

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ - UFPR**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA - PIPE**

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS**

DESENVOLVIMENTO DE TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO DA CORROSÃO EM PÉS  
DE TORRES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO, POR MEIO DE APLICAÇÃO DE  
TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS

**EMERSON LUÍS ALBERTI**

CURITIBA – PR

2004

# **UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ - UFPR**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA - PIPE**

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS**

**DESENVOLVIMENTO DE TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO DA CORROSÃO EM PÉS  
DE TORRES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO, POR MEIO DE APLICAÇÃO DE  
TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS**

**EMERSON LUÍS ALBERTI**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia - PIPE, como requisito à obtenção do título de Mestre na área de concentração de Engenharia e Ciências dos Materiais.

Orientador: Professor **Dr. José Maurílio da Silva**

CURITIBA – PR

2004

**Alberti, Emerson Luís**

**Desenvolvimento de Técnicas de Diagnóstico da Corrosão em Pés de Torres de Linhas de Transmissão, por meio de Aplicação de Técnicas Eletroquímicas. Curitiba-PR, UFPR, 2004.**

**94p.**

**Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia - PIPE, Área de Concentração: Engenharia e Ciência dos Materiais, sob orientação do Professor Dr. José Maurílio da Silva.**

**1 – Corrosão, Eletroquímica, Pés de Torres de Linhas de Transmissão**

**1 - Título**

A MEUS PAIS

**Membros da Banca Examinadora da Dissertação de Mestrado de EMERSON LUÍS ALBERTI, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia - PIPE, Área de Concentração: Engenharia e Ciência dos Materiais, da Universidade Federal do Paraná – UFPR, em (treze de dezembro de dois mil e quatro).**

**BANCA EXAMINADORA:**

---

**Prof. Dr. José Maurílio da Silva**  
**Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - LACTEC**

---

**Prof. Dr. Paulo Roberto Janissek**  
**Centro Universitário Positivo - UNICEMP**

---

**Prof. Dr. Ramon Sigifredo Paredes**  
**Universidade Federal do Paraná – UFPR**

## **SUMÁRIO**

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>IX</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>X</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XI</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....	<b>XII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>XIII</b>
<b>GLOSSÁRIO DE ABREVIACÕES</b> .....	<b>XV</b>
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>XVII</b>
<b>CAPITULO 1</b> .....	<b>1</b>
<b>CORROSÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 – Definição</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 – Adaptação da corrosão a partir do complexo ativado</b> .....	<b>2</b>
1.2.1 – Potencial do Eletrodo .....	<b>6</b>
1.2.2 – Sobretensão e Polarização .....	<b>7</b>
1.2.3 – Equações de Tafel.....	<b>10</b>
1.2.4 – Método de Aproximação de Alto Potencial .....	<b>13</b>
1.2.5 – Potencial de Proteção .....	<b>14</b>
1.2.6 – Casos em que a aproximação de Alto Potencial não pode ser diretamente aplicada.....	<b>18</b>
<b>1.3 - Influência das Características de Um Solo na Corrosão de Estruturas Enterradas</b> .....	<b>21</b>

<b>CAPITULO 2</b> .....	<b>23</b>
<b>DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL</b> _____	<b>23</b>
<b>2.1 – Roteiro Metodológico</b> .....	<b>23</b>
<b>2.2 – Equipamentos Utilizados</b> .....	<b>24</b>
<b>2.3 – Obtenção da Resistividade do Solo</b> .....	<b>24</b>
<b>2.4 – Obtenção do Potencial de Corrosão ou Potencial Natural da Estrutura/Solo</b> .....	<b>27</b>
2.4.1 – Construção da semicélula de cobre/sulfato de cobre:.....	27
2.4.2 – Medição do potencial "estrutura/solo" .....	28
2.4.3 – Modo de Avaliação da Estrutura: .....	29
<b>2.5 – Determinação da Corrente de Corrosão – Técnica do Decaimento dos 100 mV:</b> .....	<b>30</b>
2.5.1 – Obtenção do Potencial “off” .....	31
2.5.2 – Modo de Avaliação do Potencial “E <sub>off</sub> ” .....	32

<b><i>CAPÍTULO 3</i></b> .....	<b>33</b>
<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> _____	<b>33</b>
<b>3.1 – Considerações iniciais:</b> .....	<b>33</b>
3.1.1 – Comportamento comparativo entre potenciosatato/galvanostato e bateria:	33
3.1.2 – Sistema de proteção catódica pelo método tradicional (Resistividade do Solo): .....	37
3.1.3 – Comparação entre as correntes obtidas pela resistividade do solo e pelas curvas potenciodinâmicas:.....	38
<b>3.2 – Obtenção da taxa de corrosão através das curvas de polarização realizadas em campo:</b> .....	<b>40</b>
<b>3.3 – Estudo de caso</b> .....	<b>43</b>
3.3.1 – Torre 7 da LT de 500 kV de CHACON-EZEIZA (SE HENDERSON) .....	44
3.3.2 – Comprovação teórica da metodologia desenvolvida.....	60
<b><i>CAPITULO 4</i></b> .....	<b>71</b>
<b>CONCLUSÕES</b> _____	<b>71</b>
<b>TRABALHOS FUTUROS</b> _____	<b>73</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> _____	<b>74</b>

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. **José Maurílio da Silva** pela sugestão do tema desta dissertação e por todos os conhecimentos transmitidos;

A Prof<sup>a</sup>. Dra. **Sandra Mara Alberti**, minha irmã, pela compreensão, paciência, incentivo e ajuda nas adversidades que passei.

Ao **LACTEC** pela oportunidade desta dissertação;

A **todos** que de uma maneira ou de outra contribuíram, apoiaram e incentivaram este trabalho.

## RESUMO

### DESENVOLVIMENTO DE TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO DA CORROSÃO EM PÉS DE TORRES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO, POR MEIO DE APLICAÇÃO DE TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS

Este trabalho apresenta a aplicação de técnicas eletroquímicas para caracterização e quantificação do processo corrosivo em fundações tipo grelhas de torres de linhas de transmissão aérea convencional. Os estudos eletroquímicos foram realizados através de medidas de potencial de corrosão e de aplicação de técnicas potenciodinâmicas (injeção de corrente) em campo. A análise teórica é feita através da aplicação do método de aproximação de alto potenciais no ramo catódico de Tafel. Parte-se do princípio de que, o sistema está envolvido por uma região catódica sob controle misto, composto pela reação de redução do hidrogênio juntamente com a reação de redução do oxigênio.

## ABSTRACT

### *DEVELOPMENT OF TECHNIQUES FOR CORROSION DIAGNOSIS ON TRANSMISSION TOWER FOUNDATION USING ELETROCHIMICAL TECHNIQUES*

*This present work describes the application of electrochemical techniques for characterization and qualification of corrosive processes on the grillage foundation of transmission tower. Electrochemical studies were done in the field through corrosion potential measurements and the application of dynamic potential techniques (current injection).*

*A theoretical analysis was done through the application of approximation algorithms on the cathodic branch of Tafel. The principle applied was that the system is involved in a cathodic region under mixed control phenomena composed of both hydrogen reduction and oxygen reduction reaction.*

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 1 – Resumo para a Avaliação da Estrutura de Grelhas de Pés de Torres de Linhas de Transmissão.....</b>	<b>30</b>
<b>Tabela 2 – Boletim de Corrosividade do Solo – Comparação Potenciostato/Bateria .</b>	<b>35</b>
<b>Tabela 3 – Boletim de Corrosividade do Solo – LT Guarapuava / Vila Carli.....</b>	<b>37</b>
<b>Tabela 4 – Boletim de Corrosividade do Solo – LT Chacon – Ezeiza (SE Henderson) .....</b>	<b>45</b>
<b>Tabela 5 – Potenciais e correntes obtidos em campo .....</b>	<b>46</b>
<b>Tabela 6 – Potencial (<math>E_{off}</math>) com o logaritmo da corrente (Log I).....</b>	<b>49</b>
<b>Tabela 7 – Resultados de potenciais e correntes obtidos a partir de interpolação.....</b>	<b>51</b>
<b>Tabela 8 – Obtenção de valores de corrente e potencial a partir dos resultados de potenciais em relação ao Log I .....</b>	<b>53</b>
<b>Tabela 9 – Obtenção de valores de corrente e potenciais a partir dos resultados de potenciais em relação ao Log I para a região catódica distante da região de potenciais estacionários.....</b>	<b>56</b>
<b>Tabela 10 – Parâmetros eletroquímicos desenvolvidos para obter a corrente de corrosão com e sem injeção de corrente .....</b>	<b>59</b>
<b>Tabela 11 – Curva teórica de potencial e corrente calculados a partir do modelo teórico .....</b>	<b>69</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1 – Representação esquemática das curvas de polarização anódica e catódica de dois eletrodos diferentes, imersos em um eletrólito constituindo uma célula galvânica.....</b>	<b>9</b>
<b>Figura 2 - Esquemática da influência dos fatores de controle da reação de corrosão na forma das curvas de polarização: a) reação sob controle anódico; b) reação sob controle catódico; c) reação sob controle misto. ....</b>	<b>10</b>
<b>Figura 3 – Representação esquemática de um diagrama de Tafel típico.....</b>	<b>12</b>
<b>Figura 4 – Método dos quatro pontos (Werner).....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 5 – Semicélula de cobre/sulfato de cobre saturado. ....</b>	<b>27</b>
<b>Figura 6 – Medição do potencial de corrosão em pés de torres de linhas de transmissão aérea convencional. ....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 7 – Esquema de ligação para injeção de corrente .....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 8 – Representação tipo Tafel para a reação catódica sobre uma cantoneira de aço galvanizado (haste de aterramento de cerca) com 0,1m<sup>2</sup> de área enterrada.....</b>	<b>36</b>
<b>Figura 9 – Densidade de corrente necessária para proteção das 4 grelhas de cada torre para LT 138kV Guarapuava-Vila Carli. ....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 10 – Densidade de corrente necessária para proteção de torre em função da resistividade para o trecho novo. ....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 11 – Curvas de polarização obtidas em campo .....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 12 – Curva de polarização em condições de circuito fechado.....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 13 – Curva de polarização em condições de circuito aberto .....</b>	<b>48</b>

<b>Figura 14 – Tafel catódica da corrosão da haste de âncora da torre 7 da LT 500kV Chocon-Ezeiza (SE Henderson) .....</b>	<b>49</b>
<b>Figura 15 – Tafel catódica com a devida interpolação referente a corrosão da haste de âncora da torre 7 da LT 500kV Chocon-Ezeiza (SE Henderson) .....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 16 – Resistência de polarização linear obtida a partir de resultados interpolados.....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 17 – Inclinação tipo Tafel obtida a partir de resultados interpolados. ....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 18 – Literatura do gráfico: JONES D.A. - Principles and prevention of corrosion - Department of Chemical and Metallurgical Engineering University of Nevada - RENO - Prentice Hall - UPPER - SADDLE RIVER - N.J. ....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 19 – Curva de polarização catódica a partir do modelo teórico e a partir de resultados experimentais.....</b>	<b>69</b>

## GLOSSÁRIO DE ABREVIACÕES

e	Carga de um elétron
E	Potencial de um eletrodo em relação a uma referência
ER	Eletrodo de referência
ET	Eletrodo de trabalho
i	Densidade de corrente
$i_{M/f}^0$	Densidade de corrente de troca na interface metal/filme
$i_f^0$	Densidade de corrente de troca no interior do filme
$i_d^0$	Densidade de corrente de troca de dissolução
$i_d$	Densidade de corrente de dissolução
$i_i$	Densidade de corrente inicial
k	Constante de Boltzmann ( $1,38 \times 10^{-29}$ J/K)
[n]	Concentração de elétrons
Ox	Espécies oxidadas em solução
Red	Espécies reduzidas em solução
R	(a) Constante dos gases (3,314 J/mol*K) (b) Reflectividade do metal
T	Temperatura absoluta (K)
v	Velocidade de varredura
$v_a$	Velocidade de varredura anódica
$v_c$	Velocidade de varredura catódica
$\alpha$	Coefficiente de transferência de carga
$\alpha_{M/f}$	Coefficiente de transferência de carga na interface metal/filme
$\alpha_f$	Coefficiente de transferência de carga no interior do filme

$\alpha_{f/s}$	Coeficiente de transferência de carga na interface filme/solução
$\beta_a$	Constante anódica de Taffel
$\beta_c$	Constante catódica de Taffel
$\eta$	Sobrepotencial em uma fase ou interface
$\eta_{M/f}$	Sobrepotencial na interface metal/filme
$\eta_f$	Sobrepotencial no interior do filme
$\eta_{f/s}$	Sobrepotencial na interface filme/solução
$\Delta\phi_{M/f}$	Diferença de potencial na interface metal/filme
$\Delta\phi_{f/s}$	Diferença de potencial na interface filme/solução

## INTRODUÇÃO

Apesar do grande número de trabalhos, que utilizam técnicas eletroquímicas para estudar a corrosão de metais, terem sido publicados recentemente, os resultados obtidos ainda não são conclusivos e, quando o aço está enterrado no solo os resultados são ainda mais desapontadores devido aos muitos fatores envolvidos nos processos corrosivos. Explicações posteriores são relativamente fáceis para os pesquisadores especializados, após o aparecimento do fenômeno, pode-se dizer facilmente o que aconteceu naquele caso particular. Mas o problema prático fundamental, de atualidade científica, é prever antecipadamente os problemas que podem ocorrer. Para isso, necessitam-se maiores avanços no entendimento da corrosão de materiais metálicos enterrados.

Desta forma, o objetivo principal do presente trabalho é estudar a corrosão de fundações tipo grelhas, através de técnicas eletroquímicas utilizadas para ensaios em campo.

Desta forma, para um melhor entendimento desta dissertação, seguir-se-á a seguinte itemização:

No capítulo 1, será apresentada a revisão bibliográfica contendo os fundamentos teóricos com as técnicas eletroquímicas a serem utilizadas em campo.

No capítulo 2, serão descritos os problemas e procedimentos experimentais utilizados na execução dos trabalhos.

No capítulo 3, serão apresentados os resultados experimentais e discussões relacionadas com as técnicas utilizadas.

No capítulo 4, serão apresentadas as conclusões obtidas, além das referências bibliográficas e trabalhos futuros.

## CAPITULO 1

### CORROSÃO

#### 1.1 – DEFINIÇÃO

A corrosão metálica é um fenômeno natural que ocorre espontaneamente nos metais ao reagir com o meio, causando sua deterioração para formar compostos mais estáveis termodinamicamente.

Em meio aquoso, a corrosão metálica é um processo essencialmente eletroquímico, e para que ela ocorra é necessário que se estabeleça o complexo composto pôr quatro elementos essenciais, constituindo uma pilha eletroquímica, conforme segue:

- a) Uma superfície anódica, onde devem ocorrer as reações de oxidação do metal;
- b) Uma superfície catódica, onde devem ocorrer as reações de redução das espécies existentes no eletrólito;
- c) Um eletrólito em contato simultâneo com ambas as superfícies;
- d) Um condutor eletrônico que deverá estabelecer o contato elétrico entre os elementos que constituem estas superfícies.

Aos elementos que constituem individualmente as superfícies anódica e catódica denominamos respectivamente de ânodo e cátodo ou simplesmente eletrodos. Ficam dispostos em áreas diferentes, geralmente, do mesmo corpo metálico ou podem, cada qual, situar-se em um corpo metálico distinto.

Durante a corrosão ocorrem essencialmente dois tipos de reações denominadas respectivamente de reações anódicas e reações catódicas:

A reação anódica consiste na oxidação (corrosão) do metal devido à migração de íons metálicos  $M^{n+}$  para o meio corrosivo (eletrólito) segundo a equação:



onde  $M$  representa um átomo metálico do retículo cristalino do ânodo,  $M^{n+}$  representa um íon do metal diluído no eletrólito e  $ne^{-}$  representa os elétrons livres deixados no metal.

A reação catódica consiste na redução de íons contidos no eletrólito, na superfície catódica, segundo a equação:



onde  $R^{n+}$  representa uma espécie iônica contida na solução e  $R$  a espécie reduzida.

## 1.2 – ADAPTAÇÃO DA CORROSÃO A PARTIR DO COMPLEXO ATIVADO

Durante um processo corrosivo, a interface eletrodo/eletrólito (MAREK, 1992) adquire uma estrutura especial, na qual alguns fatores, tais como: i) a separação de cargas entre os elementos do metal e os íons da solução; ii) a interação entre os íons da solução e moléculas de água; iii) a adsorção de íons no eletrodo; e, iv) processos difusionais e migracionais de espécies iônicas, ocorrem de maneira particular e com

importância fundamental no entendimento dos processos de corrosão. Essa interface é denominada de dupla camada elétrica. Sobre a dupla camada aparece uma diferença de potencial, que permite a definição de potencial de eletrodo que caracteriza a passagem de corrente entre o eletrólito e eletrodo. O potencial de eletrodo é um dos mais importantes parâmetros tanto na termodinâmica quanto na cinética de reações de corrosão.

Uma teoria geral (BARD; FAULKNER, 1980) que frequentemente é adaptada para a cinética de reações de corrosão, é a teoria do complexo ativado. Considere-se o aspecto da redução catódica em um caso ideal, onde um metal puro exposto a uma solução sofre dissolução. As espécies reduzidas e oxidadas estão em poços de energia ou estado de energia mínima. A fim de passar do estado reduzido para o estado oxidado, é necessário adquirir uma certa quantidade de energia, chamada de energia de ativação. Isso ajuda no processo complexo pelo qual a espécie reduzida é transformada na espécie oxidada, onde o átomo penetra na camada das moléculas da água em contato com o metal, sendo circundado por elas, de forma que o produto final dessas reações seja um íon hidratado. Uma representação de energia de estados inicial e final, onde o final é mais baixo que o inicial, indica que o processo de redução ocorre da esquerda para a direita. Quando o equilíbrio é atingido, os poços de energia estão no mesmo nível. O complexo ativado é a configuração de máxima energia.

Para uma reação de eletrodo, o equilíbrio é caracterizado pela equação de Nerst, que vincula o potencial de eletrodo às concentrações dos participantes do processo observados no seio da solução. Para os casos de baixas correntes (quando a corrente é cerca de 10% da menor corrente limite entre anódica e catódica) e agitação adequada, nos quais o transporte de massa não é um fator determinante de limitação de corrente, é verificada a existência de uma relação (BARD; FAULKNER, 1980) exponencial entre a

corrente e o sobrepotencial. Assim o sobrepotencial está associado com qualquer corrente, o qual está relacionado à energia de ativação, de modo que, para baixos valores de correntes de troca, existe uma menor velocidade da reação e portanto é maior o sobrepotencial de ativação.

Para pequenos sobrepotenciais, pode-se usar um método de aproximação de baixo potencial para a medida da velocidade de corrosão. Para um potencial aplicado muito próximo do potencial de corrosão, a razão sobrepotencial/inclinação tipo Tafel é muito pequeno e pode seguir uma série convergente. Como resultado dessa série convergente foi estabelecido o coeficiente de **Stern & Geary** (Stern; Geary, 1957), que correlaciona a corrente de corrosão e a resistência à polarização ao coeficiente de **Stern & Geary** (NACE *et al.*, 1983). Essa correlação foi provada através da comparação entre a resistência de polarização calculada e medidas de perda de massa para amostras de aço.

O coeficiente de **Stern & Geary** (Stern; Geary, 1957), pode ser determinado através das rampas anódicas e catódicas representadas pela razão “produto/soma” das inclinações de Tafel anódica e catódica.

