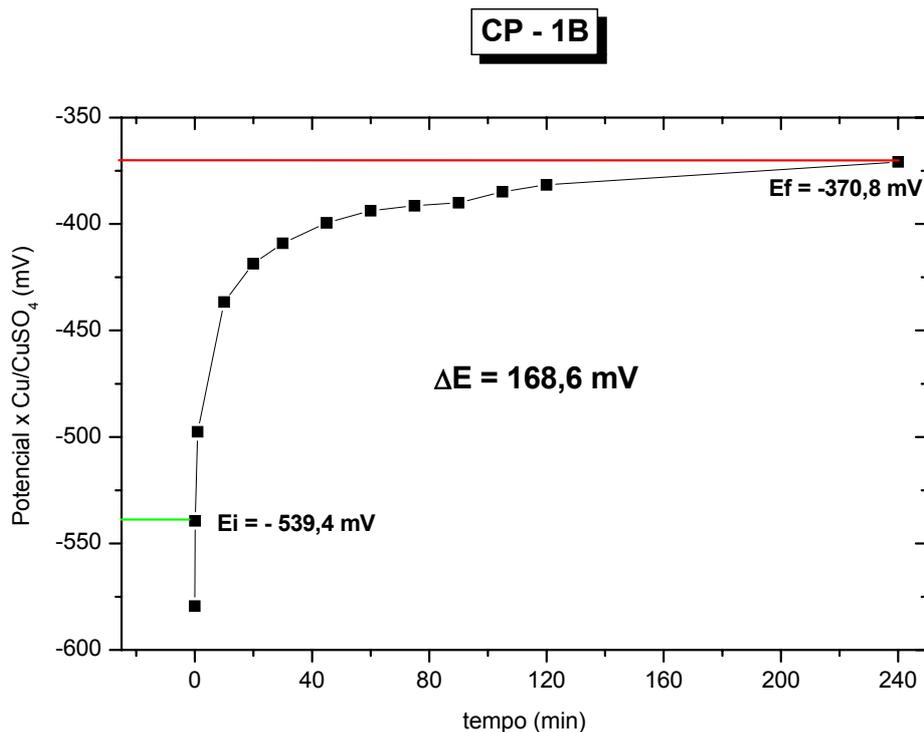


Figura III.2 – Curva potencial em função do tempo para o corpo de prova 1B.

TABELA –III.3
PROTEÇÃO CATÓDICA NO CP-2A

Ferro e Concreto								
Dim. (cm)	Volume (m ³)	Qtde. Ferro (qtde x r x h)	Área armadura (cm ²)	Volume armadura (cm ³)	Massa ferro (g)	% rel. padrão	Contaminante	Ativação
40x50x15	0,0300	8 x 0,5 x 40 3 x 0,2 x 70	1282,5	277,4	2163,6	92%	Cloretos	Nitrato de Lítio
ANODOS								
Quant. Anodos			Área anódica (cm ²)	Aa / Aarm		ΔE (Ef – Ei)		
1 PM + 1 PG			81,29	6,5%		23,9 mV		
Potencial								
t	1	2	3	4	5	Média	DP	
F	-425	-407	-392	-389	-403	-403,2	14,29	
Inst.	-405	-396	-386	-386	-390	-392,6	8,05	
1'	-389	-381	-372	-377	-369	-377,6	7,86	
10'	-382	-375	-370	-374	-367	-373,6	5,68	
20'	-382	-373	-369	-373	-365	-372,4	6,31	
30'	-380	-371	-368	-373	-365	-371,4	5,68	
45'	-377	-370	-367	-372	-364	-370,0	4,95	
60'	-377	-370	-367	-372	-364	-370,0	4,95	
75'	-377	-370	-367	-372	-363	-369,8	5,26	
90'	-377	-369	-367	-372	-363	-369,6	5,27	
105'	-377	-369	-367	-372	-363	-369,6	5,27	
120'	-377	-369	-367	-372	-363	-369,6	5,27	
240'	***	***	***	***	***	-368,7	***	

CP - 2A

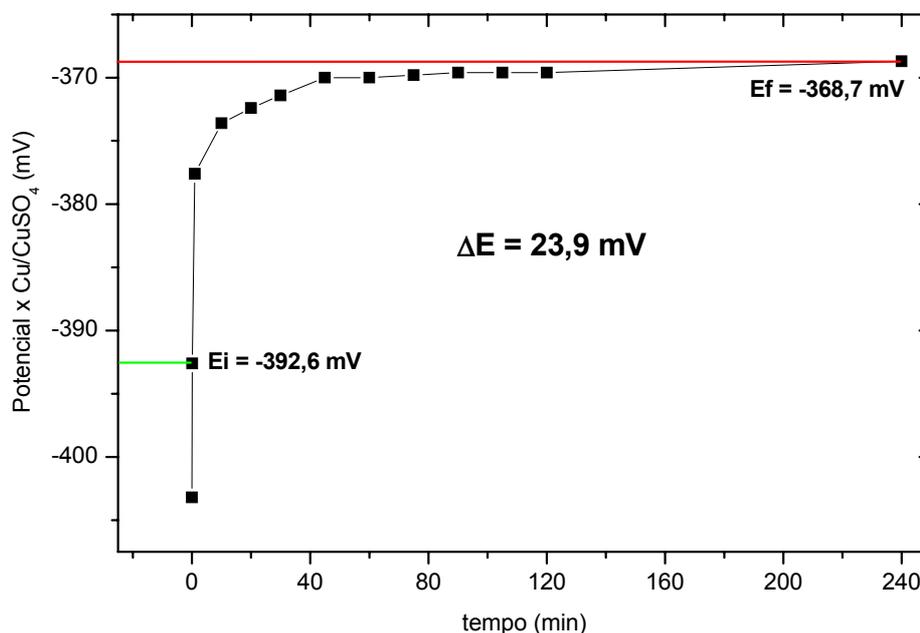


Figura III.3– Curva potencial em função do tempo para do corpo de prova 2A.

TABELA – III.4
PROTEÇÃO CATÓDICA NO CP-2C

Ferro e Concreto								
Dim. (cm)	Volume (m ³)	Qtde. Ferro (qtde x r x h)	Área armadura (cm ²)	Volume armadura (cm ³)	Massa ferro (g)	% rel. padrão	Contaminante	Ativação
40x50x15	0,0300	8 x 0,5 x 40 3 x 0,2 x 70	1282,5	277,4	2163,6	92%	Cloretos	Nitrato de Lítio
ANODOS								
Quant. Anodos			Área anódica (cm ²)	Aa / Aarm		ΔE (Ef – Ei)		
1 PM			31,03	2%		7,8 mV		
Potencial								
t	1	2	3	4	5	Média	DP	
F	-356	-367	-357	-360	-353	-358,6	5,32	
Inst.	-354	-366	-357	-358	-352	-357,4	5,37	
1'	-347	-362	-349	-352	-347	-351,4	6,27	
10'	-343	-362	-349	-351	-343	-349,6	7,80	
20'	-343	-362	-349	-351	-343	-349,6	7,80	
30'	-343	-362	-349	-351	-343	-349,6	7,80	
45'	-343	-362	-349	-351	-343	-349,6	7,80	
60'	-343	-362	-349	-351	-343	-349,6	7,80	
75'	-343	-362	-349	-351	-343	-349,6	7,80	
90'	-343	-362	-349	-351	-343	-349,6	7,80	
105'	-343	-362	-349	-351	-343	-349,6	7,80	
120'	-343	-362	-349	-351	-343	-349,6	7,80	
240'	***	***	***	***	***	-349,6	***	

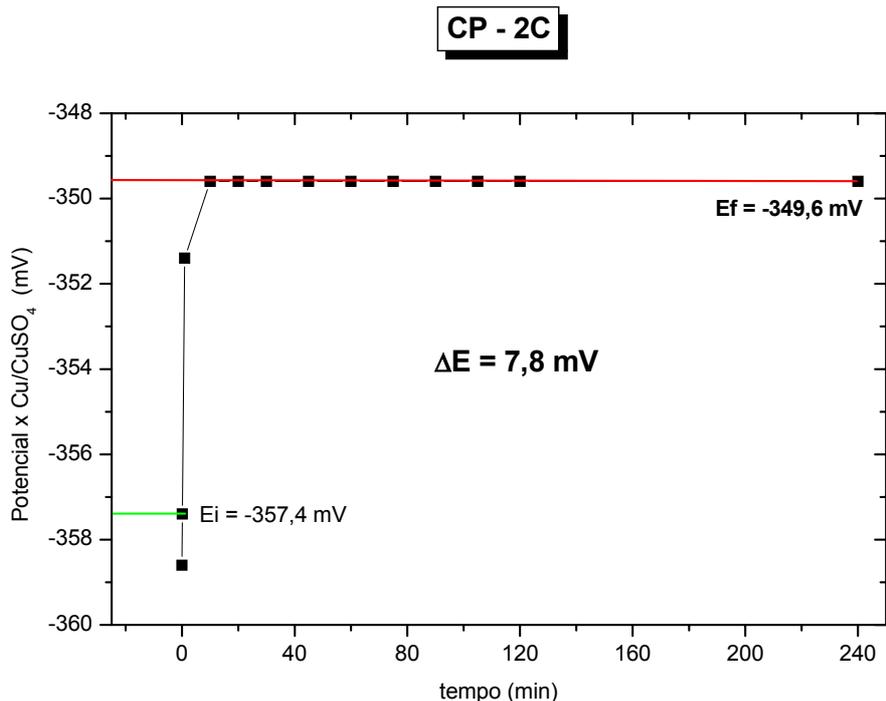


Figura III.4– Curva potencial em função do tempo para o corpo de prova 2A.

**TABELA –III.5
PROTEÇÃO CATÓDICA NO CP-3A**

Ferro e Concreto								
Dim. (cm)	Volume (m ³)	Qtde. Ferro (qtde x r x h)	Área armadura (cm ²)	Volume armadura (cm ³)	Massa ferro (g)	% rel. padrão	Contaminante	Ativação
50x30x15	0,0225	4 x 0,5 x 25 3 x 0,2 x 50	509,7	97,4	759,6	42%	Cloretos	Nitrato de Lítio
ANODOS								
Quant. Anodos			Área anódica (cm ²)	Aa / Aarm		ΔE (Ef – Ei)		
2PG + 1 PP			115,83	22%		53,4 mV		
Potencial								
t	1	2	3	4	5	Média	DP	
F	-423	-427	-434	-430	-480	-438,8	23,38	
Inst.	-392	-393	-401	-407	-418	-402,2	10,76	
1'	-382	-383	-376	-380	-392	-382,6	5,90	
10'	-364	-371	-356	-359	-380	-366,0	9,67	
20'	-359	-368	-351	-354	-376	-361,6	10,31	
30'	-357	-366	-349	-352	-374	-359,6	10,31	
45'	-357	-366	-349	-351	-372	-359,0	9,82	
60'	-357	-365	-348	-350	-370	-358,0	9,46	
75'	-355	-364	-346	-348	-369	-356,4	9,96	
90'	-353	-362	-345	-347	-368	-355,0	9,82	
105'	-352	-361	-344	-346	-367	-354,0	9,82	
120'	-351	-361	-344	-346	-367	-353,8	9,88	
240'	***	***	***	***	***	-348,8	***	