Para altos sobrepotenciais, pode-se usar um método de aproximação de alto potencial para a medida da velocidade de corrosão, pois uma das exponenciais pode ser desprezada. A forma de Tafel pode ser satisfatória sempre que a reação oposta contribui com menos de 1% da corrente em estudo e conseqüentemente o sobrepotencial deve ser maior que 118mV/n. Nestas condições é perfeitamente possível a obtenção das constantes de Tafel.

As constantes de Tafel estão relacionadas com o coeficiente de simetria da reação, que é um parâmetro que mede a simetria da barreira de energia e foi introduzido por **Erdey-Gruz** e **M. Volmer** mencionado por VETTER (1967). O coeficiente de

simetria está relacionado com a facilidade com que os processos de oxidação/redução ocorrem. Se for considerada a relação existente entre a variação da energia livre padrão e o avanço da reação. Uma reta a esquerda pode representar o processo de redução e uma reta a direita pode representar o processo de oxidação. Caso essas retas sejam lineares e se a intersecção entre elas for simétrica, os ângulos entre essas retas serão iguais e o coeficiente de simetria será 0,25. Para coeficiente de simetria entre 0 e 0,25 o processo de redução é facilitado. Na maioria dos sistemas (BORD; FAULKNER, 1980) o coeficiente de simetria varia de 0,15 a 0,35, podendo ser aproximado para 0,25 na ausência de medidas. Os sistemas comerciais adotam valor de 26mV/década para o coeficiente de **Stern-Geary**, para avaliação de corrosão em aço carbono. Este valor é obtido partindo-se do princípio de que foram utilizados valores de 120mV/década para as inclinações de Tafel anódica e catódica. O coeficiente de simetria está relacionado com o coeficiente de transferência de carga da reação. Usando os valores acima citados, e supondo a reação catódica como sendo a reação de hidrogênio, obtém-se um coeficiente de transferência de carga de 0,5 e um coeficiente de simetria de 0,25, indicando que o processo de redução está facilitado.

De acordo com VETTER (1967), para baixos sobrepotenciais, a resistência à polarização independe do coeficiente de simetria e sim somente da densidade de corrente de troca e do número de elétrons envolvido na reação de transferência de carga. No entanto, isto não é verdade para altos potenciais. Neste caso, ZEHBOUR (1980) sugere o método de aproximação de altos potenciais para medida da velocidade de corrosão.

### 1.2.1 – Potencial do Eletrodo

Ao mergulharmos um metal em uma solução eletrolítica se inicia uma troca contínua de íons metálicos entre a fase cristalina e a fase aquosa. A velocidade de troca em uma direção não será igual ao da outra. Predominará a direção que diminua a energia livre do sistema.

À medida com que os íons do metal são dissolvidos na solução carregando-a positivamente, no metal cresce a carga negativa (devido ao excesso de elétrons deixados no metal). Cria-se então uma diferença de potencial na interface metal-solução. Esta diferença de potencial crescerá até alcançar um valor no qual a variação da energia de troca dos íons entre metal e solução seja nula. Então, será alcançado o equilíbrio termodinâmico, em que o potencial estável é denominado de equilíbrio termodinâmico do metal no meio.

O valor deste potencial de equilíbrio, dependerá da natureza no metal e do eletrólito em que está submerso. Quando um metal é mergulhado em uma solução que contenha íons deste mesmo metal, ocorrerá que íons de metais nobres, como por exemplo a platina, tenderão sempre a abandonar a solução para se depositar na superfície do metal, que terá um potencial positivo em relação à solução. Por outro lado, nos metais menos nobres, como o ferro e o zinco, seus íons tenderão sempre a passar para a solução, seja qual for a concentração de seus íons, para adquirir potenciais negativos em relação à solução.

Em técnicas experimentais, o potencial de um eletrodo não pode ser medido diretamente em termos absolutos. No entanto, pode ser medida a diferença de potencial entre dois eletrodos. Assim, torna-se possível obter o potencial de um eletrodo de trabalho  $E_T$  construindo-se uma pilha com este eletrodo mais um eletrodo de referência

$E_R$  cujo potencial seja estável e possa facilmente ser reproduzido. No estudo da eletroquímica, adota-se como eletrodo de referência o eletrodo normal de hidrogênio cujo valor de potencial convencionou-se como potencial zero (ZEHBOUR, 1981).

A energia livre de um sistema eletroquímico varia com a concentração iônica na solução. Do mesmo modo varia o potencial do eletrodo e desta forma a equação de Nernst, para potenciais de eletrodo, é obtida e apresentada como:

$$E = E^{\circ} + \frac{R T}{nF} \ln (S_O/S_R) \quad [3]$$

Onde E: Potencial Observado

$E^{\circ}$ : Potencial Padrão

R: Constante dos gases ideais

F: Constante de Faraday

T: temperatura absoluta (em K)

n: número de elétrons envolvidos

$S_O$ : concentração da espécie oxidada

$S_R$ : concentração da espécie Reduzida

### 1.2.2 – Sobretenção e Polarização

Quando um metal está em equilíbrio com uma solução que contenha seus próprios íons, na ausência de reações que interfiram, terá um potencial de equilíbrio “E” dado pela equação de Nernst. Se uma corrente circular por este eletrodo, o potencial deste metal sofrerá uma alteração, em função desta corrente, para um novo valor  $E'$ . A diferença entre os dois potenciais é conhecida como sobrepotencial  $\eta$ , também chamado de polarização:

$$\eta = E' - E \quad [4]$$

No caso de dois eletrodos diferentes imersos em um eletrólito constitui-se uma célula galvânica. Quando a corrente flui, o potencial do anodo  $E_a$  se aproxima do potencial do catodo  $E_c$  e vice-versa, com isso a diferença do potencial entre os eletrodos diminui a medida que a corrente aumenta conforme representado na figura 1. Desta forma é obtida a chamada polarização dos eletrodos, ou seja, polarização anódica no anodo e polarização catódica no catodo.

A diferença de potencial desta célula galvânica pode ser descrita como:

$$E_c - E_a = \eta \quad [5]$$

No ponto de interseção das duas curvas, os dois processos ocorrem com a mesma corrente, isto é, a corrente anódica é igual a corrente catódica, estabelecendo uma situação de estado estacionário. Esta corrente é denominada Corrente de Corrosão  $I_{\text{corr}}$  e é proporcional à velocidade de corrosão do metal no sistema em questão. O potencial correspondente a este ponto é o Potencial de Corrosão do par  $E_{\text{corr}}$ .

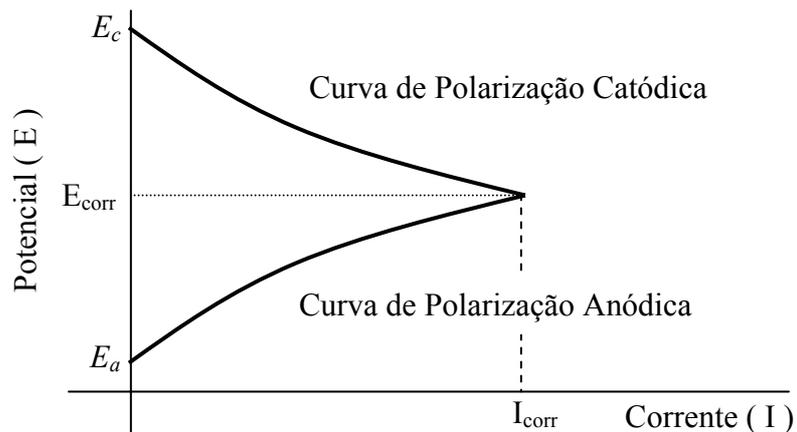
Ao se estabelecer uma sobretensão anódica  $\eta_a$ , ou seja:

$$\eta_a = E_{\text{corr}} - E_a > 0 \quad [6]$$

passa a haver um fluxo de carga  $I_a$ , mensurável positivo (corrente anódica), e sobre o metal ocorrem preferivelmente reações de oxidação. Por outro lado quando se estabelece uma sobretensão catódica, ou seja:

$$\eta_c = E_{\text{corr}} - E_c < 0 \quad [7]$$

passa a haver um fluxo de carga  $I_c$ , mensurável negativo (corrente catódica), e sobre o metal ocorrem preferivelmente reações de redução.

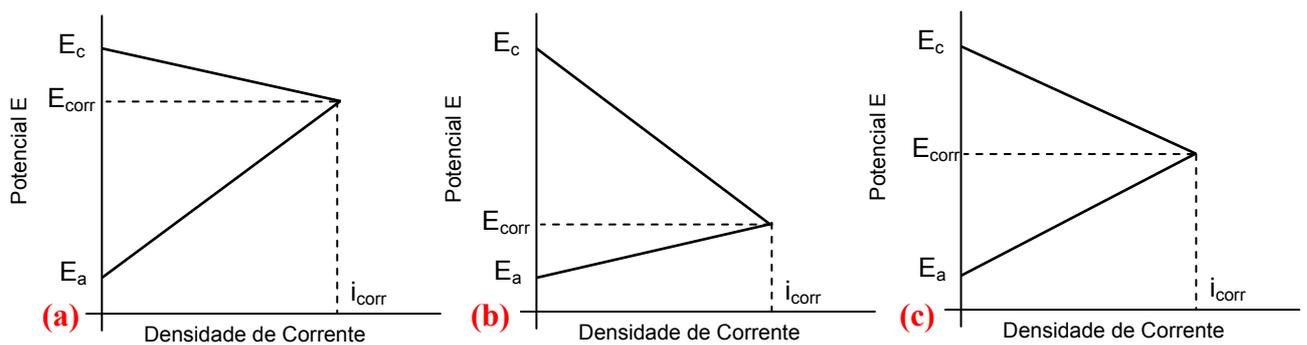


**Figura 1 – Representação esquemática das curvas de polarização anódica e catódica de dois eletrodos diferentes, imersos em um eletrólito constituindo uma célula galvânica.**

Ao se medir o potencial de um metal corroendo, o valor obtido será algo entre o potencial do eletrodo metálico e o potencial do eletrodo de referência.

Muitos fatores afetam as reações de corrosão e, portanto, também alteram as características de polarização dos eletrodos. Com ajuda de diagramas E x I, Evans explicou uma variedade de fenômenos de corrosão, ou seja:

- 1) Quando a polarização ocorre, predominantemente nas áreas anódicas, a reação é controlada anodicamente e o diagrama de polarização terá o aspecto semelhante ao da figura 2.a.
- 2) Se a polarização ocorre, predominantemente nas áreas catódicas, a reação é então controlada catolicamente, assim o diagrama característico será o da figura 2.b.
- 3) Enfim, se a polarização ocorre, em extensão apreciável, tanto no ânodo quanto no cátodo, tem-se, então, um controle misto, como mostra a figura 2.c.



**Figura 2 - Esquematização da influência dos fatores de controle da reação de corrosão na forma das curvas de polarização: a) reação sob controle anódico; b) reação sob controle catódico; c) reação sob controle misto.**

### 1.2.3 – Equações de Tafel

Quando um potencial  $E$ , diferente de  $E_{corr}$ , é imposto a um metal através de uma fonte externa e a velocidade da reação é controlada pela etapa eletroquímica lenta que requer uma energia de ativação tem-se um sobrepotencial “ $\eta$ ”:

$$\eta = E - E_{\text{corr}} \quad [8]$$

A relação entre a corrente e a sobretensão de ativação “ $\eta$ ” foi deduzida por **Butler-Volmer** para casos de equilíbrio eletroquímico. Nos casos de corrosão, utiliza-se uma analogia às equações de **Butler-Volmer** (BARD; FOULKNER, 1980) verificada empiricamente por Tafel (ZEHBOUR, 1981).

$$\eta = a + b \log i \quad (\text{Lei de Tafel}) \quad [9]$$

Sejam  $I_a$  e  $I_c$  respectivamente as correntes anódica e catódica correspondente ao potencial  $E$  e  $\beta_a$  e  $\beta_c$  as constantes de **Tafel** correspondentes. Então podemos escrever:

$$\eta_a = a_a + \beta_a \log I_a \quad [10]$$

$$\eta_c = a_c - \beta_c \log I_c \quad [11]$$

sendo as constantes de **Tafel**:

$$a_a = - \beta_a \log i_{\text{corr}} \quad [12]$$

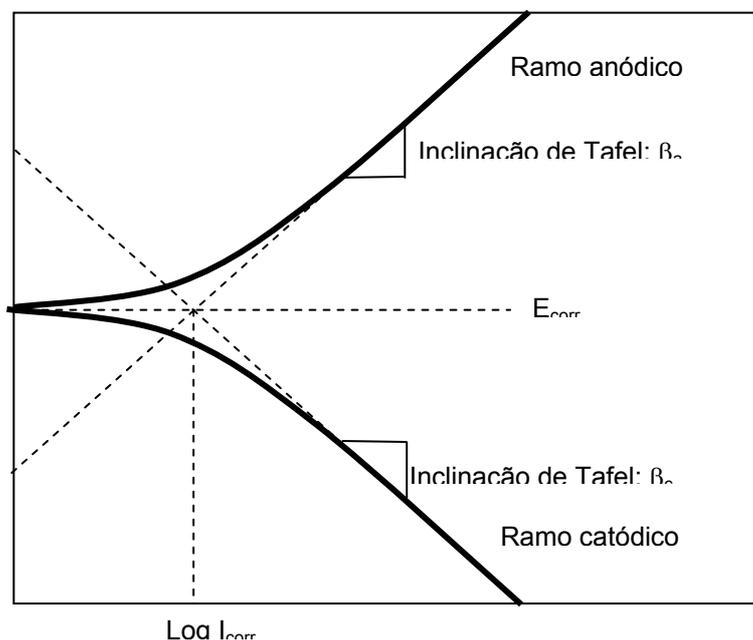
$$\beta_a = 2,303 RT / \alpha n F \quad [13]$$

$$a_c = \beta_c \log i_{\text{corr}} \quad [14]$$

$$\beta_c = 2,303 RT / (1-\alpha)nF \quad [15]$$

onde:  $R$ ,  $F$  e  $\alpha$ , são respectivamente a constante dos gases ideais, a constante de Faraday e o coeficiente de transferência de carga.  $T$  e  $n$  são a temperatura de trabalho e o número de oxidação da espécie eletroativa.

Nota-se que a equação 9 tem a forma  $y = mx + n$  e uma curva  $\eta$  vs  $\log i$  resulta em uma reta de inclinação  $\beta$  conforme ilustrado na figura 3.



**Figura 3 – Representação esquemática de um diagrama de Tafel típico.**

Este diagrama é conhecido como diagrama de **Tafel** e é uma poderosa ferramenta para avaliação de parâmetros cinéticos da corrosão. A partir do potencial de corrosão, são feitas duas varreduras distintas. Uma para o sentido catódico e outra para o sentido anódico, medindo para cada sobrepotencial a corrente característica. Assim constroem-se dois ramos independentes que, a medida que a polarização avança,

aproxima-se das retas de **Tafel** previstas na equação 9. A extrapolação destas retas ao potencial de corrosão possibilita a obtenção da corrente de corrosão  $I_{\text{corr}}$ .

As relações de **Tafel** são dependentes de processos ativados puramente por controle de energias de ativação ou controle de transferência de cargas, sendo aplicável apenas no estudo de corrosão uniforme.

#### 1.2.4 – Método de Aproximação de Alto Potencial

Observa-se nas curvas de **Tafel** para altos valores de  $\eta$  ( $\eta \ll 0$  ou  $\eta \gg 0$ ) que a influência da reação catódica sobre o ramo anódico e vice-versa torna-se desprezível para valores muito afastados do  $E_{\text{corr}}$ . Para estas condições, adota-se como prática nos trabalhos experimentais de corrosão eletroquímica, desprezar valores de correntes anódicas e que contribuam com menos de 1% da corrente catódicas e vice-versa (BARD; FAULKNER, 1980). Ou seja, quando  $i_a \leq 0,01 i_c$ . Portanto:

$$\frac{I_a}{I_c} \leq 0,01 \quad [16]$$

$$\frac{e^{(1-\alpha)nF\eta}}{e^{-anF\eta}} \leq 0,01 \quad [17]$$

que com o devido tratamento matemático nos dará :

$$|\eta| > \frac{0,059}{n \cdot \alpha} \quad [18]$$

Usualmente para a determinação das constantes de Tafel e pelo método de aproximação de alto potencial, emprega-se um  $|\eta| > 118$  mV que corresponde ao sobrepotencial de segurança do  $H_2$  cujo  $n\alpha = 1/2$  a partir do qual, construindo-se a curva

de polarização catódica obter-se-á uma reta semelhante á reta de **Tafel** (BARD; FAULKNER, 1980). A inclinação desta reta fornecerá a constante de Tafel catódica, enquanto que a sua extrapolação até a reta normal ao  $E_{\text{corr}}$ . fornecerá a corrente de corrosão  $i_{\text{corr}}$ . Analogamente, através da curva de polarização anódicas constantes de Tafel anódica podem ser determinadas.

Este método pode ser utilizado nos casos em que seja obtido, nas curvas experimentais, um trecho linear que contenha um intervalo de valores de corrente próximo de duas décadas (ZEHBOUR, 1981). Além disto, o trecho linear deve conter um  $\Delta i$  cujo valor da ordem de grandeza tenha cerca de 5 vezes ao do  $i_{\text{corr}}$  (ZEHBOUR, 1981).

### 1.2.5 – Potencial de Proteção

Com a injeção de corrente, pode-se obter o potencial em condições de circuito fechado (potencial “on” ou Eon). Se o potencial “on” for mais negativo que  $-850\text{mV}$  em relação a semicélula de cobre/sulfato de cobre saturado, a estrutura estará totalmente protegida.

Caso o potencial “on” não atinja o valor mínimo de  $-850\text{mV}$ , deve ser medido o potencial “off” e a corrente de injeção.

Durante a proteção catódica de grelhas é muito importante a seleção do potencial de proteção verdadeiro e para isso alguns critérios de potencial devem ser estabelecidos. O critério usado para estabelecer o potencial de proteção tem sido feito através de considerações termodinâmicas e através de observações empíricas.

Com relação as considerações termodinâmicas, POURBAIX (1949) fez um cálculo teórico do potencial de proteção considerando a solubilidade do ferro em água, considerando a concentração de íons  $\text{Fe(II)}$  de  $10^{-6}\text{ g/l}$  e verificou-se que o valor seria de  $-936\text{mV}$  em função do calomelano saturado. Este potencial está exatamente em cima da

linha que divide a região de corrosão com a região de imunidade no diagrama de potencial em relação ao pH. Este potencial é mais negativo que o valor de -850mV em relação ao calomelano saturado, o que mostra que neste potencial a corrosão não é totalmente zero. Pourbaix<sup>(1)</sup> também fez testes de laboratório usando ferro em meio de ácido sulfúrico na concentração de 1 normal e observou-se que para o valor experimental de -600mV com relação ao eletrodo de hidrogênio, a corrosão do ferro não era perceptível.

SUDRABIN (1957) fez cálculos através da equação de **Nerst** e encontrou o valor de -868mV em função do calomelano saturado para o potencial de proteção.

PETERSON (1959) E UHLIG'S (1971) calcularam o potencial de proteção através do produto de solubilidade do hidróxido ferroso em solução saturada de íons ferroso em água a pH = 9,3 e encontraram o valor de -906mV em função do calomelano saturado para o potencial de proteção.

DAVID (1989) E KELLMER (1989) mostraram através de cálculos termodinâmicos que o potencial de proteção depende da concentração de íons ferroso e está relacionado com o potencial redox da reação Fe/Fe(II) em condições reversíveis, além de mostrar que o valor de -850mV com relação ao calomelano saturado é mais negativo que o potencial de proteção verdadeiro.

Com relação às observações empíricas, foram realizados testes em laboratórios e em campo. No que tange aos testes de laboratório, em 1938 MEARS e BROWN (1938) mostraram que a proteção catódica era inteiramente efetiva quando se polarizava a reação catódica em condições de circuito aberto, porém isto era difícil de ser realizado em uma situação normal.