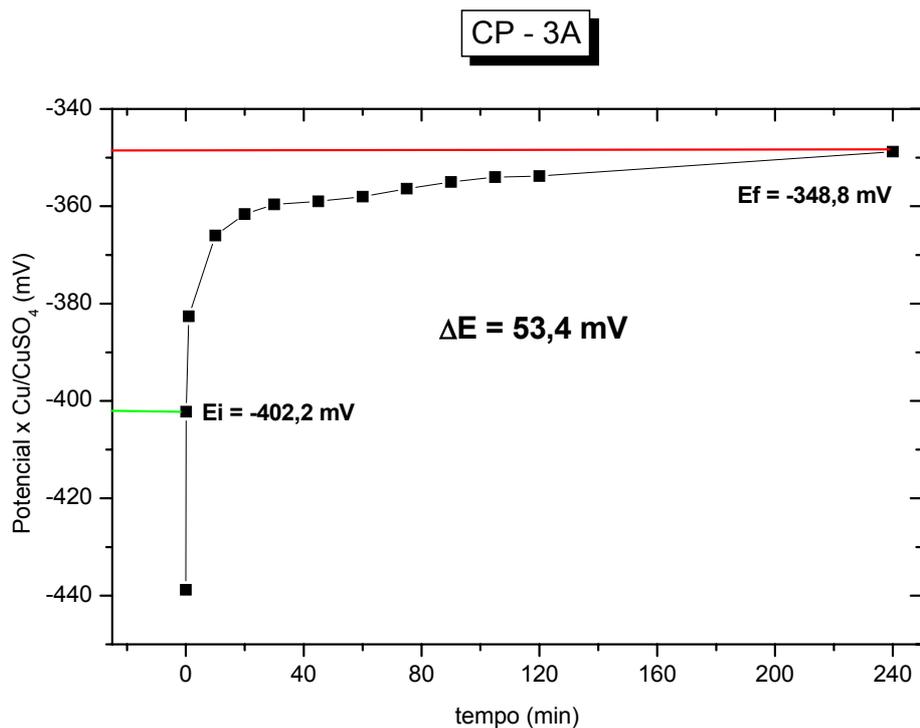


Figura III.5– Curva potencial em função do tempo para o corpo de prova 3A.

TABELA – III.6
PROTEÇÃO CATÓDICA NO CP-3B

Ferro e Concreto								
Dim. (cm)	Volume (m ³)	Qtde. Ferro (qtde x r x h)	Área armadura (cm ²)	Volume armadura (cm ³)	Massa ferro (g)	% rel. padrão	Contaminante	Ativação
50x30x15	0,0225	4 x 0,5 x 25 3 x 0,2 x 50	509,7	97,4	759,6	42%	Cloretos	Nitrato de Lítio
ANODOS								
Quant. Anodos			Área anódica (cm ²)	Aa / Aarm		ΔE (Ef – Ei)		
1 PG			50,26	10%		7,8 mV		
Potencial								
t	1	2	3	4	5	Média	DP	
F	-400	-424	-381	-381	-412	-399,6	18,98	
Inst.	-383	-400	-377	-378	-387	-385,0	9,30	
1'	-378	-391	-374	-374	-385	-380,4	7,44	
10'	-375	-385	-372	-374	-385	-378,2	6,30	
20'	-374	-384	-372	-374	-385	-377,8	6,18	
30'	-373	-384	-372	-374	-385	-377,6	6,35	
45'	-373	-383	-372	-373	-385	-377,2	6,26	
60'	-373	-383	-372	-373	-385	-377,2	6,26	
75'	-373	-383	-372	-373	-385	-377,2	6,26	
90'	-373	-383	-372	-373	-385	-377,2	6,26	
105'	-373	-383	-372	-373	-385	-377,2	6,26	
120'	-373	-383	-372	-373	-385	-377,2	6,26	
240'	***	***	***	***	***	-377,2	***	

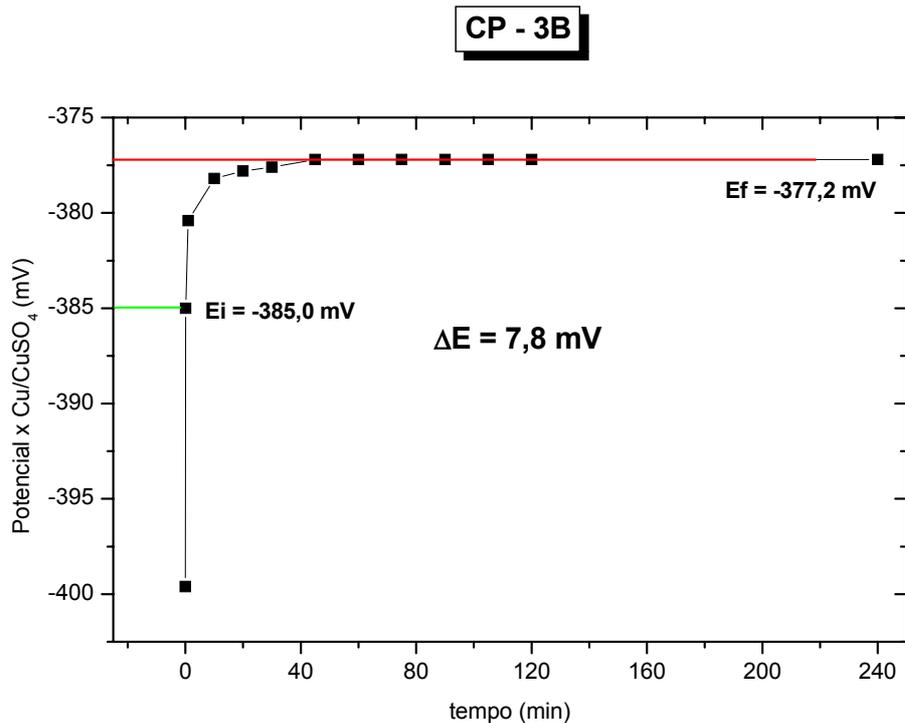


Figura III.6– Curva potencial em função do tempo para o corpo de prova 3B.

TABELA – III.7
PROTEÇÃO CATÓDICA UTILIZANDO NO CP-3C

Ferro e Concreto								
Dim. (cm)	Volume (m ³)	Qtde. Ferro (qtde x r x h)	Área armadura (cm ²)	Volume armadura (cm ³)	Massa ferro (g)	% rel. padrão	Contaminante	Ativação
50x30x15	0,0225	4 x 0,5 x 25 3 x 0,2 x 50	509,7	97,4	759,6	42%	Cloretos	Nitrato de Lítio
ANODOS								
Quant. Anodos			Área anódica (cm ²)	Aa / Aarm		ΔE (Ef – Ei)		
1PM + 1 PG			81,29	16%		30,6 mV		
Potencial								
t	1	2	3	4	5	Média	DP	
F	-413	-446	-416	-412	-434	-424,2	15,11	
Inst.	-381	-405	-408	-405	-412	-402,2	12,19	
1'	-371	-387	-392	-391	-390	-386,2	8,70	
10'	-367	-381	-386	-387	-384	-381,0	8,15	
20'	-364	-380	-382	-385	-382	-378,6	8,35	
30'	-363	-378	-382	-384	-381	-377,6	8,44	
45'	-363	-376	-381	-384	-379	-376,6	8,14	
60'	-363	-376	-381	-384	-379	-376,6	8,14	
75'	-363	-376	-380	-382	-377	-375,6	7,44	
90'	-363	-374	-379	-382	-377	-375,0	7,31	
105'	-363	-374	-379	-382	-377	-375,0	7,31	
120'	-363	-374	-379	-382	-377	-375,0	7,31	
240'	***	***	***	***	***	-371,6	***	

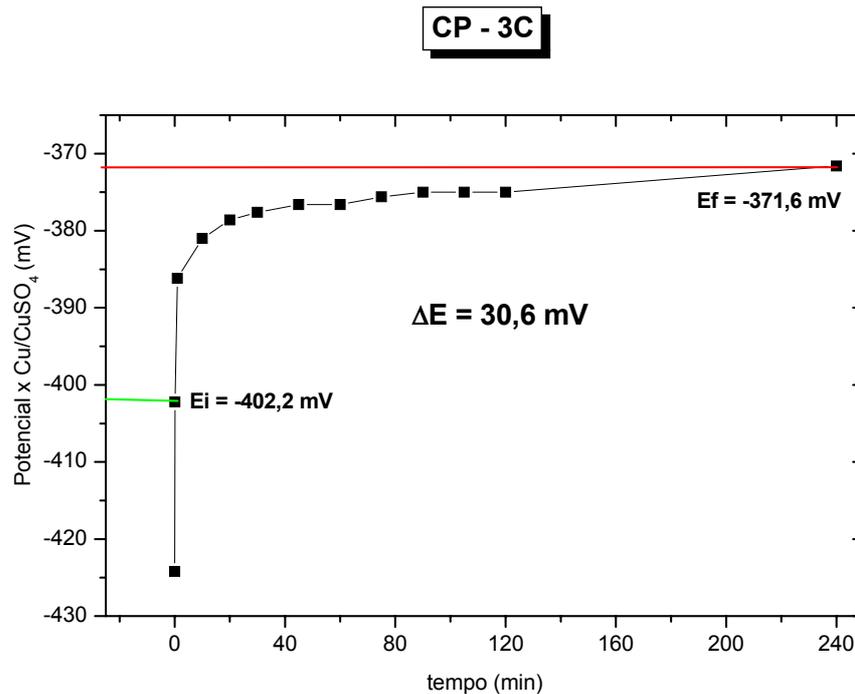


Figura III.7– Curva potencial em função do tempo para o corpo de prova 3C.

TABELA –III.8
PROTEÇÃO CATÓDICA NO CP-4B

Ferro e Concreto								
Dim. (cm)	Volume (m ³)	Qtde. Ferro (qtde x r x h)	Área armadura (cm ²)	Volume armadura (cm ³)	Massa ferro (g)	% rel. padrão	Contaminante	Ativação
50x50x15	0,0375	14 x 0,5 x 45 3 x 0,2 x 90	2341,2	528,7	4124,0	137%	Cloretos	Nitrato de Lítio
ANODOS								
Quant. Anodos			Área anódica (cm ²)	Aa / Aarm		$\Delta E (E_f - E_i)$		
tela galvânica (40 cm x 40 cm)			1097,6	47%		151,4 mV		
Potencial								
t	1	2	3	4	5	Média	DP	
F	-560	-554	-490	-650	-487	-548,2	66,46	
Inst.	-501	-498	-471	-533	-468	-494,2	26,41	
1'	-436	-435	-430	-430	-421	-430,4	5,94	
10'	-405	-399	-400	-392	-390	-397,2	6,14	
20'	-395	-388	-390	-380	-379	-386,4	6,80	
30'	-389	-383	-382	-372	-371	-379,4	7,70	
45'	-376	-372	-375	-364	-364	-370,2	5,85	
60'	-371	-367	-369	-357	-357	-364,2	6,72	
75'	-370	-364	-366	-352	-354	-361,2	7,82	
90'	-368	-360	-364	-351	-351	-358,8	7,66	
105'	-362	-354	-360	-345	-347	-353,6	7,57	
120'	-359	-353	-359	-345	-346	-352,4	6,77	
240'	***	***	***	***	***	-342,8	***	

CP - 4B

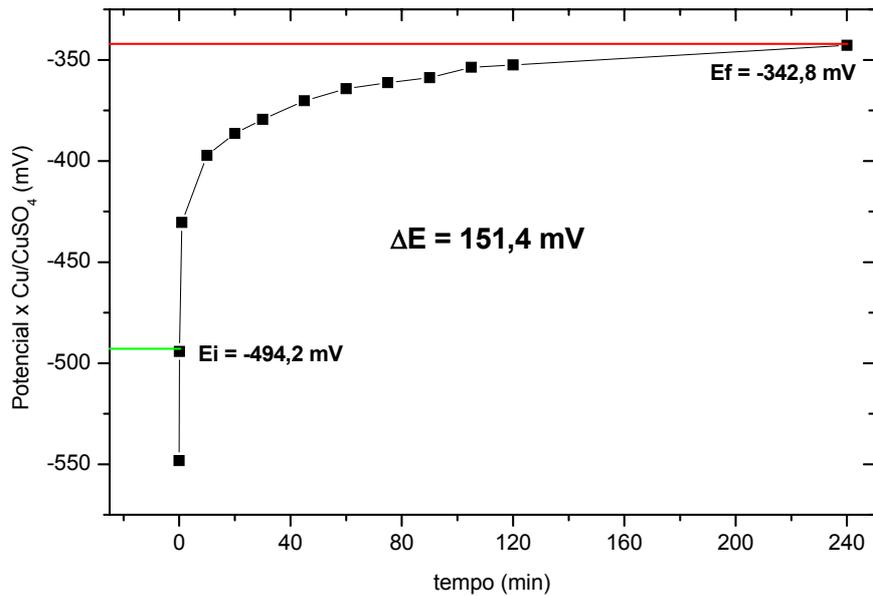


Figura III.8– Curva potencial em função do tempo para o corpo de prova 4B.