EVANS (1960) fez teste usando aço em contato com solução contendo íons Fe(II) e verificou-se que no potencial de -816mV em função do calomelano saturado, a concentração de íons ferroso desapareceu em 100%.

Em 1950 SCHWELTPZER (1954) e MCDONAN (1951) trabalharam na NBS AMERICANA, com 20 solos desoxigenados e com pH entre 2,9 e 9,6. Neste trabalho eles assumiram que a reação catódica é a reação de redução de hidrogênio e verificaram que na intersecção entre a reação anódica do Me/Me<sup>z+</sup> e a reação catódica do H<sub>2</sub>/H<sup>+</sup>, o potencial era de -850mV em relação a calomelano saturado. Nestas condições foi verificado que a força eletromotriz da pilha acima citada era zero.

MCDONAN (1951) trabalhou em soluções sem Queda Ôhmica. Nesse trabalho, eles aplicaram -770mV em relação ao eletrodo de calomelano saturado em corpos de prova de aço durante 60 dias e verificaram que a perda de massa foi desprezível durante os testes feitos.

Em 1980, BARLO (1984) e BERRY (1984) repetiram o teste acima para solos aerados e desaerados. Nestes estudos, eles aplicaram o potencial de -850mV em função do calomelano saturado e verificaram que a corrosão nestas condições era de 25µm/ano.

Com relação aos testes empíricos realizados em campo, EWING (1951) realizou vários testes durante o ano de 1951. Nestes testes, ele enterrou vários tubos em Oklahoma e verificou que o potencial mais negativo, onde não houve corrosão foi o valor de -830mV em função do calomelano saturado.

Em 1980, a AMERICAN GAS ASSOCIATION (1980), iniciou 18 ensaios nos USA, 2 ensaios no Canadá e 3 ensaios na Austrália e em 1987, eles concluíram que o potencial que previne a corrosão está por volta de -850mV com relação ao eletrodo de calomelano saturado.

Em 1983, a NACE (1983) criou a RP0169 “Controle da Corrosão pelo Solo em Tubulações Metálicas”, onde estabelece o potencial de proteção como sendo o valor de -850mV em relação ao eletrodo de calomelano saturado.

SUDRABIN (1954) verificou que havia diferença de potencial quando variava a posição do eletrodo de cobre/sulfato de cobre saturado, em direção a tubulação que estava sendo protegida catodicamente. Neste trabalho, ele comprovou, através de ensaios em água variando a resistividade de 1 a 220 Ohm.m<sup>(15)</sup>, a existência do efeito de Queda Ôhmica durante a medição do potencial de proteção em meios de alta resistividade.

Vários laboratórios (BARLO *et al.*, 1987) incorporaram a técnica de interrupção da corrente para determinar o potencial de proteção. Esta técnica baseia-se em interromper a corrente circulante e medir o potencial logo no instante em que o valor começa variar lentamente em função do tempo e este potencial é tido como potencial em condições de circuito aberto.

Essa técnica leva em conta que a representação da interface Metal/solo pode ser representado pelo circuito equivalente de RANGLES (1947) proposto em 1947. Este modelo é representado por uma resistência do meio corrosivo em série com um circuito RC, onde R está relacionado com a resistência de polarização em paralelo com C referente a um capacitor representado pela dupla camada. Assim a queda de potencial sobre a resistência do meio corrosivo desaparece instantaneamente quando a corrente é interrompida. Quando a corrente é pequena, a queda de potencial através da resistência de polarização e através da capacitância da dupla camada é igual, pois eles estão em paralelos. Deste modo, quando se interrompe a corrente, a variação de potencial na interface, não desaparece instantaneamente, mas por um decaimento lento, devido a

constante de tempo existente entre a resistência de polarização e a capacitância da dupla camada.

Em 1992 e em 1996, a NACE *et al.* fez uma revisão da RP0169, introduzindo o efeito de Queda Ôhmica e padronizou o valor de 100mV mais negativo que o potencial de corrosão, para o estabelecimento de uma estrutura metálica totalmente protegida pelo sistema de proteção catódica, em condições de circuito aberto.

A norma Alemã DIN (1985) estipula um critério para o potencial de proteção levando em conta a resistividade do solo e estabelece valores de potencial de proteção em condições de circuito fechado de acordo com determinados intervalos de resistividade: para resistividades menores que 100Ohm.m, o potencial de proteção é de -850mV em função do calomelano saturado; para a resistividade entre 100 e 1000Ohm.m, o potencial de proteção é de -750mV em relação ao calomelano saturado e para a resistividade acima de 1000Ohm.m, o potencial de proteção é -650mV em relação ao eletrodo de calomelano saturado.

### **1.2.6 – Casos em que a aproximação de Alto Potencial não pode ser diretamente aplicada**

Alguns casos em que a aproximação acima não pode ser válida é o seguinte:

- a) Sistemas em que ocorrem distorções na curva de polarização anódica devido a passivação do metal;
- b) Sistemas em que ocorrem distorções nas curvas de polarização devido as variações de área do eletrodo quando se tem velocidades de corrosão muito altas;
- c) Sistemas em que ocorrem quedas de tensão devido a existência de uma resistência Ôhmica do meio e as películas superficiais do eletrodo;

- d) Sistemas em que ocorrem reações secundárias;
- e) Sistemas em que a reação catódica está sob controle misto.

Para evitar o inconveniente discutido no subitem “a”, é comum trabalhar somente com o ramo catódico da figura 3. Já o discutido no subitem “b” não ocorre quando o meio corrosivo é o solo. Para contornar o discutido no subitem “c”, é comum usar a técnica de obtenção do potencial “off” (potencial em condições de circuito aberto), além da obtenção do potencial “on” (potencial em condições de circuito fechado).

Quando existem reações secundárias, como discutido no subitem “d” na parte catódica, como é o caso da redução de hidrogênio juntamente com a redução de oxigênio. A reação de redução do hidrogênio pode ser estudada a partir de parâmetros físico-químicos obtidos por análise de amostras de solo.

Quando a redução catódica tem controle misto conforme discutido no subitem “e”, como é o caso da corrosão de materiais enterrados no solo, tem-se a reação de redução do oxigênio como a principal reação no ramo catódico. Neste caso estuda-se a polarização catódica sob o ponto de vista da sobretensão por ativação ou transferência de carga e sob o ponto de vista da sobretensão por transporte de massa. Neste caso o transporte de massa é estudado a partir do modelo da camada de difusão de **Nerst**.

A redução catódica do oxigênio inicia-se por um processo ativacional, onde a velocidade da reação catódica ainda não atingiu as condições de corrente limite da redução do oxigênio e termina sob um controle por transporte de massa, quando a corrente necessária para o deslocamento dos 100mV ( $I_p$ ), apresenta valores próximo da corrente limite para a redução do oxigênio. Portanto o sobrepotencial envolvido na reação catódica pode ser representado pelo sobrepotencial ativacional ( $\eta_A$ ).

Na determinação da corrente de corrosão com circulação de corrente “ $I_{corrPC}$ ”, usa-se o “ $\eta_A$ ”, o “ $\beta_{off}$ ” e a  $I_p$ . A  $I_p$  é previamente determinada através dos parâmetros eletroquímicos obtidos em campo.

Para estabelecer a relação entre  $I_{corrPC}$ , “ $\eta_A$ ” e  $I_p$ , é necessário fazer as considerações a seguir:

Quando a cinética da reação catódica está sob controle ativado, isto é, a velocidade da reação catódica ainda não atingiu as condições de corrente limite da redução do oxigênio, a corrente de corrosão pode ser determinada, a partir do decaimento de 100mV mais catódico que o potencial de corrosão ( $\eta$ ), juntamente com a corrente aplicada ( $I_p$ ) para deslocar o potencial de 100mV. Para isso, deve-se assumir 100mV para “ $\eta$ ” e obter “ $I_p$ ”.

A  $I_p$  é dada pela diferença entre as reações anódicas e catódicas.

Com o decaimento do potencial a 100mV mais catódico que o potencial de corrosão, a reação anódica se torna desprezível com relação a reação catódica.

A densidade da corrente de troca da reação catódica (aproximadamente  $0,1\mu A/cm^2$ ) é muito menor que a densidade de corrente de corrosão e a contribuição da cinética sob controle ativacional, na reação catódica durante a polarização catódica tem uma contribuição bastante acentuada (o deslocamento de 100mV é facilmente obtido com pequena  $I_p$ ).

Para obtenção da  $I_{corrPC}$  é necessário o conhecimento do “ $\eta_A$ ”. O “ $\eta_A$ ” é obtido pela diferença do “ $\eta$ ” com o sobrepotencial devido ao transporte de massa “ $\eta_m$ ”. O “ $\eta_m$ ” é obtido a partir da corrente limite “ $I_L$ ”.

Quando a cinética da reação catódica está sob controle por transferência de massa, isto é, a velocidade da reação catódica já atingiu as condições de corrente limite

da redução do oxigênio ( $I_L$ ). Esta pode ser determinada, pois ela é praticamente constante, similar a corrente de corrosão e é a corrente do processo catódico. Neste caso, é necessário fazer as considerações a seguir:

A  $I_p$  é dada pela diferença entre as reações anódicas e catódicas.

A relação entre “ $I_p$ ” e o deslocamento de potenciais ( $\eta$ ) é definido pela reação anódica, pois  $I_L$  é similar a corrente catódica. Para o caso do presente trabalho, usou-se o valor de 60 mV/dec para “ $\beta_a$ ”.

A densidade de corrente de troca da reação anódica é muito menor que a densidade de corrente de corrosão e a contribuição da cinética sob controle ativacional, na reação anódica durante a polarização catódica tem uma contribuição bastante acentuada (o deslocamento de 100mV é facilmente obtido com pequena  $I_p$ ).

### **1.3 - INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DE UM SOLO NA CORROSÃO DE ESTRUTURAS ENTERRADAS**

De acordo com ROMANOFF (1957) são denominados de “solos” as primeiras camadas da crosta terrestre e a tem sua origem na desagregação de rochas por processos de intemperismo.

As características de um solo são determinadas por uma série de fatores entre os quais podem ser citados:

- a) **Origem geológica e localização:** este fator apresenta pouca influência nas características de um solo sob o ponto de vista de corrosão.
- b) **Condições climáticas durante a sua formação:** é um fator muito importante, estando diretamente relacionado com as características físicas e químicas. Por exemplo, se no período de formação do solo houver muita

precipitação pluviométrica a água pode lixiviar os compostos solúveis mudando completamente a sua composição química.

- c) **Condições climáticas durante a sua existência:** as chuvas podem continuar lixiviando os compostos solúveis após a formação do solo.
- d) **Atividade vegetal e animal:** muita atividade vegetal e animal faz com que material orgânico seja incorporado, fazendo parte integrante do solo. O conteúdo de material orgânico pode variar desde 0% (em areia) até 100%. Além disso, a presença de microorganismos vivos no solo pode determinar a corrosão microbiológica dos metais.

Classificar o solo, sob o ponto de vista da corrosão, em termos destas características é quase impossível. No entanto, busca-se apresentar uma classificação que seja pronunciada no comportamento dos metais enterrados nos solos. Tal classificação pode ser em: propriedades físicas, propriedades químicas, propriedades biológicas, granulometria e textura de solos.

## CAPITULO 2

### DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Para melhor compreensão deste capítulo, ele foi dividido em cinco itens conforme segue:

- Roteiro Metodológico;
- Equipamentos Utilizados;
- Obtenção da Resistividade do Solo;
- Obtenção do Potencial de Corrosão ou Potencial Natural da Estrutura/Solo;
- Determinação da Corrente de Corrosão pela Técnica de Decaimento dos 100 mV.

#### 2.1 – ROTEIRO METODOLÓGICO

Para a quantificação da intensidade corrosiva de uma estrutura enterrada, aplicou-se o seguinte roteiro metodológico:

##### **A) Parâmetros obtidos no campo:**

- Resistividade do Solo;
- Obtenção do potencial estrutura/solo;
- Obtenção da corrente necessária para a estrutura enterrada estar protegida em condições de circuito fechado;
- Obtenção da corrente necessária para a estrutura enterrada estar protegida em condições de circuito aberto.

##### **B) Parâmetros obtidos no laboratório:**

- Obtenção das curvas de potenciais “on” e potenciais “off”;
- Obtenção das curvas sigmoidais dos potenciais “off”;

- Extrapolação sigmoïdal na região de potenciais estacionários;
- Obtenção da corrente de corrosão sem proteção catódica;
- Obtenção da taxa de corrosão sem proteção catódica (desde que saiba a área da estrutura enterrada).

## 2.2 – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Foi utilizado um conjunto potenciostato/galvanostato, modelo 173, fabricado pela Princeton Applied Research Company “PARC”, acoplado com um gerador de função modelo 175 também da PARC.

Um conjunto de Voltímetro/Amparímetro, modelo 5318, da Multimeter e uma bateria automotiva de 42 A.h, fabricada pela Moura.

Um eletrodo de referência de Cobre/Sulfato de Cobre saturado foi construído para facilitar a medição do Potencial de Corrosão, conforme representado pela figura 5, item 2.5, página 27.

Componentes como cabos de cobre flexível, potenciômetros, chaves de liga/desliga e bornes de ligação também fizeram parte da lista de materiais.

## 2.3 – OBTENÇÃO DA RESISTIVIDADE DO SOLO

Para as medidas de resistividade do solo foi montado o circuito desenvolvido através do **Método de Werner**, conforme apresentado pela figura 4.

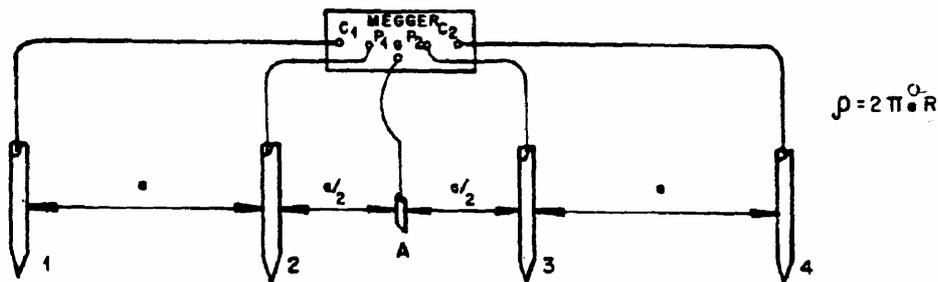


Figura 4 – Método dos quatro pontos (Werner)

Este método que usa 4 pontos alinhados, igualmente espaçados, cravados a uma mesma profundidade, também é conhecido por **Método dos Quatro Pontos**.

Uma corrente elétrica  $I$  é injetada no ponto 1, pela primeira haste e, coletada no ponto 4, pela última haste.

Esta corrente, passando pelo solo entre os pontos 1 e 4, produz potencial nos pontos 2 e 3 (terminais P1 e P2). Assim, o aparelho processa internamente e indica na leitura, o valor da resistência elétrica.

Com o valor da resistência, pela fórmula de **Palmer**, calcula-se o valor da resistividade do solo ( $\rho$ ).

Devem ser feitas diversas leituras, para vários espaçamentos, com as hastes sempre alinhadas. Os espaçamentos recomendados para facilitar o cálculo pelo método de estratificação do solo são:  $a(m) = 2, 4, 6, 8, 16, 32$  metros ...

No **Método de Wenner**, deverão ser observados os seguintes preceitos:

- a) os eletrodos deverão ser cravados, aproximadamente, 20 cm no solo, até apresentarem resistência mecânica de cravação aceitável que defina uma resistência ôhmica de contato aceitável;
- b) os eletrodos deverão estar sempre alinhados;
- c) as distâncias entre eletrodos deverão ser sempre iguais;

- d) verificar se o contato com o solo está bom (por exemplo, se o eletrodo está sem gorduras ou oxidado);
- e) ajustar o potenciômetro e o multiplicador do mesmo até que o galvanômetro do aparelho indique "zero";
- f) fazer a medição e anotar os valores obtidos;
- g) proceder identicamente para as outras separações entre eletrodos. Se o ponteiro do galvanômetro oscilar, significa que existe alguma interferência devido as correntes dispersas no solo e isso deverá ser indicado como observação a parte;
- h) para aparelhos que tiverem o 5<sup>o</sup> (quinto) terminal, ou seja, terminal G (Ground – terminal terra), deve ser cravado um outro eletrodo no centro entre as hastes intermediárias (ponto A na figura 4) e interligar o terminal G com este eletrodo, atenuando, assim, a interferência que possa existir;
- i) deverá ser indicado na tabela de medição, se o solo está seco, úmido ou molhado e o tipo aproximado de solo;
- j) deverá ser apresentado o croqui de locação dos pontos onde foram executadas as medidas;
- k) o valor de resistividade será dado pela fórmula de **Palmer**, conforme segue:

$$\rho = 2\pi \cdot a \cdot R \quad [19]$$

onde:

R – [Ω] (ohm)

[a] – m (metros)

[ρ] – Ω . m

onde **R** é o valor indicado no potenciômetro do medidor, aplicado o respectivo multiplicador do aparelho utilizado, **a** é a separação entre eletrodos e **ρ** é a resistividade.

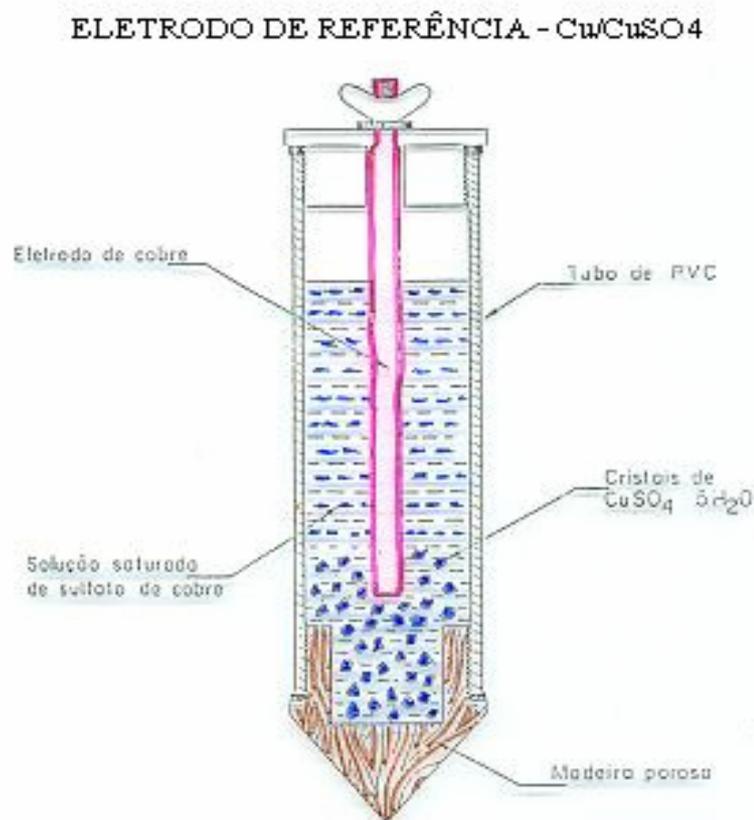
Cabe ainda acrescentar que:

- O método de **Wenner** considera o solo homogêneo.
- O valor de resistividade obtido com um determinado espaçamento entre eletrodos é o valor referido à profundidade - igual a esse espaçamento.

## 2.4 – OBTENÇÃO DO POTENCIAL DE CORROSÃO OU POTENCIAL NATURAL DA ESTRUTURA/SOLO

Para obtenção do potencial estrutura/solo (RECOMENDAÇÕES SCM, 1994), foi construído uma semi-célula de cobre/sulfato de cobre saturado, conforme a figura 5, e realizaram-se medidas com esse tipo de eletrodo.