TABELA –III.9
PROTEÇÃO CATÓDICA NO CP-4C

Ferro e Concreto								
Dim. (cm)	Volume (m ³)	Qtde. Ferro (qtde x r x h)	Área armadura (cm ²)	Volume armadura (cm ³)	Massa ferro (g)	% rel. padrão	Contaminante	Ativação
50x50x15	0,0375	14 x 0,5 x 45 3 x 0,2 x 90	2341,2	528,7	4124,0	137%	Cloretos	Nitrato de Lítio
ANODOS								
Quant. Anodos			Área anódica (cm ²)		Aa / Aarm		ΔE (Ef – Ei)	
1 PM + 1 PG			81,29		3,5%		8,6 mV	
Potencial								
t	1	2	3	4	5	Média	DP	
F	-440	-494	-428	-444	-449	-451,0	25,26	
Inst.	-436	-486	-427	-441	-431	-444,2	23,95	
1'	-429	-473	-423	-432	-424	-436,2	20,90	
10'	-428	-471	-423	-432	-424	-435,6	20,11	
20'	-428	-471	-423	-432	-424	-435,6	20,11	
30'	-428	-471	-423	-432	-424	-435,6	20,11	
45'	-428	-471	-423	-432	-424	-435,6	20,11	
60'	-428	-471	-423	-432	-424	-435,6	20,11	
75'	-428	-471	-423	-432	-424	-435,6	20,11	
90'	-428	-471	-423	-432	-424	-435,6	20,11	
105'	-428	-471	-423	-432	-424	-435,6	20,11	
120'	-428	-471	-423	-432	-424	-435,6	20,11	
240'	***	***	***	***	***	-435,6	***	

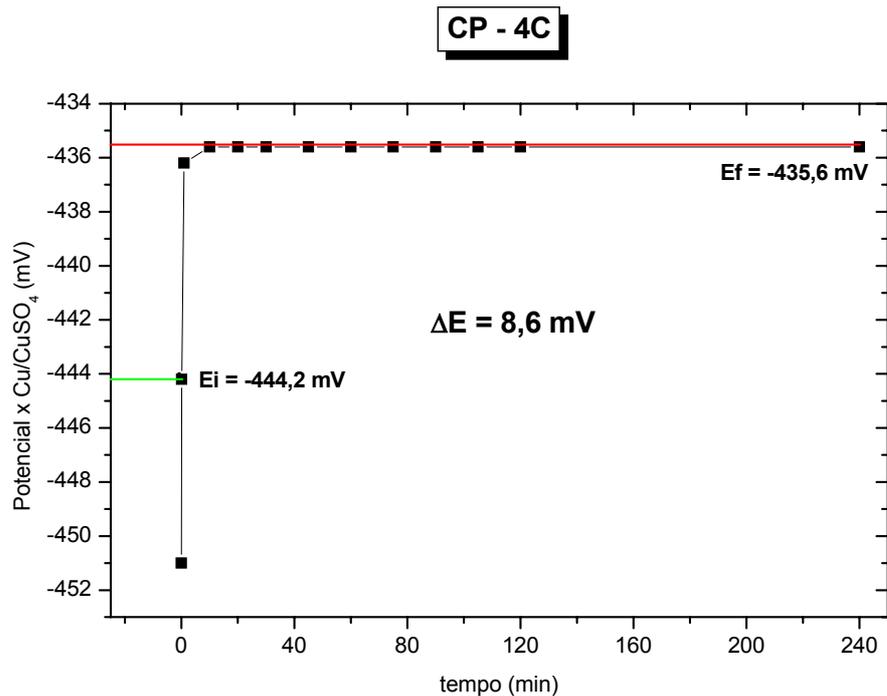


Figura III.9– Curva potencial em função do tempo para o corpo de prova 4C.

III.2.2 - Primeiro estudo das relações entre áreas e polarização

A tabela III.10 apresenta relações entre áreas e polarização do primeiro estudo, além do uso do critério utilizado segundo a NACE RP0290-90[2], e se foi ou não atendido.

TABELA III.10
Primeiro Estudo das relações entre áreas e da polarização [2]

Corpos de Prova	Anodos		Relação entre Áreas (A_a/A_{Fe})	Polarização (mV) $\Delta E (E_f - E_i)$	Critério da Polarização dos 100mv [2]
	Utilizados	Quantidade			
1A	Pastilhas	1 PG	1%	14,8 mV	Não Atendido
2C		1 PM	2%	7,8 mV	Não Atendido
4C		1 PM + 1PG	3,5%	8,6 mV	Não Atendido
2A		1 PM + 1 PG	6,5%	23,9 mV	Não Atendido
3B		1 PG	10%	7,8 mV	Não Atendido
3C		1 PM + 1 PG	16%	30,6 mV	Não Atendido
3A		2 PG + 1PP	22%	53,4 mV	Não Atendido
4B		Tela Galvânica	Tela (40cm x40cm)	47%	151,4 mV
1B	Tela (60cm x 60cm)		54%	168,6 mV	Atendido

A tabela III.11 apresenta a relação entre polarização e áreas (A_a/A_{Fe}) encontradas. Os valores dos potenciais de polarização permitiram fazer a correlação entre áreas.

TABELA III.11
Relação entre Áreas e Polarização [2]

<i>Regiões</i>	Polarização [2] (mV)	Relação entre Áreas (A_a/A_{Fe}) (%)
I	60 a 80mV	24 a 28%
II	80 a 100mV	28 a 34%
III	100 a 150mV	34 a 47%
IV	Acima de 150mV	Acima de 47%

III.2.3 – Segundo Estudo da relação entre áreas e polarização

A tabela III.12 apresenta a quantidade de pastilhas necessárias para que seja atendido, neste segundo estudo, o critério da polarização dos 100mV [2], com base na curva polarização em função da relação entre áreas, figura III.5.

Tabela III.12

**Quantidade de pastilhas necessárias para atender o critério estabelecido pela norma
NACE RP0290-90[2]**

Corpos de Prova	Anodos			Relação entre Áreas (A_a/A_{Fe})	Polarização medida (mV)
	Utilizado	Quantidade de Pastilhas Utilizadas nos Ensaios	Quantidade de pastilhas necessária para a polarização mínima de 100mV		
1A	Pastilha	1 PG	29 PG	33,00%	105 mV
2A		1 PM + 1 PG	7 PG	33,77%	105 mV
2C		1 PM	8 PG	33,77%	105 mV
3A		2 PG + 1 PP	1 PM	34,90%	108 mV
3B		1 PG	2 PG + 1 PM	35,67%	110 mV
3C		1 PM + 1 PG	2 PG	35,67%	110 mV
4C		1 PM + 1PG	14 PG	33,52%	104 mV

Obs.: Retira-se os CPs 1B e 4B já que não entraram na composição da curva da figura III-5.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

IV.1 - PRIMEIRA FASE DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Nesta etapa dos ensaios experimentais, foram dimensionados e confeccionados corpos de prova com base na curva experimental que mostra a polarização necessária versus relação entre áreas, figura III.5.

IV.1.1 – Dimensionamento e confecção dos corpos de prova

No dimensionamento dos corpos de prova foram utilizados os seguintes procedimentos:

- 1– De acordo com a curva experimental obtida, estabeleceram-se relações entre áreas dentro das regiões I, II e III da curva, levando-se em consideração apenas a polarização encontrada.
- 2 – Conhecendo-se as áreas dos diferentes anodos (pastilha e tela) e com as relações entre áreas estabelecidas, ficou determinada a área de anodo ideal para as armaduras empregadas.
- 3 – Com a densidade de armaduras de uma estrutura padrão estabelecida como 80kg de ferro /m³ de concreto, obteve-se os valores das dimensões das armaduras e do concreto dos corpos-de-prova.

Nesta fase, foram confeccionados dezoito (18) corpos de prova para três condições de ensaio, sendo seis corpos de prova ativados com solução aquosa de sal de lítio, seis corpos de prova ativados com água e seis corpos de prova apenas na umidade e temperatura ambiente. A ativação foi realizada através de borrifação diária nos corpos-de-prova pelo

período de uma semana. O concreto utilizado na confecção dos corpos-de-prova foi contaminado previamente, durante sua confecção, com Cloreto de Sódio (NaCl) 3%, a fim de promover a cinética (aceleração) do processo corrosivo nas armaduras pela atuação dos íons cloretos (Cl⁻) [7]. Os valores da resistividade do concreto dos corpos de prova foram analisados após ativação com a solução de nitrato de lítio, encontrando-se um valor médio de 25,2kΩ.cm. Os ativados, posteriormente, com água deram, em média 12,0 kΩ.cm e com sal de lítio apresentaram a resistividade média de 3,9 kΩ.cm.

A tabela IV.4 apresenta os anodos utilizados e as condições de ensaio adotadas, respectivamente.

Tabela IV.1
Condições de ensaios e quantidades de corpos de prova utilizados nesta fase dos ensaios

Condições de Ensaio (Ativação)	Anodos de Sacrifício Utilizados				Quantidade total de Corpos de Prova
	Pastilhas em cada c.p.			Tela galvânica	
	PP	PM	PG		
Seco	1	2	2	1	6
Sal de lítio	1	2	2	1	6
Água	1	2	2	1	6

Legenda	
PP	Pastilha Pequena
PM	Pastilha Média
PG	Pastilha Grande

IV.1.2 Dimensionamento dos corpos de prova

O dimensionamento dos corpos de prova foi estabelecido através das seguintes expressões:

- Determinação da área de ferro:

$$A_{Fe} = 2\pi r^2 + 2\pi r h \quad (IV.2)$$

- Determinação do volume do ferro:

$$Vol_{Fe} = \pi r^2 L \times n^{\circ} \text{ barras} \quad (IV.3)$$

- Determinação da massa de ferro:

$$m_{Fe} = [\rho_{Fe} (7,8g) Vol_{Fe}] / 1000 \quad (IV.4)$$

O volume do concreto foi determinado da seguinte forma:

$$80 \text{ kg de ferro} \text{ ----- } 1 \text{ m}^3 \text{ de concreto (tomada como situação padrão em edificações)}$$
$$x \text{ m}_{Fe} \text{ ----- } X \text{ m}^3$$

Onde:

Xm_{Fe} corresponde a massa de ferro no concreto determinada através da expressão IV.4. Através do volume do concreto, levantou-se as dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios.