### 2.4.1 – Construção da semicélula de cobre/sulfato de cobre:



**Figura 5 – Semicélula de cobre/sulfato de cobre saturado.**

Para a construção desse eletrodo, foi preparada uma solução estoque de sulfato de cobre conforme segue:

- a) 100g de sulfato de cobre (comercial);
- b) 500ml de água destilada;
- c) O sulfato de cobre foi dissolvido em 500ml de água destilada;

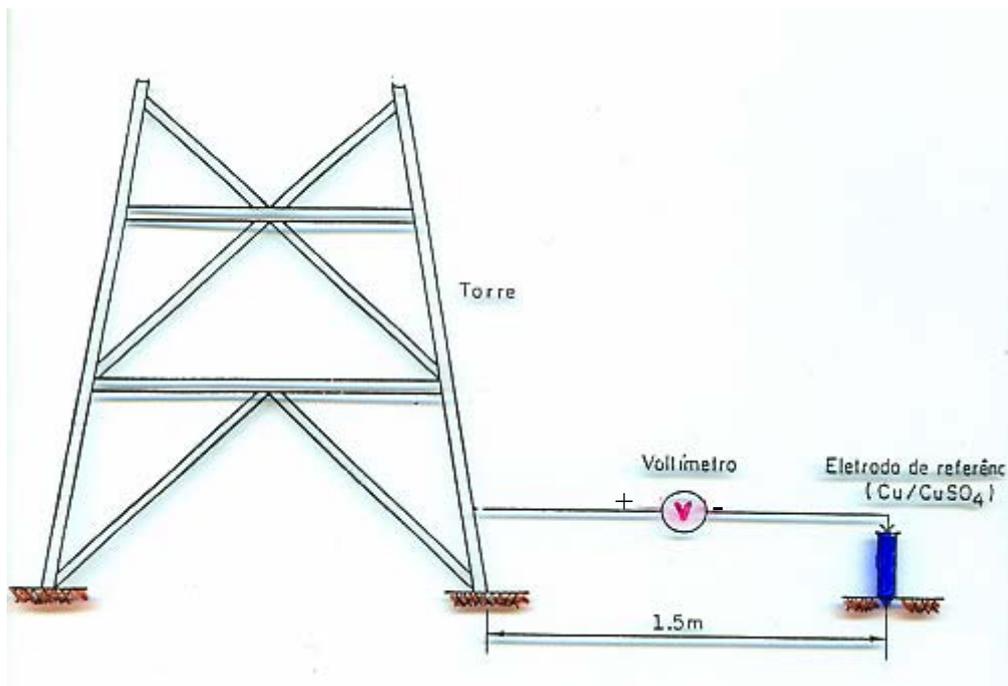
Essa solução foi colocada em tubo de PVC (30 cm de comprimento e 2,54 cm de diâmetro) e vedada com duas rolhas em suas extremidades, juntamente com um condutor de cobre (25 cm de comprimento) no interior do tubo. As rolhas foram muito bem ajustadas para não permitir entrada de ar na extremidade superior e para não permitir saída da solução de sulfato de cobre pela extremidade inferior. Tamponaram-se as possíveis entrada de ar com cola do tipo araldite cura lenta, na rolha da extremidade superior. Esse eletrodo ficou com uma metade imersa na solução estoque de sulfato de cobre saturado. Foram construídos dois eletrodos de sulfato de cobre para que um fosse calibrador do outro, isto é, antes de usá-los sempre media-se a variação de potencial entre os dois eletrodos imersos na solução estoque. O valor da variação de potencial se manteve estável e próximo de zero.

#### **2.4.2 – Medição do potencial "estrutura/solo"**

Para medir o potencial "estrutura/solo", fez-se um pequeno orifício de aproximadamente 20 cm de profundidade e cerca de 1,5 metros de distância da estrutura. No interior desse orifício introduziu-se água comum e logo em seguida, o eletrodo de cobre/sulfato de cobre saturado. Para a realização das medidas, colocou-se o pólo positivo do voltímetro na estrutura e o pólo negativo ou "terra" do voltímetro foi conectado no eletrodo de cobre/sulfato de cobre saturado. Antes da medição

propriamente dita, verificou-se a presença de água no interior do orifício para facilitar o contato elétrico e a leitura foi realizada em condições de corrente contínua.

A figura 6, demonstra a distribuição esquemática de instalação do eletrodo de cobre/sulfato de cobre, a fim de permitir a medição do potencial da estrutura em relação ao solo.



**Figura 6 – Medição do potencial de corrosão em pés de torres de linhas de transmissão aérea convencional.**

#### **2.4.3 – Modo de Avaliação da Estrutura:**

Conforme a literatura (NACE, 1992), uma forma expedita de avaliação das condições da estrutura pode ser efetuada, de acordo com a seguinte regra:

- a) Nas estruturas com potenciais mais negativos que -850mV (isto é, -950mV ou -1000mV ou -1100mV, etc..) a grelha deve ser considerada como nova onde o revestimento de zinco encontra-se em boas condições, protegendo o aço adequadamente.

b) Nas estruturas com potenciais mais positivos que  $-400\text{mV}$  (isto é,  $-400\text{mV}$  ou  $-350\text{mV}$  ou  $-300\text{mV}$ , etc...) a grelha deve ser considerada como “estado crítico de corrosão” e deve sofrer manutenção ou substituição em pequeno espaço de tempo.

**Tabela 1 – Resumo para a Avaliação da Estrutura de Grelhas de Pés de Torres de Linhas de Transmissão**

POTENCIAIS	OBSERVAÇÃO
mais negativo que $-850\text{mV}$	Grelha nova
entre $-510\text{mV}$ a $-840\text{mV}$	Grelha normal
mais positivo que $-400\text{mV}$	Grelha crítica

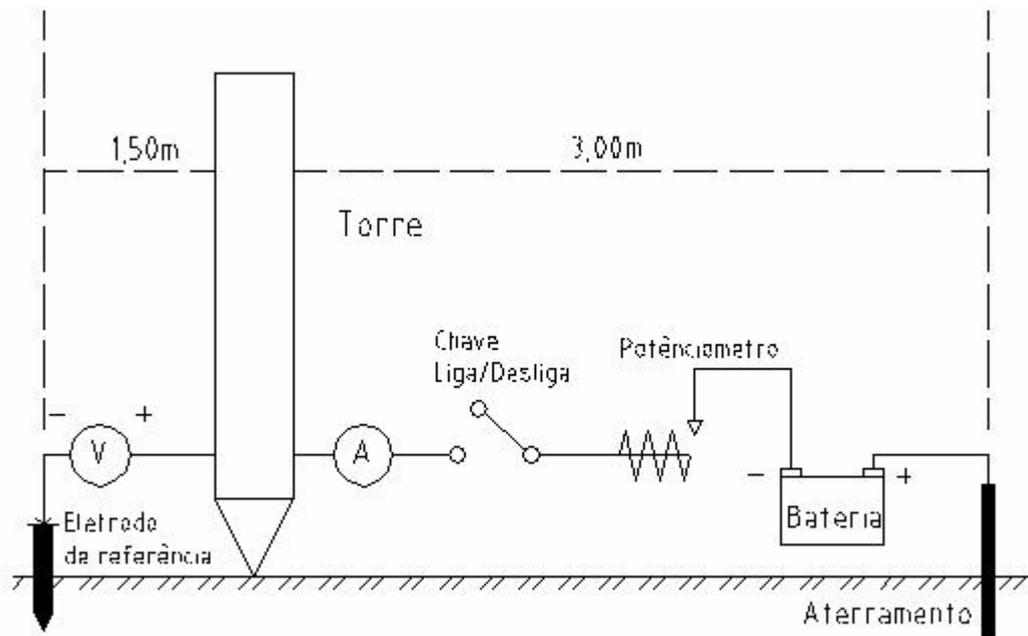
**Fonte: NACE RPO 169/92**

## 2.5 – DETERMINAÇÃO DA CORRENTE DE CORROSÃO – TÉCNICA DO DECAIMENTO DOS 100 mV:

O procedimento de medição dos potenciais “ON / OFF” por injeção de corrente, a seguir descrito, foi elaborado com base nas recomendações de MOHAMMAD e RASHEEDUZZAFAR (1992) e HOLTSBAUM (2000).

A injeção de corrente foi realizada na estrutura através de circuito montado conforme a figura 7. O multímetro e o eletrodo de referência de  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$  (cobre/sulfato de cobre) saturado foram instalados observando-se o recomendado na figura 6, subitem 2.4.2, página 29.

As hastes de aterramento foram distribuídas de forma similar à disposição final dos anodos. Após a montagem do aterramento, interligou-se à estrutura através da bateria, potenciômetro, chave liga/desliga e multímetro, conforme demonstrado pela figura 7.



**Figura 7 – Esquema de ligação para injeção de corrente**

### 2.5.1 – Obtenção do Potencial “off”

Inicialmente mediu-se o potencial natural da estrutura, conforme mencionado no subitem 2.4.2, página 29. Com a chave na posição fechada foram realizadas as medidas de potencial de circuito fechado que denominamos de “Eon”. Os potenciais obtidos em condições de circuito aberto referem-se à polarização efetiva e são chamados de “Eoff”.

Para a realização das medidas, necessárias às curvas de polarização, utilizou-se injeção de corrente em intervalos próximos de 0,5 mA em 0,5 mA.

Para obter o potencial “Eon” em condições de circuito fechado, o tempo de estabilização é de 30 segundos. Após este tempo interrompia-se o circuito através da chave liga/desliga e lia-se o primeiro valor que aparecia no visor do amperímetro, obtendo-se o potencial “Eoff”. Em seguida retornava-se a chave liga/desliga na posição original e esperava-se o restabelecimento da estabilização do potencial em condições de circuito fechado, em torno de 30 segundos. Para cada valor de corrente mediu-se o potencial “Eoff” três vezes, obtendo-se “Eoff<sub>1</sub>”, “Eoff<sub>2</sub>” e “Eoff<sub>3</sub>”.

### **2.5.2 – Modo de Avaliação do Potencial “Eoff”**

Com a injeção de corrente, pode-se obter o potencial em condições de circuito aberto (potencial “off” ou Eoff). Se a diferença entre o potencial “off” e o potencial natural for 100mV mais negativo que o potencial natural, a estrutura pode ser considerada protegida. Se o potencial “on” ou o potencial “off” não for atingido deve-se repensar o projeto

## CAPÍTULO 3

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para melhor compreensão deste capítulo, apresentaremos em três seções itemizadas conforme segue:

- a) **Considerações Iniciais** – trata sobre o comportamento das curvas potenciodinâmicas geradas a partir da bateria Moura de 42 A.h em substituição ao Potenciostato/Galvanostato, modelo 173 da PARC. Trata também, da avaliação do sistema de proteção catódica através do método convencional (avaliação pela resistividade do solo);
- b) **Taxa de Corrosão** – A obtenção da taxa de corrosão através das curvas de polarização realizadas em campo;
- c) **Estudo de Caso** – Linha de Transmissão de Chacon – Ezeiza de 500 kV, Torre N° 7, Subestação de Henderson, Buenos Aires, Argentina.

#### 3.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS:

##### 3.1.1 – Comportamento comparativo entre potenciosatato/galvanostato e bateria:

Em função das limitações do uso em campo do Potenciostato/Galvanostato, foi utilizada a bateria de 42 A.h (fabricação Moura) com o objetivo de validá-la como fonte alimentadora de corrente contínua na determinação dos potenciais de corrosão  $E_{on}$  e  $E_{off}$ .

O experimento foi realizado em 17/07/2002, no terreno da Universidade Federal do Paraná, próximo ao Laboratório do LACTEC.

Para a realização das medidas, conforme apresenta a figura 8 (página 37), a célula eletroquímica foi o solo local com resistividade próximo de  $100\Omega.m$ , a temperatura foi a ambiente, o corpo de prova foi uma haste de aço galvanizado com área enterrada no solo de  $0,1\text{ m}^2$  e o experimento foi realizado conforme descrito no Capítulo 2.

As condições ideais para a realização de uma curva de polarização compreendem:

- a) Manter o pH do meio constante;
- b) Manter o meio desoxigenado, com a finalidade de evitar possíveis influências das reações catódicas;
- c) Manter a temperatura constante para não aumentar a velocidade das reações envolvidas durante o experimento;
- d) Manter um meio de fácil condução elétrica para evitar possíveis potenciais de junção líquida entre os contatos de diferentes fases existentes no sistema eletroquímico;
- e) Manter a área do eletrodo de trabalho bem menor que o volume da solução, para estar seguro de que a corrente de trabalho não está sendo afetada por agentes externos;
- f) Evitar formação de corrosão por fresta no eletrodo de trabalho, pois isto pode influenciar nos valores da corrente verdadeira.

Pelo fato do estabelecimento dessas condições ideais serem quase impossíveis quando o meio corrosivo é o solo (devido a sua natureza ser muito complexa), desenvolveu-se o “Boletim de Corrosividade do Solo” na região em que se obteve a curva de polarização.

O “Boletim de Corrosividade do Solo” está baseado na agressividade do mesmo, a qual é composta por propriedades físicas, químicas e biológicas. Pelo fato destas propriedades atuarem de forma conjunta, a corrosividade do solo não pode ser avaliada de forma isolada, motivo que impõe ao boletim a necessidade de vários parâmetros eletroquímicos obtidos por análises físico-químicas e biológicas.

As características do solo em que a figura 8 foi realizada, segue indicada através da tabela 2.

**Tabela 2 – Boletim de Corrosividade do Solo – Comparação Potenciostato/Bateria**

BOLETIM DE CORROSIVIDADE DE SOLOS

Gramado do laboratório - LACTEC (Curitiba)

TESTES DE LABORATÓRIO: SOLO MEDIANAMENTE AGRESSIVO (TAXA 100 A 200 um/ano)

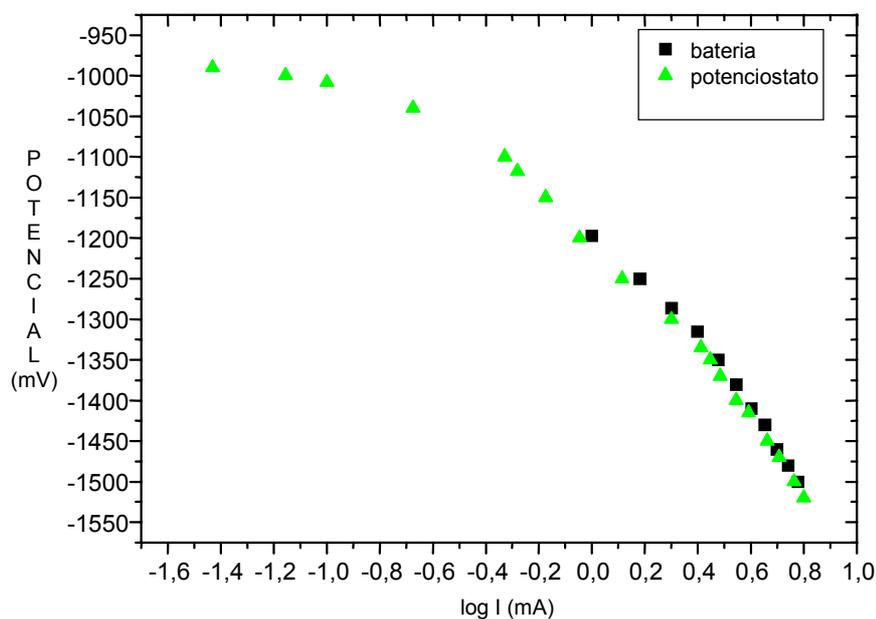
	valores	classificação	critério	valor referencia
Humidade natural do solo (% água)			Booth	15 a 20
capacidade de retenção de água (% água)	48	elevada	Booth	15 a 20
Resistividade na retenção de água em Ohm.m	200	Ligeiramente corrosivo	pc por limpre	100 a 1000
Resistividade mínima	90	Solo de baixa resistividade		
resistividade média em Ohm.m	145	Ligeiramente corrosivo	pc por limpre	100 a 1000
Potencial redox em mV	430	Baixa prob. De bactérias	Stark/Wigth	100 a 400
(% água na resist. mínima)	58	elevada	Booth	15 a 20
Cloreto em mEq/100g de solo (1ppm)	0,007	Baixa agressividade	Trab.Modif	0,03 a 0,1
Sulfatos em mEq/100g de solo (8,5ppm)	0,018	Baixa agressividade	Tomashov	0,1 a 1
pH Região não passiva	5,2	Pouco agressivo	Pourbaix	5 a 7
pH em extrator KCl pH<4 (2H <sup>+</sup> + 2é --> H <sub>2</sub> )	4,6	pH>4 (2 H <sub>2</sub> O + 2é --> H <sub>2</sub> + 2 OH <sup>-</sup> )		
desvio da saturação em % (capacid. Ret. Agua	17,24138	((%sat-cretagua)/%sat)*100	Abaixo limitr	30 a 50
tx de stratful pH	90	um/ano corrosivo	Stratful	25 a 100
Índice de Trabanelli	1	Pouco agressivo	Trabanelli	(-1 a -8)
acidez total e resistividade	7,3	Agressivo	122,6 Girard	10 a 100
Alumínio em ppm	780	Agressivo	Embrapa(pH, 10 a 100	>200um/an
bicarbonatos em mEq/100gsolo (22ppm)	0,13			
Categoria de corrosividade (tabela abaixo)	3			
resistividade média em Ohm.m (teste campo)				

micrometro/ano

1	<10	Proteção quase permanente (norma iso - 15589-1)
2	10-100	Pouco agressivo
3	100-200	Medianamente Agressivo (8mm em 40 anos ou 30 anos comerciais)
4	>200	Agressivo

Na figura 8, página 36, as medidas experimentais apresentam um resultado típico de uma região de Tafel catódica para altos sobrepotenciais (100mV mais negativo que o potencial de corrosão), além do potencial de repouso estacionário na região de baixos sobrepotenciais. A variação de potencial de 100mV, para o início da região de altos sobrepotenciais, mostra que nesta região, a reação anódica é desprezível em

relação a reação catódica. As duas retas de Tafel mostram uma perfeita correspondência e fica evidente a possibilidade de realizar curvas de polarização em campo (na própria Linha de Transmissão) sem haver a necessidade do potenciostato/galvanostato. A curva obtida através da injeção de corrente se inicia na região de altos sobrepotenciais para a intensidade de corrente injetada. A inclinação de Tafel ( $\beta_{on}$ ) das polarizações catódicas estudadas apresenta o valor de 50mV/dec, indicando que a polarização do sistema está no catodo, isto é, o deslocamento de potenciais na direção catódica está facilitada e a reação predominante sobre todo o processo é a catódica. Além disso, verifica-se que o potencial de corrosão se encontra próximo à região do potencial reversível da reação anódica, o que facilita na obtenção do potencial de proteção da reação anódica.



**Figura 8 – Representação tipo Tafel para a reação catódica sobre uma cantoneira de aço galvanizado (haste de aterramento de cerca) com 0,1m<sup>2</sup> de área enterrada.**

### 3.1.2 – Sistema de proteção catódica pelo método tradicional (Resistividade do Solo):

O experimento foi realizado no trecho de Linha de Transmissão de 138 kV da Companhia Paranaense de Energia – COPEL, que alimenta a cidade de Guarapuava à Vila Carli, oeste do Paraná.

O solo estudado na Linha de Transmissão Guarapuava – Vila Carli, foi similar ao solo cujo boletim está representado pela tabela 3, conforme abaixo.

O experimento foi instalado e realizado de acordo com o referenciado no Capítulo 2,

**Tabela 3 – Boletim de Corrosividade do Solo – LT Guarapuava / Vila Carli**

#### BOLETIM DE CORROSIVIDADE DE SOLOS

TORRE 26 LT Guarapuava - Vila Carli (Copel) 11/09/1996

TESTES DE LABORATÓRIO: SOLO MEDIANAMENTE AGRESSIVO (TAXA 100 a 200 um/ano)

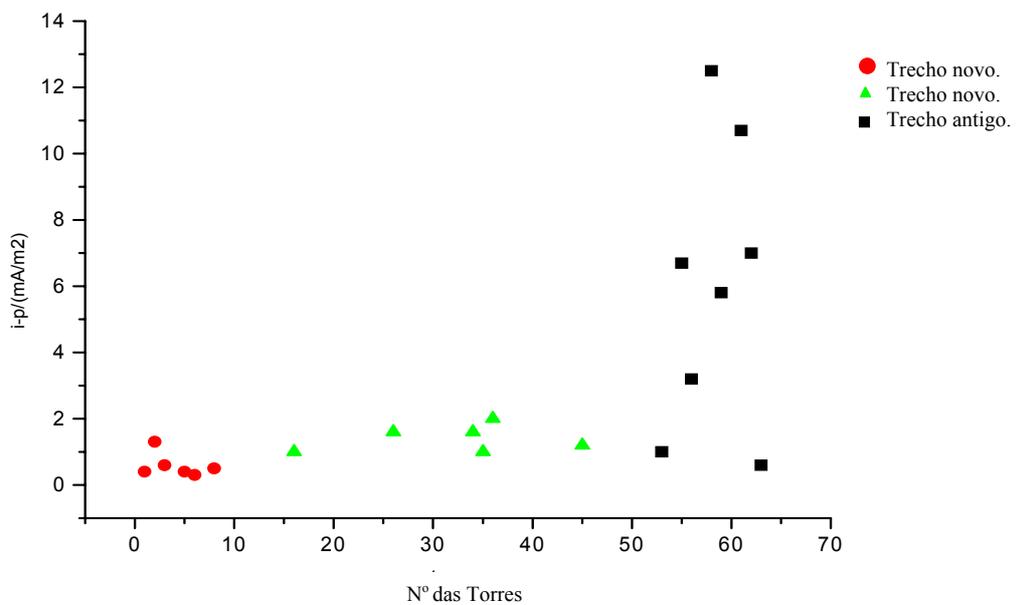
	valores	classificação	critério	valor referencia
Humidade natural do solo (% água)			Booth	15 a 20
capacidade de retenção de água (% água)	24	elevada	Booth	15 a 20
Resistividade na retenção de água em Ohm.m	400	Ligeiramente corrosivo	pc por limpre	100 a 1000
Resistividade mínima	120	Solo de baixa resistividade		10a100um/
resistividade média em Ohm.m	260	Ligeiramente corrosivo	pc por limpre	100 a 1000
Potencial redox em mV	330	Média proba. De bactéria	Stark/Wigth	100 a 400
(% água na resist. mínima)	45	elevada	Booth	15 a 20
Cloreto em mEq/100g de solo (31ppm)	0,22	Agressivo	355 Trab.Modif	0,03 a 0,1
Sulfatos em mEq/100g de solo (0,2ppm)	0,0006	Baixa agressividade	960 Tomashov	0,1 a 1
pH Região não passiva	5,1	Baixa agressividade	Pourbaix	5 a 7
pH em extrator KCl pH<4 (2H+ + 2é --> H2)	4,6	pH>4 (2 H2O + 2é --> H2 + 2 OH-)		
desvio da saturação em % (capacid. Ret. Agua	46,66667	((%sat-cretagua)/%sat)*100	limitrofe	30 a 50
tx de stratful pH	90	um/ano corrosivo	Stratful	25 a 100
Indice de Trabaneli	-1	Medianamente corrosivo	Trabaneli	(-1 a -8)
acidez total e resistividade	0,6	Baixa agressividade	5,712 Girard	10 a 100
Aluminio em ppm	65	Medianamente corrosi	270 Embrapa(pH	10 a 100
bicarbonatos em mEq/100gsolo (78ppm)	0,32		610	
Categoria de corrosividade (tabela abaixo)	3			
resistividade média em Ohm.m (teste campo)	180			

micrometro/ano

1	<10	Proteção quase permanente (norma iso - 15589-1)
2	10-100	Pouco agressivo
3	100-200	Medianamente Agressivo (8mm em 40 anos ou 30 anos comerciais)
4	>200	Agressivo

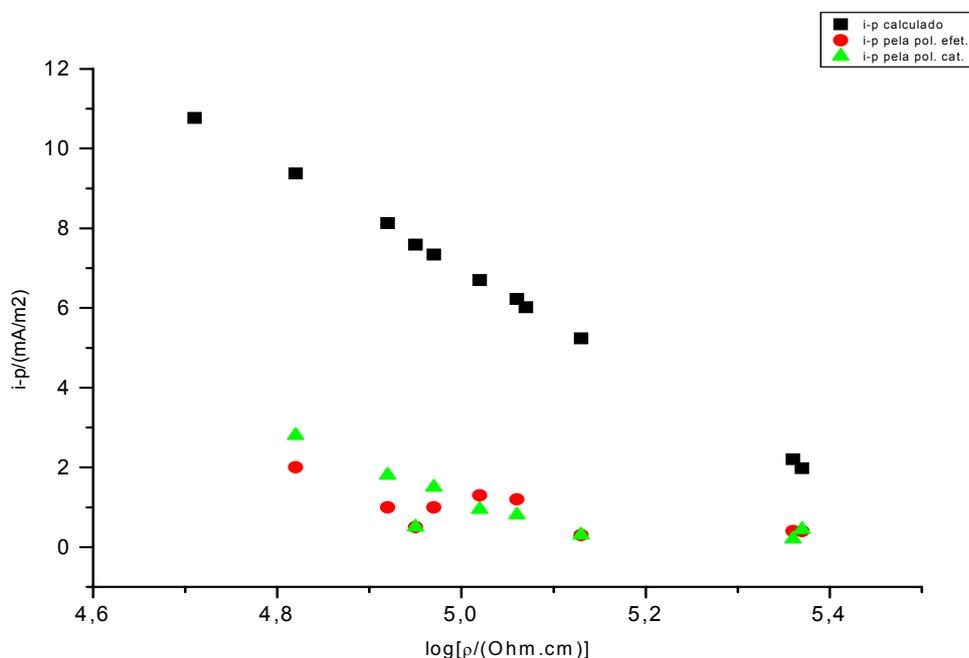
### 3.1.3 – Comparação entre as correntes obtidas pela resistividade do solo e pelas curvas potenciodinâmicas:

Na figura 9 é nítida a diferença entre os valores da densidade de corrente de proteção referente aos trechos: novo e antigo da LT 138kV Guarapuava – Vila Carli. O trecho novo (estruturas recém instaladas) apresenta valores de densidades de corrente de proteção próximos de  $1\text{mA/m}^2$  e com formato constante, já o trecho antigo (estruturas com 18 anos de operação) mostra valores de até  $13\text{mA/m}^2$ .



**Figura 9 – Densidade de corrente necessária para proteção das 4 grelhas de cada torre para LT 138kV Guarapuava-Vila Carli.**

Deve ser salientado que o método tradicional de cálculo do sistema de proteção catódica, determina a resistividade do meio com inclinação 13,35, conforme mostram as retas simbolizadas por quadrados na figura 10.



**Figura 10 – Densidade de corrente necessária para proteção de torre em função da resistividade para o trecho novo.**

A densidade de corrente de proteção obtida pela polarização catódica é sempre menor do que aquela calculada, baseando-se apenas na resistividade do solo. Essa diferença aumenta quando se tem baixa resistividade, sendo que para alta resistividade as densidades de correntes de proteção se aproximam. Assim pode-se concluir que os valores parecem indicar que a densidade de corrente de proteção (obtida a partir da resistividade) está super dimensionada e aumenta ainda mais quando o meio é bastante agressivo.

### 3.2 – OBTENÇÃO DA TAXA DE CORROSÃO ATRAVÉS DAS CURVAS DE POLARIZAÇÃO REALIZADAS EM CAMPO:

As duas principais reações que caracterizam a corrosão de grelhas em solos é a dissolução anódica do aço e a redução catódica do oxigênio. Portanto a corrosão pode estar relacionada com a polarização anódica, catódica e com a resistência do solo.

A resistência do solo é desprezível, quando se usa a técnica do decaimento de 100mV, pois se obtém a curva de polarização catódica, no instante da interrupção da corrente circulante no circuito.

Para grelhas de torres em condições de circuito aberto, a corrente de corrosão é determinada pela resistência de polarização, pois neste caso, tanto a reação anódica quanto a reação catódica podem estar cineticamente sob controle ativado. Para um potencial aplicado muito próximo do potencial de corrosão, a razão “sobrepotencial/inclinação tipo Tafel” é muito pequena e pode seguir uma série convergente. A resolver esta série convergente, parte-se do princípio que a corrente aplicada é dada pela diferença entre a corrente catódica e anódica. Em geral os valores da inclinação de Tafel catódica ( $\beta_{\text{off}}$ ) variam de 30 mV/dec a 180 mV/dec e os valores da inclinação de Tafel anódica ( $\beta_a$ ) varia de 60 mV/dec a 120)mV/dec. Quando o sistema está controlado pela corrente limite da difusão do oxigênio, o ( $\beta_{\text{off}}$ ) tende ao infinito. Para este sistema o erro seria de no máximo 35%, ao determinar-se a corrente de corrosão pela resistência de polarização.

Para grelhas de torres com sistema de proteção catódica em funcionamento, a corrente de corrosão é determinada pela teoria dos potenciais mistos.

A redução catódica do oxigênio inicia-se por um processo ativacional, onde a velocidade da reação catódica ainda não atingiu as condições de corrente limite da

redução do oxigênio e termina sob um controle por transporte de massa, quando a corrente necessária para o deslocamento dos 100mV ( $I_p$ ), apresenta valores próximo da corrente limite ( $I_L$ ) para a redução do oxigênio. Portanto o sobrepotencial envolvido na reação catódica pode ser representado pela soma do sobrepotencial ativacional ( $\eta_A$ ) e do sobrepotencial da transferência de massa ( $\eta_m$ ).

Quando a cinética da reação catódica está sob controle por transferência de massa, isto é, a velocidade da reação catódica já atingiu as condições de corrente limite da redução do oxigênio, a corrente de corrosão ( $I_{corrPC}$ ) em condições de circuito fechado com a circulação da “ $I_p$ ” por um sistema de proteção catódica, pode ser determinada. Neste caso é necessário a prévia determinação da corrente limite ( $I_L$ ).

Para a determinação da corrente de proteção “ $I_p$ ” é necessário fazer as considerações a seguir:

- A  $I_p$  é dada pela diferença entre as reações anódicas e catódicas.
- Como a corrente limite é praticamente constante e similar a corrente de corrosão, a relação entre a “ $I_p$ ” e o deslocamento de potenciais ( $\eta$ ) é definido pela reação anódica. Para a determinação da “ $I_L$ ” deve-se assumir um valor para a inclinação de Tafel da reação anódica ( $\beta_a$ ). Para o caso do presente trabalho, usou-se o valor de 60mV/dec para “ $\beta_a$ ” e o valor de 100mV para “ $\eta$ ”.
- A densidade da corrente de troca da reação anódica é muito menor que a densidade de corrente de corrosão (aproximadamente  $100 \mu A/cm^2$ ) e a contribuição da cinética sob controle ativacional, na reação anódica durante a polarização catódica tem uma contribuição bastante acentuada (o deslocamento de 100mV é facilmente obtido com pequena  $I_p$ ).

- De posse da  $I_L$ , determina-se o “ $\eta_m$ ” e o sobrepotencial da reação catódica sob controle ativacional “ $\eta_A$ ” é obtido pela diferença do “ $\eta$ ” com o “ $\eta_m$ ”.

Para estabelecer a relação entre  $I_{corrPC}$ ,  $\eta$  e  $I_p$ , é necessário fazer a seguinte consideração:

- Na determinação da “ $I_{corrPC}$ ”, usa-se o “ $\eta_A$ ”, o “ $\beta_{off}$ ” e a  $I_p$  previamente determinados. Para isso, deve-se assumir 100mV para “ $\eta$ ”, obter o “ $\beta_{off}$ ” quando a reação anódica é, no máximo, igual a 1% da reação catódica e obter “ $I_p$ ” a partir do “ $\beta_{off}$ ”.

Quando a cinética da reação catódica está sob controle ativado, isto é, a velocidade da reação catódica ainda não atingiu as condições de corrente limite da redução do oxigênio, a corrente de corrosão em condições de circuito aberto ( $I_{corr}$ ) pode ser determinada, a partir do decaimento de 100mV mais catódico que o potencial de corrosão ( $\eta$ ), juntamente com a corrente aplicada ( $I_p$ ) para deslocar o potencial de 100mV. Para isso, deve-se assumir 100mV para “ $\eta$ ”, obter o “ $\beta_{off}$ ” quando a reação anódica é, no máximo, igual a 1% da reação catódica e obter “ $I_p$ ” a partir do “ $\beta_{off}$ ”.

Para estabelecer a relação entre  $I_{corr}$ ,  $\eta$  e  $I_p$ , são necessárias as seguintes considerações:

- A  $I_p$  é dada pela diferença entre as reações anódicas e catódicas;
- Com o decaimento do potencial a 100mV mais catódico que o potencial de corrosão, a reação anódica se torna desprezível com relação à reação catódica;
- A densidade da corrente de troca da reação catódica (aproximadamente  $0,1\mu A/cm^2$ ) é muito menor que a densidade de corrente de corrosão (aproximadamente  $100\mu A/cm^2$ ) e a contribuição da cinética sob controle

ativacional, na reação catódica durante a polarização catódica tem uma contribuição bastante acentuada (o deslocamento de 100mV é facilmente obtido com pequena  $I_p$ ).

Dessa forma, a expectativa do prolongamento da vida útil da estrutura enterrada pode ser estimada pela comparação das correntes de corrosão previamente determinadas ( $I_{corr}$  e  $I_{corrPC}$ ).

A redução da porcentagem de corrosão tendendo a zero, pode ser estimada, usando valores de  $I_p$  e “ $\eta$ ” apropriados.

### 3.3 – ESTUDO DE CASO

Neste item serão apresentados os resultados e discussões experimentais da Linha de Transmissão de 500 kV de Chacon – Ezeiza, situada em Buenos Aires, Argentina.

Inicialmente, foi obtido o valor do potencial de corrosão e em seguida obter duas curvas de polarização; uma em condições de circuito fechado “ $E_{on}$ ” e outra em condições de circuito aberto “ $E_{off}$ ”.

Para obter a resistência de polarização, deve-se trabalhar somente com a curva de potenciais “off”, neste caso deve-se fazer uma extrapolação sigmoidal e preencher os resultados faltantes próximos ao potencial de corrosão. Com esses dados, pode-se fazer uma representação de potencial ( $E_{off}$ ) com o logaritmo da corrente (Log I). Neste gráfico, pode-se obter os valores para plotar potencial ( $E_{off}$ ) em função da corrente (I) e calcular a resistência de polarização ( $R_p$ ).

Com a resistência de polarização e utilizando-se o valor da constante de Stern & Geary, obtém-se a corrente de corrosão sem injeção de corrente. A partir da corrente de corrosão e dispondo-se da área da estrutura enterrada pode-se obter a densidade de

corrente de corrosão e sabendo-se da densidade do material pode-se saber a taxa de corrosão em  $\mu\text{m}/\text{ano}$ , a qual pode ser convertida em  $\text{mpy}/\text{ano}$ , em  $\text{mdd}$  ou em  $\mu\text{m}/\text{ano}$ .

A partir de figuras similares à figura 13, página 48, referente aos potenciais “on” e “off”, obteve-se a corrente de proteção média. A partir desta corrente e a partir da resistência de polarização ( $R_p$ ), obteve-se a corrente de corrosão no potencial de proteção ( $-850\text{mV}$  para o aço) ou corrosão em condições de circuito fechado.

Para obtenção da corrente em condições de circuito fechado, supôs-se sobrepotencial da reação anódica de  $100\text{ mV}$ , inclinação de Tafel anódica de  $60\text{ mV}/\text{dec}$ ,  $\eta_{\text{off}}$  de  $100\text{ mV}$  e  $\beta_{\text{off}}$  de  $60\text{ mV}/\text{dec}$ .

Dispondo-se da corrente de corrosão em condições de circuito fechado e, sabendo-se da área enterrada, obteve-se a densidade de corrente em condições de circuito fechado e sabendo-se da densidade do material tem-se a taxa de corrosão em  $\mu\text{m}/\text{ano}$ , a qual pode ser convertida em  $\text{mpy}/\text{ano}$ , em  $\text{mdd}$  ou em  $\mu\text{m}/\text{ano}$ .

Ao comparar as duas taxas de corrosão pode-se concluir sobre a quantificação da corrosão sem a necessidade de escavações.

Para se concluir sobre a intensidade corrosiva de uma torre, pode-se comparar os potenciais de corrosão medidos com valores prévios.

### **3.3.1 – Torre 7 da LT de 500 kV de CHACON-EZEIZA (SE HENDERSON)**

O experimento foi instalado e realizado em 11/09/2002. O local foi o trecho da Linha de Transmissão de 500 kV de Chacon – Ezeiza,, na torre de nº 7, próximo à Subestação de Henderson, em Buenos Aires, Argentina. Os procedimentos de medição seguiram o roteiro da metodologia, conforme descrito no Capítulo 2.

Para o estudo da Linha de Transmissão Chacon Ezeiza o boletim de corrosividade do solo tem as características, conforme descrito na tabela 4.

**Tabela 4 – Boletim de Corrosividade do Solo – LT Chacon – Ezeiza (SE Henderson)**

## BOLETIN DE CORROSIVIDADE DE SOLOS

TORRE 7 LT Chocon-Ezeiza (Henderson - Argentina) 11/09/2002

TESTES DE LABORATÓRIO: SOLO MEDIANAMENTE (TAXA 100 A 200 um/ano)

	valores	classificação	critério	valor referencia
Humidade natural do solo (% água)			Booth	15 a 20
capacidade de retenção de água (% água)	35	elevada	Booth	15 a 20
Resistividade na retenção de água em Ohm.m	250	Ligeiramente corrosivo	pc por limpre	100 a 1000
Resistividade mínima	88	Solo de baixa resistividade		10a100um/ano
resistividade média em Ohm.m	170	Ligeiramente corrosivo	pc por limpre	100 a 1000
Potencial redox em mV	350	Média proba. De bactéria	Stark/Wigth	100 a 400
(% água na resist. mínima)	53	elevada	Booth	15 a 20
Cloreto em mEq/100g de solo (90ppm)	0,64	Agressivo	Trab.Modif	0,03 a 0,1
Sulfatos em mEq/100g de solo n.d	n.d.	Baixa agressividade	Tomashov	0,1 a 1
pH Região não passiva	4,6	Corrosivo	Pourbaix	5 a 7
pH em extrator KCl pH<4 (2H+ + 2é -> H2)	4,1	pH>4 (2 H2O + 2é -> H2 + 2 OH-)		
desvio da saturação em % (capacid. Ret. Agua	33,96226	((%sat-cretagua)/%sat)*100	limitrofe	30 a 50
tx de stratful pH	150	um/ano corrosivo	Stratful	25 a 100
Índice de Trabaneli	-2	Medianamente corrosivo	Trabaneli	(-1 a -8)
acidez total e resistividade	2,6	Medianamente corrosi	38,1 Girard	10 a 100
Alumínio em ppm	280	Agressivo	Embrapa(pH)	10 a 100
bicarbonatos em mEq/100gsolo (22ppm)	0,09			>200um/ano
Categoria de corrosividade (tabela abaixo)	3			
resistividade média em Ohm.m (teste campo)				

micrometro/ano

1	<10	Proteção quase permanente (norma iso - 15589-1)
2	10-100	Pouco agressivo
3	100-200	Medianamente Agressivo (8mm em 40 anos ou 30 anos comerciais)
4	>200	Agressivo

Para construir a curva de polarização em condições de circuito fechado e aberto, utilizou-se a tabela 5 de potenciais e correntes obtidas em campo. A partir destes resultados, construiu-se a figura 11.