A tabela IV.2 mostra as dimensões dos anodos de sacrifício e da quantidades de ferro utilizadas para a obtenção do volume de concreto e, conseqüentemente, dimensionar-se os corpos de prova correlacionados as respectivas regiões da curva da figura III.5. A determinação das áreas dos anodos de sacrifício foi mostrada na tabela III.1.

Tabela IV.2

**Dimensões dos Anodos de sacrifício e Quantidades de ferro
Polarizações encontradas em função da nova relação entre áreas**

Dimensões dos Anodos e do Ferro Empregado nos Ensaios									
Anodos de Sacrifício			Quantidades de Ferro no Concreto (ferro com diâmetro de 10mm)				Polarização e as Regiões na curva		
Pastilhas	Tela	Área (cm ²)	Raio (cm)	Compr. (cm)	Área (cm ²)	Quant. de Ferro	Polarização (mV)	Rel. Áreas	Regiões
Pequena	-	15,31	0,5	10	65,94	2	60	0,23	I
Média	-	31,03		13	127,17	3	60	0,24	I
Média	-	31,03		10	98,91	3	90-100	0,31	II e III
Grande	-	50,26		20	193,11	3	60	0,26	I
Grande	-	50,26		18	174,27	3	90-100	0,29	II e III
-	20x20	274,4		30	766,16	8	100	0,36	III

A tabela IV.3 apresenta o volume de ferro e as dimensões dos corpos de prova obtidos para cada anodo de sacrifício nas três condições(à seco, sal de lítio e água).

Tabela IV.3

Valores dos volumes de ferro, Concreto e as dimensões dos corpos de provas utilizados nos ensaios

Volume e Dimensões dos corpos de provas Utilizados nos Ensaios				
Anodos de Sacrifício	Armadura		Volume de Concreto (m ³)	Dimensões dos Corpos de Prova (cm)
	Massa de Ferro no Concreto (kg)	Volume de Ferro (m ³)		
Past. Pequena	0,122	15,70	0,002	20x10x10
Past. Média	0,239	30,62	0,003	20x15x10
Past. Média	0,184	23,55	0,002	20x10x10
Past. Grande	0,367	47,10	0,005	25x20x10
Past. Grande	0,331	42,39	0,004	20x20x10
Tela Galvânica	1,470	188,40	0,018	45x40x10

IV.1.3 - Ativação dos Corpos de Prova e medição dos potenciais de corrosão

A ativação dos corpos de prova foi realizada através da borrifação diária de solução aquosa comercial de nitrato de lítio por um período corrido de sete dias.

Para a busca dos potenciais de proteção foram realizadas três medições, sendo duas nas laterais e uma sobre o corpo de prova. As medições dos potenciais foram realizadas utilizando-se semi-pilha CPV-4, composta por um eletrodo de referência Cu/ CuSO₄ e um voltímetro, por um período de duas horas em cada corpo de prova. O valor final dos potenciais, após o período de quatro horas de ensaio, foi determinado através da extrapolação das curvas obtidas, conforme mostrado no item III-2.

A temperatura média nos dias de ensaio foi de 34°C e a umidade relativa média foi de 77%.

IV.1.4 - Obtenção da resistividade nos corpos de prova

Foram realizadas medições de resistividade nos dezoito corpos de prova utilizados nos ensaios, antes e depois da ativação com solução aquosa de nitrato de lítio e água. A figura IV.1 mostra o equipamento utilizado para a determinação dos valores da resistividade dos corpos de prova. Nesse ensaio, foram realizadas quatro medições em regiões distintas de cada corpo de prova. Os valores da resistividade são apresentados à seguir.



Figura IV.1 – Equipamento RESI utilizado na obtenção dos valores da resistividade

IV.1.4.1 – Determinação dos valores da resistividade nos corpos de prova ativados com água, sal de lítio e sem ativação (à seco) com telas galvânicas

As tabelas IV.4, IV.5 e IV.6 apresentam os valores da resistividade nos corpos de prova ativados com água, sal de lítio e sem ativação (à seco).

TABELA IV.4
Valores da Resistividade obtidos em Corpos de prova ativados com Água

H₂O (A)						
C P	PONTOS				Média (kΩ.cm)	Desvio Padrão
	I	II	III	IV		
1	7,6	9,4	***	***	8,5	1,3
2	19,0	14,0	14,0	***	15,7	2,9
3	8,3	9,2	***	***	8,8	0,6
4	18,0	12,0	7,6	13,0	12,7	4,3
5	19,0	22,0	9,0	14,0	16,0	5,7
6	9,4	9,2	9,2	13,0	10,2	1,9
Valor Final					12,0	3,3

TABELA IV.5
Valores da Resistividade obtidos em Corpos de prova ativados com Sal de Lítio

LiNO₃ (B)						
C P	PONTOS				Média (kΩ.cm)	Desvio Padrão
	I	II	III	IV		
1	8,3	4,8	***	***	6,6	2,5
2	1,7	4,8	2,8	***	3,1	1,6
3	2,3	2,8	***	***	2,6	0,4
4	3,8	5,4	3,1	3,1	3,9	1,1
5	3,1	5,4	1,9	2,8	3,3	1,5
6	3,8	4,5	3,8	4,5	4,2	0,4
Valor Final					3,9	1,4

TABELA IV.6
Valores da Resistividade obtidos em Corpos de prova sem ativação
(Umidade relativa de 82% e temperatura ambiente de 34°C)

SECO (C)						
C P	PONTOS				Média (kΩ.cm)	Desvio Padrão
	I	II	III	IV		
1	22,0	25,0	***	***	23,5	2,1
2	36,0	21,0	35,0	***	30,7	8,4
3	37,0	26,0	***	***	31,5	7,8
4	23,0	15,0	15,0	23,0	19,0	4,6
5	9,2	13,0	18,0	19,0	14,8	4,6
6	24,0	16,0	13,0	25,0	19,5	5,9
Valor Final					23,2	6,7

IV.2 – SEGUNDA FASE DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

IV.2.1 - Determinação da Polarização dos corpos de provas ativados com água, sal de lítio e sem ativação (à seco) com pastilhas PEQUENAS na região I.

As tabelas IV.13 à IV.15 e a figura IV.16, a seguir, apresentam os valores da polarização obtidos para pastilhas pequenas nas condições seco, ativado com água e sal de lítio.

Tabela.IV.13

Medição das Polarizações nos corpos de prova CP -01 ativados com água

<i>CP - 01</i>						
Anodo	Área Fe (cm ²)	Relação entre Áreas	Região	ΔE (mV)		
PAST.PEQUENA	65,94	0,23	I	60		
<i>H₂O (A)</i>						
Tempo	E (mV)			Média	D P	ΔE (mV)
	1	2	3			
Fechado	-396	-426	-405	-409	15,4	68 mV
Instantâneo	-386	-370	-391	-382	11,0	
1'	-375	-351	-373	-366	13,3	
10'	-352	-330	-353	-345	13,0	
20'	-343	-317	-346	-335	15,9	
30'	-345	-334	-347	-342	7,0	
45'	-348	-329	-344	-340	10,0	
60'	-343	-325	-342	-337	10,1	
75'	-341	-319	-341	-334	12,7	
90'	-338	-316	-337	-330	12,4	
105'	-335	-314	-336	-328	12,4	
120'	-334	-312	-334	-327	12,7	
240'	***	***	***	-314	***	

Tabela IV.14

Medição das Polarizações nos corpos de prova CP -01 ativados com Sal de Lítio

<i>CP -01</i>						
Anodo	Área Fe (cm ²)	Relação entre Áreas	Região	ΔE (mV)		
PAST.PEQUENA	65,94	0,23	I	60		
<i>LiNO₃ (B)</i>						
Tempo	E (mV)			Média	D P	ΔE (mV)
	1	2	3			
Fechado	-608	-612	-572	-597	22,0	199 mV
Instantâneo	-568	-572	-540	-560	17,4	
1'	-534	-524	-518	-525	8,1	
10'	-486	-502	-495	-494	8,0	
20'	-446	-450	-444	-447	3,1	
30'	-429	-434	-423	-429	5,5	
45'	-404	-412	-402	-406	5,3	
60'	-396	-390	-389	-392	3,8	
75'	-371	-376	-375	-374	2,6	
90'	-367	-372	-370	-370	2,5	
105'	-365	-370	-366	-367	2,6	
120'	-363	-368	-362	-364	3,2	
240'	***	***	***	-361	***	

Tabela IV.15

Medição das Polarizações nos corpos de prova CP -01 Sem ativação

CP-01						
Anodo	Área Fe (cm ²)	Relação entre Áreas	Região	ΔE (mV)		
PAST.PEQUENA	65,94	0,23	I	60		
Seco (C)						
Tempo	E (mV)			Média	D P	ΔE (mV)
	1	2	3			
Fechado	-397	-415	-338	-383	40,3	76 mV
Instantâneo	-395	-368	-334	-366	30,6	
1'	-379	-357	-350	-362	15,1	
10'	-349	-340	-340	-343	5,2	
20'	-341	-333	-335	-336	4,2	
30'	-343	-331	-333	-336	6,4	
45'	-341	-327	-330	-333	7,4	
60'	-325	-308	-316	-316	8,5	
75'	-320	-304	-309	-311	8,2	
90'	-314	-300	-301	-305	7,8	
105'	-312	-298	-298	-303	8,1	
120'	-310	-296	-296	-301	8,1	
240'	***	***	***	-290	***	

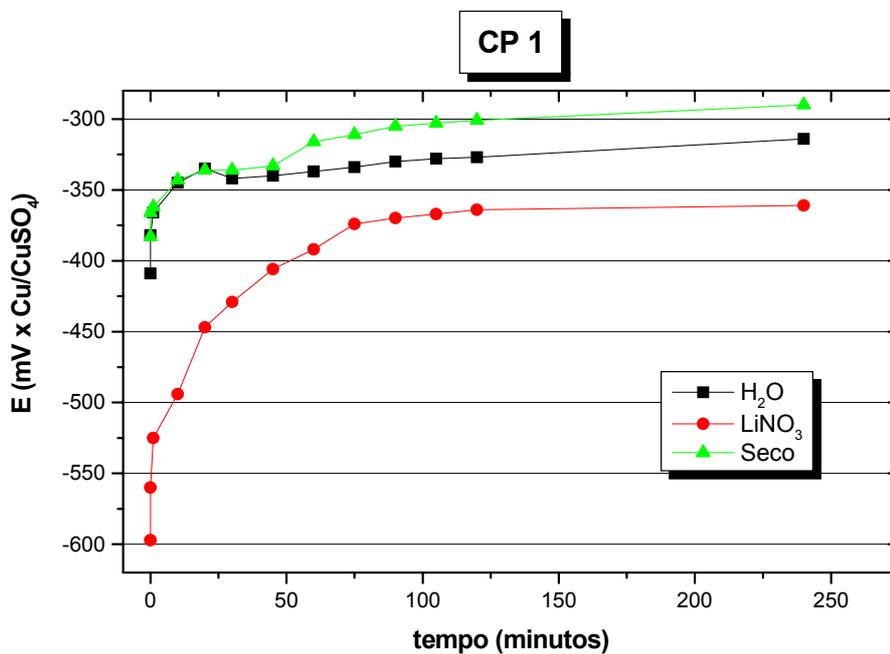


Figura IV.16 – Curva polarização em função do tempo para CP-01

IV.2.2 - Determinação da Polarização nos corpos de provas ativados com água, sal de lítio e sem ativação (à seco) com pastilhas MÉDIAS na região I.

As tabelas IV.17 à IV.19 e a figura IV.20 apresentam os valores da polarização obtidos com a pastilha média nas condições seco, ativado com água e com sal de lítio.

Tabela IV.17

Medição das Polarizações nos corpos de prova CP –02 ativados com água

<i>CP - 02</i>						
Anodo	Área Fe (cm ²)	Relação entre Áreas	Região	ΔE (mV)		
PAST. MÉDIA	127,17	0,24	I	60		
<i>H₂O (A)</i>						
Tempo	E (mV)			Média	D P	ΔE (mV)
	1	2	3			
Fechado	-482	-520	-456	-486	32,2	195 mV
Instantâneo	-468	-435	-449	-451	16,6	
1'	-437	-422	-425	-428	7,9	
10'	-349	-339	-341	-343	5,3	
20'	-326	-315	-317	-319	5,9	
30'	-303	-292	-296	-297	5,6	
45'	-296	-277	-288	-287	9,5	
60'	-290	-278	-280	-283	6,4	
75'	-286	-274	-274	-278	6,9	
90'	-276	-270	-272	-273	3,1	
105'	-272	-262	-265	-266	5,1	
120'	-270	-260	-262	-264	5,3	
240'	***	***	***	-256	***	

Tabela IV.18

Medição das Polarizações nos corpos de prova CP -02 ativados com sal de Lítio

<i>CP -02</i>						
Anodo	Área Fe (cm ²)	Relação entre Áreas		Região	ΔE (mV)	
PAST. MÉDIA	127,17	0,24		I	60	
<i>LiNO₃ (B)</i>						
Tempo	E (mV)			Média	D P	ΔE (mV)
	1	2	3			
Fechado	-538	-510	-557	-535	23,6	101 mV
Instantâneo	-505	-499	-535	-513	19,3	
1'	-495	-493	-497	-495	2,0	
10'	-476	-478	-476	-477	1,2	
20'	-466	-468	-465	-466	1,5	
30'	-464	-466	-463	-464	1,5	
45'	-448	-451	-448	-449	1,7	
60'	-439	-443	-439	-440	2,3	
75'	-434	-441	-433	-436	4,4	
90'	-428	-435	-428	-430	4,0	
105'	-424	-431	-425	-427	3,8	
120'	-422	-430	-423	-425	4,4	
240'	***	***	***	-412	***	

Tabela IV.19

Medição das Polarizações nos corpos de prova CP -02 sem ativação

<i>CP - 02</i>						
Anodo	Área Fe (cm ²)	Relação entre Áreas		Região	ΔE (mV)	
PAST. MÉDIA	127,17	0,24		I	60	
<i>Seco (C)</i>						
Tempo	E (mV)			Média	D P	ΔE (mV)
	1	2	3			
Fechado	-488	-520	-460	-489	30,0	81 mV
Instantâneo	-480	-510	-460	-483	25,2	
1'	-474	-435	-460	-456	19,8	
10'	-454	-434	-460	-449	13,6	
20'	-453	-434	-460	-449	13,5	
30'	-453	-434	-460	-449	13,5	
45'	-453	-434	-460	-449	13,5	
60'	-445	-425	-458	-443	16,6	
75'	-436	-414	-445	-432	15,9	
90'	-426	-404	-433	-421	15,1	
105'	-420	-398	-430	-416	16,4	
120'	-417	-395	-427	-413	16,4	
240'	***	***	***	-402	***	

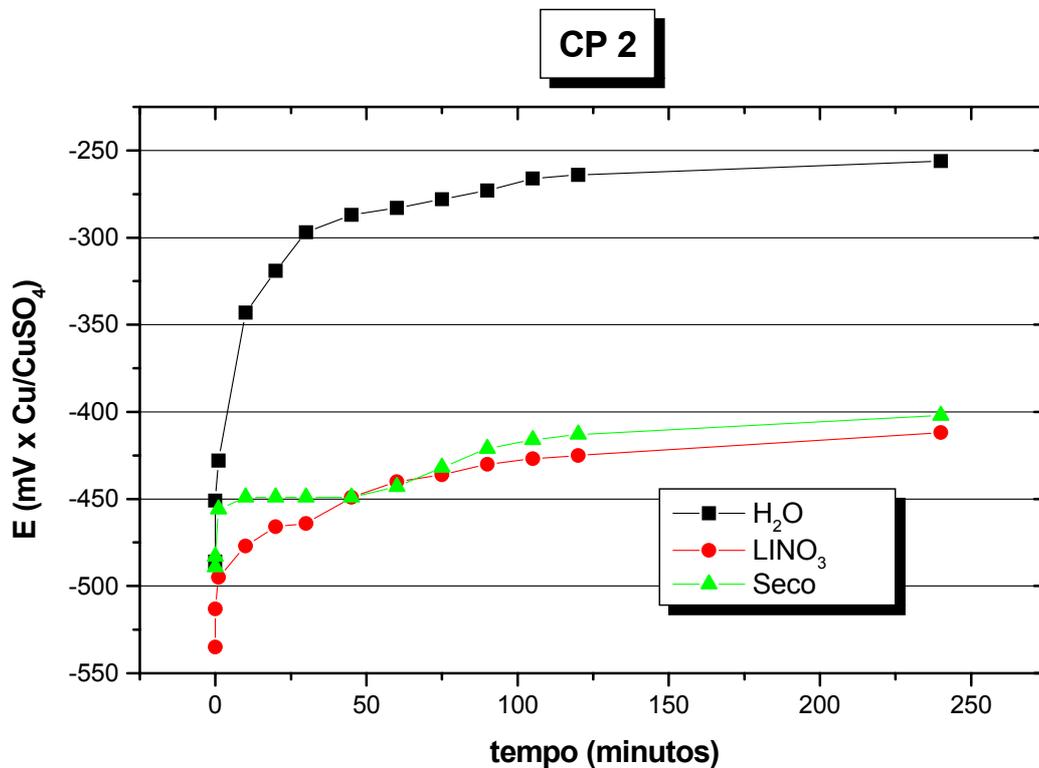


Figura IV.20– Curva polarização em função do tempo para CP-02

IV.2.3- Determinação da Polarização nos corpos de provas ativados com água, sal de lítio e sem ativação (à seco) para pastilhas MÉDIAS nas regiões II e III.

As tabelas IV.21 à IV.23 e a figura IV.24 apresentam os valores da polarização obtidos para pastilhas pequenas nas condições seco, ativado com água e com sal de lítio.

Tabela IV.21

Medição das Polarizações nos corpos de prova CP -03 ativados com água

CP - 03						
Anodo	Área Fe (cm ²)	Relação entre Áreas	Região	ΔE (mV)		
PAST. MÉDIA	98,91	0,31	II / III	90 - 100		
H ₂ O (A)						
Tempo	E (mV)			Média	D P	ΔE (mV)
	1	2	3			
Fechado	-404	-387	-405	-399	10,1	71 mV
Instantâneo	-396	-310	-395	-367	49,4	
1'	-389	-302	-391	-361	50,8	
10'	-358	-273	-361	-331	50,0	
20'	-345	-258	-350	-318	51,7	
30'	-338	-250	-343	-310	52,3	
45'	-348	-261	-351	-320	51,1	
60'	-353	-276	-354	-328	44,7	
75'	-352	-276	-355	-328	44,8	
90'	-346	-266	-351	-321	47,7	
105'	-340	-260	-342	-314	46,8	
120'	-335	-255	-338	-309	47,1	
240'	***	***	***	-296	***	

Tabela IV.22

Medição das Polarizações nos corpos de prova CP -03 ativados com sal de lítio

CP -03						
Anodo	Área Fe (cm ²)	Relação entre Áreas	Região	ΔE (mV)		
PAST. MÉDIA	98,91	0,31	II / III	90 - 100		
LiNO ₃ (B)						
Tempo	E (mV)			Média	D P	ΔE (mV)
	1	2	3			
Fechado	-517	-521	-503	-514	9,5	115 mV
Instantâneo	-492	-496	-486	-491	5,0	
1'	-489	-485	-477	-484	6,1	
10'	-442	-443	-437	-441	3,2	
20'	-423	-423	-418	-421	2,9	
30'	-410	-412	-408	-410	2,0	
45'	-400	-404	-397	-400	3,5	
60'	-390	-404	-388	-394	8,7	
75'	-385	-397	-382	-388	7,9	
90'	-382	-393	-379	-385	7,4	
105'	-380	-391	-378	-383	7,0	
120'	-379	-390	-377	-382	7,0	
240'	***	***	***	-376	***	

Tabela IV.23

Medição das Polarizações nos corpos de prova CP -03 sem ativação

CP-03						
Anodo	Área Fe (cm ²)	Relação entre Áreas	Região	ΔE (mV)		
P AST. MÉDIA	98,91	0,31	II / III	90 - 100		
Seco (C)						
Tempo	E (mV)			Média	D P	ΔE (mV)
	1	2	3			
Fechado	-450	-475	-480	-468	16,1	112 mV
Instantâneo	-410	-434	-435	-426	14,2	
1'	-401	-400	-457	-419	32,6	
10'	-352	-350	-404	-369	30,6	
20'	-334	-327	-382	-348	29,9	
30'	-326	-320	-370	-339	27,3	
45'	-316	-307	-356	-326	26,1	
60'	-312	-300	-347	-320	24,4	
75'	-308	-297	-340	-315	22,3	
90'	-314	-287	-340	-314	26,5	
105'	-314	-287	-340	-314	26,5	
120'	-314	-287	-340	-314	26,5	
240'	***	***	***	-314	***	

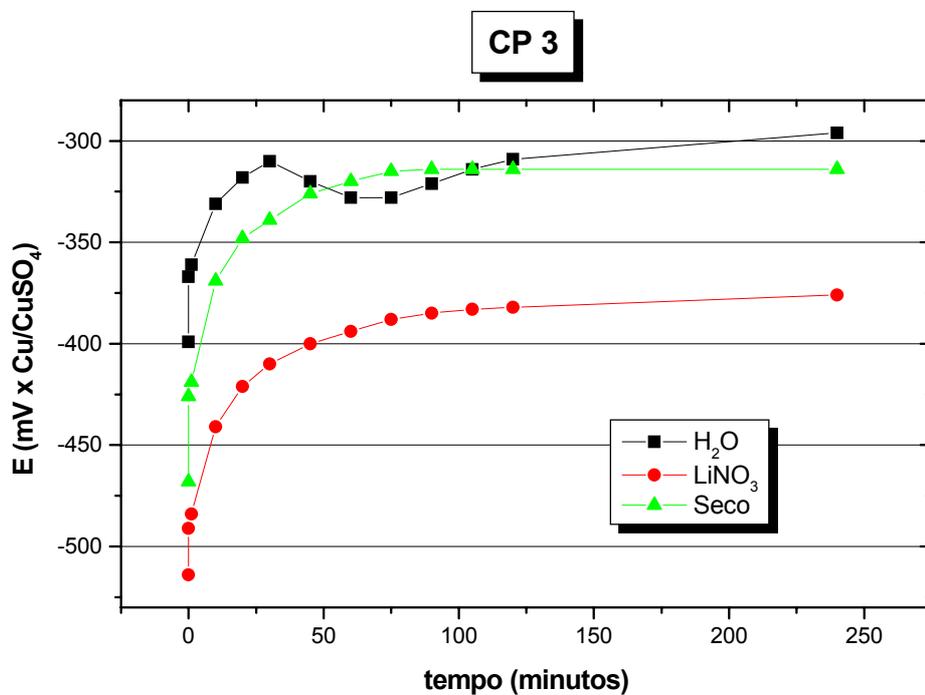


Figura IV.24 - Curva polarização em função do tempo para CP-03

IV.2.4- Determinação da Polarização nos corpos de prova ativados com água, sal de lítio e sem ativação (à seco) para pastilhas GRANDES. na região I.