Tabela 5 – Potenciais e correntes obtidos em campo

TORRE 07 LT 500 KV CHOCON-EZEIZA (SE HENDERSON)		
Potencial de Corrosão $E_{corr} = -677,0$ mV		
I (mA)	$E_{on}$ (mV)	$E_{off}$ (mV)
0,0	-677,0	-677,0
1,4	-680,0	
2,0	-681,0	
3,0	-688,0	
4,0	-694,0	
5,0	-700,0	-681,0
12,0	-743,0	-692,0
27,0	-853,0	-730,0
42,0	-945,0	-768,0

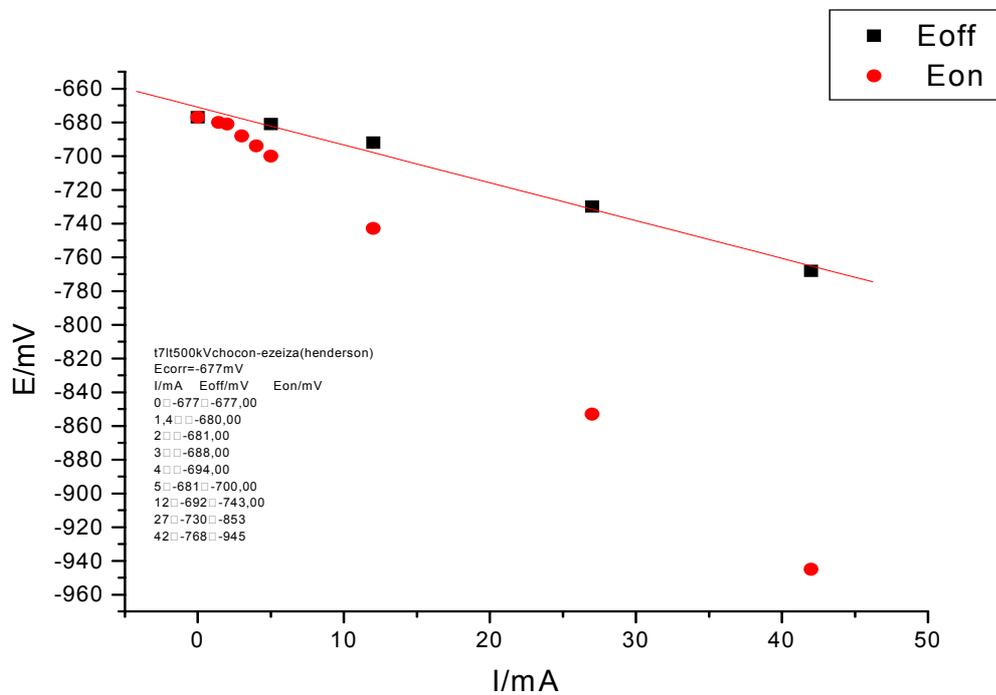
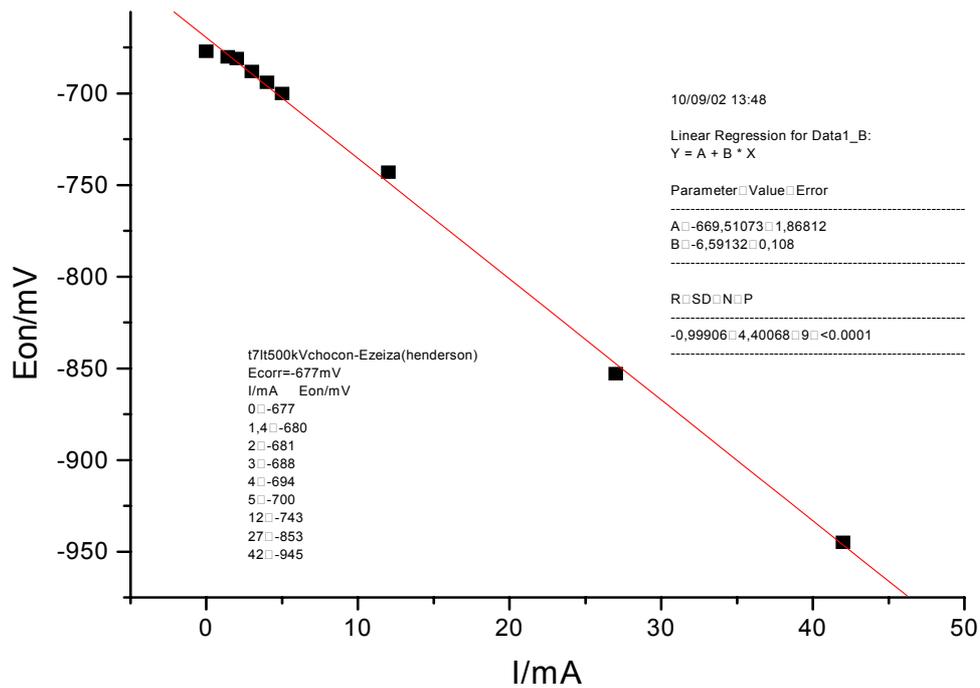


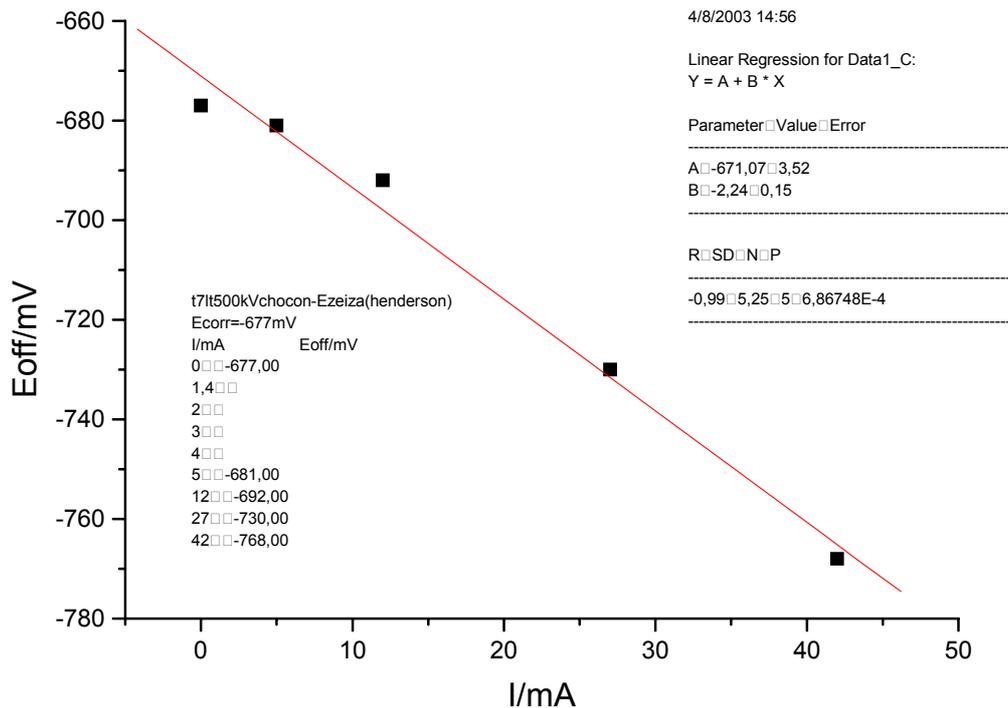
Figura 11 – Curvas de polarização obtidas em campo

A partir da figura 11, pode-se separar as duas curvas com o objetivo de calcular a corrente de proteção ( $I_p$ ) nas condições de circuito fechado e a ( $I_p$ ) em condições de circuito aberto, conforme demonstram as figuras 12 e 13.



**Figura 12 – Curva de polarização em condições de circuito fechado**

A partir da figura 12 é perfeitamente possível obter a  $I_p$  através da extrapolação da curva até o potencial de  $-850\text{mV}$  em relação ao eletrodo de cobre/sulfato de cobre saturado.



**Figura 13 – Curva de polarização em condições de circuito aberto**

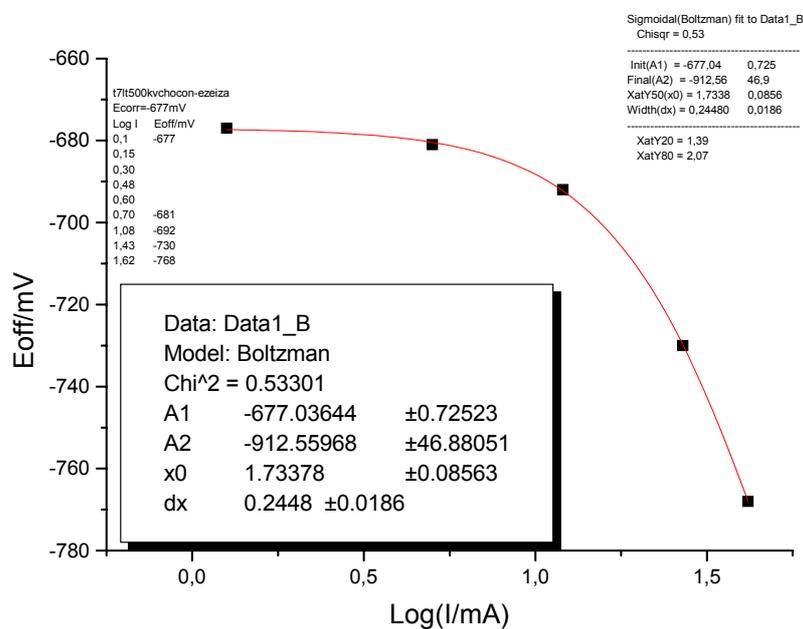
Como pode ser observado na figura 13, a  $I_p$  é obtida a partir da extrapolação da curva  $E_{off}$  em relação a corrente, quando a variação de potencial está a 100mV mais negativo que o potencial de corrosão. Para a torre 7 da LT 500kV Chocon-Ezeiza, o potencial de corrosão era de -680mV (em relação ao eletrodo de cobre/sulfato de cobre saturado). Portanto o potencial a ser atingido era de -780mV. Nesse potencial a corrente encontrada foi de 45mA.

A partir dos valores de potenciais e correntes da figura 13, obtiveram-se os valores do logaritmo da corrente (Log I), conforme demonstrado na tabela 6 a seguir.

**Tabela 6 – Potencial ( $E_{\text{off}}$ ) com o logaritmo da corrente (Log I)**

TORRE 07 LT 500 KV CHOCON-EZEIZA (SE HENDERSON)				
Potencial de Corrosão $E_{\text{corr}} = -677,0$ mV				
I (mA)	$E_{\text{on}}$ (mV)	$E_{\text{off}}$ (mV)	Log I (mA)	$E_{\text{off}}$ (mV)
0,0	-677,0	-677,0	0,10	-677,0
1,4	-680,0		0,15	
2,0	-681,0		0,30	
3,0	-668,0		0,48	
4,0	-694,0		0,60	
5,0	-700,0	-681,0	0,70	-681,0
12,0	-743,0	-692,0	1,08	-692,0
27,0	-853,0	-730,0	1,43	-730,0
42,0	-945,0	-768,0	1,62	-768,0

A partir da Tabela 6, construiu-se a figura 14.



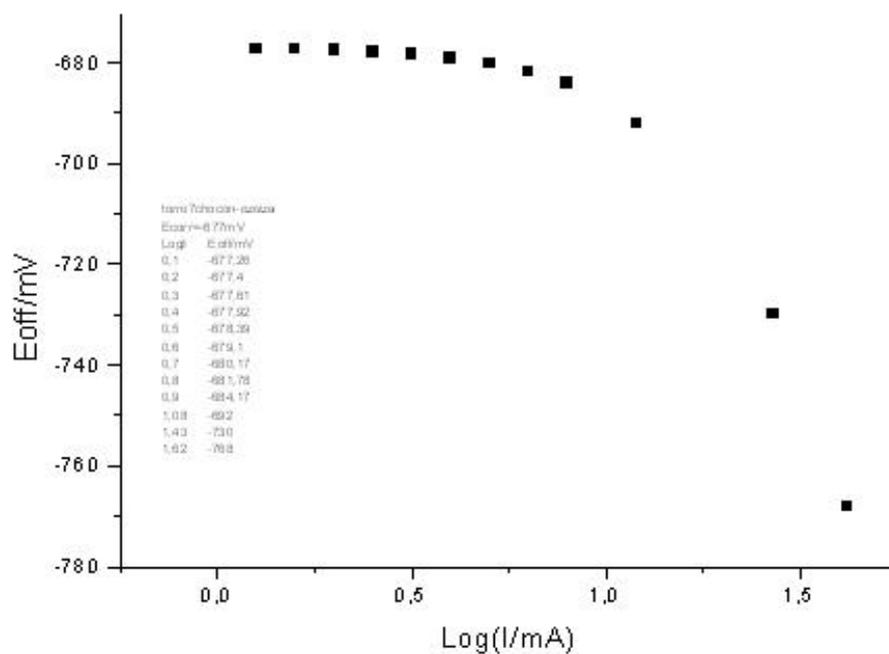
**Figura 14 – Tafel catódica da corrosão da haste de âncora da torre 7 da LT 500kV Chocon-Ezeiza (SE Henderson)**

A partir da figura 14, obteve-se a equação da curva sigmoidal e a partir desta equação, obteve-se a interpolação de vários pontos, localizados na região de condições estacionárias do sistema, conforme mostra a Tabela 7, a seguir.

Tabela 7 – Resultados de potenciais e correntes obtidos a partir de interpolação

Potencial de Corrosão $E_{corr} = -677,0$ mV												
I (mA)	Eon (mV)	Eoff (mV)	Log I (mA)	Eoff (mV)	Log I (mA)	A1	A2	x0	dx	Eoff (mV)	Log I (mA)	Eoff (mV)
0,0	-677,0	-677,0	0,1	-677,0								
1,4	-680,0		0,2		0,1	-677,0	-912,0	1,73	0,24	-677,26	0,1	-677,26
2,0	-681,0		0,3		0,2	-677,0	-912,0	1,73	0,24	-677,40	0,2	-677,40
3,0	-668,0		0,5		0,3	-677,0	-912,0	1,73	0,24	-677,61	0,3	-677,61
4,0	-694,0		0,6		0,4	-677,0	-912,0	1,73	0,24	-677,92	0,4	-677,92
5,0	-700,0	-681,0	0,7	-681,0	0,5	-677,0	-912,0	1,73	0,24	-678,39	0,5	-678,39
12,0	-743,0	-692,0	1,1	-692,0	0,6	-677,0	-912,0	1,73	0,24	-679,10	0,6	-679,10
27,0	-853,0	-730,0	1,4	-730,0	0,7	-677,0	-912,0	1,73	0,24	-680,17	0,7	-680,17
42,0	-945,0	-768,0	1,6	-768,0	0,8	-677,0	-912,0	1,73	0,24	-681,78	0,8	-681,78
					0,9	-677,0	-912,0	1,73	0,24	-684,17	0,9	-684,17
											1,08	-692,00
											1,43	-730,00
											1,62	-768,00

A partir da Tabela 7, obteve-se a figura 15

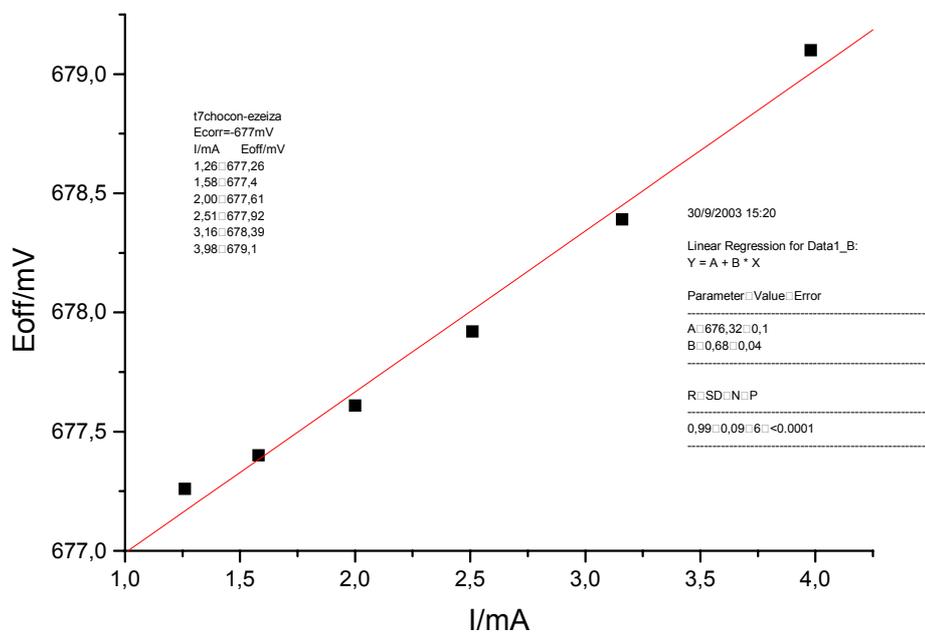


**Figura 15 – Tafel catódica com a devida interpolação referente a corrosão da haste de âncora da torre 7 da LT 500kV Chocon-Ezeiza (SE Henderson)**

Tabela 8 – Obtenção de valores de corrente e potencial a partir dos resultados de potenciais em relação ao Log I

Potencial de Corrosão $E_{\text{corr}} = -677,0 \text{ mV}$															
I (mA)	Eon (mV)	Eoff (mV)	Log I (mA)	Eoff (mV)	Log I (mA)	A1	A2	x0	dx	Eoff (mV)	Log I (mA)	Eoff (mV)	Log I (mA)	I (mA)	Eoff (mV)
0,0	-677,0	-677,0	0,1	-677,0											
1,4	-680,0		0,2		0,1	-677,0	-912,0	1,73	0,24	-677,26	0,1	-677,26	0,1	1,26	-677,26
2,0	-681,0		0,3		0,2	-677,0	-912,0	1,73	0,24	-677,40	0,2	-677,40	0,2	1,58	-677,40
3,0	-668,0		0,5		0,3	-677,0	-912,0	1,73	0,24	-677,61	0,3	-677,61	0,3	2,00	-677,61
4,0	-694,0		0,6		0,4	-677,0	-912,0	1,73	0,24	-677,92	0,4	-677,92	0,4	2,51	-677,92
5,0	-700,0	-681,0	0,7	-681,0	0,5	-677,0	-912,0	1,73	0,24	-678,39	0,5	-678,39	0,5	3,16	-678,39
12,0	-743,0	-692,0	1,1	-692,0	0,6	-677,0	-912,0	1,73	0,24	-679,10	0,6	-679,10	0,6	3,96	-679,10
27,0	-853,0	-730,0	1,4	-730,0	0,7	-677,0	-912,0	1,73	0,24	-680,17	0,7	-680,17	0,7	5,01	-680,17
42,0	-945,0	-768,0	1,6	-768,0	0,8	-677,0	-912,0	1,73	0,24	-681,78	0,8	-681,78	0,8	6,31	-681,78
					0,9	-677,0	-912,0	1,73	0,24	-684,17	0,9	-684,17	0,9	7,94	-684,17
											1,08	-692,00			
											1,43	-730,00			
											1,62	-768,00			

A partir da Tabela 8 construiu-se a figura 16, a qual mostra a curva referente à resistência de polarização linear.