As tabelas IV.25 à IV.27. e a figura IV.28 apresentam os valores da polarização obtidos para pastilhas pequenas nas condições seco, ativado com água e com sal de lítio.

Tabela IV.25

Medição das Polarizações nos corpos de prova CP -04 ativados com água

<i>CP - 04</i>						
Anodo	Área Fe (cm ²)	Relação entre Áreas		Região	ΔE (mV)	
P AST. GRANDE	193,11	0,26		I	60	
H ₂ O (A)						
Tempo	E (mV)			Média	D P	ΔE (mV)
	1	2	3			
Fechado	-394	-431	-395	-407	21,1	103 mV
Instantâneo	-341	-352	-338	-344	7,4	
1'	-286	-274	-281	-280	6,0	
10'	-275	-252	-265	-264	11,5	
20'	-273	-245	-260	-259	14,0	
30'	-266	-240	-258	-255	13,3	
45'	-252	-241	-256	-250	7,8	
60'	-250	-234	-249	-244	9,0	
75'	-250	-231	-249	-243	10,7	
90'	-250	-231	-249	-243	10,7	
105'	-250	-231	-249	-243	10,7	
120'	-250	-231	-249	-243	10,7	
240'	***	***	***	-241	***	

Tabela IV.26

Medição das Polarizações nos corpos de prova CP -04 ativados com sal de Lítio

<i>CP - 04</i>						
Anodo	Área Fe (cm ²)	Relação entre Áreas	Região	ΔE (mV)		
PAST. GRANDE	193,11	0,26	I	60		
<i>LiNO₃ (B)</i>						
Tempo	E (mV)			Média	D P	ΔE (mV)
	1	2	3			
Fechado	-531	-604	-551	-562	37,7	197 mV
Instantâneo	-519	-550	-531	-533	15,6	
1'	-507	-531	-511	-516	12,9	
10'	-460	-482	-462	-468	12,2	
20'	-436	-450	-438	-441	7,6	
30'	-413	-428	-413	-418	8,7	
45'	-382	-398	-383	-388	9,0	
60'	-368	-398	-369	-378	17,0	
75'	-352	-388	-354	-365	20,2	
90'	-342	-368	-343	-351	14,7	
105'	-338	-364	-339	-347	14,7	
120'	-337	-361	-337	-345	13,9	
240'	***	***	***	-336	***	

Tabela IV.27

Medição das Polarizações nos corpos de prova CP -04 sem ativação

<i>CP - 04</i>						
Anodo	Área Fe (cm ²)	Relação entre Áreas	Região	ΔE (mV)		
PAST. GRANDE	193,11	0,26	I	60		
<i>Seco (C)</i>						
Tempo	E (mV)			Média	D P	ΔE (mV)
	1	2	3			
Fechado	-455	-478	-465	-466	11,5	121 mV
Instantâneo	-433	-423	-430	-429	5,1	
1'	-420	-408	-422	-417	7,6	
10'	-395	-389	-418	-401	15,3	
20'	-367	-352	-412	-377	31,2	
30'	-350	-336	-395	-360	30,8	
45'	-335	-318	-373	-342	28,2	
60'	-326	-306	-361	-331	27,8	
75'	-317	-301	-349	-322	24,4	
90'	-312	-296	-343	-317	23,9	
105'	-309	-291	-340	-313	24,8	
120'	-306	-288	-338	-311	25,3	
240'	***	***	***	-308	***	

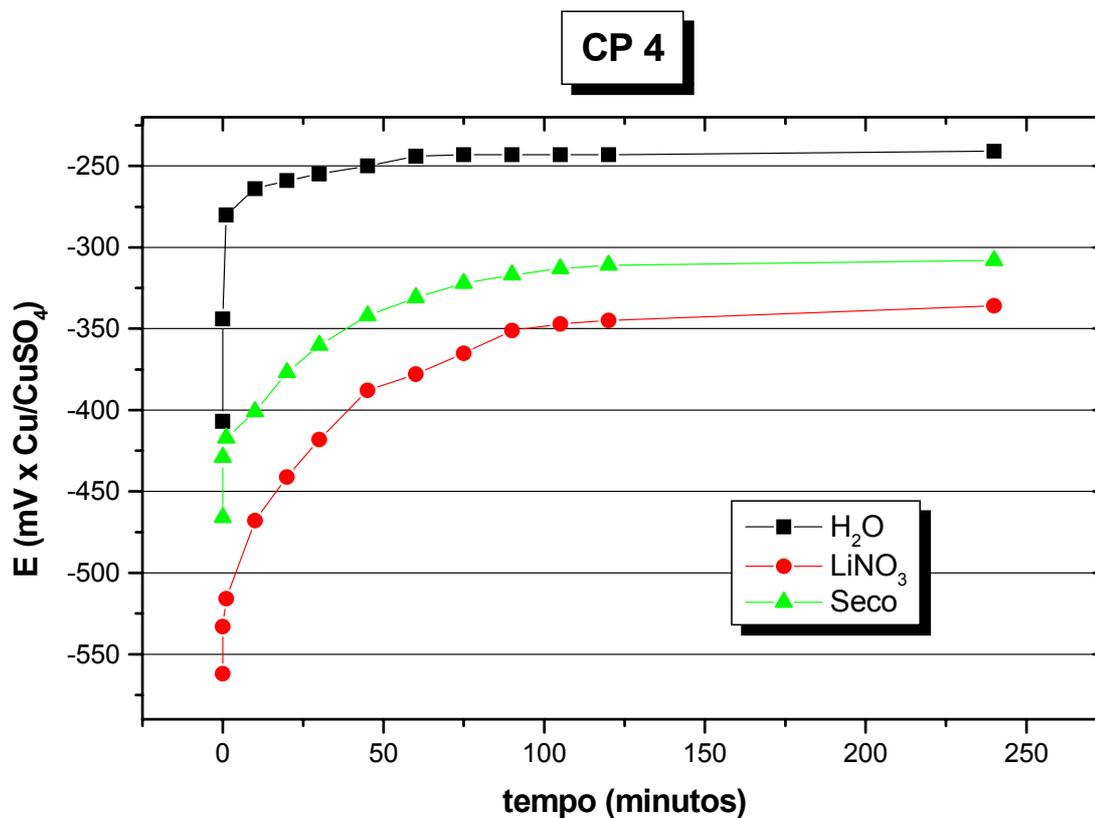


Figura IV.28– Curva polarização em função do tempo para CP-04.

IV.2.5- Determinação da Polarização nos corpos de prova ativados com água, sal de lítio e sem ativação (à seco) para pastilhas GRANDES. nas regiões I e II.

As tabelas IV.29 à IV.31 e a figura IV.32 apresentam os valores da polarização obtidos com pastilhas grandes nas condições seco, ativado com água e com sal de lítio.

Tabela IV.29

Medição das Polarizações nos corpos de prova CP -05 ativados com água

CP - 05						
Anodo	Área Fe (cm ²)	Relação entre Áreas	Região	ΔE (mV)		
PAST. GRANDE	174,27	0,29	II / III	90 - 100		
H ₂ O (A)						
Tempo	E (mV)			Média	D P	ΔE (mV)
	1	2	3			
Fechado	-467	-487	-489	-481	12,2	103 mV
Instantâneo	-422	-430	-424	-425	4,2	
1'	-427	-425	-406	-419	11,6	
10'	-395	-398	-389	-394	4,6	
20'	-375	-379	-370	-375	4,5	
30'	-370	-375	-370	-372	2,9	
45'	-350	-354	-348	-351	3,1	
60'	-342	-345	-342	-343	1,7	
75'	-334	-340	-335	-336	3,2	
90'	-328	-334	-329	-330	3,2	
105'	-324	-330	-325	-326	3,2	
120'	-322	-328	-323	-324	3,2	
240'	***	***	***	-322	***	

Tabela IV.30

Medição das Polarizações nos corpos de prova CP -05 ativados com sal de Lítio

CP - 05						
Anodo	Área Fe (cm ²)	Relação entre Áreas	Região	ΔE (mV)		
PAST.GRANDE	174,27	0,29	II / III	90 - 100		
LiNO ₃ (B)						
Tempo	E (mV)			Média	D P	ΔE (mV)
	1	2	3			
Fechado	-509	-507	-512	-509	2,5	105 mV
Instantâneo	-497	-489	-499	-495	5,3	
1'	-476	-467	-472	-472	4,5	
10'	-449	-442	-445	-445	3,5	
20'	-435	-429	-433	-432	3,1	
30'	-433	-426	-429	-429	3,5	
45'	-415	-409	-412	-412	3,0	
60'	-408	-406	-406	-407	1,2	
75'	-403	-401	-400	-401	1,5	
90'	-402	-398	-398	-399	2,3	
105'	-399	-397	-396	-397	1,5	
120'	-396	-395	-394	-395	1,0	
240'	***	***	***	-390	***	

Tabela IV.31

Medição das Polarizações nos corpos de prova CP -05 sem ativação

CP - 05						
Anodo	Área Fe (cm ²)	Relação entre Áreas	Região	ΔE (mV)		
P G	174,27	0,29	II / III	90 - 100		
Seco (C)						
Tempo	E (mV)			Média	D P	ΔE (mV)
	1	2	3			
Fechado	-415	-460	-411	-429	27,2	88 mV
Instantâneo	-398	-430	-380	-403	25,3	
1'	-412	-407	-373	-397	21,2	
10'	-380	-360	-350	-363	15,3	
20'	-371	-344	-344	-353	15,6	
30'	-361	-315	-337	-338	23,0	
45'	-356	-320	-337	-338	18,0	
60'	-353	-315	-344	-337	19,9	
75'	-348	-312	-327	-329	18,1	
90'	-343	-308	-322	-324	17,6	
105'	-340	-305	-319	-321	17,6	
120'	-338	-302	-317	-319	18,1	
240'	***	***	***	-315	***	

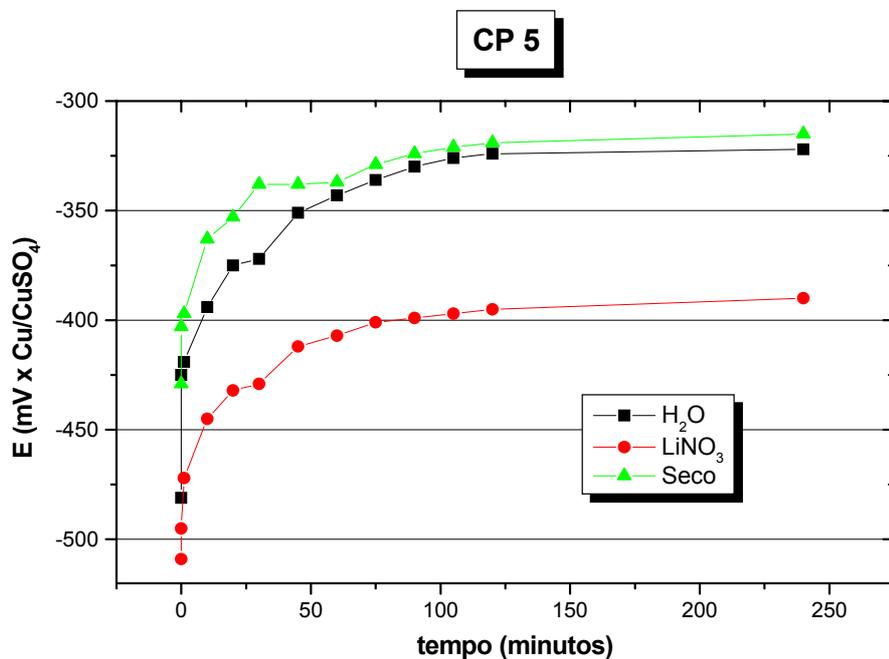


Figura IV.32– Curva polarização em função do tempo para CP-05.