**Figura 16 – Resistência de polarização linear obtida a partir de resultados interpolados.**

A partir da figura 16 obteve-se a resistência de polarização, a qual apresentou um valor de 0,68 mV/mA.

A partir da resistência de polarização e utilizando o coeficiente de Stern Geary de 26mV/dec, determinou-se um valor de 30mA para a intensidade da corrente de corrosão. Sabendo-se que a área lateral da haste de âncora era de 3000 cm<sup>2</sup>, determinou-se a densidade de corrente e o seu valor foi de 10μA/cm<sup>2</sup>. Uma densidade de corrente de corrosão do zinco ou ferro em torno de 1μA/cm<sup>2</sup> equivale a 15μm/ano (usando para o cálculo, uma capacidade de desgaste próximo de 10Kg/A.ano e uma densidade próxima

de  $7\text{g/cm}^3$ ). Utilizando os valores recém determinados, obtém-se próximo de  $150\mu\text{m/ano}$  como taxa de corrosão da haste da torre 7 da LT 500kV Chocon-Ezeiza. Esta taxa de corrosão foi calculada para uma estrutura enterrada sem o recebimento da proteção catódica. A partir de uma região catódica distante da região de potenciais estacionários (pelo menos  $100\text{mV}$  mais catódico que o potencial de corrosão) e com os pontos obtidos pela interpolação existente na figura 15 obteve-se a tabela 9, conforme segue:

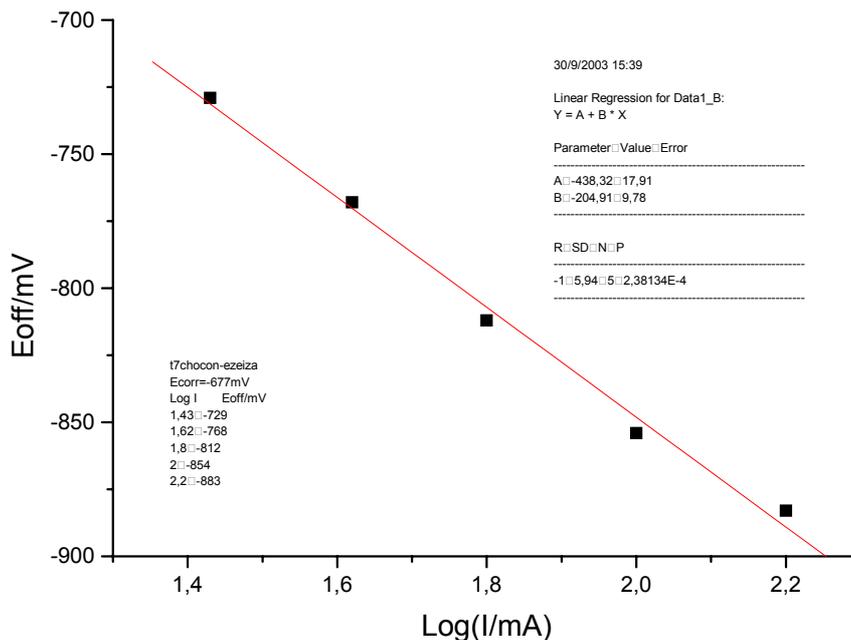
**Tabela 9 – Obtenção de valores de corrente e potenciais a partir dos resultados de potenciais em relação ao Log I para a região catódica distante da região de potenciais estacionários**

Potencial de Corrosão $E_{corr} = -677,0$ mV															
I (mA)	Eon (mV)	Eoff (mV)	Log I (mA)	Eoff (mV)	Log I (mA)	A1	A2	x0	dx	Eoff (mV)	Log I (mA)	Eoff (mV)	Log I (mA)	I (mA)	Eoff (mV)
0,0	-677,0	-677,0	0,1	-677,0											
1,4	-680,0		0,2		0,1	-677,0	-912,0	1,73	0,24	-677,26	0,1	-677,26	0,1	1,26	-677,26
2,0	-681,0		0,3		0,2	-677,0	-912,0	1,73	0,24	-677,40	0,2	-677,40	0,2	1,58	-677,40
3,0	-668,0		0,5		0,3	-677,0	-912,0	1,73	0,24	-677,61	0,3	-677,61	0,3	2,00	-677,61
4,0	-694,0		0,6		0,4	-677,0	-912,0	1,73	0,24	-677,92	0,4	-677,92	0,4	2,51	-677,92
5,0	-700,0	-681,0	0,7	-681,0	0,5	-677,0	-912,0	1,73	0,24	-678,39	0,5	-678,39	0,5	3,16	-678,39
12,0	-743,0	-692,0	1,1	-692,0	0,6	-677,0	-912,0	1,73	0,24	-679,10	0,6	-679,10	0,6	3,96	-679,10
27,0	-853,0	-730,0	1,4	-730,0	0,7	-677,0	-912,0	1,73	0,24	-680,17	0,7	-680,17	0,7	5,01	-680,17
42,0	-945,0	-768,0	1,6	-768,0	0,8	-677,0	-912,0	1,73	0,24	-681,78	0,8	-681,78	0,8	6,31	-681,78
					0,9	-677,0	-912,0	1,73	0,24	-684,17	0,9	-684,17	0,9	7,94	-684,17
											1,08	-692,00			
											1,43	-730,00			
											1,62	-768,00			
Log I (mA)	A1	A2	x0	dx	Eoff (mV)	Log I (mA)	Eoff (mV)								
1,08	-677,0	-912,0	1,73	0,24	-691,68	1,08	-692,00								
1,43	-677,0	-912,0	1,73	0,24	-729,33	1,43	-729,00								
1,62	-677,0	-912,0	1,73	0,24	-768,03	1,62	-768,00								
1,80	-677,0	-912,0	1,73	0,24	-811,51	1,80	-812,00								
2,00	-677,0	-912,0	1,73	0,24	-854,41	2,00	-854,00								
2,20	-677,0	-912,0	1,73	0,24	-882,94	2,20	-883,00								
2,40	-677,0	-912,0	1,73	0,24	-898,42	2,40	-898,00								

A partir da tabela 9 construiu-se a figura 17, a qual mostra a região de onde foi calculado a inclinação  $\beta_{\text{off}}$ .

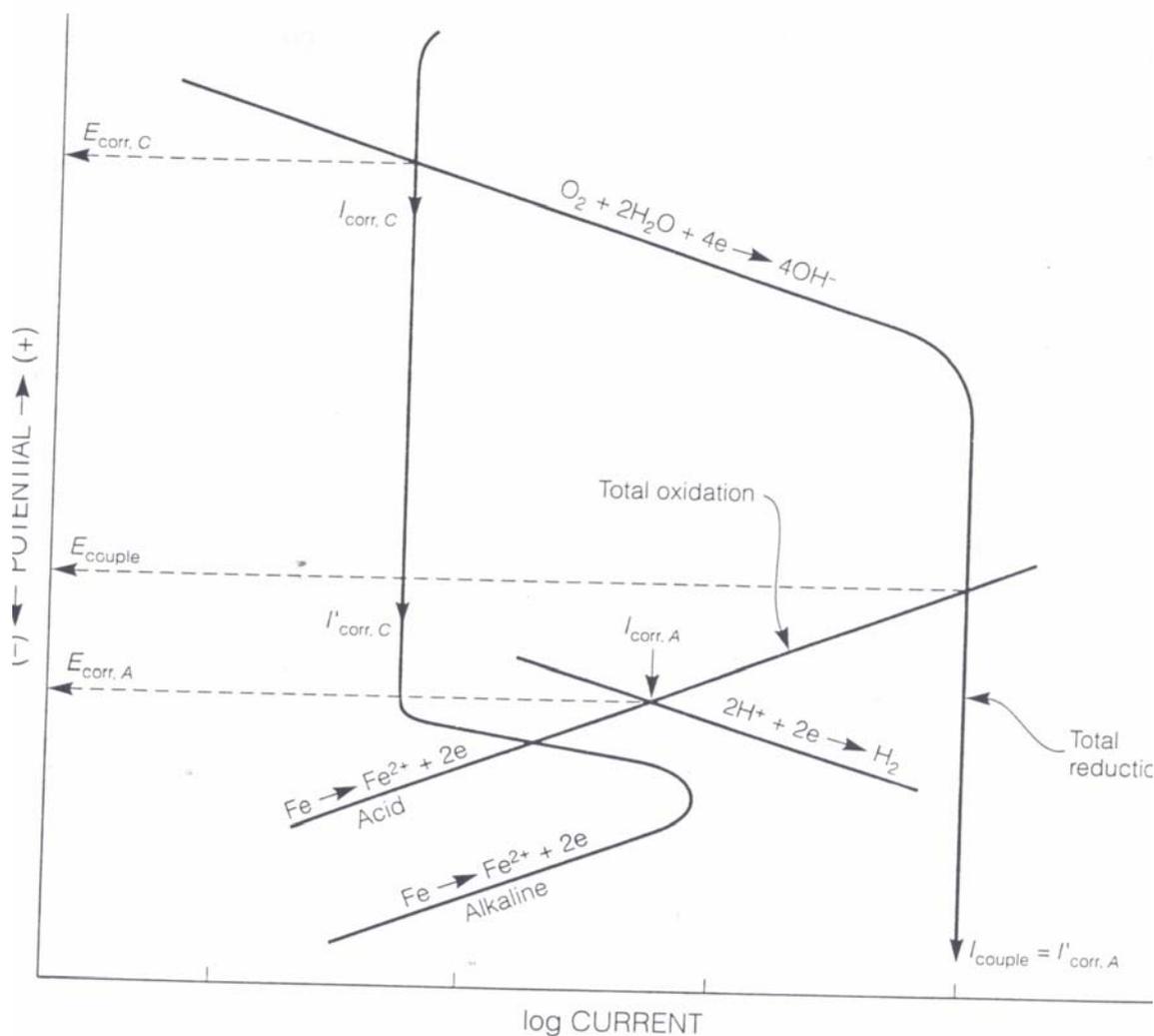
A partir da figura 19, determinou-se um valor de  $-205\text{mV/dec}$  para o  $\beta_{\text{off}}$ . O  $\beta_{\text{off}}$  é o somatório do  $\beta_{\text{H}_2}$  com o  $\beta_{\text{O}_2}$ . Também é sabido da proporcionalidade existente entre o  $\beta_{\text{H}_2}$  e o  $\beta_{\text{O}_2}$ , conforme segue:

$\beta_{\text{H}_2}/\beta_{\text{O}_2} = 2$  ou  $\beta_{\text{H}_2} = 2 \beta_{\text{O}_2}$ . Ao aplicar as idéias acima mencionada para o caso em estudo, obtém-se o valor de  $67\text{mV/dec}$  para o  $\beta_{\text{O}_2}$  e o valor de  $133\text{mV/dec}$  para o  $\beta_{\text{H}_2}$ .



**Figura 17 – Inclinação tipo Tafel obtida a partir de resultados interpolados.**

A figura 18 mostra um modelo gráfico das reações que estão ocorrendo no pé da torre.



**Figura 18 – Literatura do gráfico: JONES D.A. - Principles and prevention of corrosion - Department of Chemical and Metallurgical Engineering University of Nevada - RENO - Prentice Hall - UPPER - SADDLE RIVER - N.J.**

A partir da figura 16, obteve-se a  $R_p$  de 0,68mV/mA. Usando os devidos valores de  $\beta_{\text{off}}$ , estipulados pelo coeficiente de Stern Geary, obteve-se a corrente de corrosão quando a estrutura enterrada não está protegida, conforme mostra a tabela 10.

De acordo com MAREK (1992) o sobrepotencial anódico ( $\eta_a$ ) do aço é próximo de 170mV. A inclinação de Tafel anódica ( $\beta_a$ ) típica de um aço que contém óxidos durante

a sua corrosão é  $\beta_a = 60\text{mV/dec}$ . A corrente de proteção de  $45\text{mA}$  foi determinado pela figura 15. Ao usar estes parâmetros, obteve-se a corrente de corrosão quando a estrutura enterrada está sendo protegida por uma proteção catódica, cujo potencial de proteção de  $-850\text{mV}$  estabelecido por um dos critérios da NACE RP0169/92 (vide tabela 10).

**Tabela 10 – Parâmetros eletroquímicos desenvolvidos para obter a corrente de corrosão com e sem injeção de corrente**

PARÂMETROS ELETROQUÍMICOS DA $I_{\text{corr}}$ , COM E SEM INJEÇÃO DE CORRENTE												
$\eta_a$ (mv)	$\beta_a$ (mV/dec)	$e^{-2,3\eta_a/\beta_a}$	$1 - e^{-2,3\eta_a/\beta_a}$	$i_p$ (mA)	$\beta_{\text{off}}$ (mV/dec)	$i_c$ (mA)	$\eta_m$ (mv)	$\eta_A$ (mv)	$\beta_{\text{off}}$ (mV/dec)	$e^{-2,3\eta_A/\beta_{\text{off}}}$	$I_{\text{corrPC}}$ (mA)	
10,00	120,00	0,83	0,17	80,00	10,00	458,67	-1,25	8,75	120,00	1,18	67,65	
25,00	120,00	0,62	0,38	80,00	25,00	210,14	-3,12	21,88	120,00	1,52	52,60	
50,00	120,00	0,38	0,62	80,00	50,00	129,77	-6,24	43,76	120,00	2,31	34,58	
75,00	120,00	0,24	0,76	80,00	75,00	104,92	-9,36	65,64	120,00	3,52	22,74	
100,00	60,00	0,02	0,98	80,00	100,00	81,77	-24,97	75,03	60,00	17,74	4,51	
<b>170,00</b>	<b>60,00</b>	<b>0,00</b>	<b>1,00</b>	<b>45,00</b>	<b>100,00</b>	<b>45,07</b>	<b>-42,46</b>	<b>57,55</b>	<b>67,00</b>	<b>7,21</b>	<b>6,24</b>	
100,00	30,00	0,00	1,00	250,00	100,00	250,12	-49,94	50,06	60,00	6,81	36,70	
125,00	120,00	0,09	0,91	80,00	125,00	88,02	-15,61	109,39	120,00	8,14	9,83	
150,00	120,00	0,06	0,94	80,00	150,00	84,78	-18,73	131,27	120,00	12,38	6,46	
175,00	120,00	0,03	0,97	80,00	175,00	82,90	-21,85	153,15	120,00	18,83	4,25	
200,00	120,00	0,02	0,98	80,00	200,00	81,77	-24,97	175,03	120,00	28,64	2,79	

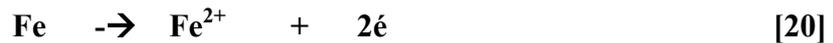
PARÂMETROS ELETROQUÍMICOS DA $I_{\text{corr}}$ , COM E SEM INJEÇÃO DE CORRENTE								
$R_p$ (mV/mA)	$\beta_a$ (mV/dec)	$\beta_{\text{off}}$ (mV/dec)	$\beta_a * \beta_{\text{off}}$	$\beta_a + \beta_{\text{off}}$	$k_1$	$k_2$	$k_m$	$I_{\text{corr}}$ (mA)
0,68	60,00	200,00	12000,00	260,00	20,07	20,07	20,07	29,51

Ao analisar as correntes de corrosão, ora obtida com a torre protegida, ora obtida com a torre sem proteção, observa-se que a proteção catódica não elimina o processo corrosivo, mas diminui bastante a intensidade da corrosão. A proteção catódica faz com que a intensidade da corrosão seja diminuída próximo de 80% em relação ao que estava sendo corroído. A proteção catódica diminui a taxa de corrosão de  $150\mu\text{m/ano}$ , para  $30\mu\text{m/ano}$ .

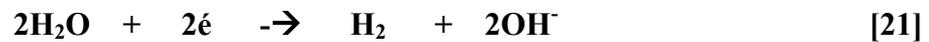
### 3.3.2 – Comprovação teórica da metodologia desenvolvida

A figura 18 mostra as curvas de polarização referente a corrosão de uma estrutura de aço enterrada.

A curva de oxidação do ferro pode ser esquematizada pela seguinte reação:



A curva de redução catódica do hidrogênio pode ser esquematizada pela seguinte reação:



A curva de redução catódica do oxigênio pode ser esquematizada pela seguinte reação:



A equação envolvendo a corrente teórica relacionada com a oxidação anódica do ferro, pode ser descrita como segue:

$$I_a = I_a^0 \cdot e^{-2,3 \eta_a / \beta_a} \quad [23]$$

Onde o primeiro termo refere-se a corrente anódica devido a oxidação do ferro, o segundo termo refere-se a densidade de corrente de troca envolvendo o eletrodo reversível do ferro e o terceiro termo refere-se ao efeito de polarização anódica provocado pela reação de oxidação do ferro.

A equação envolvendo a corrente teórica relacionada com a redução catódica do hidrogênio, pode ser descrita como segue:

$$I_c^{\text{H}_2} = I_c^{0, \text{H}_2} \cdot e^{2,3 \eta_{\text{H}_2} / \beta_{\text{H}_2}} \quad [24]$$

onde o primeiro termo refere-se a corrente catódica devido a redução do hidrogênio, o segundo termo refere-se a densidade de corrente de troca do eletrodo reversível do hidrogênio e o terceiro termo refere-se ao efeito de polarização catódica provocado pela reação de redução do hidrogênio.

A redução catódica do oxigênio pode ser dividida em duas etapas: A primeira etapa refere-se a região de controle ativado e a segunda etapa refere-se a região controlada pela transferência de massa.

A equação envolvendo a corrente teórica relacionada com a redução catódica do oxigênio, sob controle ativacional, pode ser descrita como segue:

$$I_A^{O_2} = I_c^{O_2} = I_c^{0, O_2} \cdot e^{2,3 \eta_{off} / \beta_{off}} \quad [25]$$

onde o primeiro termo refere-se a corrente catódica devido a redução do oxigênio sob controle ativacional, o segundo termo refere-se a densidade de corrente de troca do eletrodo reversível do oxigênio e o terceiro termo refere-se ao efeito de polarização catódica provocado pela reação de redução do oxigênio.

A equação envolvendo a corrente teórica relacionada com a redução catódica do oxigênio, na região controlada pela transferência de massa, pode ser descrita como segue:

$$I_m^{O_2} = I_L^{O_2} - I_a^0 \cdot e^{-2,3 \eta_a / \beta_a} \quad [26]$$

onde o primeiro termo refere-se a corrente catódica devido a redução do oxigênio na região controlada pela transferência de massa, o segundo termo refere-se a corrente limite do oxigênio e o terceiro termo refere-se ao efeito de polarização anódica provocado pela reação de oxidação do ferro.

A corrente total para todas reações envolvendo o elemento de corrosão de uma estrutura enterrada no solo pode ser representada pelo somatório das correntes de cada reação individual. Assim, tomando-se as equações 25 e 26, temos que:

$$I = I_c^{H_2} + I_A^{O_2} + I_m^{O_2} - I_a \quad [27]$$

Com base nas mesmas equações 25 e 26 podemos reescrever a equação 27, conforme segue:

$$I = I_c^{H_2} + I_L^{O_2} + I_c^{O_2} - I_a \quad [28]$$

Aplicando-se transformações matemáticas sucessivas, obtém-se a equação genérica da corrente de corrosão total de uma estrutura enterrada no solo, conforme segue:

$$I = e^{2,3(E - E_{Corr}) / \beta_{H_2}} + \frac{(E - E_{Corr})}{b_{OFF} (1 - e^{-2,3 \eta_a / \beta_a})} + e^{(2,3(E - E_{Corr}) + 2,3 \eta_m) / \beta_{OFF}} - e^{-2,3(E - E_{Corr}) / \beta_a} \quad [29]$$

onde o primeiro termo refere-se a corrente total do sistema, o segundo termo refere-se corrente catódica da redução do hidrogênio, o terceiro termo refere-se a corrente catódica de redução do oxigênio na região controlada por transferência de massa, o quarto termo refere-se a corrente catódica de redução do oxigênio sob controle ativacional e o quinto termo refere-se a corrente anódica da oxidação do ferro.