IV.2.6- Determinação da Polarização nos corpos de prova ativados com água, sal de lítio e sem ativação (à seco) para telas Galvânicas na região III.

As tabelas IV.33 à IV.35 e a figura IV.36 apresentam os valores dos potenciais obtidos para a tela galvânica nas condições seco, ativado com água e com sal de lítio.

Tabela IV.33

Medição das Polarizações nos corpos de prova CP – 06 ativados com água

<i>CP – 06</i>								
Anodo	Área Fe (cm ²)	Relação entre Áreas			Região	ΔE (mV)		
Tela 20 x 20	766,16	0,36			III	100		
<i>H₂O (A)</i>								
Tempo	E (mV)					Média	D P	ΔE (mV)
	1	2	3	4	5			
Fechado	-398	-357	-356	-413	-336	-372	32,1	87 mV
Instantâneo	-398	-357	-350	-385	-335	-365	25,9	
1'	-397	-357	-345	-357	-334	-358	23,8	
10'	-387	-350	-329	-343	-323	-346	25,1	
20'	-393	-354	-333	-347	-328	-351	25,7	
30'	-390	-359	-336	-349	-333	-353	23,0	
45'	-379	-350	-330	-344	-329	-346	20,3	
60'	-356	-327	-311	-326	-306	-325	19,5	
75'	-339	-311	-291	-305	-287	-307	20,6	
90'	-329	-306	-288	-302	-287	-302	17,1	
105'	-309	-287	-269	-283	-269	-283	16,5	
120'	-307	-287	-267	-283	-268	-282	16,4	
240'	***	***	***	***	***	-278	***	

Tabela IV.34

Medição das Polarizações nos corpos de prova CP -06 ativados com Lítio

CP -06								
Anodo	Área Fe (cm ²)	Relação entre Áreas			Região	ΔE (mV)		
Tela 20 x 20	766,16	0,36			III	100		
LINO ₃ (B)								
Tempo	E (mV)					Média	D P	ΔE (mV)
	1	2	3	4	5			
Fechado	-490	-495	-558	-615	-540	-540	51,2	147 mV
Instantâneo	-476	-485	-508	-545	-495	-502	26,9	
1'	-448	-456	-478	-479	-463	-465	13,6	
10'	-412	-421	-410	-396	-406	-409	9,1	
20'	-402	-412	-395	-386	-393	-398	9,9	
30'	-387	-400	-378	-372	-378	-383	10,9	
45'	-369	-388	-365	-353	-366	-368	12,6	
60'	-369	-388	-361	-368	-362	-370	10,9	
75'	-368	-371	-342	-348	-344	-355	13,8	
90'	-378	-383	-357	-343	-357	-364	16,5	
105'	-368	-383	-357	-343	-356	-361	15,0	
120'	-368	-381	-353	-340	-354	-359	15,7	
240'	***	***	***	***	***	-355	***	

Tabela IV.35

Medição das Polarizações nos corpos de prova CP -06 sem ativação

CP - 06								
Anodo	Área Fe (cm ²)	Relação entre Áreas			Região	ΔE (mV)		
Tela 20 x 20	766,16	0,36			III	100		
Seco (C)								
Tempo	E (mV)					Média	D P	ΔE (mV)
	1	2	3	4	5			
Fechado	-568	-560	-540	-565	-553	-557	11,2	62 mV
Instantâneo	-568	-560	-540	-558	-552	-556	10,4	
1'	-567	-556	-536	-544	-546	-550	12,0	
10'	-558	-546	-531	-538	-538	-542	10,3	
20'	-548	-539	-528	-538	-538	-538	7,1	
30'	-547	-534	-523	-530	-532	-533	8,8	
45'	-541	-525	-515	-521	-523	-525	9,7	
60'	-535	-520	-505	-511	-513	-517	11,5	
75'	-530	-516	-500	-506	-508	-512	11,6	
90'	-525	-514	-497	-498	-499	-507	12,4	
105'	-521	-510	-495	-495	-493	-503	12,3	
120'	-516	-508	-492	-491	-493	-500	11,3	
240'	***	***	***	***	***	-494	***	

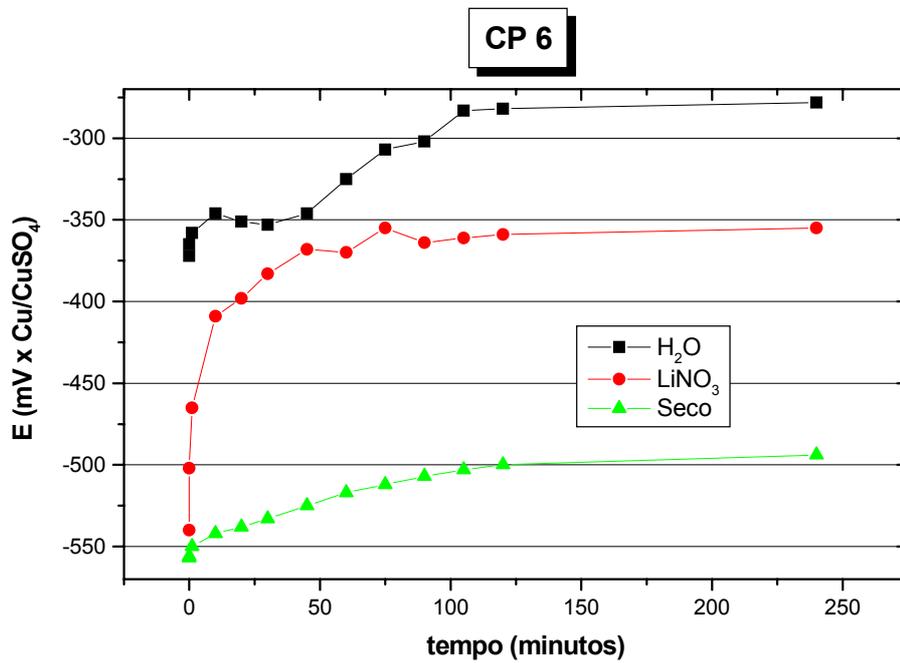


Figura IV.36 – Curva polarização em função do tempo para CP-06

CAPÍTULO V

DISCUSSÃO

V.1 – PRIMEIRA FASE DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

V.1.1 – Processo de proteção catódica em peças de concreto armado com a utilização de pastilhas galvânicas.

Os resultados apresentados nas tabelas IV.1 à IV.8, com suas respectivas curvas polarização em função do tempo, mostraram que a utilização de diferentes tipos de pastilhas galvânicas como anodo de sacrifício, para diferentes relações entre áreas não atenderam ao critério dos 100 mV de polarização estabelecido pela norma NACE RP 0290-90 [2], conforme mostrado na tabela IV.11. Os valores da polarização apresentados na tabela IV.10 ficaram entre 7,8 mV e 53,4 mV, para uma relação entre áreas (A_a/A_{Fe}) de 1% a 22%, mostrando que os valores da polarização ficaram abaixo do critério estabelecido pela norma nesta primeira fase de ensaio experimental. Considerando-se que os anodos foram instalados na superfície dos corpos de prova, e que apresentam pequena área superficial, presume-se que a interface de ligação da pastilha (assentada sobre berço de argamassa) com o concreto tenha sido o fator limitante para a proteção catódica efetuada, considerando-se a descontinuidade e a alta resistividade iônica ali existente.

Constata-se, pelos valores encontrados na tabela III.11 e de acordo com a norma SHRP-359 [1] que poder-se-á obter uma polarização mínima de 60 mV, suficiente para a proteção catódica. Contudo, os valores obtidos para a polarização naquela etapa do estudo não atingiram o nível mínimo de 60 mV.

V.1.2 – Quantidade de pastilhas necessárias para atender ao critério estabelecido pela norma NACE RP 0290-90.

Com os resultados apresentados na tabela III.12 ficou evidente, no entanto, que utilizando-se quantidades adicionais de pastilhas galvânicas como anodos de sacrifício, fato este que promoveu relações entre as áreas maiores, acabou por atender ao critério dos

100mV estabelecido pela norma NACE RP 0290-90 [1]. Na figura III.5, portanto, considerando-se a inclusão de pastilhas adicionais, obteve-se relações entre áreas suficientes para promover uma polarização favorável e adequada.

V.1.3 – Processo de Proteção Catódica com utilização de Tela Galvânica

Os resultados apresentados nas tabelas III.2 e III.8, com suas respectivas curvas polarização versus tempo, atenderam ao critério estabelecido pela norma NACE RP0290-90[2], apresentando polarização acima dos 100mV. Os valores obtidos fizeram com que permanecessem na região IV da curva polarização versus áreas A_a/A_{Fe} , conforme mostrado na figura III.5. Mesmo uma situação de contaminação no concreto com íons cloretos insuficiente mas com outros processos de ativação, conforme mostrado na tabela III.11, viabiliza o sistema de proteção catódica, atendendo a norma SHRP-359[1].

V.1.4 - Curva polarização em função da relação entre áreas

A construção da curva polarização em função da relação entre áreas, figura III.5, permitiu delimitar regiões distintas (I,II,III e IV). Isto representou uma economia de materiais e tempo nos ensaios, já que a relação linear obtida permitiu projetar uma relação entre áreas adequada à polarização normatizada, garantindo a efetividade do tratamento além, claro, do atendimento às normas NACE RP 0290-90 e SHRP –359 [1,2].

Assim, verificando-se a faixa de atuação da tela galvânica, com base na figura III.5, constata-se que para cada 1 m² (10000 cm²) de armadura na estrutura, deve-se ter uma tela galvânica com dimensões conforme a tabela V.1.

A relação contrária foi determinada, constatando-se que para 1m² de tela galvânica, pode-se ter faixas de proteção, conforme mostrado na tabela V.2.

Tabela V.1

Faixa de atuação da tela galvânica para 1 m² de área de armadura na estrutura de concreto armado.

FAIXA DE PROTEÇÃO MÍNIMA		FAIXA DE PROTEÇÃO MÁXIMA	
Dimensão	Polarização (ΔE)	Dimensão	Variação de Potencial (ΔE)
70x70cm (Aprox. 4900cm ² de área retangular)	$\cong 100\text{mV}$	80x80cm (Aprox. 6400cm ² de área retangular)	$\cong 150\text{mV}$

Tabela V.2

Faixa protegida da armadura para cada 1 m² de tela galvânica

FAIXA DE PROTEÇÃO MÍNIMA		FAIXA DE PROTEÇÃO MÁXIMA	
Dimensão	Variação de Potencial (ΔE)	Dimensão	Variação de Potencial (ΔE)
2,3 m ² de armadura	$\cong 100\text{mV}$	1,5 m ² de armadura	$\cong 150\text{mV}$

V.2 – SEGUNDA FASE DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

V.2.1 - A polarização dos corpos de prova, com e sem ativação, contendo pastilhas e telas galvânicas.

De acordo com os valores da polarização obtidos nos corpos de provas ativados com solução de nitrato de lítio, conforme mostrado nas figuras IV.16, IV.20, IV.24, IV.28, IV.32 e IV.36, verificou-se que não ocorreu um comportamento similar à curva apresentada na primeira fase dos ensaios. Este fato, provavelmente, foi originado pela variação da intensidade da aplicação da solução de nitrato de lítio nos corpos de prova, uma vez que os processos de ativação foram diferentes. Nesta fase dos ensaios, saturou-se os corpos de prova com aquele ativador, resultando em valores mais adequados de polarização [4].

Houve, em quase todos os corpos de prova ativados com solução de nitrato de lítio, uma polarização inicial (circuito fechado) mais negativa que os outros casos, ou seja, sempre inferior à -500 mV. Isso confirma sua maior eficiência em promover a proteção catódica, conforme mostrado nas figuras IV.16, IV.20, IV.24, IV.28, IV.32 e IV.36 e tabelas IV.13 à a IV.35.

Confrontando dados obtidos nas duas fases dos ensaios, podemos estimar uma relação média ideal entre áreas em torno de 0,3, para a obtenção da polarização mínima de 100 mV, de acordo com a norma NACE [2], conforme pode ser visto na tabela V.3.

Tabela V.3

Relação entre área anódica e área de armadura necessária à obtenção da polarização mínima de 100mV

Área de anodo Diâmetro das Armaduras	PP (52 cm ²)	PM (107 cm ²)	PG (173 cm ²)	Tela 20cm x 20cm (946 cm ²)
1/4'' (6,3 mm)	2 x 13 cm	3 x 18 cm	4 x 22 cm	6 x 80 cm
5/16'' (8,00 mm)	2 x 10 cm	3 x 14 cm	4 x 17 cm	6 x 63 cm
3/8'' (10 mm)	2 x 8 cm	3 x 11 cm	4 x 13 cm	6 x 50 cm
1/2'' (12,50 mm)	2 x 6 cm	3 x 9 cm	4 x 11 cm	6 x 40 cm
5/8'' (16 mm)	2 x 5 cm	3 x 7 cm	4 x 8 cm	6 x 32 cm

Legenda	
PP	Pastilha Pequena
PM	Pastilha Média
PG	Pastilha Grande

Se compararmos os sistemas ativados com água, solução de nitrato de lítio e ao ambiente, observa-se que com o LiNO₃ houve resultados mais interessantes, minimizando o efeito da resistividade do concreto. Como consequência, tivemos eficiência no processo de proteção catódica [4].

A alta temperatura ambiente, presente em alguns dias dos ensaios (entre 30°C e 40°C), contribuiu para a dispersão dos potenciais, principalmente nos ativados com água, conforme pode ser visto nas figuras IV.16, IV.20, IV.24, IV.28, IV.32, deixando pouco conclusiva a eficiência desse sistema.

De acordo com os valores da resistividade do concreto, mostrados nas tabelas IV.37, IV.38 e IV.39, verificou-se um comportamento esperado dos ativadores conforme a relação LiNO₃ < H₂O < Seco.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

O presente trabalho objetivou a elaboração das primeiras diretrizes para o dimensionamento da proteção catódica por anodos de sacrifício em estruturas de concreto armado, através da utilização de pastilhas e telas galvânicas.

Os ensaios experimentais permitiram as seguintes conclusões:

1- Na primeira fase do estudo os valores das polarizações apresentaram-se abaixo dos 100mV nos corpos de prova contendo pastilhas. Com a adição de novas pastilhas, as relações entre áreas tornaram-se satisfatórias, atingindo a polarização necessária para a eficiência do sistema proposto.

2- Ficou constatado que os corpos de prova contendo tela galvânica apresentaram polarização acima dos 100mv, atendendo a norma NACE RP 0290-90.

3- Os valores obtidos para a relação entre áreas (A_a/A_{Fe}) e as respectivas polarizações permitiram a construção de uma curva com comportamento linear, viabilizando a construção da relação entre áreas ideais ao processo de proteção catódica proposto, atendendo as normas NACE RP0290-90 e SHRP-S-359.

4 – Os valores da polarização apresentados nos ensaios com pastilhas galvânicas estão intimamente comprometidos pela interface de ligação anodo-concreto, mesmo considerando que tenham sido assentadas sobre berço de argamassa similar ao concreto do corpo de prova. Este é um fator limitante, na medida em que ocorrem efeitos intrínsecos de retração e secagem na massa cimentícia de recuperação, promovendo descontinuidades ou altas resistividades nesta zona de transição.

5 – Constatou-se que os corpos de prova apresentaram baixos teores de cloretos, assim como pH alcalino característico, indicando que o concreto não sofreu nenhuma contaminação excessiva, ao contrario do que se imaginava.

6 – Considerando-se 1 m^2 de armadura a ser protegida, verificou-se a necessidade da incorporação de uma tela galvânica, com dimensões de $70\times 70\text{cm}$, para a obtenção da polarização mínima de 100mv e uma tela $80\times 80\text{cm}$, para uma polarização máxima em torno de 150mV .

7 – Constatou-se que para 1 m^2 de tela galvânica teremos uma faixa de proteção de $1,5\text{ m}^2$ e $2,3\text{ m}^2$, correspondente a potenciais de 150mV e 100mV , respectivamente.

8 – Na segunda fase dos estudos, verificou-se que o comportamento dos sistemas ativados com solução de sal de lítio não seguiu a curva experimental, provavelmente devido à maior impregnação dos corpos de prova com aquela sal, o que ocasionou maiores valores de polarização.

9 – Na segunda fase, a curva experimental dos corpos de prova ativados com solução de sal de lítio, mesmo não seguindo a curva base, apresentou resultados melhores, motivados por polarizações superiores a 100 mV , em todos os casos.

10 – Observou-se confirmando a maior eficiência da solução de sal de lítio para melhorar a condutividade no concreto, que no instante do fechamento do circuito, houveram sempre valores mais negativos que os outros sistemas, apresentando-se sempre inferiores a -500 mV .

11 – Os valores obtidos para a resistividade, de acordo com os processos de ativação impostos, enquadraram-se perfeitamente como o esperado, ou seja, $\text{LiNO}_3\langle\text{H}_2\text{O}\langle\text{seco}$.

12 – Com os resultados obtidos, estima-se um valor médio da relação entre áreas correspondente a $0,3$ para a obtenção de polarizações superiores a 100 mV .

SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

1 – Encontrar a concentração ideal da solução de sal de lítio, assim como o teor de impregnação na massa do concreto, de modo a se obter polarização seguras e estáveis superiores a 100 mV.

2 – Uma vez determinada a concentração e o teor de impregnação, determinar o período de vida útil da atuação do sal de lítio nas peças de concreto armado.

3 – Verificar se estes fatores são influenciados pela temperatura ambiente.

CAPÍTULO VII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] NORMA SHRP – S 359 – “Strategic Highway Research Program – Criteria for the Cathodic Protection of Reinforced Concrete Bridge Elements”, 1994.
- [2] NORMA NACE International - RP0290 – 90 – Protección Catódica de Acero de Refuerzo em Estructuras de Concreto Expuestas a la Atmosfera”, 1990.
- [3] Gentil, Vicente – Corrosão – 4ª edição, Editora LTC, 2003.
- [4] Glass, G.K., Buenfeld, N.R., Corrosion Science, V.39, pp. 1001, 1997.
- [5] Christopher, L Page and Geogi Sergi. Developments in Cathodic Protection Applied to Reinforced Concrete. Journal of materials in civil engineering/february 2000.
- [6] Derrien, F. et al. Cathodic Polarization Behavior of Steel in Solutions Simulating Concrete. Cement and Concrete Research, v.20, n.4, p.636-43, 1990.
- [7] Mattedi, V. A. – Proteção Catódica em Estruturas de Concreto Armado e Protendido – Tese de Mestrado. Rio de Janeiro, UFRJ, 1999.
- [8] UHLIG’S, Corrosion Handbook 2ª edition. John Wiley and Sons, inc., 2000.
- [9] BENNETT, J.E., SHUE, T.J., Galvanic Cathodic Protection of Reinforced Concrete Bridge Members Using Sacrificial Anodes Attached by Conductive Adhesives, Publication No. FHWA-RD-96-073, Federal Highway Administration, Washington, D.C., December 1996.
- [10] Journal of performance of constructed facilities/August 1999 pag 101,102.
- [11] G.R. Holcomb, B.S. Covino, J.H. Russel, S.J. Bullard, W.K. Collins, J.E. Bennett and H.M. Laylor – Humectant use in the cathodic protection of reinforced concrete.

- [12] Compositions and Processes for Remediating Hardened Cementitious Materials, United States Patent nº 5.985.011.
- [13] Effect of an humectant agent on cathodic protection of reinforced concrete, José T. Pérez – Quiroz, Universidad Nacional Autónoma de México.
- [14] The lithium salt as a current enhancing agent, United States Patent nº 6.033.553.
- [15] Klisowski, S., Hartt, W.H., “Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction”, pp. 354-368, Ed. The Royal Society of Chemistry, Londres, Reino Unido, 1996.
- [16] Mietz, J. Isecke, B., “Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction”, pp. 200-209, Ed. The Royal Society of Chemistry, Londres, Reino Unido, 1996.

**Matérias a respeito de corrosão no concreto armado
Publicados na revista RECUPERAR pelo autor desta Tese**

- [17] Rodrigues, J.C., “Corrosão tem fim. Use proteção catódica”, pp 5-9, Revista Recuperar, Instituto de Patologias da Construção, Rio de Janeiro, Brasil, Novembro/Dezembro 1994.
- [18] Rodrigues, J.C., “Dicas para avaliar o estado de corrosão no concreto armado”, pp 4-8, Revista Recuperar, Instituto de Patologias da Construção, Rio de Janeiro, Brasil, Novembro/Dezembro 1996.
- [19] Rodrigues, J.C., Rocha, C.C., Rocha C.C., Monge, C.A., “A pastilha anticorrosão”, “ZTP protege barragens” e “MAZ”, pp 4-11; 12-16 e 28-33, Revista Recuperar, Instituto de Patologias da Construção, Rio de Janeiro, Brasil, Janeiro/Fevereiro 2000.
- [20] Rodrigues, J.C., “A banalização da recuperação estrutural”, “Os segredos da corrosão (I)”, pp 4-10 e 24-33, Revista Recuperar, Instituto de Patologias da Construção, Rio de Janeiro, Brasil, Março/Abril 2002.
- [21] Rodrigues, J.C., Pinto, E.S., “E prudente usar concreto armado/protendido em ambiente corrosivo sem proteção efetiva?” e “Os segredos da corrosão”, pp 5-10 e 26-33, Revista Recuperar, Instituto de Patologias da Construção, Rio de Janeiro, Brasil, Maio/Junho 2002.
- [22] Rodrigues, J.C., “Os segredos da corrosão (V)”, pp 28-33, Revista Recuperar, Instituto de Patologias da Construção, Rio de Janeiro, Brasil, Setembro/Outubro 2003.

- [23] Rodrigues, J.C., “Segredos da corrosão VII”, pp 20-26, Revista Recuperar, Instituto de Patologias da Construção, Rio de Janeiro, Brasil, Janeiro/Fevereiro 2004.
- [24] Rodrigues, J.C., “Segredos da corrosão VIII”, pp 12-18, Revista Recuperar, Instituto de Patologias da Construção, Rio de Janeiro, Brasil, Maio/Junho 2004.