A corrente total do sistema, pode ser calculada teoricamente para um determinado potencial, de acordo com a equação matemática acima. Para este cálculo, usou-se um potencial aleatório de  $E = -680\text{mV}$  em relação ao eletrodo de cobre/sulfato de cobre saturado, para a torre 7 da LT 500kV Chocon-Ezeiza. As correntes referentes a reações individuais foram calculadas, conforme segue:

a) Cálculo da corrente catódica da redução do hidrogênio, a partir do  $E_{\text{corr}} = -677\text{mV}$ , inclinação de Tafel do hidrogênio de  $120\text{mV/dec}$  e potencial aplicado de  $E = -680\text{mV}$ .

Então, com base na equação 24, tem-se que:

$$I_c^{H_2} = I_c^{0, H_2} \cdot e^{2,3 \eta_{H_2} / \beta_{H_2}}$$

como,

$$I_c^{0, H_2} \ll I_{\text{Corr}}$$

então,

$$I_c^{H_2} = e^{2,3 \eta_{H_2} / \beta_{H_2}}$$

Aplicando-se então a equação 8, a corrente catódica da redução do hidrogênio, resulta em:

$$I_c^{H_2} = e^{2,3 (E - E_{\text{Corr}}) / \beta_{H_2}} \quad [30]$$

Considerando-se o resultado da equação 30 e aplicando-se os valores de  $E_{\text{corr}} = -677\text{ mV}$ ,  $\beta_{H_2} = 120\text{ mV/dec}$  e  $E = -680\text{ mV}$ , temos que:

$$I_c^{H_2} = e^{2,3 (-680 - (-677))/120}$$

$$I_c^{H_2} = e^{-6,9/120}$$

$$I_c^{H_2} = 0,94\text{ mA}$$

b) Cálculo da corrente catódica da redução do oxigênio na região controlada pela transferência de massa, a partir do  $E_{\text{corr}} = -677\text{mV}$ , inclinação da curva de polarização catódica do potencial em função da corrente ( $b_{\text{off}}$ ) cujo valor é de  $-2,24\text{mV/mA}$  (vide

figura 13), potencial aplicado de  $E = -680\text{mV}$ , sobrepotencial anódico ( $\eta_a$ ) do ferro próximo de  $170\text{mV}$ , inclinação de Tafel da oxidação do ferro de  $60\text{mV/dec}$ ).

Considerando-se a equação 26, temos que:

$$I_m^{O_2} = I_L^{O_2} - I_a^0 \cdot e^{-2,3 \eta_a / \beta_a}$$

como,

$$I_a^0 \ll I_{\text{Corr}} \quad \text{e} \quad I_L^{O_2} = I_{\text{Corr}}$$

podemos reescrever a equação 3.2.7 conforme segue:

$$I_m^{O_2} = I_L^{O_2} - I_L^{O_2} \cdot e^{-2,3 \eta_a / \beta_a}$$

Aplicando-se transformações matemáticas sucessivas, obtemos como resultado a seguinte expressão:

$$I_m^{O_2} = I_L^{O_2} (1 - e^{-2,3 \eta_a / \beta_a})$$

$$I_L^{O_2} = \frac{I_m^{O_2}}{(1 - e^{-2,3 \eta_a / \beta_a})}$$

$$I_L^{O_2} = \frac{E - E_{\text{Corr}}}{b_{\text{OFF}} (1 - e^{-2,3 \eta_a / \beta_a})} \quad [31]$$

Considerando os valores de  $E_{\text{corr}} = -677\text{ mV}$ ,  $\beta_a = 60\text{ mV/dec}$ ,  $\eta_a = 170\text{ mV}$ ,  $b_{\text{off}} = -2,24\text{ mV/mA}$  (Vide Figura 13) e  $E = -680\text{ mV}$  e aplicando estes valores na equação 31, temos que:

$$I_L^{O_2} = \frac{(-680 - (-677))}{2,24(1 - e^{-2,3 \cdot 170 / 60})}$$

$$I_L^{O_2} = 1,35 \text{ mA}$$

c) Cálculo da corrente catódica da redução do oxigênio sob controle ativacional, a partir do  $E_{\text{corr}} = -677\text{mV}$ , inclinação da curva tipo Tafel da redução catódica do oxigênio cujo valor é de  $68\text{mV/dec}$ , potencial aplicado de  $E = -680\text{mV}$ , sobrepotencial devido a transferência de massa cujo valor é de  $42,45\text{mV}$ .

Considerando-se a equação 25, temos que:

$$I_A^{O_2} = I_c^{O_2} = I_c^{0, O_2} \cdot e^{2,3 \eta_{\text{off}} / \beta_{\text{off}}}$$

como,

$$I_c^{0, O_2} \ll I_{\text{Corr}}$$

então,

$$I_c^{O_2} = e^{2,3 \eta_{\text{OFF}} / \beta_{\text{OFF}}}$$

porém,

$$\eta_{\text{OFF}} = \eta_a + \eta_m \quad [32]$$

logo,

$$I_c^{O_2} = e^{2,3 (\eta_a + \eta_m) / \beta_{\text{OFF}}}$$

Considerando também a equação 8, temos como resultado para a corrente catódica da redução do oxigênio sob controle ativacional, a seguinte equação:

$$I_c^{O_2} = e^{(2,3 (E - E_{\text{Corr}}) + 2,3 \eta_m) / \beta_{\text{OFF}}} \quad [33]$$

Aplicando-se os valores de  $E_{\text{corr}} = -677 \text{ mV}$ ,  $\beta_{\text{off}} = 68 \text{ mV/dec}$ ,  $E = -680 \text{ mV}$  e  $\eta_m = 42,54 \text{ mV}$ , no resultado da equação 33, temos que:

$$I_c^{O_2} = e^{(2,3 (-680 - (-677)) + 2,3 \cdot 42,54) / 68}$$

$$I_c^{O_2} = 3,8 \text{ mA}$$

d) Cálculo da corrente anódica da oxidação do ferro, a partir do  $E_{\text{corr}} = -677 \text{ mV}$ , inclinação da curva tipo Tafel da oxidação do ferro cujo valor é de  $60 \text{ mV/dec}$  e o potencial aplicado é de  $E = -680 \text{ mV}$ .

Considerando-se a equação 23, temos que:

$$I_a = I_a^0 \cdot e^{-2,3 \eta_a / \beta_a}$$

como,

$$I_a \ll I_{\text{Corr}}$$

então,

$$I_a = e^{-2,3 \eta_a / \beta_a}$$

Considerando também a equação 8, a equação para o cálculo da corrente anódica da oxidação do ferro, resulta em:

$$I_a = e^{-2,3 (E - E_{\text{Corr}}) / \beta_a} \quad [34]$$

Aplicando-se os valores de  $E_{\text{corr}} = -677 \text{ mV}$ ,  $\beta_a = 60 \text{ mV/dec}$  e  $E = -680 \text{ mV}$  na equação 34, temos que:

$$I_a = e^{-2,3 (-680 - (-677)) / 60}$$

$$I_a = 1,12 \text{ mA}$$

e) Cálculo da corrente total a partir do somatório das correntes parciais referentes às reações individuais.

Com base nas equações 28 e 29, temos que:

$$I = I_c^{H_2} + I_L^{O_2} + I_c^{O_2} - I_a$$

$$I = e^{2,3(E - E_{Corr}) / \beta_{H_2}} + \frac{(E - E_{Corr})}{b_{OFF} (1 - e^{-2,3\eta_a / \beta_a})} + e^{(2,3(E - E_{Corr}) + 2,3\eta_m / \beta_{OFF})} - e^{-2,3(E - E_{Corr}) / \beta_a}$$

p/ E = - 680 mV, temos que:

$$I = e^{2,3(-680 - (-677)) / 120} + \frac{(-680 - (-677))}{-2,24(1 - e^{-2,3 \cdot 170 / 60})} + e^{(2,3(-680 - (-677)) + 2,3 \cdot 42,54) / 68} - e^{-2,3(-680 - (-677)) / 60}$$

$$I = e^{-0,06} + \frac{(-3)}{-2,24(1 - e^{-6,52})} + e^{1,34} - e^{0,115}$$

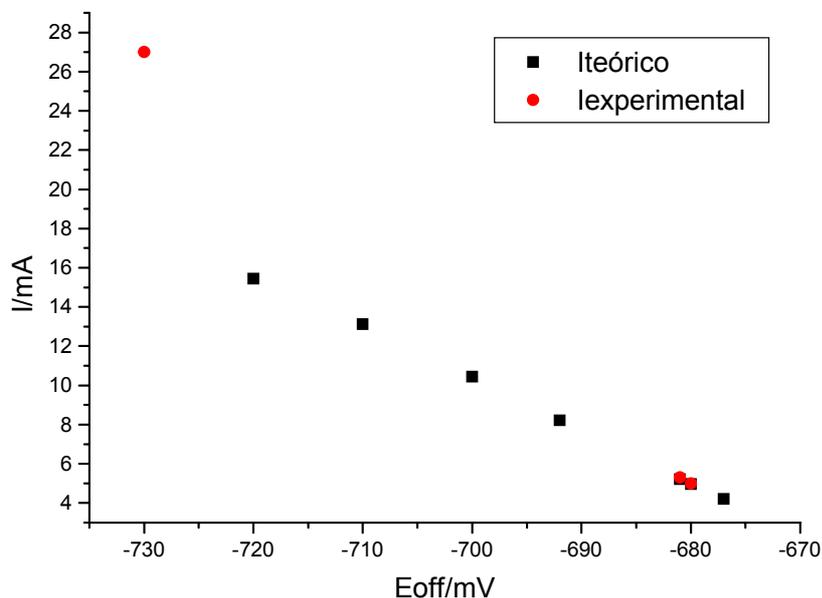
$$I = 4,98 \text{ mA}$$

A partir de cálculos similares aos comentados acima, porém para outros potenciais, construiu-se a tabela 11.

**Tabela 11 – Curva teórica de potencial e corrente calculados a partir do modelo teórico**

CURVA TEÓRICA DE POTENCIAL E CORRENTE CALCULADOS								
E (mV)	$b_{OFF}$ (mV/mA)	$E_{CORR}$ (mV)	$\beta_{H_2}$ (mV/dec)	$\eta_m$ (mV)	$\beta_{OFF}$ (mV/dec)	I (mA)	E (mV)	Iteórica (mA)
-677,0	-2,24	-677,0	120,0	42,45	68,0	4,20	-677,0	4,20
-680,0	-2,24	-677,0	120,0	42,45	68,0	4,96	-680,0	4,96
-681,0	-2,24	-677,0	120,0	42,45	68,0	5,22	-681,0	5,22
-692,0	-2,24	-677,0	120,0	42,45	68,0	8,21	-692,0	8,21
-700,0	-2,24	-677,0	120,0	42,45	68,0	10,44	-700,0	10,44
-710,0	-2,24	-677,0	120,0	42,45	68,0	13,12	-710,0	13,12
-720,0	-2,24	-677,0	120,0	42,45	68,0	15,45	-720,0	15,45

A partir da tabela 11, construiu-se a figura 19, conforme segue:



**Figura 19 – Curva de polarização catódica a partir do modelo teórico e a partir de resultados experimentais.**

Pela figura 19, observa-se uma perfeita concordância entre os resultados teóricos e os resultados experimentais para uma região de até 50mV mais catódica que o potencial de corrosão, confirmando a possibilidade de aplicar o modelo teórico do elemento de corrosão quando o meio corrosivo é o solo.

## CAPITULO 4

### CONCLUSÕES

Dos resultados obtidos foi constatado que a construção da curva de polarização, ora com baterias, ora com potenciostato apresentam curvas similares.

O elemento de corrosão de um pé de torre no solo pode ser representado por uma curva de oxidação do aço, por uma curva de redução do hidrogênio e por uma curva de redução do oxigênio, constituída de duas regiões: uma sob controle ativacional e outra região controlada pela transferência de massa.

A técnica de decaimento dos 100mV foi aplicada com êxito na obtenção do potencial “off” e como consequência foi aplicada com êxito na obtenção da corrente de corrosão existente, mesmo quando a torre está sob proteção catódica devidamente concordando com os critérios mencionados na RP 0169/92 da NACE.

O potencial de corrosão pode ser usado para um diagnóstico do aspecto corrosivo de um pé de torre. No entanto, somente ele não é suficiente para saber a intensidade corrosiva de uma torre. A intensidade corrosiva de uma torre é obtida através do potencial de corrosão e da corrente necessária para a torre estar totalmente protegida. Estes parâmetros atuam de forma conjunta e por este motivo a intensidade corrosiva do pé de torre em solo não deve ser avaliada com base em um dos parâmetros de forma isolada.

A correntes necessárias para que uma torre esteja completamente protegidas é sempre menor quando a técnica utilizada é uma curva de polarização e não a equação estabelecida pela literatura, onde leva em conta apenas o parâmetro resistividade do solo.

Nesta dissertação fica clara a possibilidade de se obter a taxa de corrosão através de medidas eletroquímicas, ora com a torre sem proteção catódica, ora com a torre com proteção catódica.

A metodologia desenvolvida nesta dissertação está perfeitamente comprovada a partir de um modelo teórico discutido através de cálculos das equações (item 3.3.2).

## TRABALHOS FUTUROS

Já existe no mercado de softwares, um aplicativo denominado de Intel Fortran Compiler 8.0 for Windows, licença de uso ‘single user’, versões “standard” e “professional”, com o qual é possível simular o estado de corrosão de uma torre de linha de transmissão injetando apenas algumas medidas de campo. Este programa utiliza simulações matemáticas baseadas no BME – Boundary Methodos Elements ( Método dos Elementos de Contorno Bi e Tridimensionais). Com este simulador poderão ser desenvolvidos trabalhos mais acurados sobre corrosão em pés de torres de linhas de transmissão, permitindo avaliações mais rápidas, eficazes e econômicas.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

BARD, A.J. & FAULKNER, L.R. – **Electrochemical Methods – Fundamentals and Applications** – John Wiley & Sons Inc: (1980).

BARLO T. J. – Field Testing the criteria for cathodic protection, American Gas Association Pipelines Research Committee, Project PR 151-163 Interim Report, Dec. 1987, IN: GUMMOW R. A. - **Cathodic Protection Potential Criterion for Underground Steel Structures – MP**, November 1993, p.21.

BARLO T. J. AND BERRY W. E. – MP 9 (1984) p.12, IN: GUMMOW R. A. - **Cathodic Protection Potential Criterion for Underground Steel Structures – MP**, November 1993, p.21.

DAVIS J.A. AND KELLNER J. D. – Electrochemical Principles Applied to Operating Pipelines – Corrosion/89 paper n<sup>o</sup> 412 (HOUSTON, TX: NACE, 1989), IN: GUMMOW R. A. - **Cathodic Protection Potential Criterion for Underground Steel Structures – MP**, November 1993, p.21.

DIN – Deutsches Institut für Normung e. V. – **Design and Application of Cathodic Protection of External Surfaces**, 30676, 3.ed., Berlin – Germany, October 1985, p. 12-22.

EVANS U. R. – The corrosion and oxidation of metals (Edward Arnold publishers Ltda) (1960) p.284, IN: GUMMOW R. A. - **Cathodic Protection Potential Criterion for Underground Steel Structures – MP**, November 1993, p.21.

EWING S. P. – Corrosion 7, 11 (1951) p.410, IN: GUMMOW R. A. - **Cathodic Protection Potential Criterion for Underground Steel Structures – MP**, November 1993, p.21.

HOLLER H. D. – J. Electrochem. Soc. 97, 9, IN: GUMMOW R. A. - **Cathodic Protection Potential Criterion for Underground Steel Structures – MP**, November 1993, p.21.

MAREK, M.I. – **Fundamentals of Corrosion** – Introduction – ASM HANDBOOK – 4<sup>a</sup> impressão: Corrosion, volume 13(1992).

MEARS R. B. AND BROWN R. G. – Trans. Electrochem. Soc. 74 (1938) p.527, IN: GUMMOW R. A. - **Cathodic Protection Potential Criterion for Underground Steel Structures – MP**, November 1993, p.21.

Mohammad Golam Ali and Rasheeduzzafar - **Polarization Period, Current Density, and the Cathodic Protection Criteria** – ACI Materials Journal, may-june, 1992, p.247-251.

NACE – International the Corrosion Society – **Electrical and Electrochemical Methods for Determining Corrosion Rates**, 3D170, Houston, TX, September 1984, p.2-8.

NACE – International the Corrosion Society – **Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems**, RPO169, 1.ed., Houston, TX, June 1983.

NACE – International the Corrosion Society – **Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems**, RPO169, 2.ed., Houston, TX, April 1992.

NACE – International the Corrosion Society – **Standard Recommended Practice On-Line Monitoring of Cooling Waters**, STD RP0189, 1.ed., Houston, TX, January 1991.

PETERSON M. H. – Corrosion 15, 9 (1959) p.485, IN: GUMMOW R. A. - **Cathodic Protection Potential Criterion for Underground Steel Structures – MP**, November 1993, p.21.

POURBAIX M. – Corrosion 5, 4 (1949) p.125, IN: GUMMOW R. A. – **Cathodic Protection Potential Criterion for Underground Steel Structures – MP**, November 1993, p.21.

RANDLES J. E. B. – Disc. Faraday Society 1 (1947) p.11, IN: GUMMOW R. A. - **Cathodic Protection Potential Criterion for Underground Steel Structures – MP**, November 1993, p.21.

RECOMENDAÇÃO SCM –104 – **Técnica de Medição do Potencial de Corrosão em Estruturas Metálicas Enterradas**. Setor Elétrico Brasileiro – Grupo Coordenador de Operações Interligadas – Sub-Comitê de Manutenção – Comissão de Físico–Química – Grupo de Corrosão, 1994.

SCHWERDTFEGER W.J. AND McDORMAN O. N. – JRNBS 47, 2 (1951) p.105, IN: GUMMOW R. A. - **Cathodic Protection Potential Criterion for Underground Steel Structures** – MP, November 1993, p.21.

STERN, M. E GEARY, A.L. – **A Theoretica Analysis of the Shape of Polarization Curves** – Journal of Electrochemical Society – Volume 104, número 1 (1957).

SUDRABIN L. P. – Corrosion 12, 2 (1956) p.16, IN: GUMMOW R. A. - **Cathodic Protection Potential Criterion for Underground Steel Structures** – MP, November 1993, p.21.

SUDRABIN L. P. – Corrosion 13, 5 (1957) p.87, IN: GUMMOW R. A. - **Cathodic Protection Potential Criterion for Underground Steel Structures** – MP, November 1993, p.21.

SUDRABIN L.P. – Corrosion 10, 8 (1954) p.232, IN: GUMMOW R. A. - **Cathodic Protection Potential Criterion for Underground Steel Structures** – MP, November 1993, p.21.

UHLIG H. H. – Corrosion & Corrosion Control, 2<sup>nd</sup> Ed. (New York, NY: John Wiley & Sons, 1971) p.224, IN: GUMMOW R. A. - **Cathodic Protection Potential Criterion for Underground Steel Structures – MP**, November 1993, p.21.

VETTER K.J. – **Electrochemical Kinetics** – Theoretical and Experimental Aspects – Academic Press Inc., 3.ed., New York, 1967, 640p.

W.Brian Holtsbaum – **Determinação da Queda Ôhmica do Solo próximo aos Estais**, Materials Performance, July 2000, p.26-30.

ZEHBOUR P. K. – **Estudo da Corrosão de Aços Carbono em Meio Ácido** – Tese de Doutorado, Instituto de Pesquisa Tecnológica de São Paulo – IPT, 1981.